



# Παράκτια Ωκεανογραφία

Διάλεξη 3η: Παράκτια Υδροδυναμική Κυκλοφορία

Γιάννης Ν. Κρεστενίτης  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



# Περιεχόμενα ενότητας

1. Παράκτια νερά, παράκτια υδροδυναμική κυκλοφορία – ρεύματα. Γενεσιουργά αίτια και επιμέρους κατηγοριοποιήσεις.
2. Όργανα μέτρησης θαλασσίων ρευμάτων.
3. Απεικόνιση θαλασσίων ρευμάτων.
4. Το μαθηματικό ομοίωμα της παράκτιας υδροδυναμικής κυκλοφορίας.



# Σκοποί ενότητας

- Η κατανόηση της θαλάσσιας υδροδυναμικής κυκλοφορίας. Τα αίτια δημιουργίας των θαλασσίων ρευμάτων. Συσχέτιση γενεσιουργού αίτιου και θαλασσίου ρεύματος, κατηγοριοποιήσεις θαλασσίων ρευμάτων.
- Όργανα και μέθοδοι μέτρησης των θαλασσίων ρευμάτων.
- Μέθοδοι απεικόνισης των θαλασσίων ρευμάτων
- Η διαμόρφωση του μαθηματικού ομοιώματος της παράκτιας υδροδυναμικής κυκλοφορίας. Παραδοχές, απλουστεύσεις, περιορισμοί.





# Φυσική Ωκεανογραφία:

(I) Περιγραφική Ωκεανογραφία = μετρήσεις και ανάλυση φυσικών παραμέτρων.

(II) **Δυναμική Ωκεανογραφία** = η μελέτη της συσχέτισης και των αντίστοιχων μαθηματικών σχέσεων, γενεσιουργού αιτίου και δημιουργούμενης θαλάσσιας υδροδυναμικής κυκλοφορίας.

# ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ (ρεύματα)

## ΤΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΝΕΡΑ

Αποτελούν το συνεχές μέσο με το οποίο μεταφέρονται και αναμιγνύονται τα φερτά υλικά που καταλήγουν στον παράκτιο θαλάσσιο χώρο ως αποτέλεσμα διαφόρων φαινομένων και επιδράσεων.

## Η ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

Υδροδυναμική κυκλοφορία των παράκτιων νερών ή **παράκτια κυκλοφορία**, χαρακτηρίζεται η λόγω διαφόρων αιτίων κίνηση του νερού στον παράκτιο θαλάσσιο χώρο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία διανυσματικού πεδίου ταχύτητας (μη μόνιμη γενικά κίνηση), τη μεταβολή της χωρικής κατανομής της θερμοκρασίας, της αλατότητας και της πυκνότητας και τη μεταβολή της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού.



# ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

## Γενεσιουργά αίτια

- ο άνεμος.
- οι αστρονομικές παλίρροιες.
- η χωρική και χρονική μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης.
- οι χωρικές και χρονικές μεταβολές της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας.
- οι οριζόντιες και κατακόρυφες διαφορές πυκνότητας του θαλάσσιου νερού.
- οι μακροί κυματισμοί που δημιουργούνται στους γειτονικούς ωκεανούς..





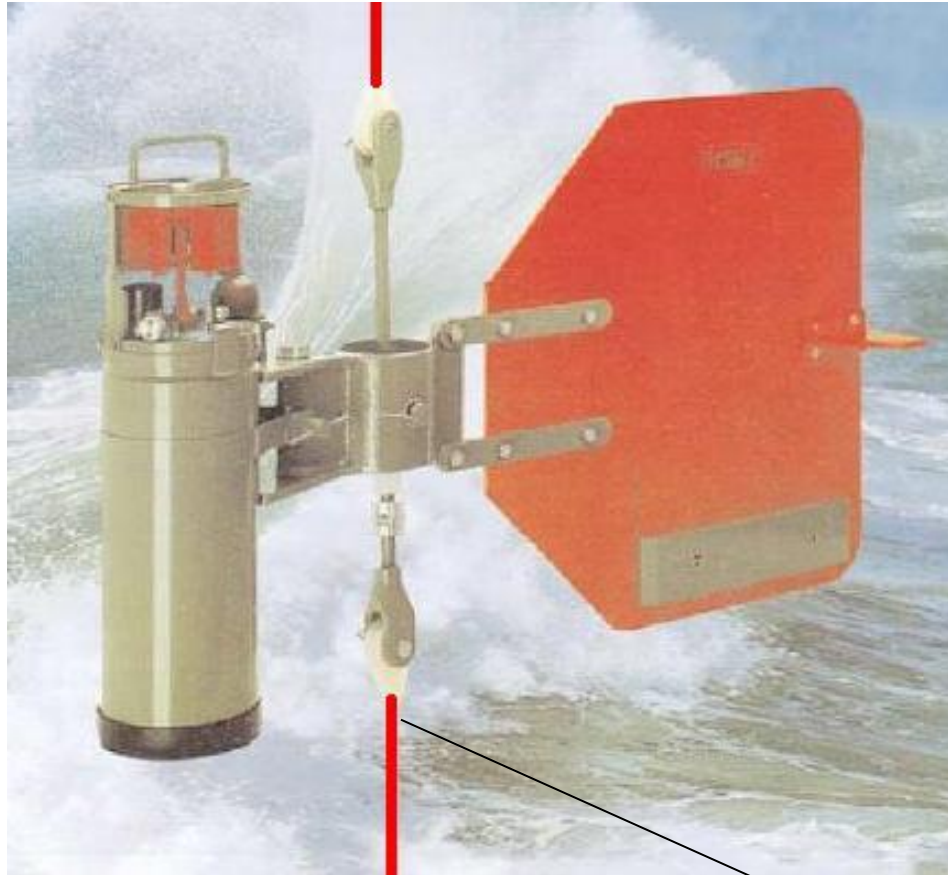
# ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

Περιλαμβάνει:

- τα παλιρροιακά ρεύματα.
- τα ανεμογενή ρεύματα.
- τα κυματογενή ρεύματα.
- τα ρεύματα πυκνότητας.
- τις αναδύσεις θαλάσσιων μαζών (upwelling).



# Ρευματογράφος



Ρευματογράφος  
RCM της εταιρίας  
AANDERAA –  
εξοπλισμός του  
Εργαστηρίου  
Θαλάσσιας Τεχνικής  
& Θαλασσιών  
Έργων, ΑΠΘ

αγκύρωση



# Συσκευές μέτρησης ρευμάτων-1

## ADCP

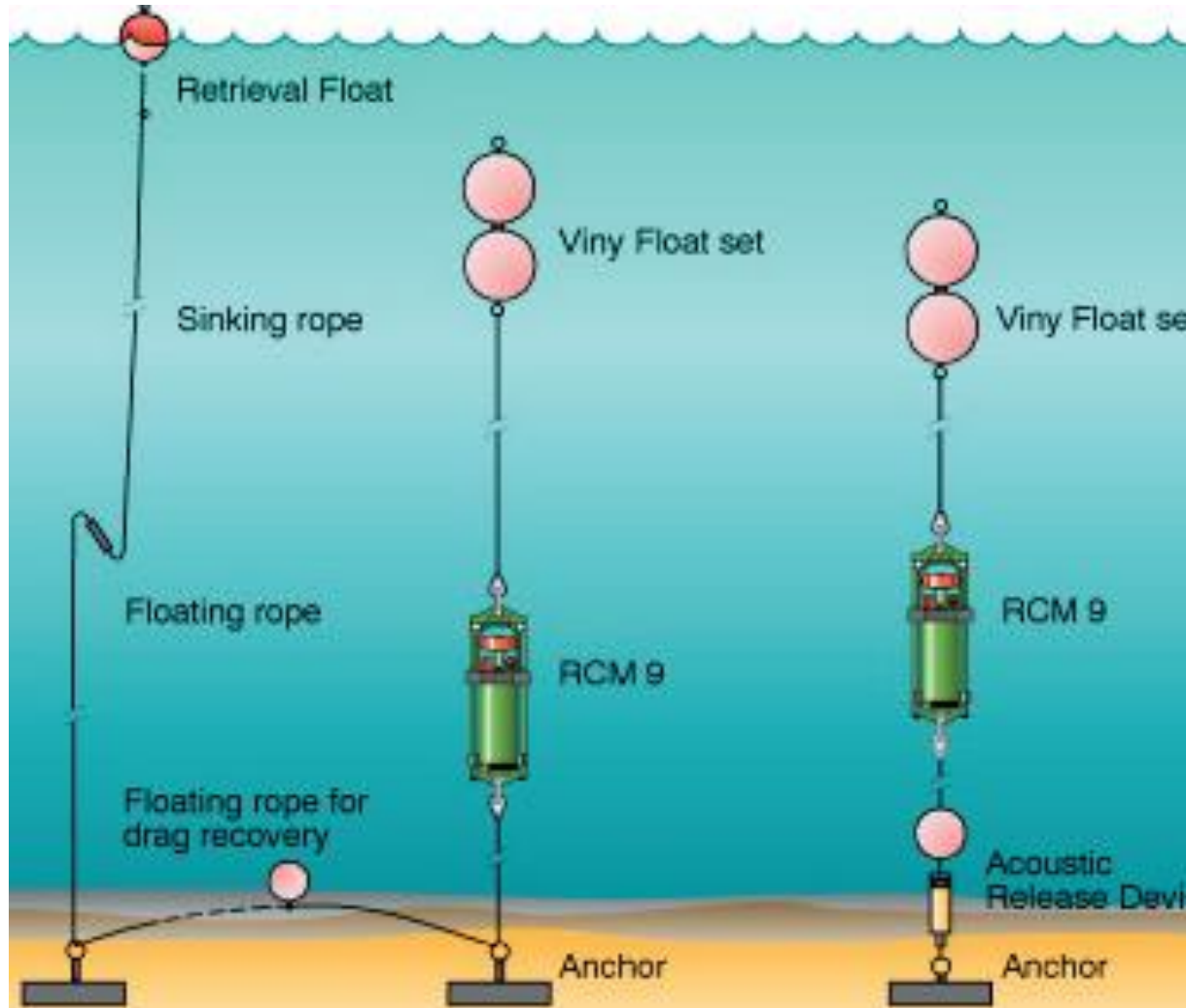


Ρευματογράφοι ADCP (αριστερά) της εταιρίας RDI και RCM (δεξιά) της εταιρίας AANDERAA – εξοπλισμός του Εργαστηρίου Θαλάσσιας Τεχνικής & Θαλασσίων Έργων, ΑΠΘ

## RCM

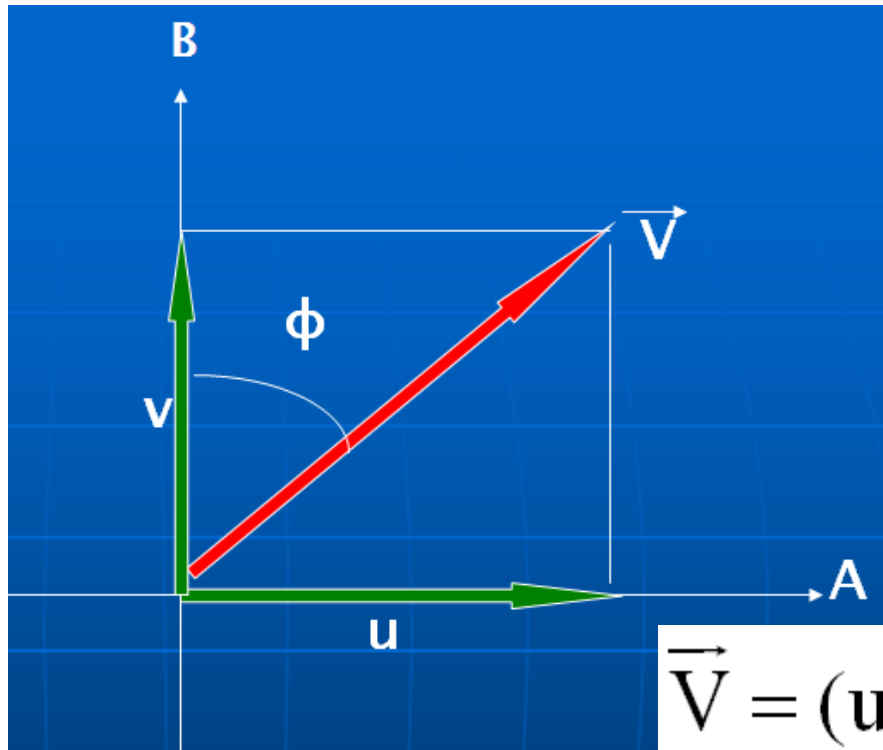


# Μέτρηση ρευμάτων



Διάταξη  
ρευματογράφων  
στο πεδίο

# Συνιστώσες ρεύματος



$$\vec{V} = (u, v)$$

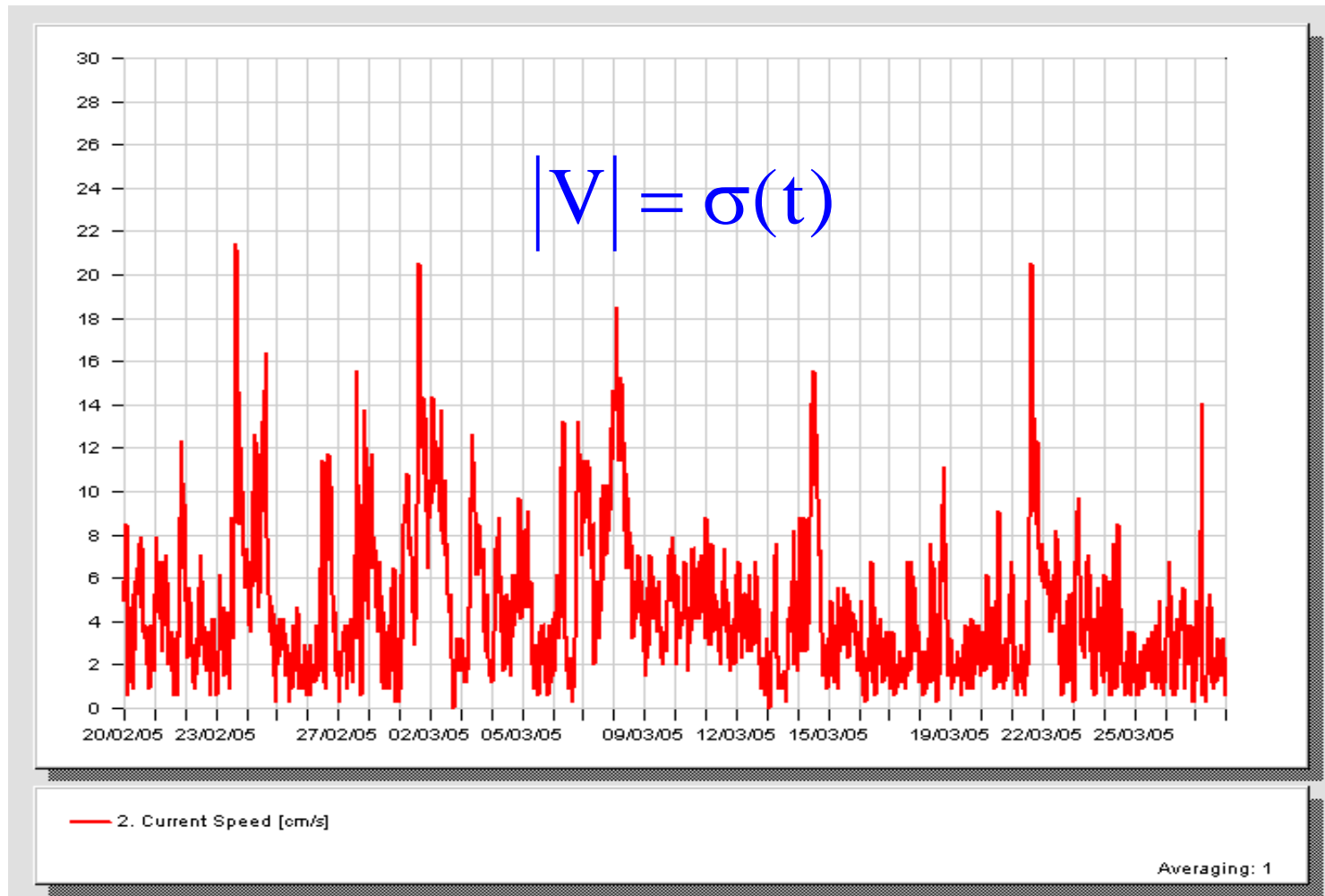
$$|\vec{V}| = \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$u = |\vec{V}| \cdot \sin(\phi)$$

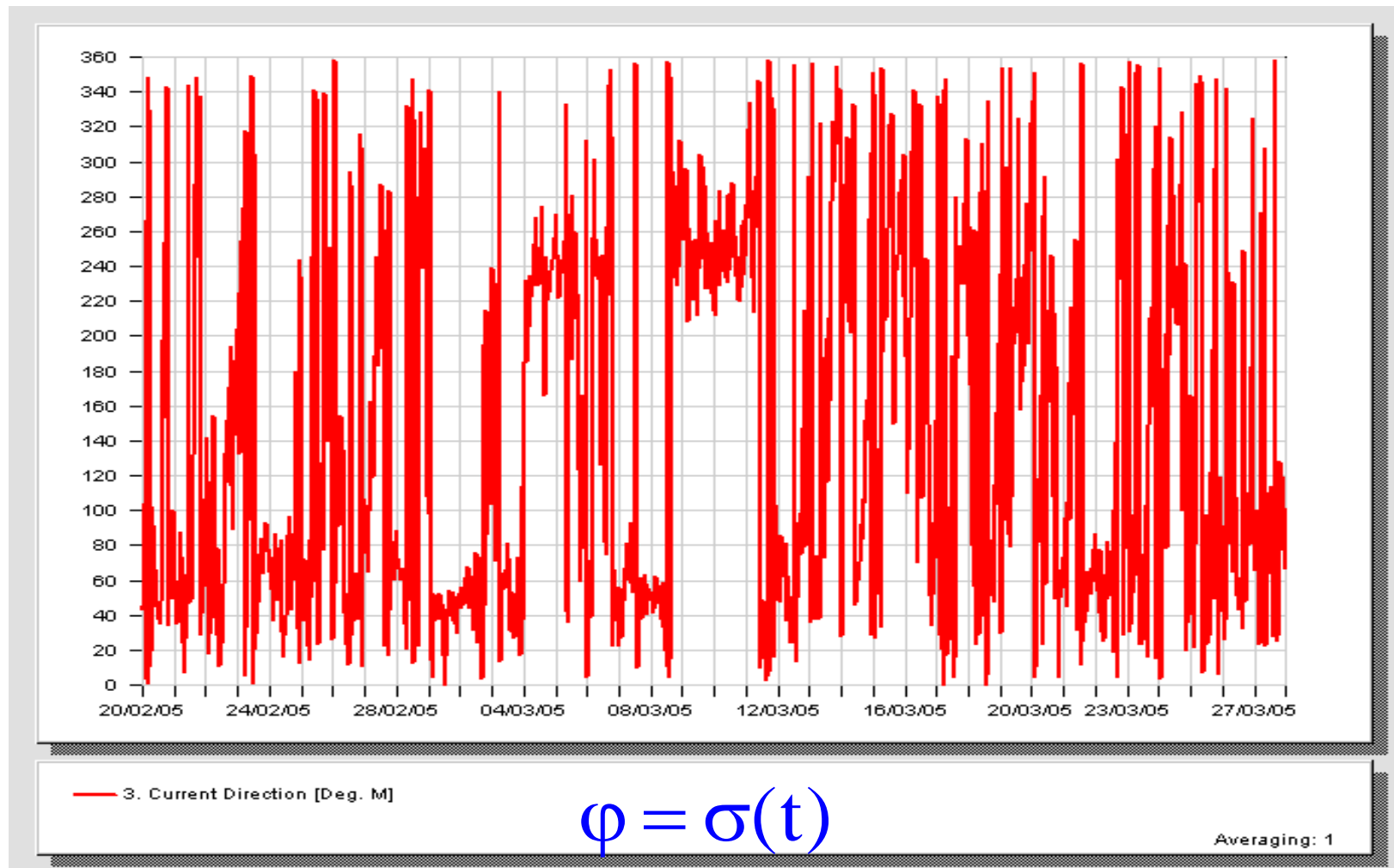
$$v = |\vec{V}| \cdot \cos(\phi)$$



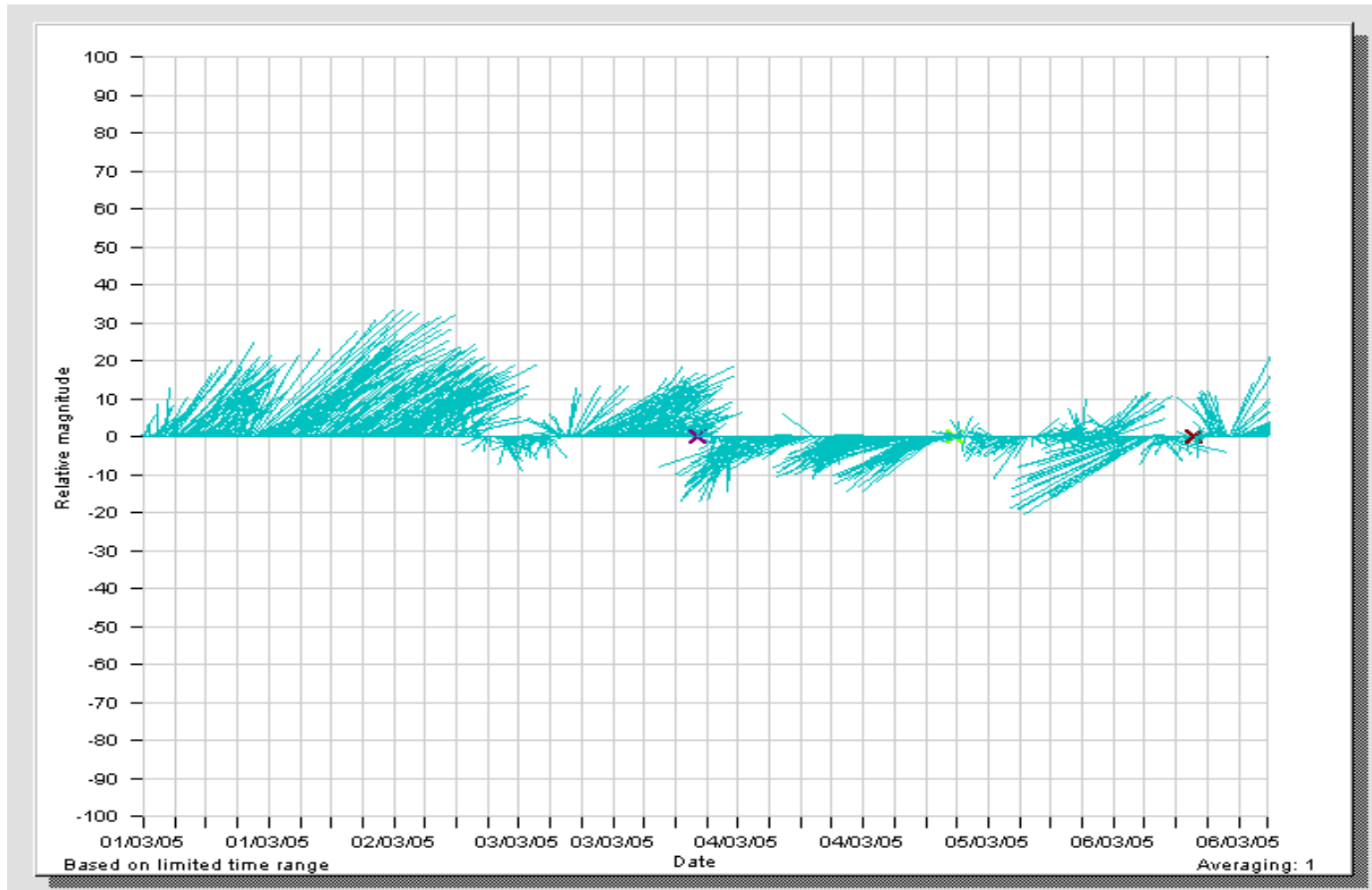
# Χρονοσειρά ταχύτητας ρεύματος



# Χρονοσειρά διεύθυνσης ρεύματος

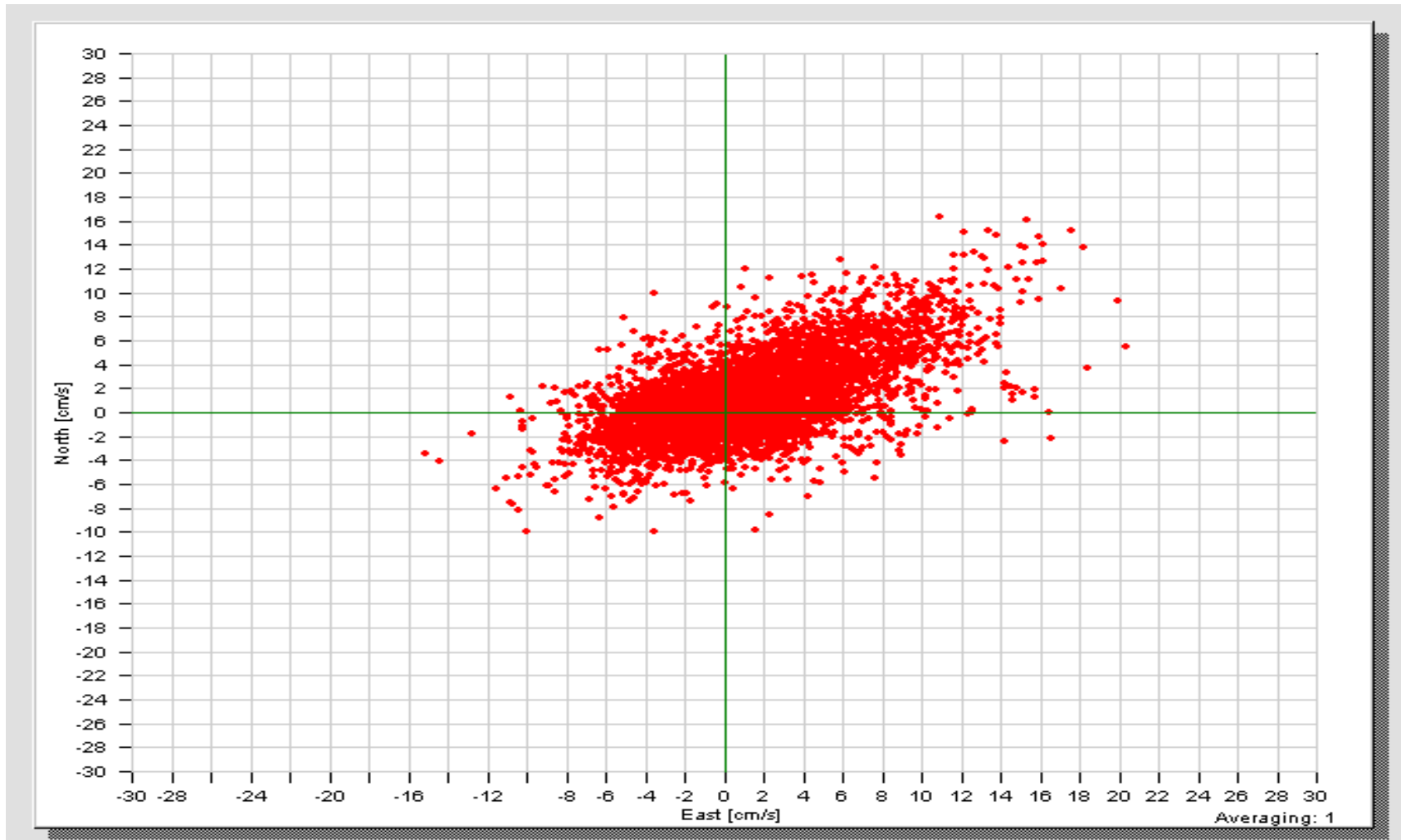


# Χρονοσειρά διανυσμάτων ρεύματος

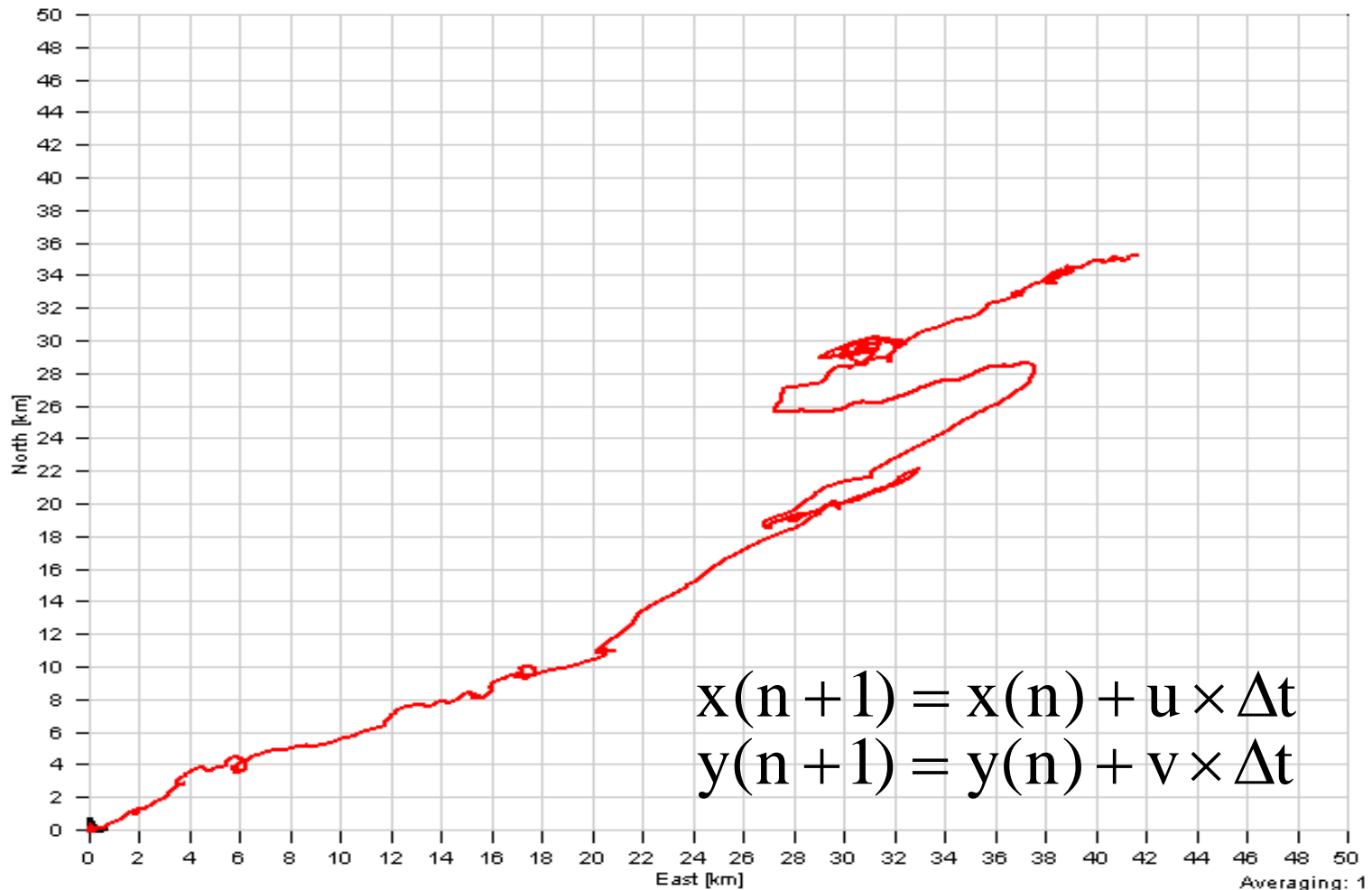




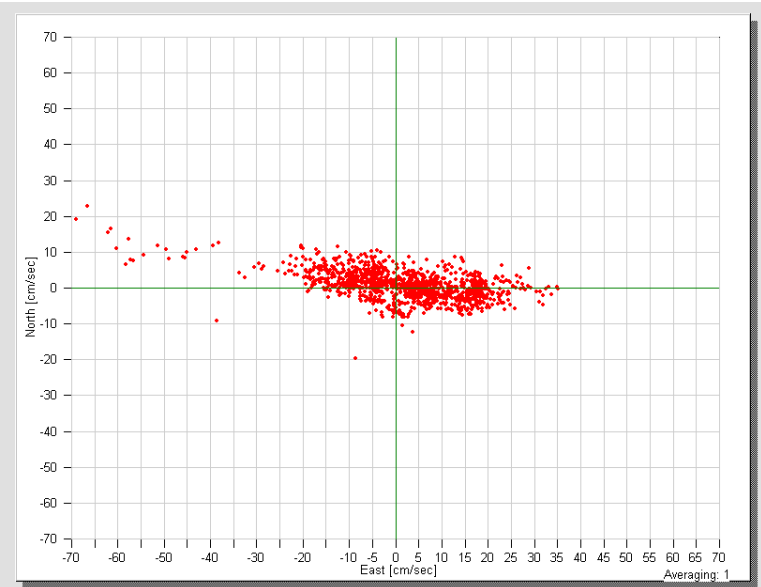
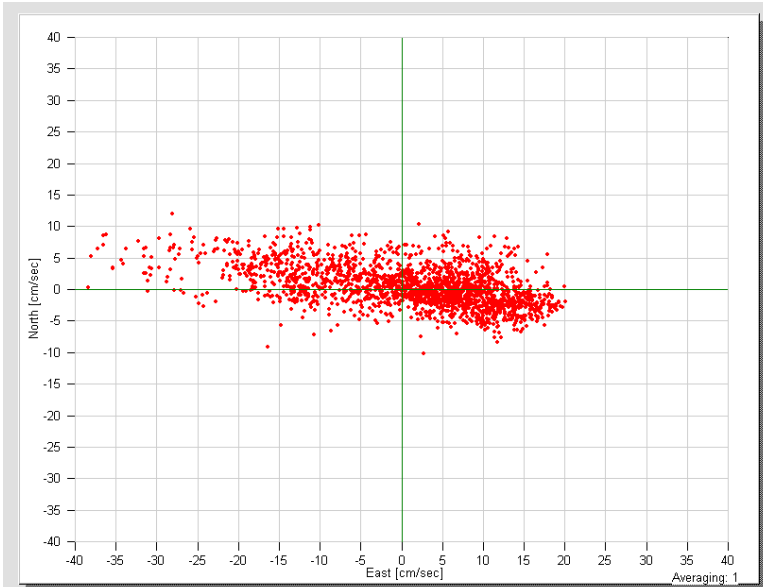
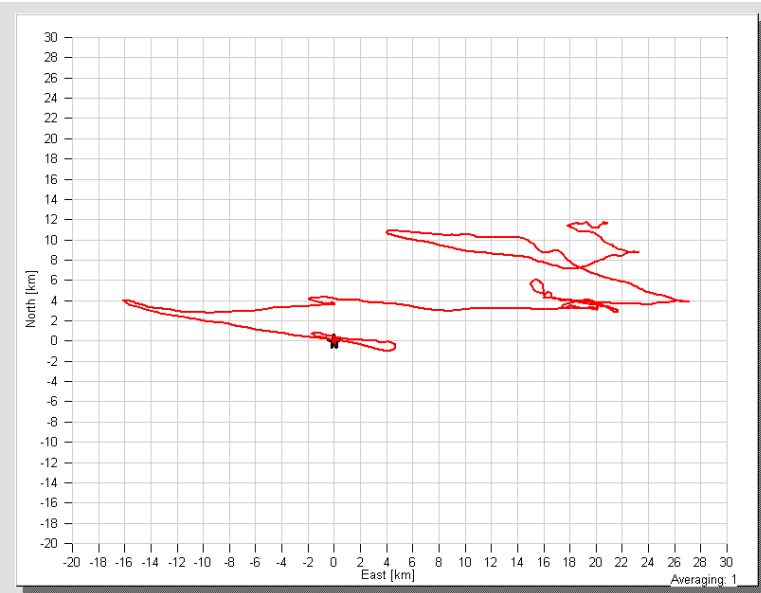
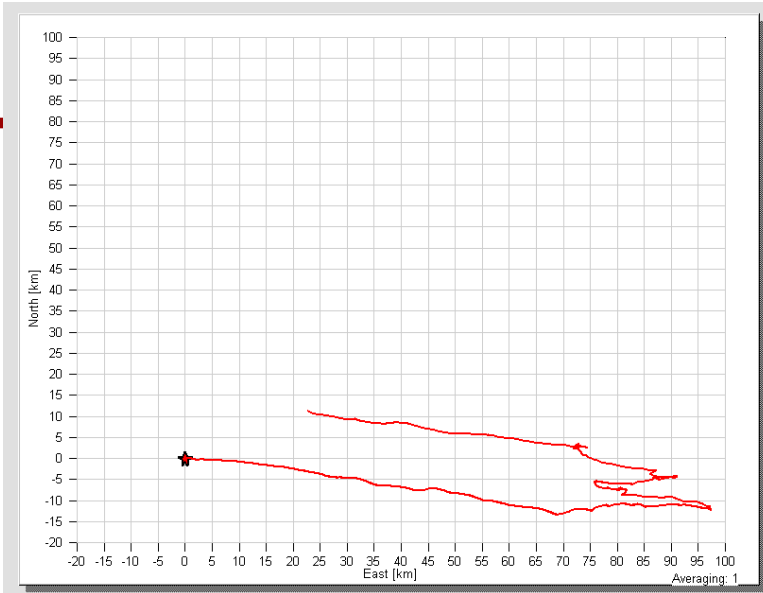
# Διάγραμμα διασποράς ρεύματος



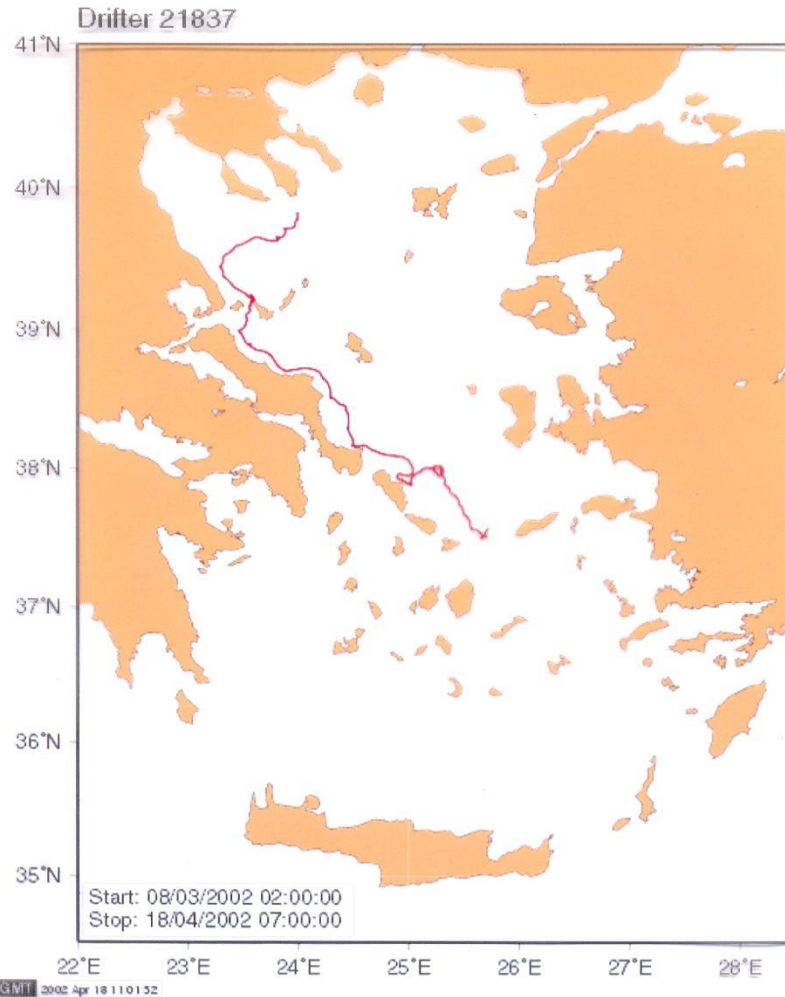
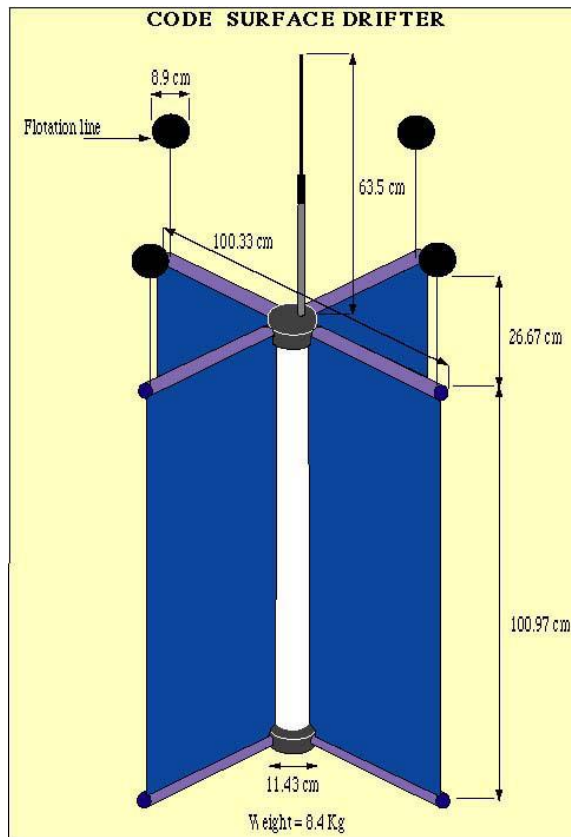
# Οδογράφος ρεύματος



# Οδογράφος ρεύματος



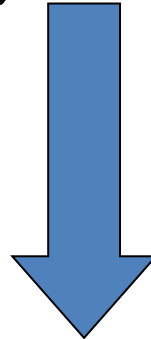
# Drifter



---

**Αλληλεπίδραση**

**Θάλασσας-Ατμόσφαιρας**



**Συζευγμένο Δυναμικό**



# Κλίμακα Beaufort

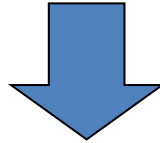
Beaufort Number	Descriptive term	m/s	Appearance of the Sea
0	Calm	0	Sea like a mirror.
1	Light Air	1.2	Ripples with appearance of scales; no foam <a href="#">crests</a> .
2	Light Breeze	2.8	Small wavelets; crests of glassy appearance, not breaking.
3	Gentle breeze	4.9	Large wavelets; crests begin to break; scattered whitecaps.
4	Moderate breeze	7.7	Small waves, becoming longer; numerous whitecaps.
5	Fresh breeze	10.5	Moderate waves, taking longer to form; many whitecaps; some spray.
6	Strong breeze	13.1	Large waves forming; whitecaps everywhere; more spray.
7	Near gale	15.8	Sea heaps up; white foam from breaking waves begins to be blown into streaks.
8	Gale	18.8	Moderately high waves of greater length; edges of crests begin to break into spindrift; foam is blown in well-marked streaks.
9	Strong gale	22.1	High waves; sea begins to roll; dense streaks of foam; spray may reduce visibility.
10	Storm	25.9	Very high waves with overhanging crests; sea takes white appearance as foam is blown in very dense streaks; rolling is heavy and visibility reduced.
11	Violent storm	30.2	Exceptionally high waves; sea covered with white foam patches; visibility still more reduced.
12	Hurricane	35.2	Air is filled with foam; sea completely white with driving spray; visibility greatly reduced.

From Kent and Taylor (1997)



# Τάση ανέμου

Στην Ωκεανογραφία σημασία δεν έχει τόσο ο άνεμος όσο το αποτέλεσμα του στην θάλασσα.



Η οριζόντια φόρτιση του ανέμου στην θάλασσα ονομάζεται τάση ανέμου, μέσω της οποίας μεταφέρεται ορμή από την ατμόσφαιρα στην θάλασσα.

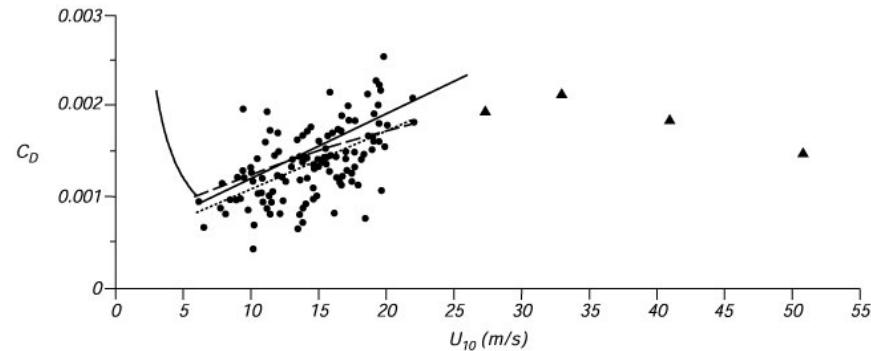
$$\tau = \rho C_D U_{10}^2$$

Όπου:

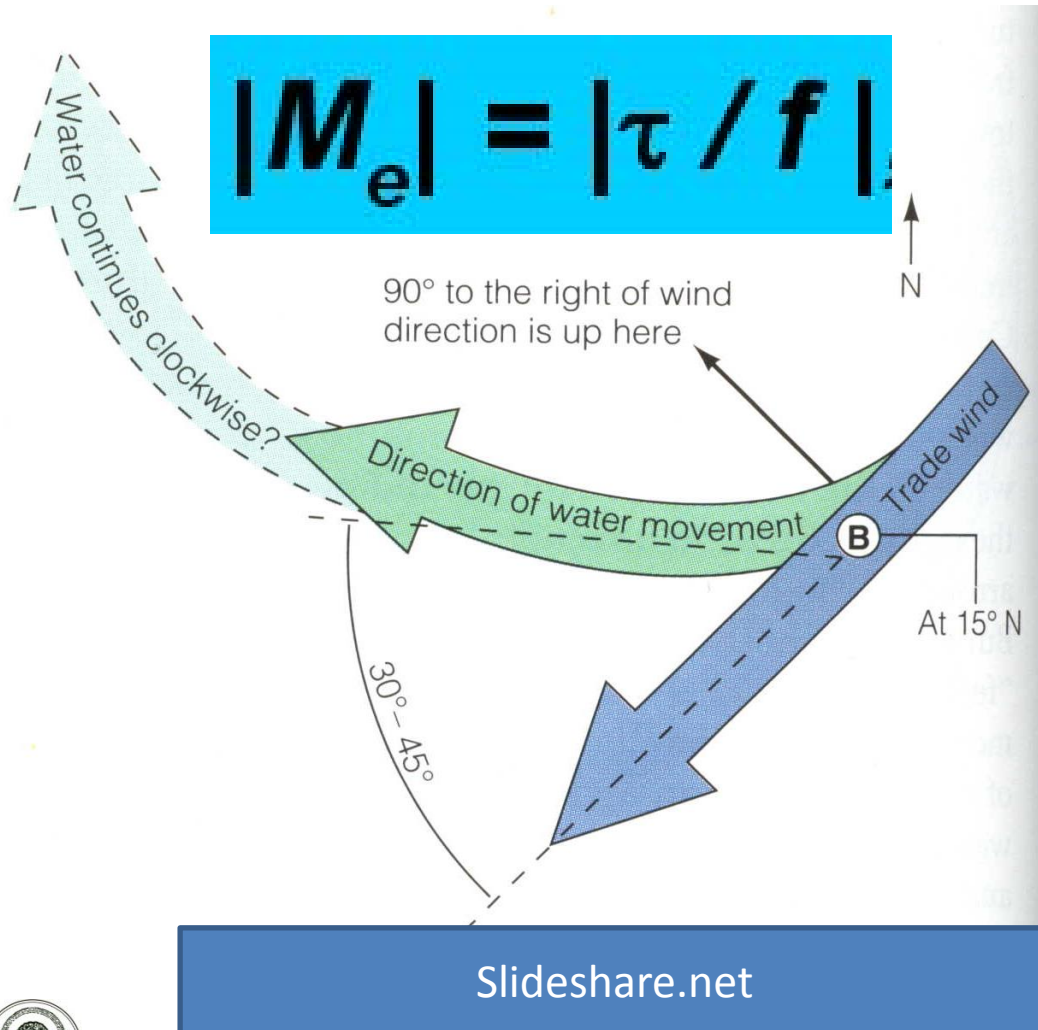
$\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$  πυκνότητα του αέρα

$U_{10}$  ταχύτητα του αέρα σε 10 μέτρα ύψος

$C_D$  συντελεστής σύρσεως



# Μεταφορά Ekman -1-



<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/181647/Walfrid-Ekman>

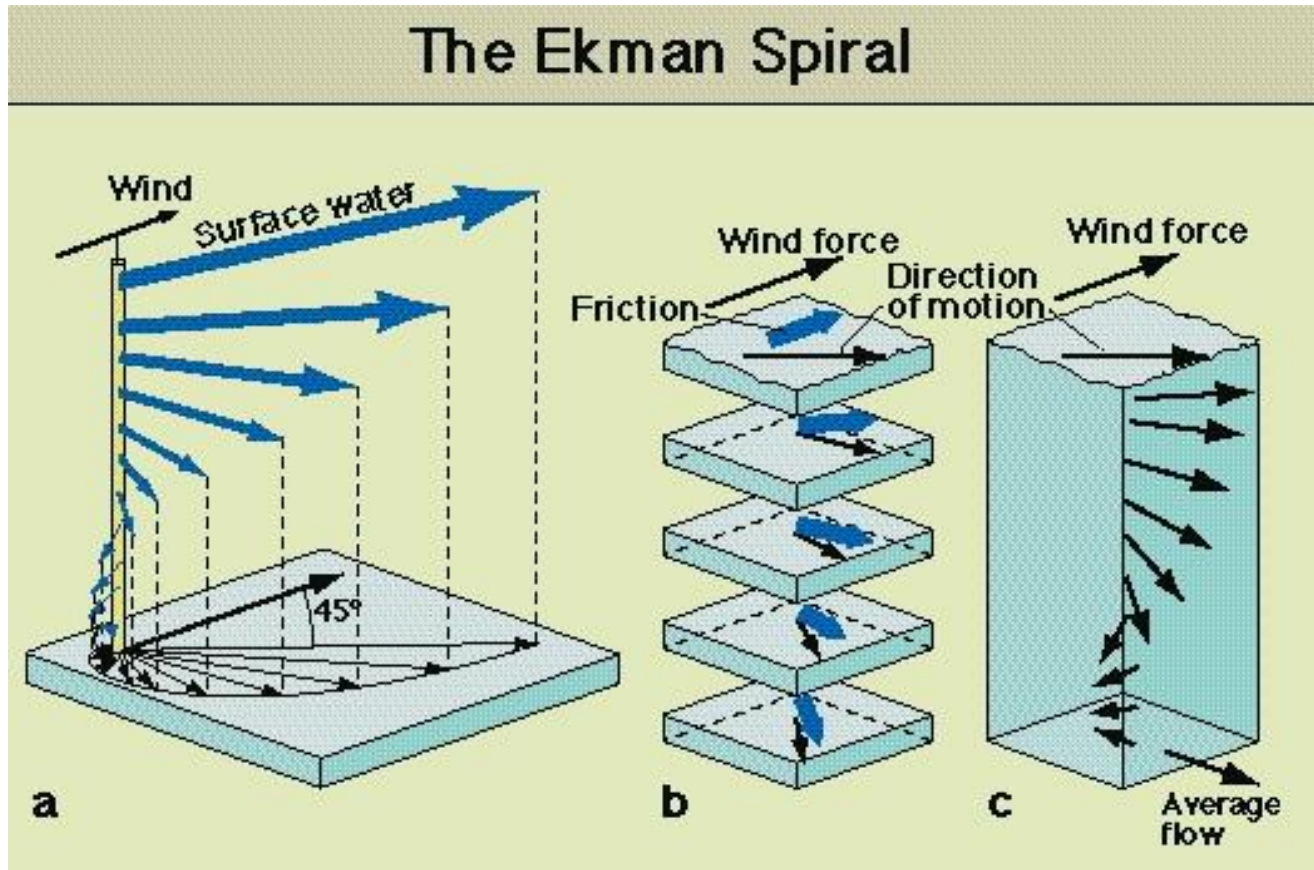
## Μεταφορά Ekman (1902)

$\tau$  = η διατμητική τάση ανέμου  
 $f$  = η παράμετρος Coriolis





# Μεταφορά Ekman -2-



Μέση (στο βάθος) μεταφορά κάθετη στην διεύθυνση του ανέμου

Slideshare.net



# Ρεύματα

2<sup>ος</sup> Νόμος Newton:

$$\gamma = \frac{DV}{Dt} = \frac{F}{m}$$

για σταθερή μάζα και με δεδομένο ότι οι σημαντικές δυνάμεις είναι: η πίεση, οι τριβές, η βαρύτητα και η δύναμις Coriolis

$$\frac{DV}{Dt} = \frac{F}{m} = f_m = -\frac{1}{\rho} \nabla p - 2\Omega \times V + g + F_r$$

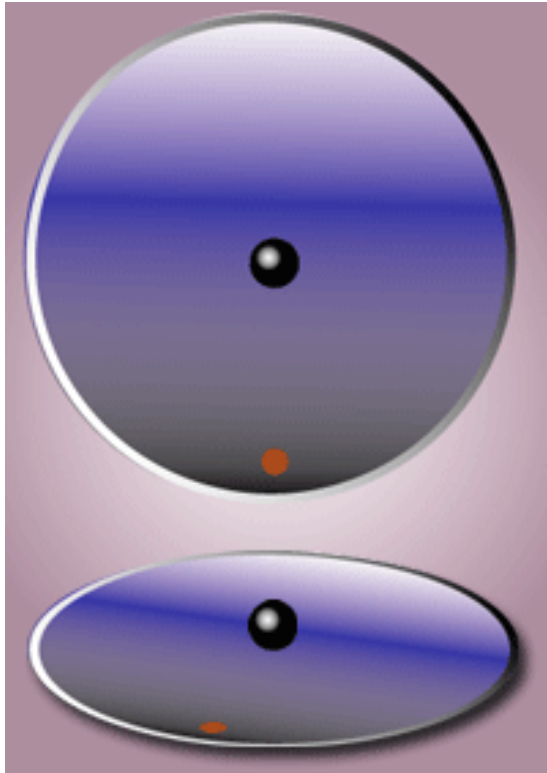
Για καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

$$x: \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) E_h + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_v \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$y: \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) E_h + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_v \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$



# Δύναμη Coriolis



<http://imgarcade.com/1/coriolis-effect-animation-merry-go-round/>

- Ένας παρατηρητής (κόκκινο σημείο) και μια ευθύγραμμη κίνηση από το κέντρο ενός περιστρεφόμενου αντικειμένου προς τον παρατηρητή όπως φαίνεται σε έναν εξωτερικό παρατηρητή.
- Κάτω, η κίνηση όπως φαίνεται στον παρατηρητή που βρίσκεται στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς.
- Για την περιγραφή της καμπύλης τροχιάς ο παρατηρητής εισαγάγει μια δύναμη  $F_C$  (Δύναμη Coriolis) η οποία είναι υπεύθυνη για την απόκλιση από την ευθύγραμμη κίνηση.



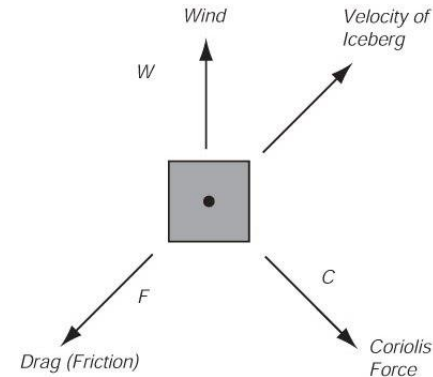
# Μεταφορά Ekman (1)

## Ισορροπία των δυνάμεων:

- Διατμητική τάση ανέμου
- Δύναμη Coriolis
- Τριβές

Παραδοχές:

- Άπειρο πεδίο
- Μόνιμο φαινόμενο
- Σταθερός συντελεστής διάχυσης της ορμής
- Σταθερός άνεμος



[http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng\\_textbook/chapter09/chapter09\\_02.htm](http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/chapter09/chapter09_02.htm)

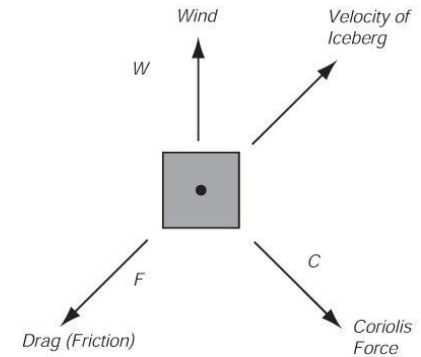
$$x: 0 = +fv + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \Rightarrow fv + E_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$
$$y: 0 = -fu + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Rightarrow -fu + E_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0$$



# Μεταφορά Ekman (2)

$$x: 0 = +fv + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \Rightarrow fv + E_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$

$$y: 0 = -fu + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Rightarrow -fu + E_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0$$



$$u = V_o \exp(az) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - az\right) \quad \& \quad v = V_o \exp(az) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - az\right)$$

$$a = \sqrt{\frac{|f|}{2E_v}} \quad \text{και} \quad V_o = \frac{\tau}{\sqrt{E_v \rho_w^2 |f|}}$$

όπου  $f = 2\Omega \sin(\varphi)$  και  $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$

$\tau =$  διατμητική τάση λόγω ανέμου και  $\rho_w$  η πυκνότητα



# Μεταφορά Ekman (3)

στην επιφάνεια ( $z=0$ ):  $u(0) = V_o \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)$  &  $v(0) = V_o \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)$

μεταβολή με το βάθος:  $\left[u^2 + v^2\right]^{1/2} = V_o \exp(az)$

βάθος στρώματος Ekman:  $D_E = \sqrt{\frac{2\pi^2 E_z}{f}}$

## Σύνδεση με τα στοιχεία του ανέμου

$$\tau_x = \rho_w E_v \frac{\partial u}{\partial z} \text{ και } \tau_y = \rho_w E_v \frac{\partial v}{\partial z}$$

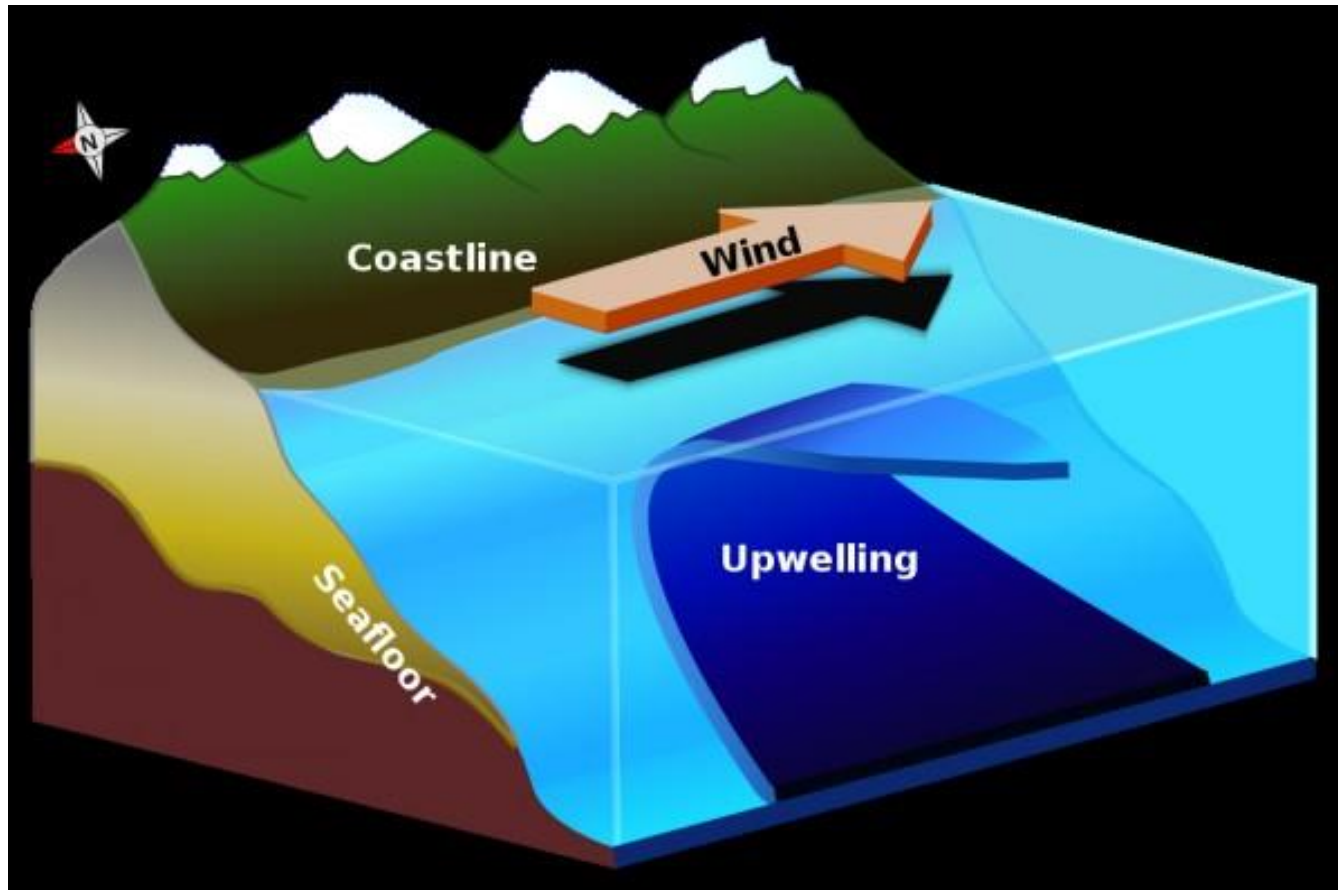
$$\tau = \sqrt{(\tau_x + \tau_y)^2} = \rho_{air} C_D U_{10}^2$$

τελικά:

$$V_o = \frac{0.0127}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10} \text{ και } D_E = \frac{7.6}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10}$$



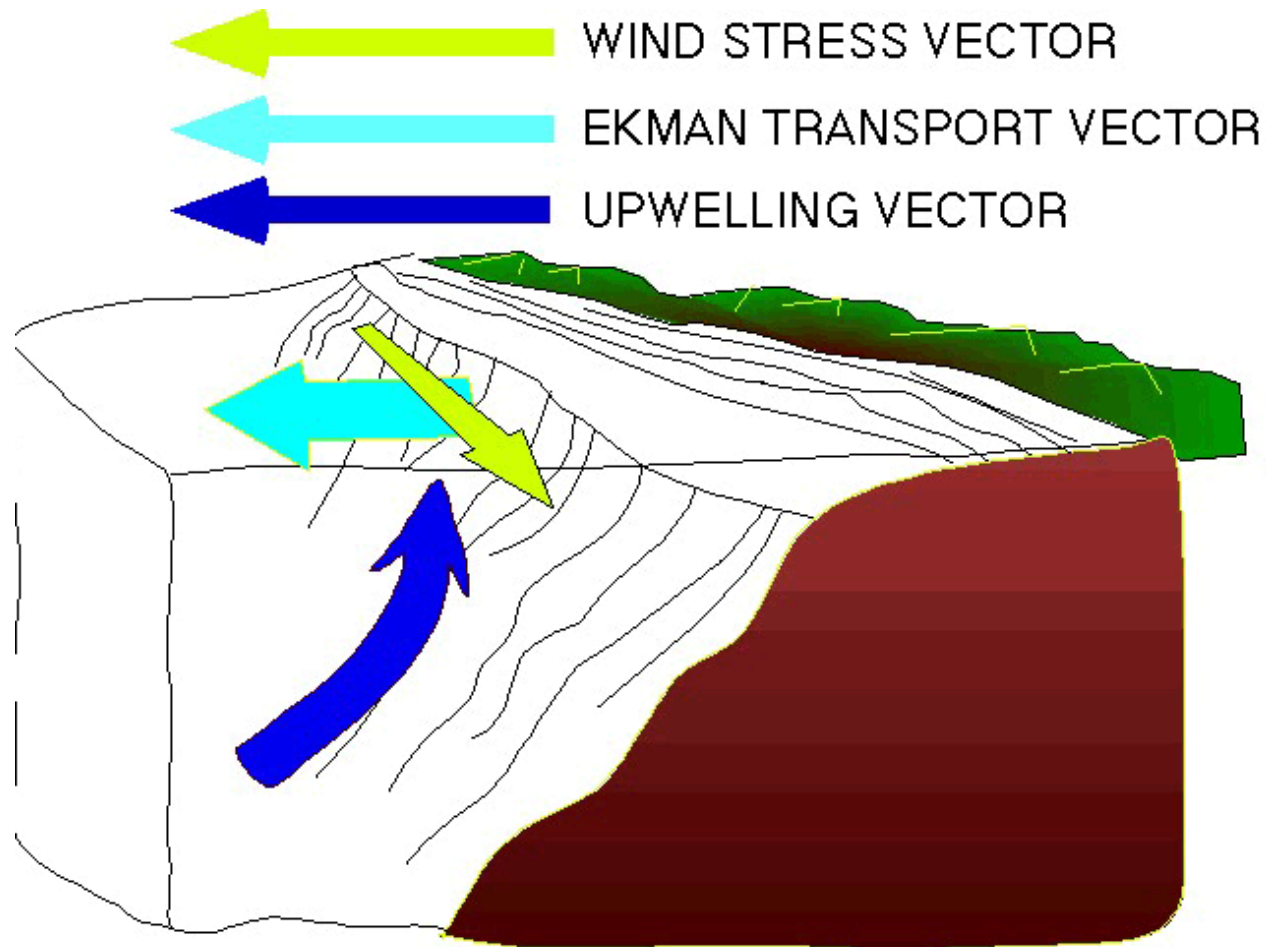
# Παράκτια ανάδυση (upwelling) (1)



Wikipedia.org



# Παράκτια ανάδυση (upwelling) (2)





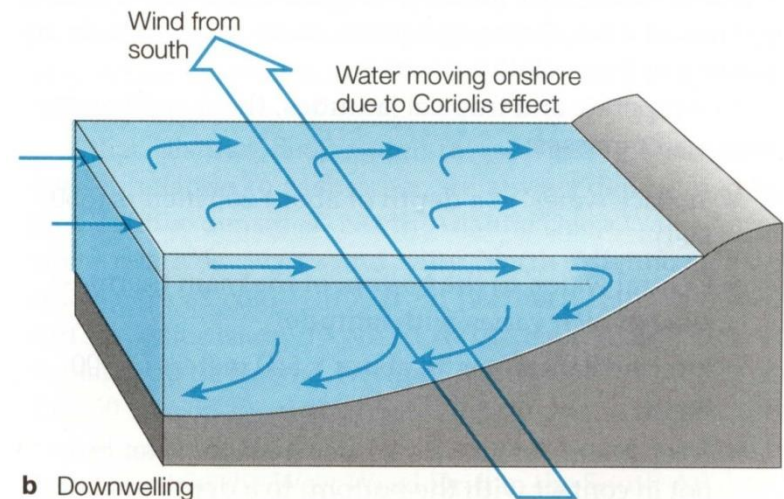
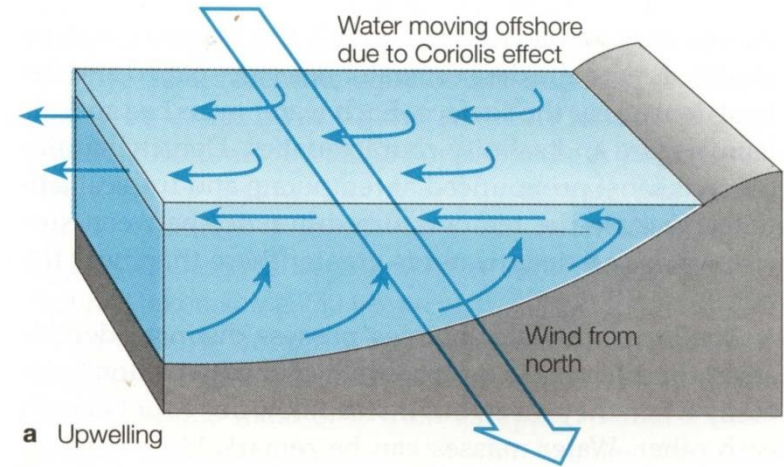
# Παράκτια ανάδυση και κατάδυση-καταβύθιση θαλάσσιων μαζών

Παράκτια ανάδυση  
(upwelling)

και

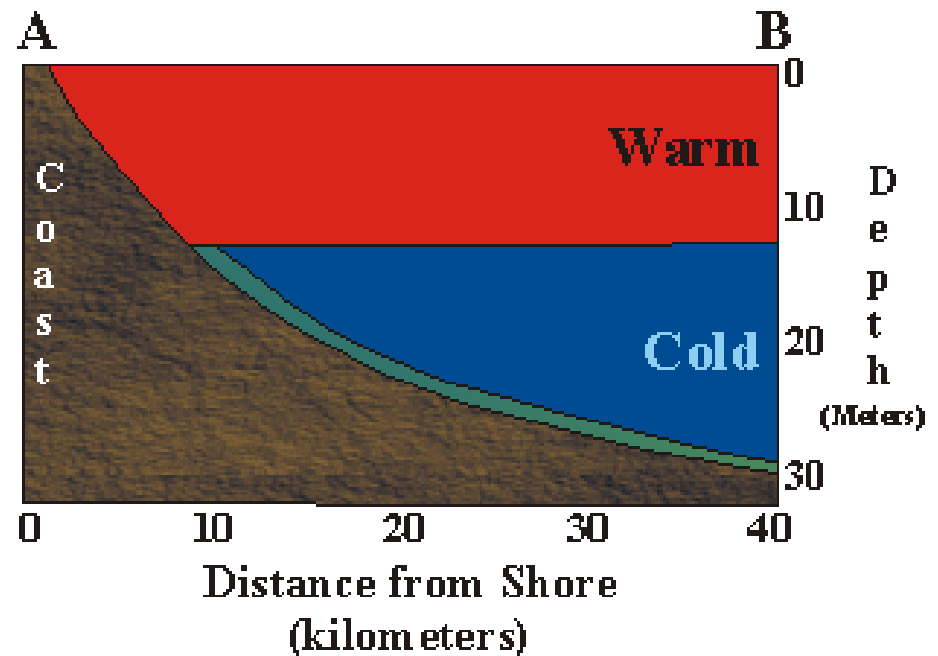
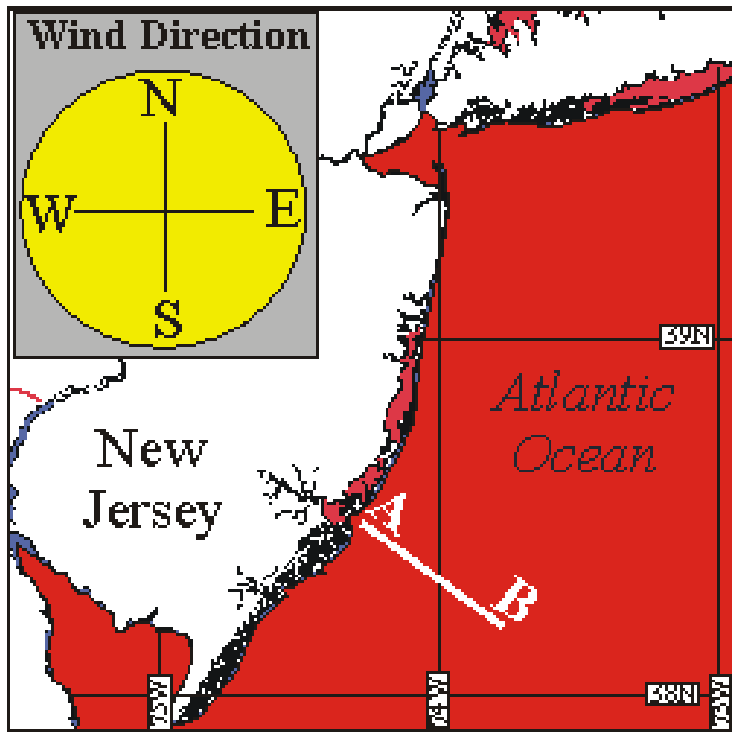
κατάδυση - καταβύθιση  
(downwelling)  
θαλασσίων μαζών

Eeb.ucla.edu



# Παράκτια ανάδυση (upwelling)

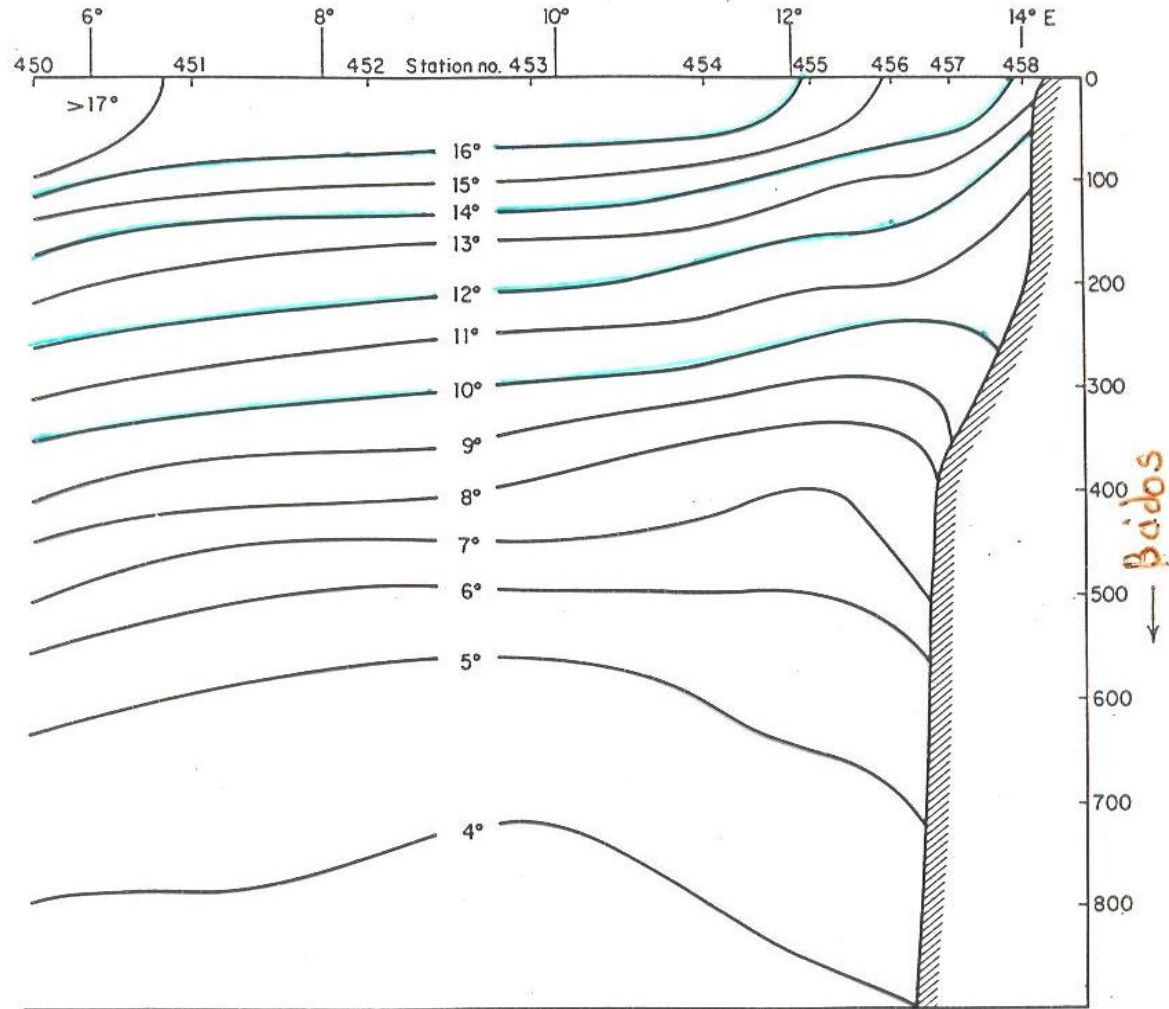
## The Basics of Coastal Upwelling No Wind



Πηγή σχήματος



# Μεταβολή θερμοκρασίας σε περιοχή ανάδυσης (ανάβλυσης) των θαλάσσιων μαζών



# Μεταφορά Εκman

στην επιφάνεια ( $z=0$ ):  $u(0) = V_o \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)$  &  $v(0) = V_o \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)$

μεταβολή με το βάθος:  $[u^2 + v^2]^{1/2} = V_o \exp(az)$

βάθος στρώματος Ekman:  $D_E = \sqrt{\frac{2\pi^2 E_z}{f}}$

## Σύνδεση με τα στοιχεία του ανέμου

$$\tau_x = \rho_w E_v \frac{\partial u}{\partial z} \text{ και } \tau_y = \rho_w E_v \frac{\partial v}{\partial z}$$

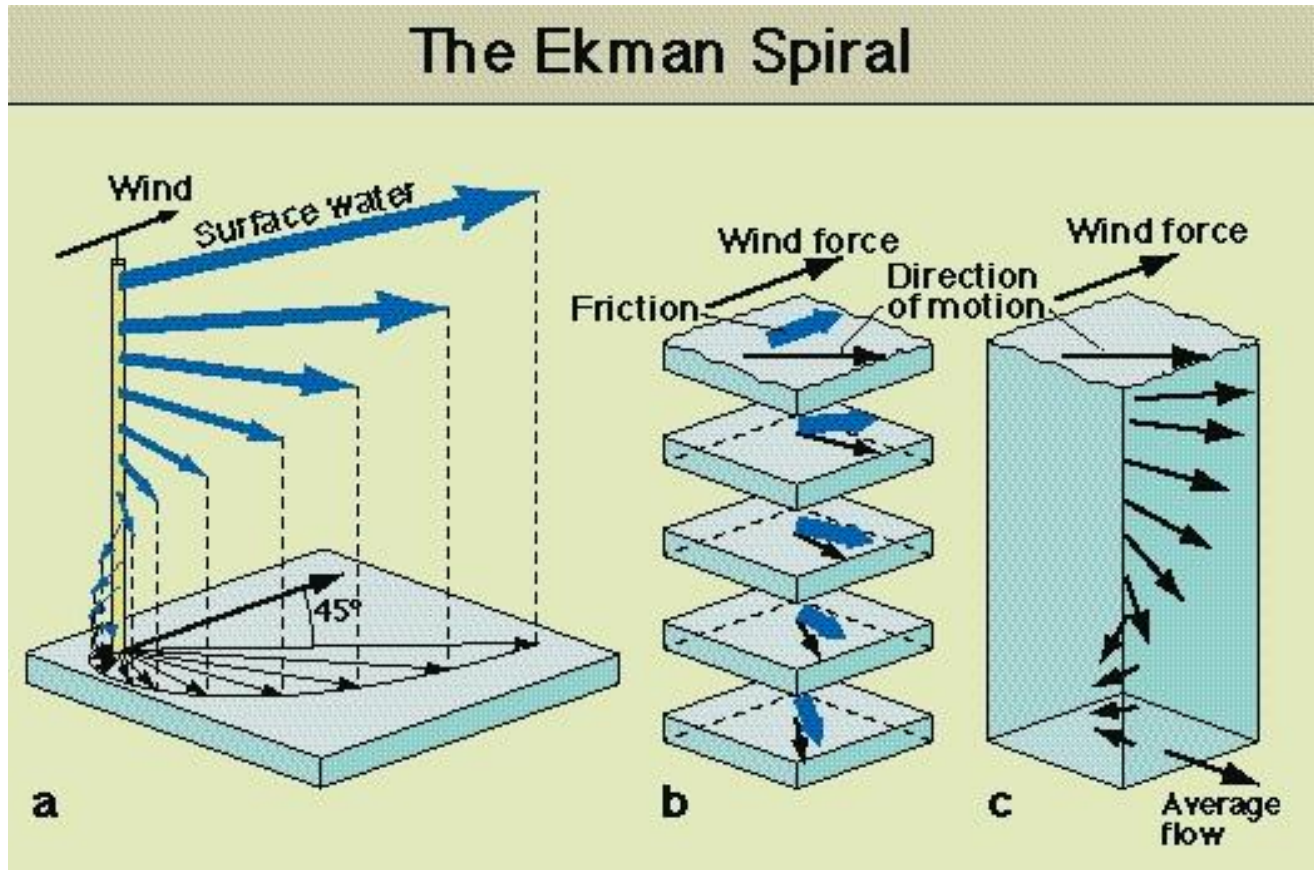
$$\tau = \sqrt{(\tau_x + \tau_y)^2} = \rho_{air} C_D U_{10}^2$$

τελικά:

$$V_o = \frac{0.0127}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10} \text{ και } D_E = \frac{7.6}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10}$$



# Μεταφορά Ekman



Μέση (στο βάθος) μεταφορά κάθετη στην διεύθυνση του ανέμου

Slideshare.net



# Μεταφορά Ekman

στην επιφάνεια ( $z=0$ ):  $u(0) = V_o \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)$  &  $v(0) = V_o \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)$

μεταβολή με το βάθος:  $\left[u^2 + v^2\right]^{1/2} = V_o \exp(az)$

βάθος στρώματος Ekman:  $D_E = \sqrt{\frac{2\pi^2 E_z}{f}}$

## Σύνδεση με τα στοιχεία του ανέμου

$$\tau_x = \rho_w E_v \frac{\partial u}{\partial z} \text{ και } \tau_y = \rho_w E_v \frac{\partial v}{\partial z}$$

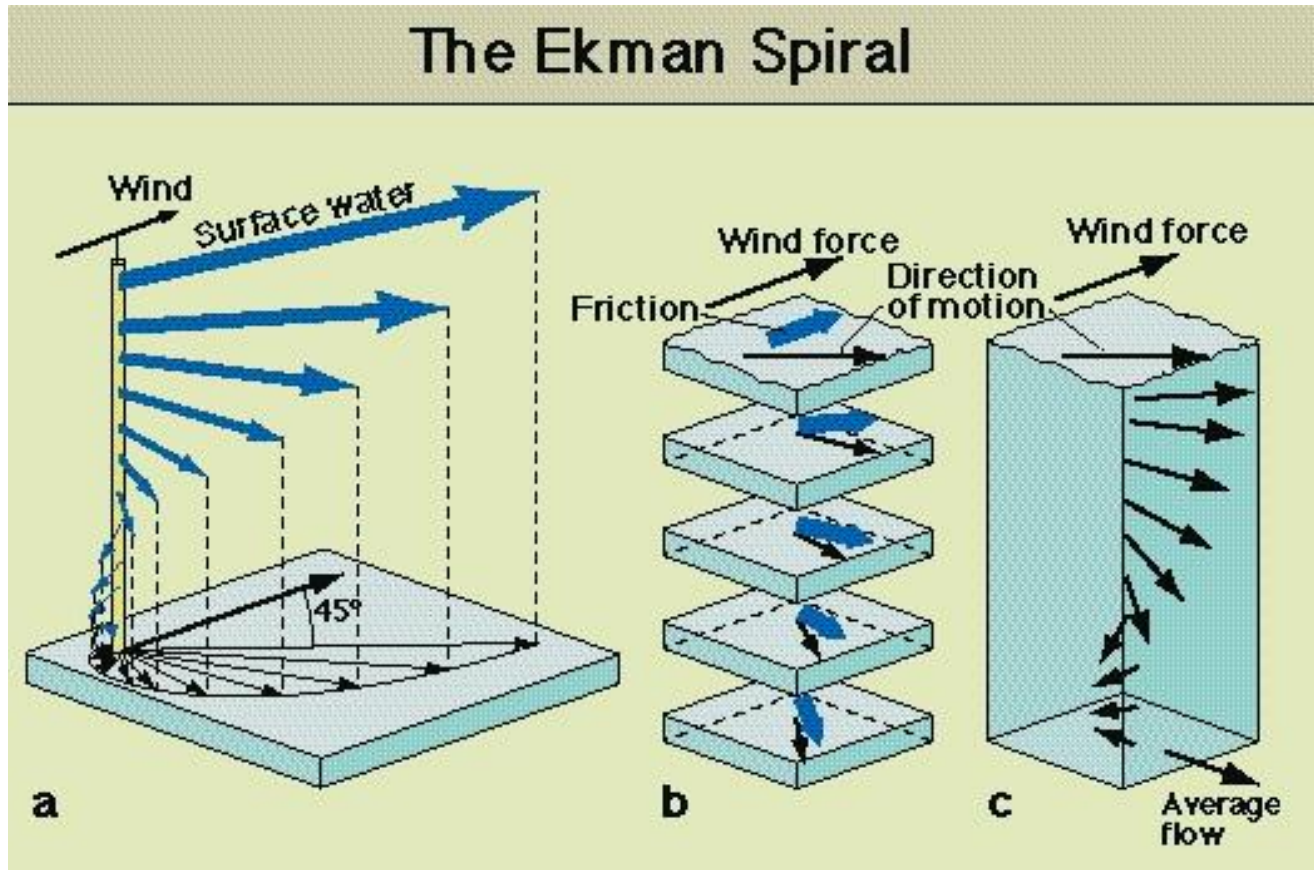
$$\tau = \sqrt{(\tau_x + \tau_y)^2} = \rho_{air} C_D U_{10}^2$$

τελικά:

$$V_o = \frac{0.0127}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10} \text{ και } D_E = \frac{7.6}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10}$$



# Μεταφορά Ekman



Μέση (στο βάθος) μεταφορά κάθετη στην διεύθυνση του ανέμου

Slideshare.net



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Κρεστενίτης Ιωάννης.  
«Παράκτια Ωκεανογραφία. Παράκτια Υδροδυναμική Κυκλοφορία, Μεταφορά Ekman ». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.auth.gr/courses/OCRS318/>





# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Παρόμοια Διανομή [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

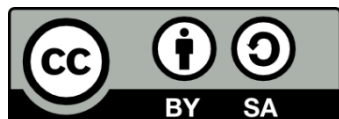
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: <Μαυρίδου Σοφία>  
Θεσσαλονίκη, <Χειμερινό Εξάμηνο 2013-2014>



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

---

# Σημειώματα

# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

