



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΜΠ535 Παράκτια Μηχανική

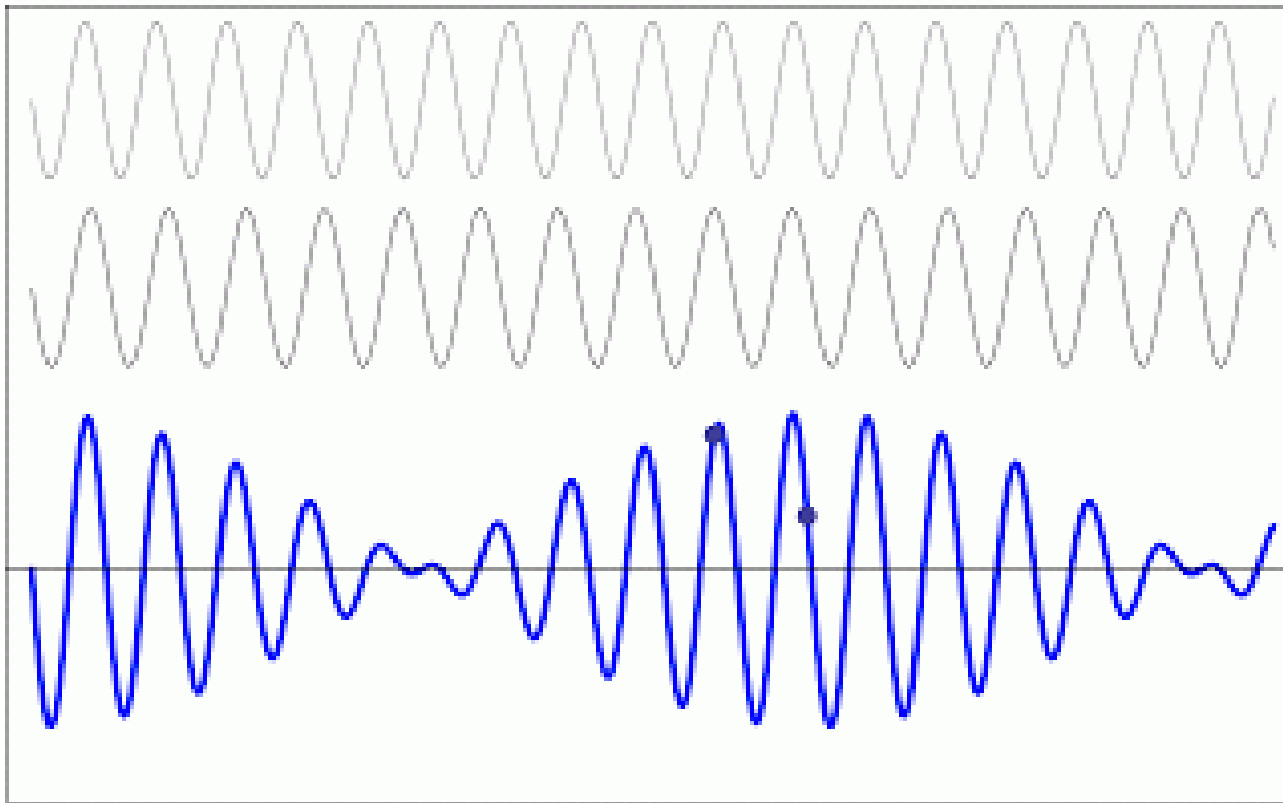
Πρόγνωση ανεμογενών κυματισμών

Ανεμογενείς κυματισμοί



Ανεμογενείς κυματισμοί

- Κύριος παράγοντας φορτίσεως θαλάσσιων έργων
- Συνήθως έχουν τυχαία (στοχαστική) μορφή
- Τοπικά μπορεί να περιγράψει ως άθροιση αρμονικών συνιστωσών



Ορισμοί

- **Ανεμογενείς κυματισμοί (*wind waves*):** γενεσιουργό αίτιο ο άνεμος που πνέει τοπικά
- **Αποθάλασσες (*Swell waves*):** κύματα μεγαλύτερης περιόδου που δημιουργήθηκαν από τους ανέμους μακρινών καιρικών συστημάτων.
- **Θαλάσσια κατάσταση (*Sea state*):** ο συνδυασμός ανεμογενών κυμάτων και αποθαλασσών.

Γένεση κυματισμών



Γένεση κυματισμών

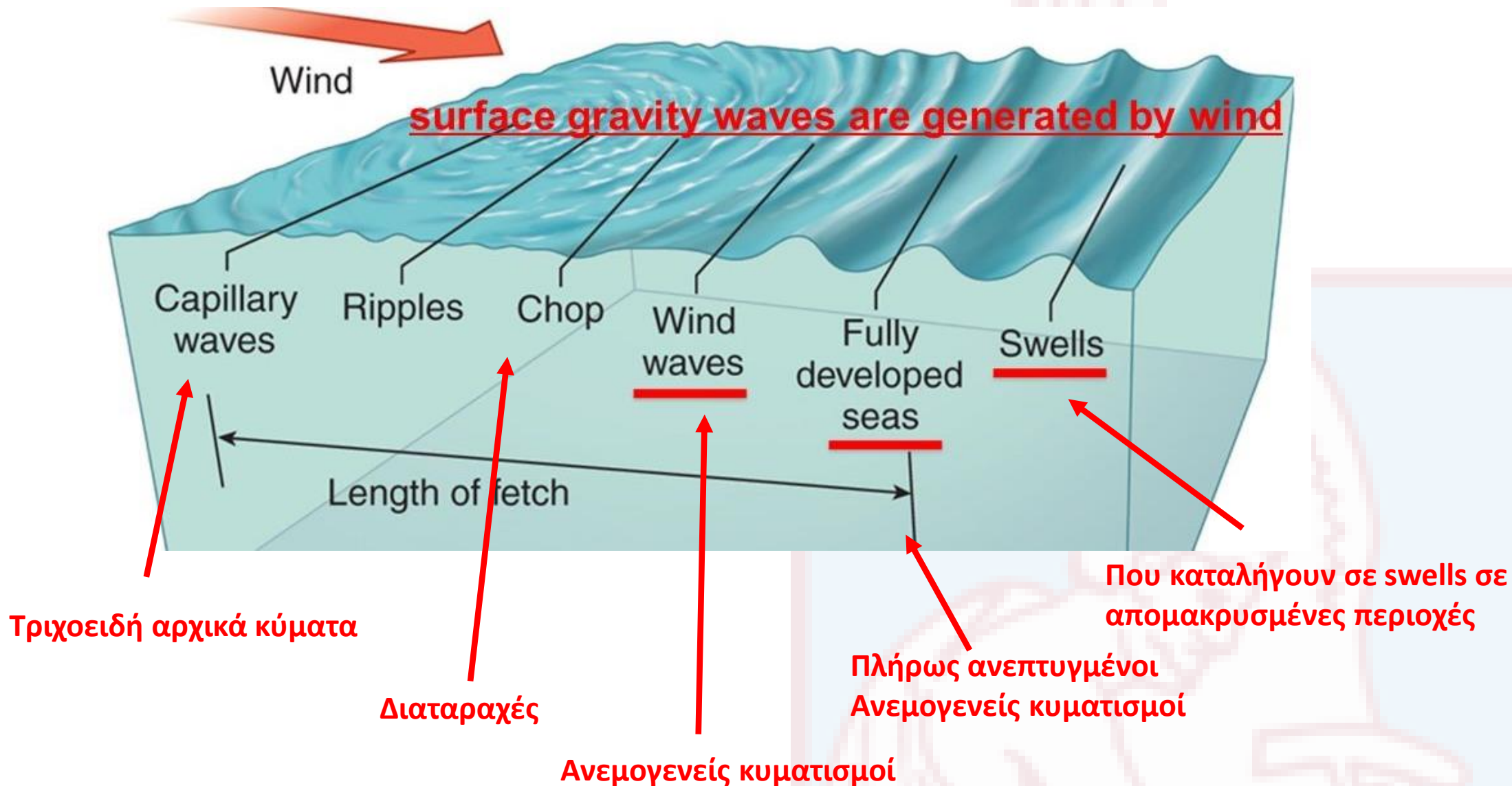
Μηχανική ενέργεια

Αρχικά μεταφέρεται γραμμικά και έπειτα εκθετικά

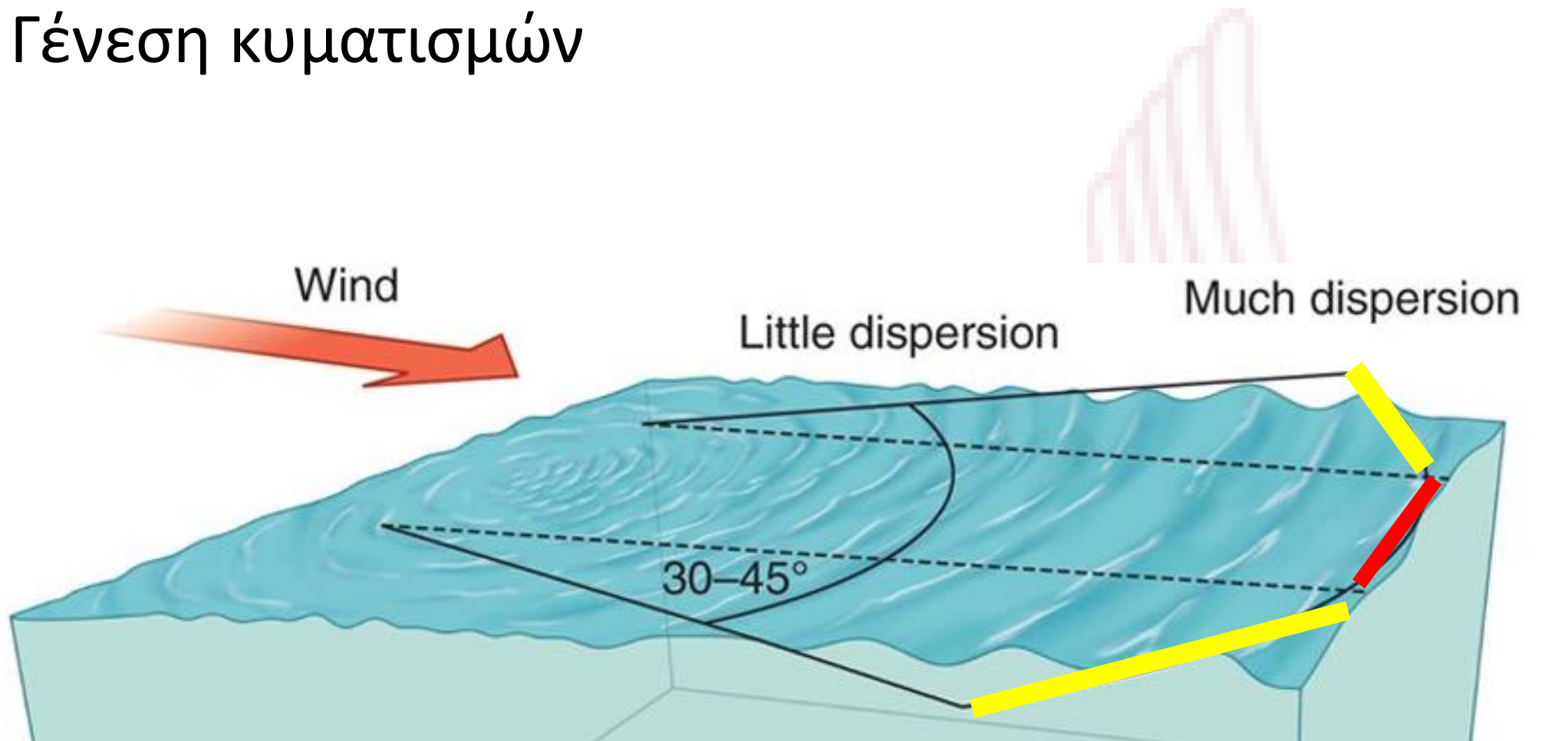
Μετά ↓ | Περίοδος & Μήκος ↑

Φασική ταχύτητα $\cong$ Ανέμου

Γένεση κυματισμών



Γένεση κυματισμών

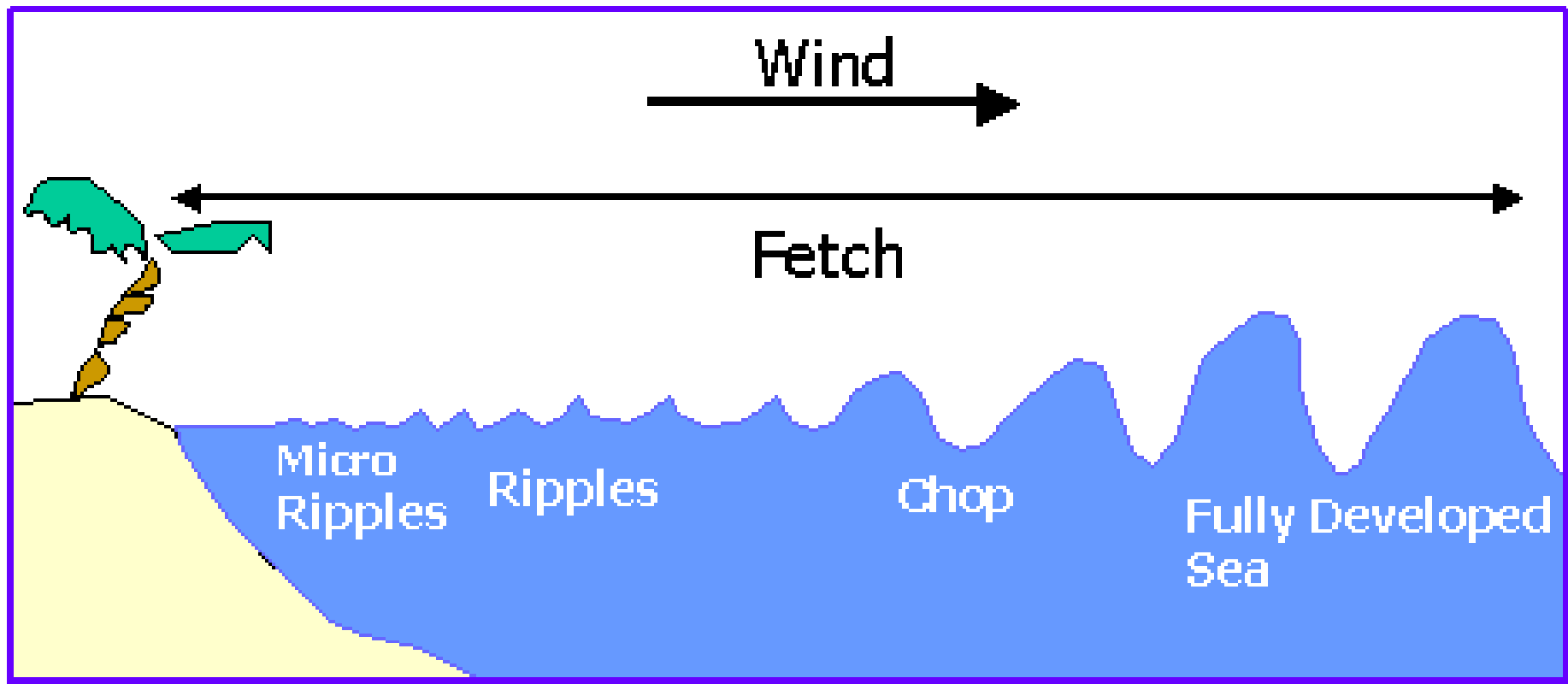


- Μικρότερα κύματα
- Μεγαλύτερα κύματα

Κυματογένεση σε τομέα $+ / - 30$ έως και 45° εκατέρωθεν της διεύθυνσεως του ανέμου.

Μήκος αναπτύγματος F (fetch)

Μήκος αναπτύγματος είναι το μήκος της θάλασσας πάνω σε μια διεύθυνση που δύναται να δράσει ο άνεμος.



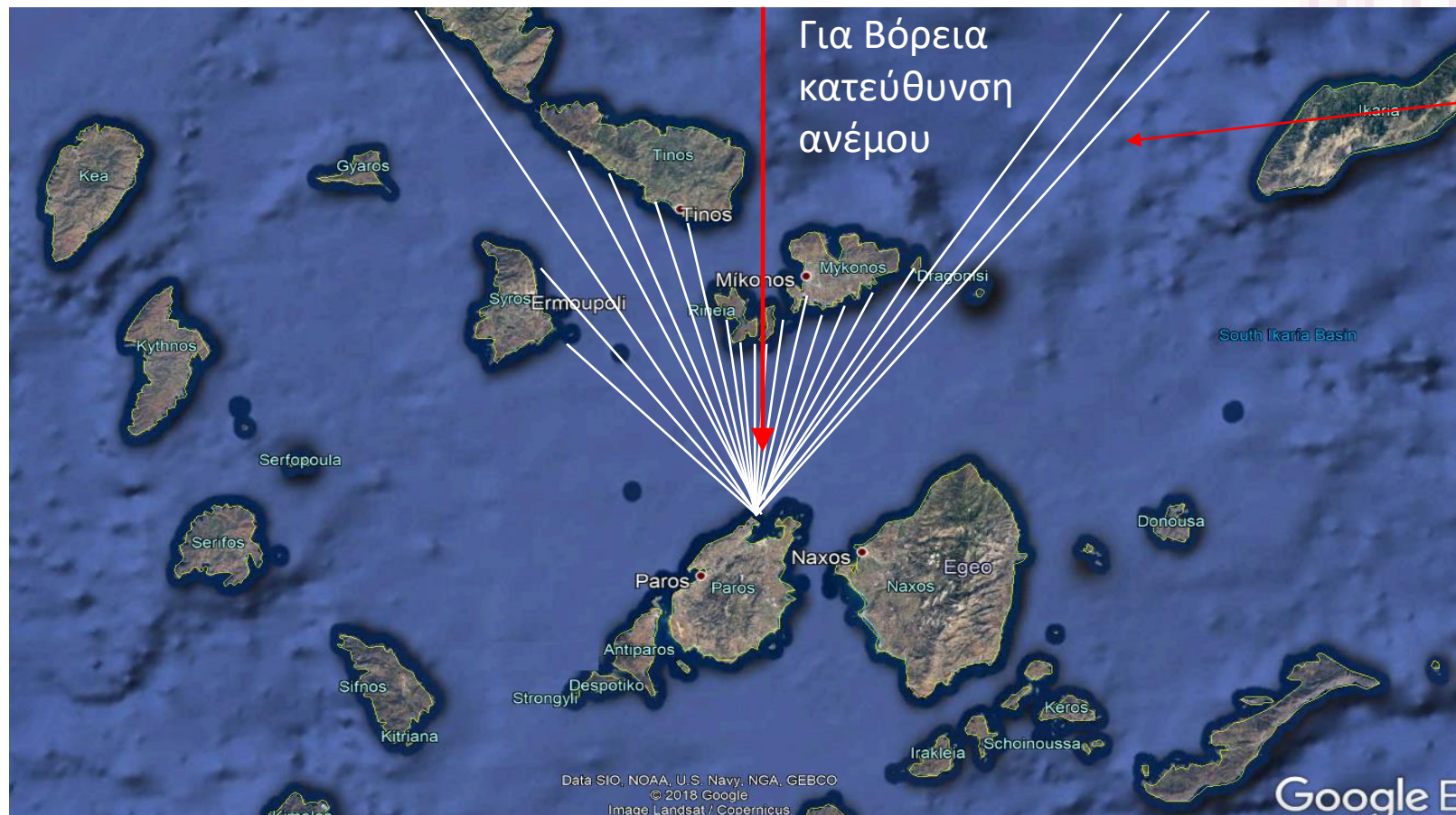
Μήκος αναπτύγματος F (fetch)



Μήκος αναπτύγματος είναι το μήκος της θάλασσας πάνω σε μια διεύθυνση που δύναται να δράσει ο ανεμος.

Μήκος ισοδύναμου αναπτύγματος F_{eff} (effective fetch)

Όμως κάθε διεύθυνση ανέμου δημιουργεί κύμα σε ένα τομέα $+ / - 45^\circ$ εκατέρωθεν αυτής. Για το λόγο αυτό υπάρχει το ισοδύναμο ανάπτυγμα (effective fetch):



$$F_{eff} = \frac{\sum F_i (\cos \alpha_i)^2}{\sum (\cos \alpha_i)}$$

Για $i = 1$: αριθμό ακτίνων

$$(\cos(0))^2 = 1$$

$$(\cos(45))^2 = 0.5$$

Μεγαλύτερο βάρος το Fetch κατά τη διεύθυνση του ανέμου.

Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση κυματισμών

Εμπειρικές
Μέθοδοι

- Ανεμολογικές $\rightarrow$ κυματικές παράμετροι
- Μεγάλα σετ δεδομένων
- Δεν περιέχουν φυσικές διεργασίες!

Ύψος &
Περίοδος
κύματος
από

- Ταχύτητα του ανέμου (U)
- Διάρκεια πνοής (t_d)
- Μήκος αναπτύγματος (F , fetch)

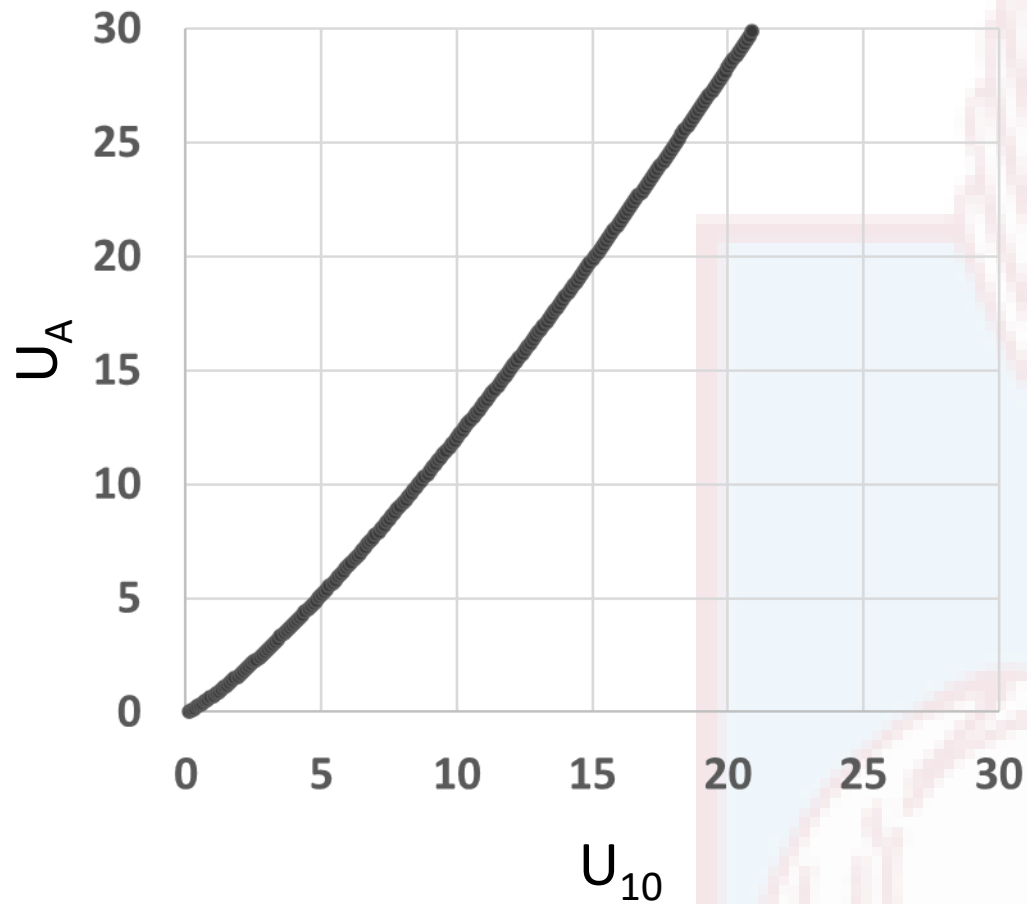
Ταχύτητα του ανέμου U

- Ο άνεμος ασκεί διατμητική τάση στην επιφάνεια της θάλασσας
- Η ταχύτητα ανέμου ως παράγοντας κυματογένεσης επηρεάζεται από τη θερμική ευστάθεια της κατώτερης ατμόσφαιρας που περιγράφεται από τη διαφορά θερμοκρασίας αέρα/νερού.
- Λόγω της μη γραμμικής μορφής της σχέσης ταχύτητας ανέμου και διατμητικής τάσης, η «**ρυθμισμένη**» ταχύτητα ανέμου ή «ταχύτητα τριβής» σε σχέση με την αντίστοιχη στα 10 μέτρα από την επιφάνεια, δίνεται από τη σχέση:

$$U_A = 0.71 \cdot U_{10}^{1.23} \quad (\text{Κουτίτας, 1998})$$

Ταχύτητα του ανέμου U

$$U_A = 0.71 \cdot U_{10}^{1.23} \quad (\text{Κουτιπας, 1998})$$



Ταχύτητα του ανέμου U

- Πολλές φορές όμως δεν γνωρίζουμε την ταχύτητα στα 10 μέτρα υψόμετρο, αλλά σε κάποιο άλλο ύψος στο οποίο έχει εγκατασταθεί ανεμόμετρο.
- Τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τη ταχύτητα στα 10 μέτρα από της σχέση:

$$U_{10} = U_z \left(\frac{10}{z} \right)^{\frac{1}{7}} \text{ για } 0 < z < 20$$

Όπου Z το υψόμετρο που γίνεται η καταγραφή

Ανάπτυξη Κυματισμών

Εξαρτάται από:

- Ταχύτητα ανέμου U ,
- Μήκος αναπτύγματος F ,
- Διάρκεια πνοής ανέμου t_d

Διακρίνεται σε 3 καταστάσεις ανάλογα τη περίπτωση των παραπάνω μεγεθών:

I. **Περιορισμένο μήκος F , αλλά t_d πολύ μεγάλη:**

Τότε τα στοιχεία του κύματος εξαρτώνται από F και U

II. **Περιορισμένη διάρκεια t_d , αλλά F πολύ μεγάλο:**

Τότε τα στοιχεία κύματος εξαρτώνται από t_d και U

III. **Πολύ μεγάλο F και $t_d \rightarrow$ Πλήρης ανάπτυξη κύματος:**

Τότε η μεταφορά ενέργειας περιορίζεται μόνο από την ταχύτητα ανέμου U

Σημαντικό ύψος κύματος

- Η διαταραχή της θαλάσσιας επιφάνειας αντιπροσωπεύεται από το «χαρακτηριστικό κύμα».
- Ένα κύμα του οποίου το ύψος αντιστοιχεί στο $1/3$ του συνόλου των υψηλότερων κυμάτων τη συγκεκριμένη στιγμή (ή αλλιώς, ο μέσος όρος του $1/3$ υψηλότερων κυμάτων).
- Συμβολίζεται ως $H_{1/3}$ ή H_s .

Εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού του σημαντικού ύψους κύματος

1. JONSWAP

(JOint North Sea Wave Project)

2. SMB

(Sverdrup, Munk, and Bretschneider)

Πρόγνωση με τη μέθοδο JONSWAP

- Υπολογισμός σημαντικού ύψους κύματος H_s

$$H_s = \frac{U_A^2 \cdot 0.0016 \cdot \left(\frac{g \cdot x}{U_A^2} \right)^{0.5}}{g}$$

- Υπολογισμός περιόδου μέγιστης ενεργειακής πυκνότητας T_p

$$T_p = \frac{U_A \cdot 0.286 \cdot \left(\frac{g \cdot x}{U_A^2} \right)^{0.33}}{g}$$

Πρόγνωση με τη μέθοδο JONSWAP

...3 καταστάσεις :

I. Περιορισμένο μήκος F , αλλά t_d πολύ μεγάλη:

Τότε τα στοιχεία του κύματος εξαρτώνται από F και U

II. Περιορισμένη διάρκεια t_d , αλλά F πολύ μεγάλο:

Τότε τα στοιχεία κύματος εξαρτώνται από t_d και U

III. Πολύ μεγάλο F και $t_d \rightarrow$ Πλήρης ανάπτυξη κύματος:

Τότε η μεταφορά ενέργειας περιορίζεται μόνο από την ταχύτητα ανέμου U

Πρόγνωση με τη μέθοδο JONSWAP

- ΈΛΕΓΧΟΣ για πλήρη ανάπτυξη κυματισμών, περίπτωση **III Πολύ μεγάλο F και $t_d \rightarrow$ Πλήρης ανάπτυξη κύματος:**

$$\frac{g \cdot F}{U_A^2} \geq 22.8 \cdot 10^3$$

- και τα χαρακτηριστικά του κύματος δίνονται πλέον από τις εξισώσεις:

$$g \frac{H_s}{U_A^2} = 0.243, \quad g \frac{T_p}{U_A} = 8.13$$

Δηλαδή, εφόσον το Fetch και η διάρκεια πνοής δεν αποτελούν περιορισμό, τα χαρακτηριστικά του κύματος εξαρτώνται μόνο από το την ταχύτητα του ανέμου.

Πρόγνωση με τη μέθοδο JONSWAP

Αν δεν ισχύει η προηγούμενη ανισότητα (δεν είμαστε στην περίπτωση III):

ΕΛΕΓΧΟΣ περιορισμού μήκους αναπτύγματος:

$$\frac{g \cdot t_d}{U_A} > 68.8 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{0.66}$$

Αν ισχύει η ανισότητα, τότε είμαστε στην περίπτωση I Περιορισμένο μήκος F , αλλά t_d πολύ μεγάλη.

Τότε ύψος και περίοδος υπολογίζονται σύμφωνα με το υπολογισμένο από το χάρτη F , θέτοντας $x = F$

Αν δεν ισχύει η ανισότητα, τότε είμαστε στην περίπτωση II Περιορισμένη διάρκεια t_d , αλλά F πολύ μεγάλο:

Τότε μετατρέπουμε την ανωτέρω ανισότητα σε ισότητα και λύνουμε ως προς F :

$$x = F^* = \frac{U_A^2}{g} \left(\frac{g \cdot t_d}{68.8 \cdot U_A} \right)^{1.5}$$

$$T_p = \frac{U_A \cdot 0.286 \cdot \left(\frac{g \cdot x}{U_A^2} \right)^{0.33}}{g}$$

$$H_s = \frac{U_A^2 \cdot 0.0016 \cdot \left(\frac{g \cdot x}{U_A^2} \right)^{0.5}}{g}$$

Πρόγνωση με τη μέθοδο SMB (Sverdrup, Munk, and Bretschneider)

- Με το μοντέλο SMB υπολογίζονται τόσο το ύψος H_s όσο και η περίοδος T_s του κύματος σαν μονοσήμαντες συναρτήσεις της ταχύτητας U του ανέμου, του (fetch) F και της διάρκειας πνοής του ανέμου D .
- Εξισώσεις υπολογισμού των παραπάνω παραμέτρων:

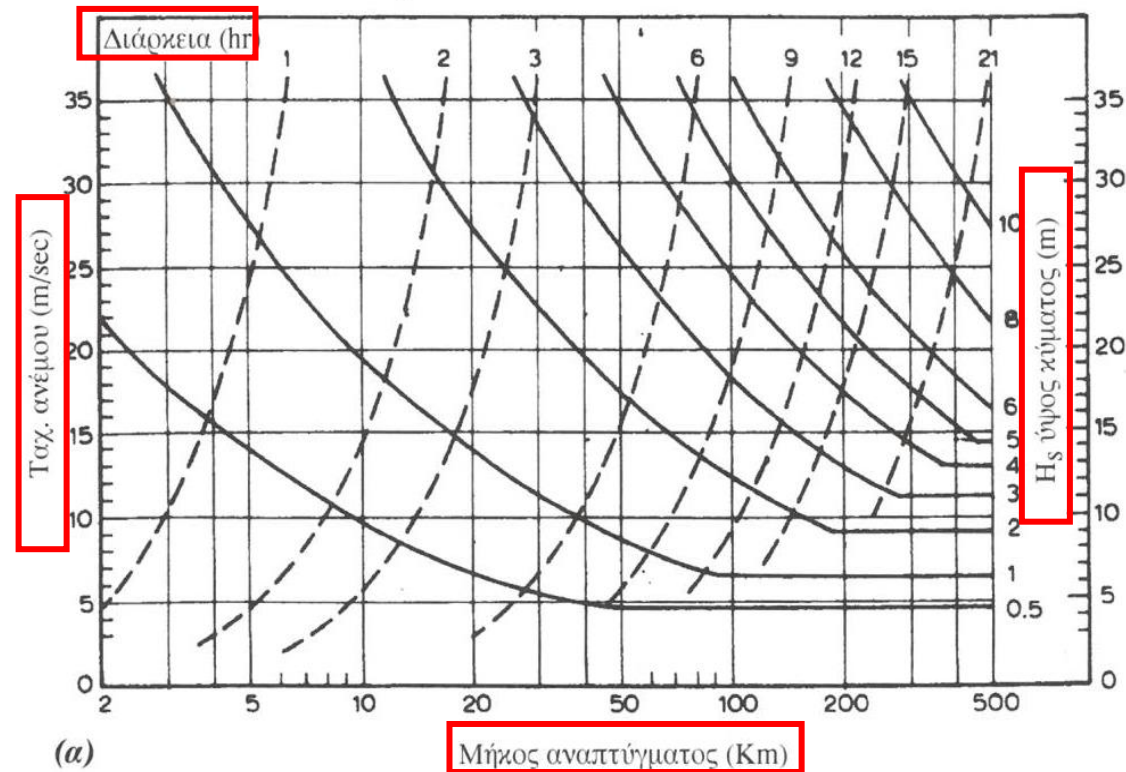
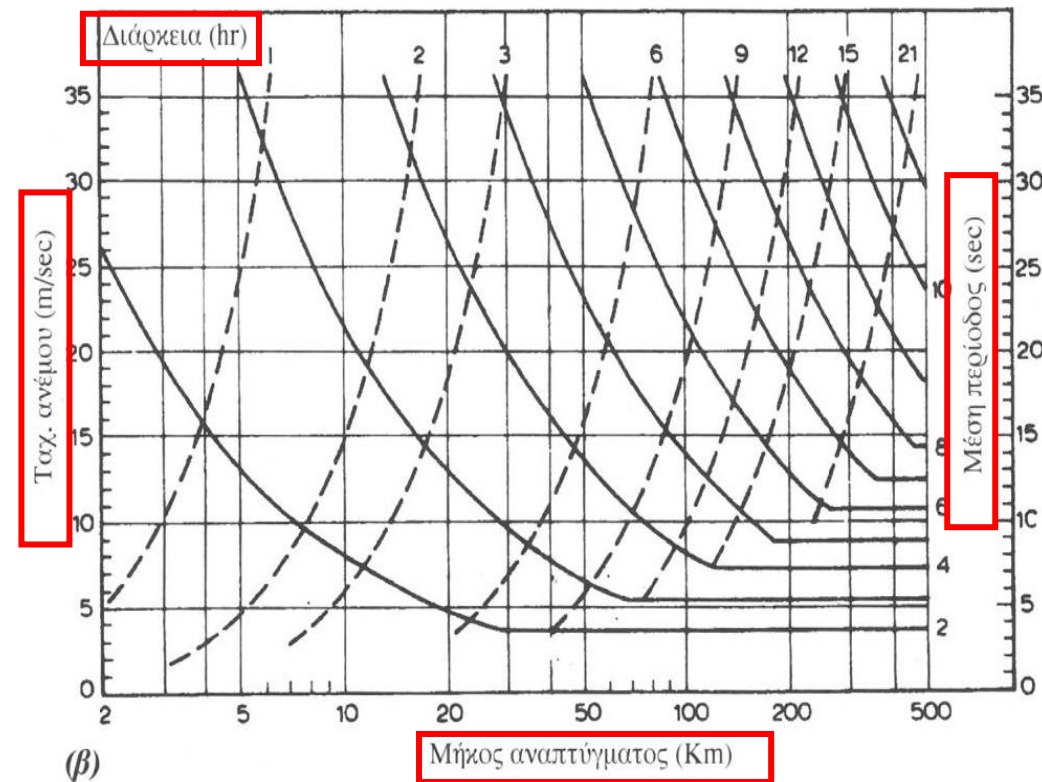
$$\frac{gH_s}{U^2} = 0.283 \cdot \tanh(0.125 \cdot \Phi^{0,42})$$

$$\frac{gT_s}{U} = 7.540 \cdot \tanh(0.077 \cdot \Phi^{0,25})$$

όπου Φ είναι ο συντελεστής αναπτύγματος πελάγους ($\Phi = gF / U$).

Πρόγνωση με τη μέθοδο SMB

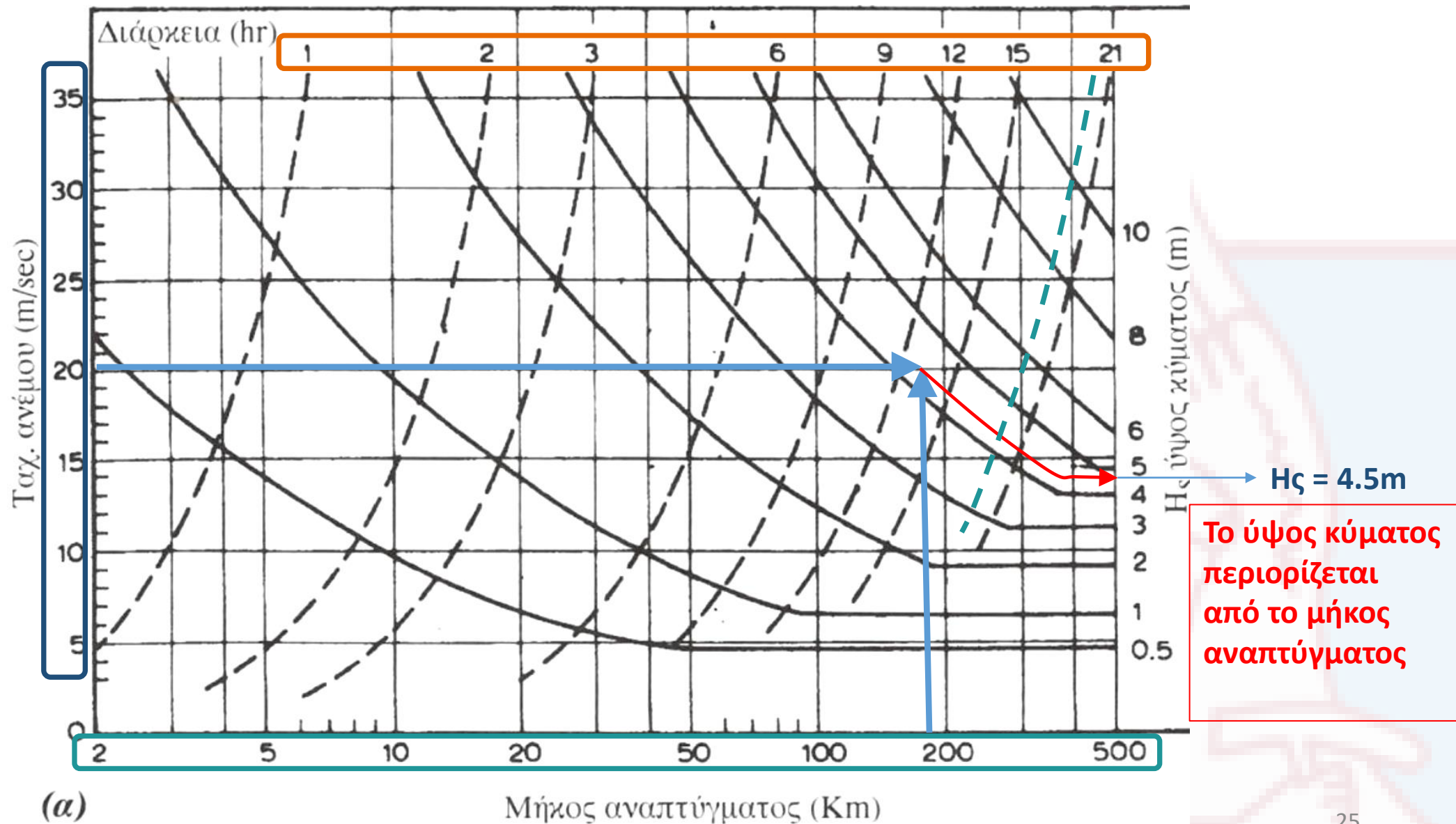
Οι παραπάνω εξισώσεις δίνουν τα εξής νομογραφήματα:



Πρόγνωση με τη μέθοδο SMB – Υπολογισμός H_s

ΕΣΤΩ:

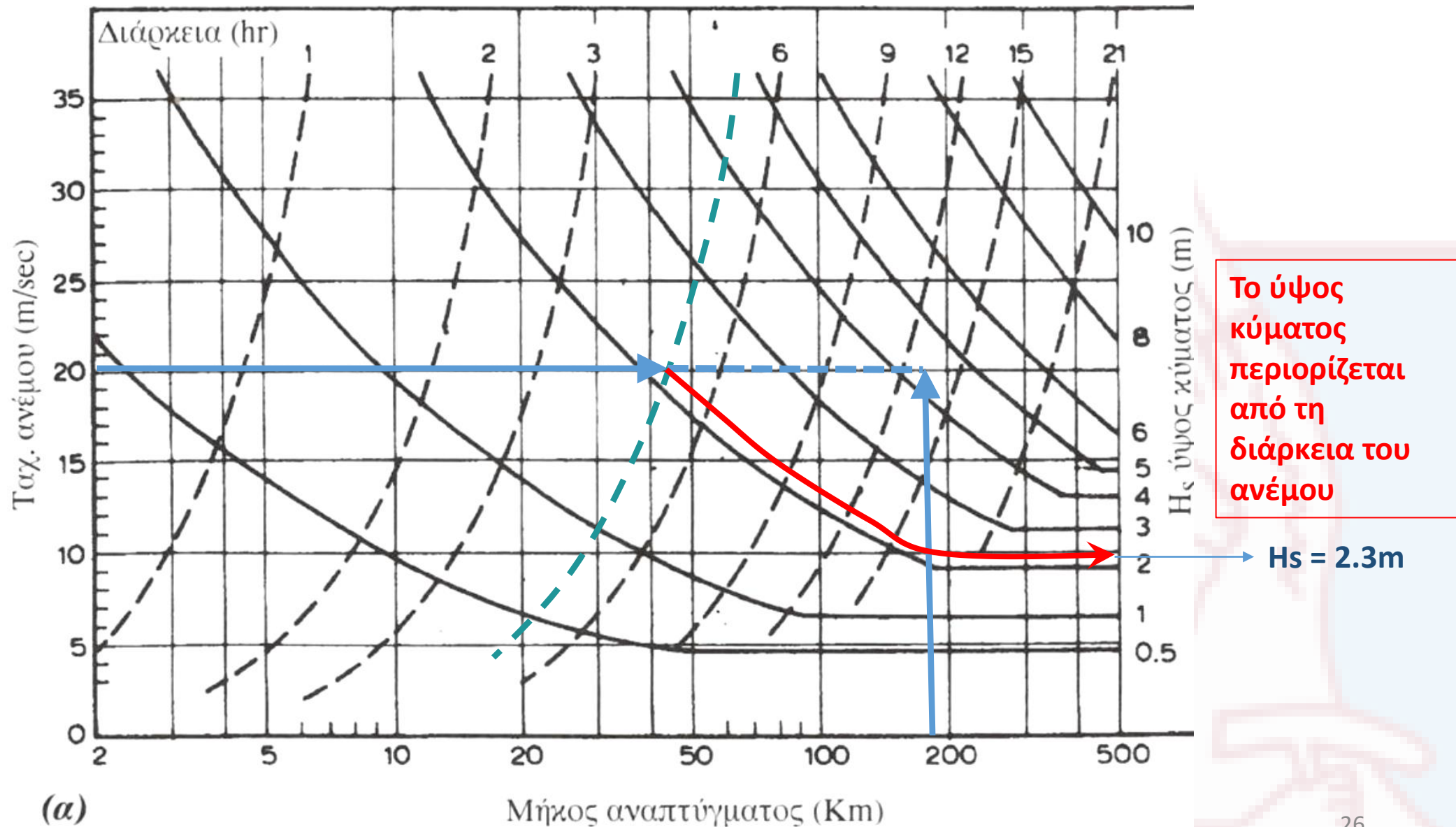
Ταχύτητα ανέμου $U = 20\text{m/s}$, Μήκος αναπτύγματος $F = 185\text{Km}$, Διάρκεια ανέμου 20 ώρες



Πρόγνωση με τη μέθοδο SMB – Υπολογισμός H_s

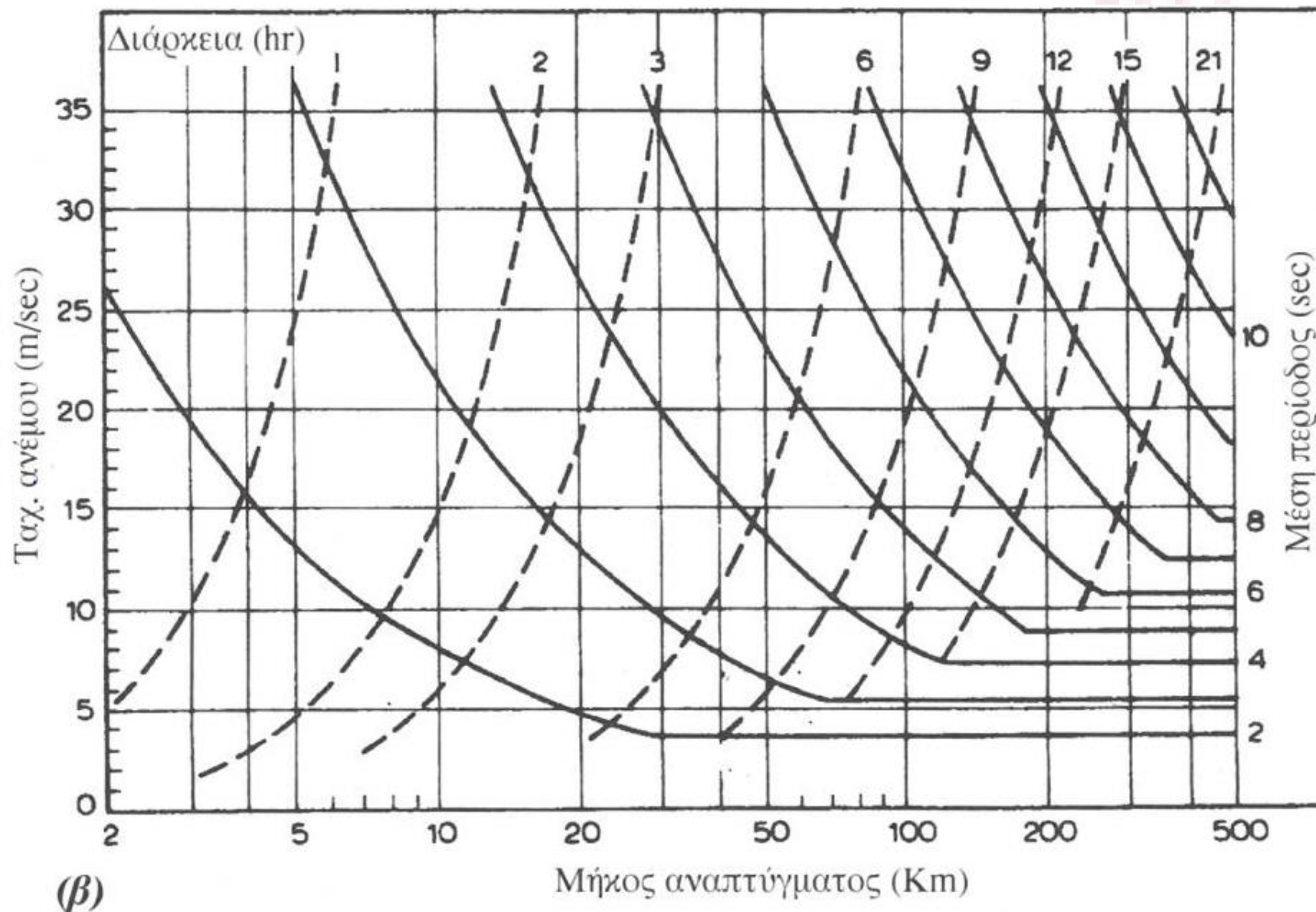
ΕΣΤΩ:

Ταχύτητα ανέμου $U = 20\text{m/s}$. Μήκος αναπτύγματος $F = 185\text{Km}$. Διάρκεια ανέμου ~~20~~ 5 ώρες



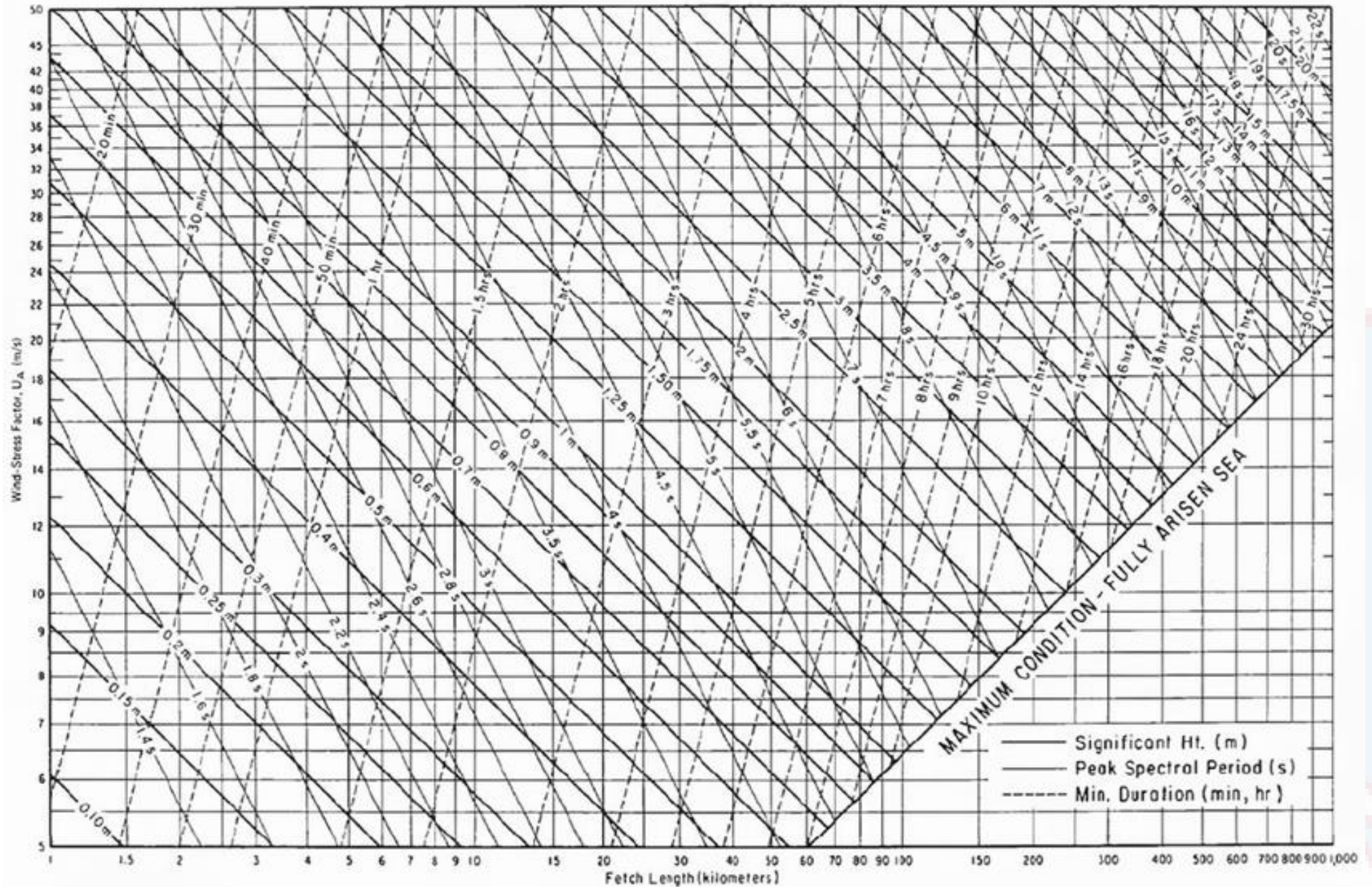
Πρόγνωση με τη μέθοδο SMB – Υπολογισμός T_s

Αντίστοιχα με H_s



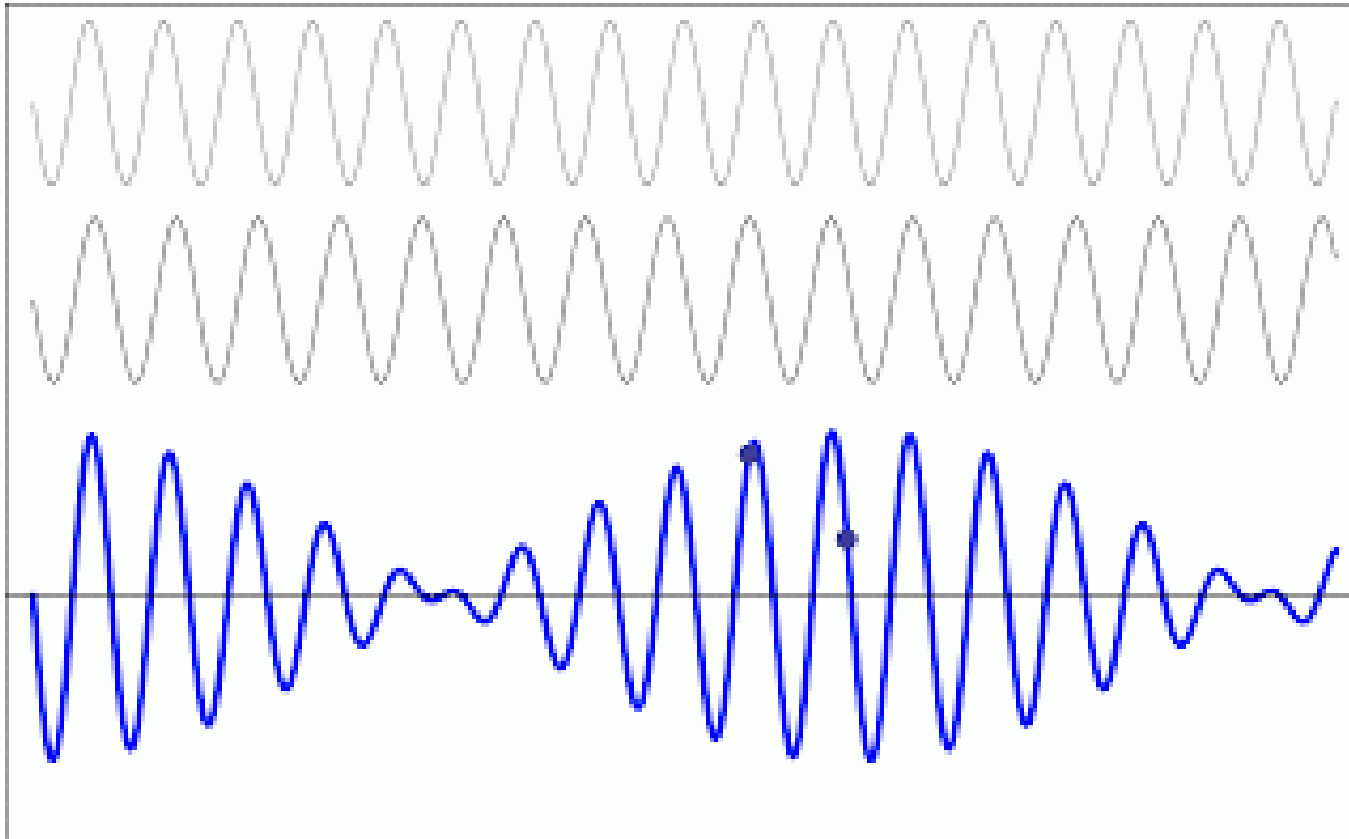
Πρόγνωση με τη μέθοδο SMB

συνδυασμός των προηγούμενων διαγραμμάτων σε ένα:



Ανεμογενείς κυματισμοί

- Κύριος παράγοντας φορτίσεως θαλάσσιων έργων
- Συνήθως έχουν τυχαία (στοχαστική) μορφή
- Τοπικά μπορεί να περιγράψει ως άθροιση αρμονικών συνιστωσών



Ύψος κύματος σε αλλαγή των συνθηκών:

1. Αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου

- Αν η αλλαγή είναι $< 30^\circ$, δεν αλλάζουμε κάτι στον υπολογισμό.
- Αν η αλλαγή είναι $> 30^\circ$, τότε θεωρούμε τον υπάρχον κυματισμό ως swell και υπολογίζουμε ξανά το κύμα για τη νέα κατεύθυνση ανέμου.
- Ως γενικός κανόνας, το swell μειώνεται σε ύψος κύματος κατά 25% σε 12 ώρες

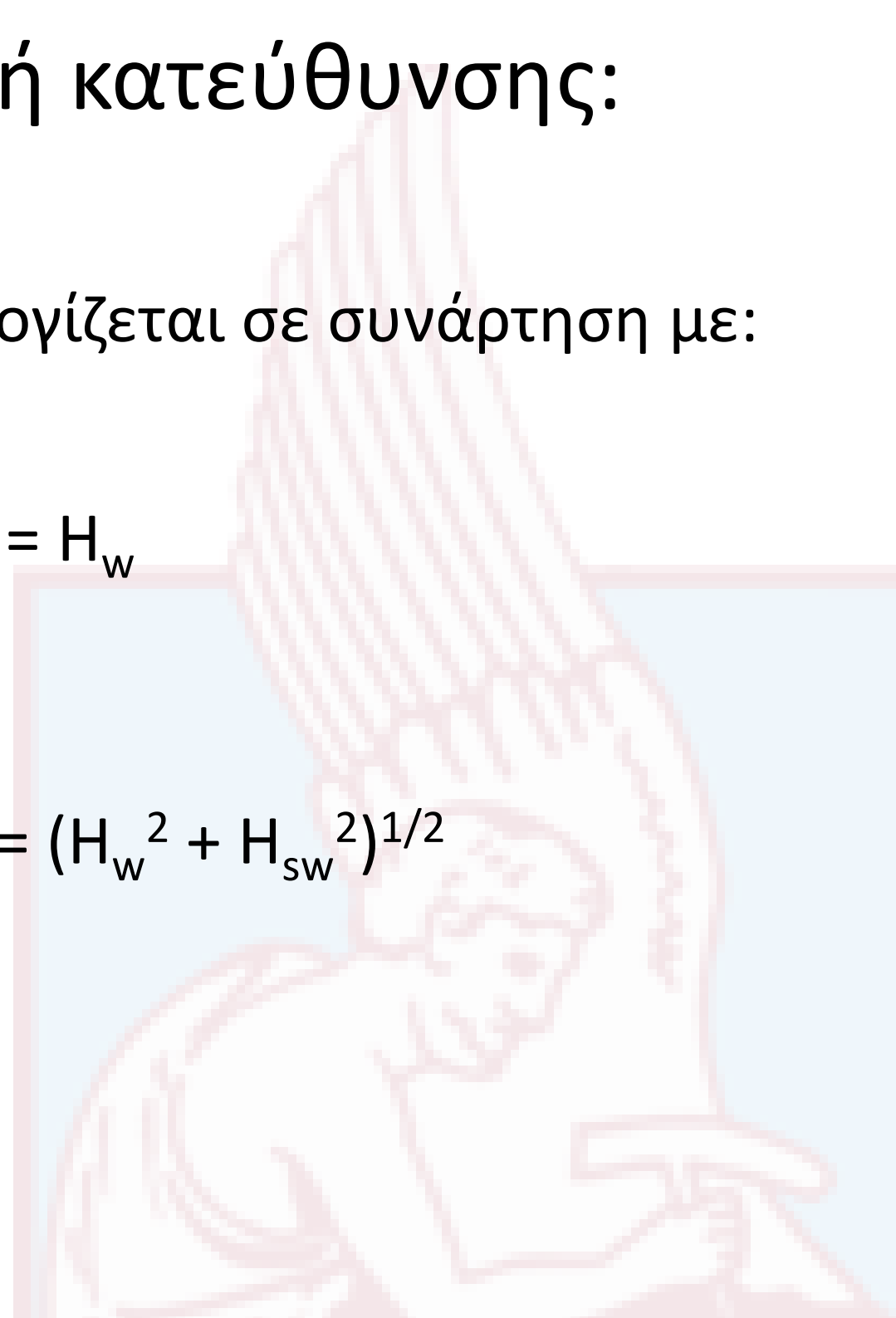
Ύψος κύματος σε αλλαγή κατεύθυνσης:

Το Συνολικό ύψος κύματος υπολογίζεται σε συνάρτηση με:

α) Ύψος ανεμογενών κυμάτων = H_w

β) Ύψος swell = H_{sw}

$$\text{Συνολικό ύψος κύματος} = (H_w^2 + H_{sw}^2)^{1/2}$$



Ύψος κύματος σε αλλαγή των συνθηκών:

2. Αύξηση ταχύτητας ανέμου (με αλλαγή κατεύθυνσης $< 30^\circ$)

- Έστω η νέα ταχύτητα ανέμου V_2
- Έστω ύψος κύματος τη στιγμή της αύξησης $= H_1$
- Έστω διάρκεια νέου ανέμου $= T_2$
- Βήμα 1: Υπολογίζουμε τη ισοδύναμη διάρκεια του νέου ανέμου (έστω T_1^*) που θα μας έδινε το ίδιο ύψος κύματος με H_1
- Βήμα 2: Υπολογίζουμε το ύψος κύματος για άνεμο με $T_{\text{tot}} = T_1^* + T_2$ και ταχύτητα V_2

Ύψος κύματος σε αλλαγή των συνθηκών:

3. Μειούμενη ταχύτητα ανέμου

- Όταν η ταχύτητα ανέμου μειώνεται κάτω από το όριο διατήρησης του συγκεκριμένου ύψους κύματος*, το κύμα μετατρέπεται σε swell.
- Ως γενικός κανόνας, το swell μειώνεται σε ύψος κύματος κατά 25% σε 12 ώρες

* Ελάχιστη ταχύτητα ανέμου που μπορεί να δημιουργήσει το συγκεκριμένο ύψος κύματος στο συγκεκριμένο fetch

Πρόβλεψη αποθάλασσας (swell)

Συνήθεις ερωτήσεις:

- Πότε θα φτάσει το swell σε κάποια περιοχή που απέχει από τη περιοχή που δημιουργήθηκε?
- Τι μήκος κύματος θα έχει?
- Τι ύψος θα έχει?

Απλές προσεγγίσεις, δεδομένου ότι η δημιουργία του swell έγινε σε μακρινή καταιγίδα και θεωρώντας τη περιοχή γένεσης ως ένα σημείο

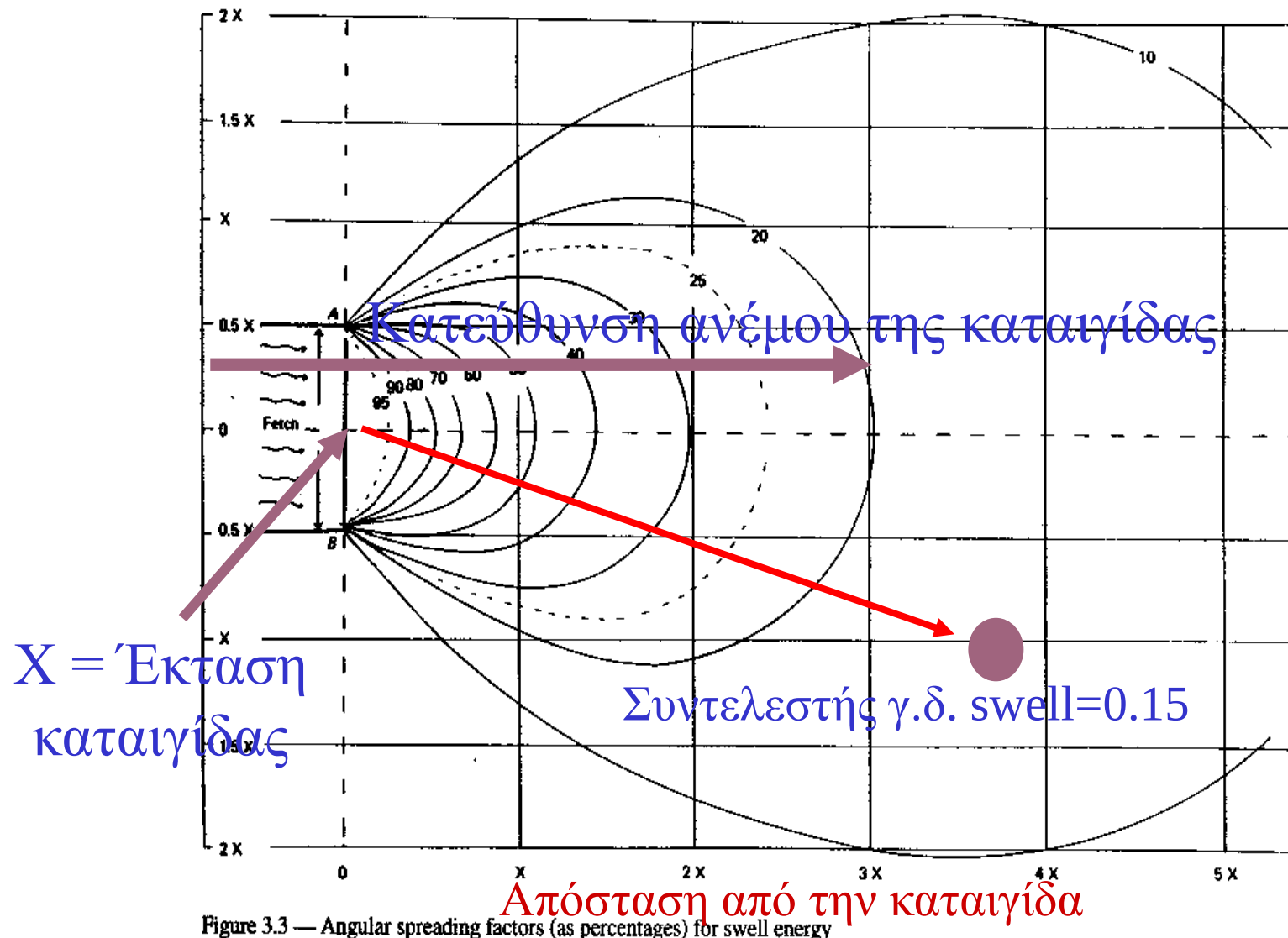
Μήκος κύματος και χρόνος προσέγγισης

- Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος ταξιδεύουν γρηγορότερα, άρα φτάνουν πιο σύντομα.
- Οι περίοδοι συνήθως κυμαίνονται μεταξύ $T \sim 0.5T_p$ και $1.5T_p$ (άλλες περίοδοι μπορεί να υπάρχουν αλλά αθροίζουν μικρά ποσά ενέργειας)
 - $L = 1.56T^2 \text{ m}$ (T σε secs)
 - $C = L/T$ (άρα τα μικρότερα σε περίοδο κύματα έχουν 3 φορές μικρότερη ταχύτητα – θα χρειαστούν 3-πλάσιο χρόνο να ταξιδέψουν την ίδια απόσταση)

Ύψος swell

- Εξαρτάται από:
 - Το ύψος του αρχικού κύματος και το fetch της περιοχής γένεσης
 - Γωνιακή «διάχυση» του κύματος (το ύψος μειώνεται με την απόσταση καθώς η ενέργεια «απλώνεται» σε μεγαλύτερη περιοχή)
 - Γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του ανέμου και της κατεύθυνσης στην οποία συμβαίνει η καταιγίδα.

Γωνιακή διάχυση του Swell μιας καταιγίδας

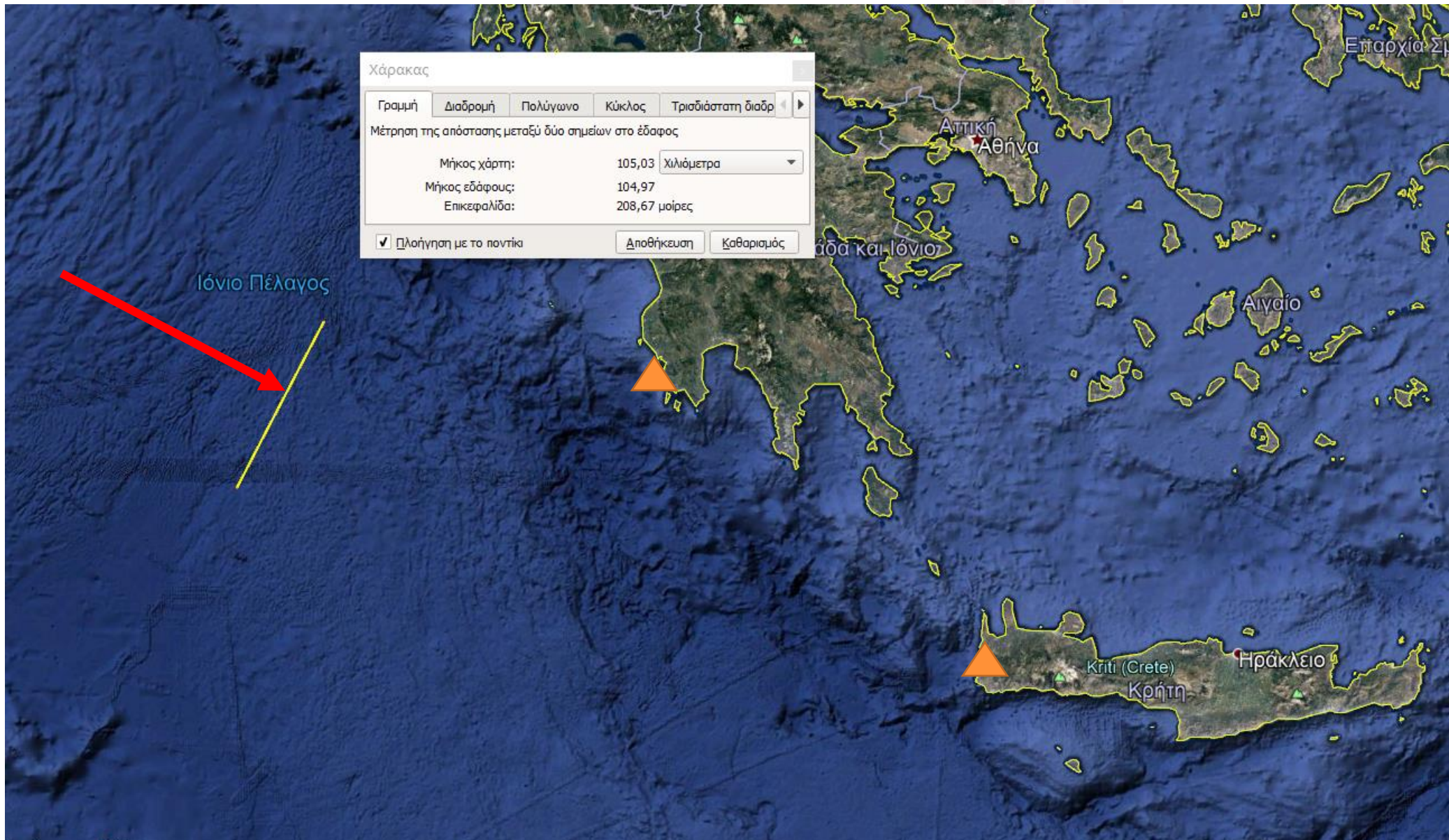


% διάχυση της ενέργειας

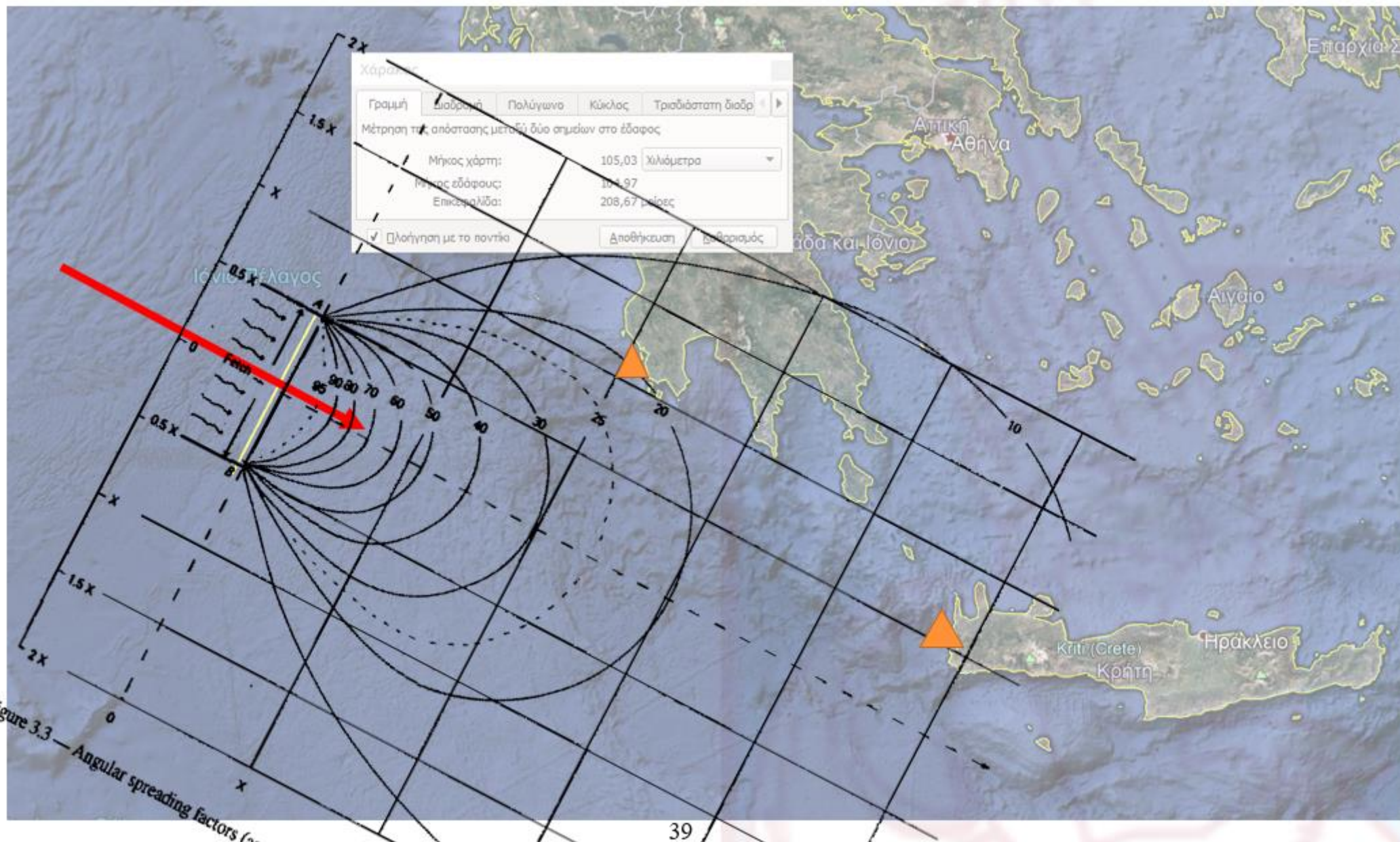
Χρησιμοποιούμε τη ρίζα του συντελεστή γ.δ. swell:

$$\text{Swell} = \sqrt{0.15 * H_s}$$

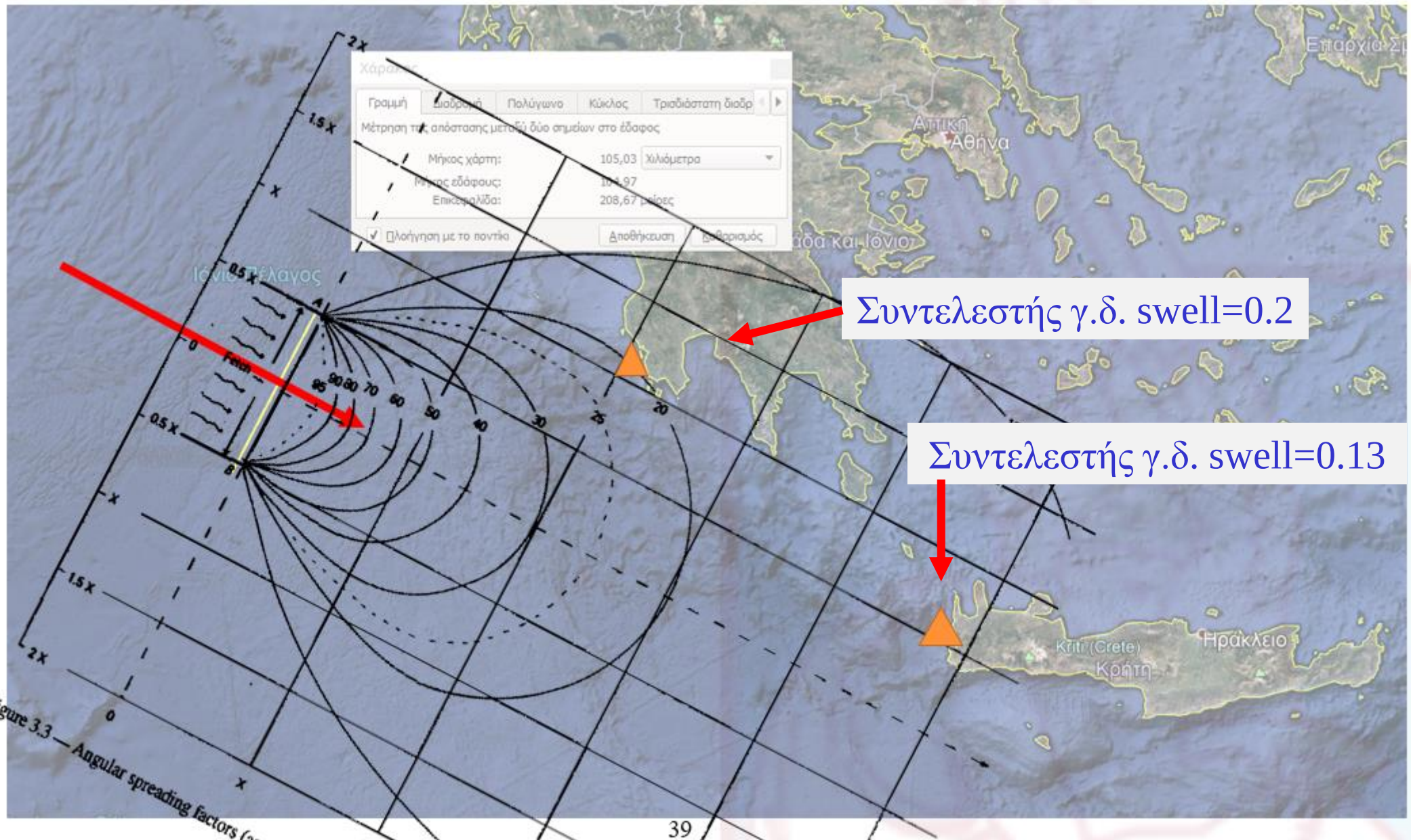
Γωνιακή διάχυση του Swell μιας καταιγίδας



Γωνιακή διάχυση του Swell μιας καταιγίδας

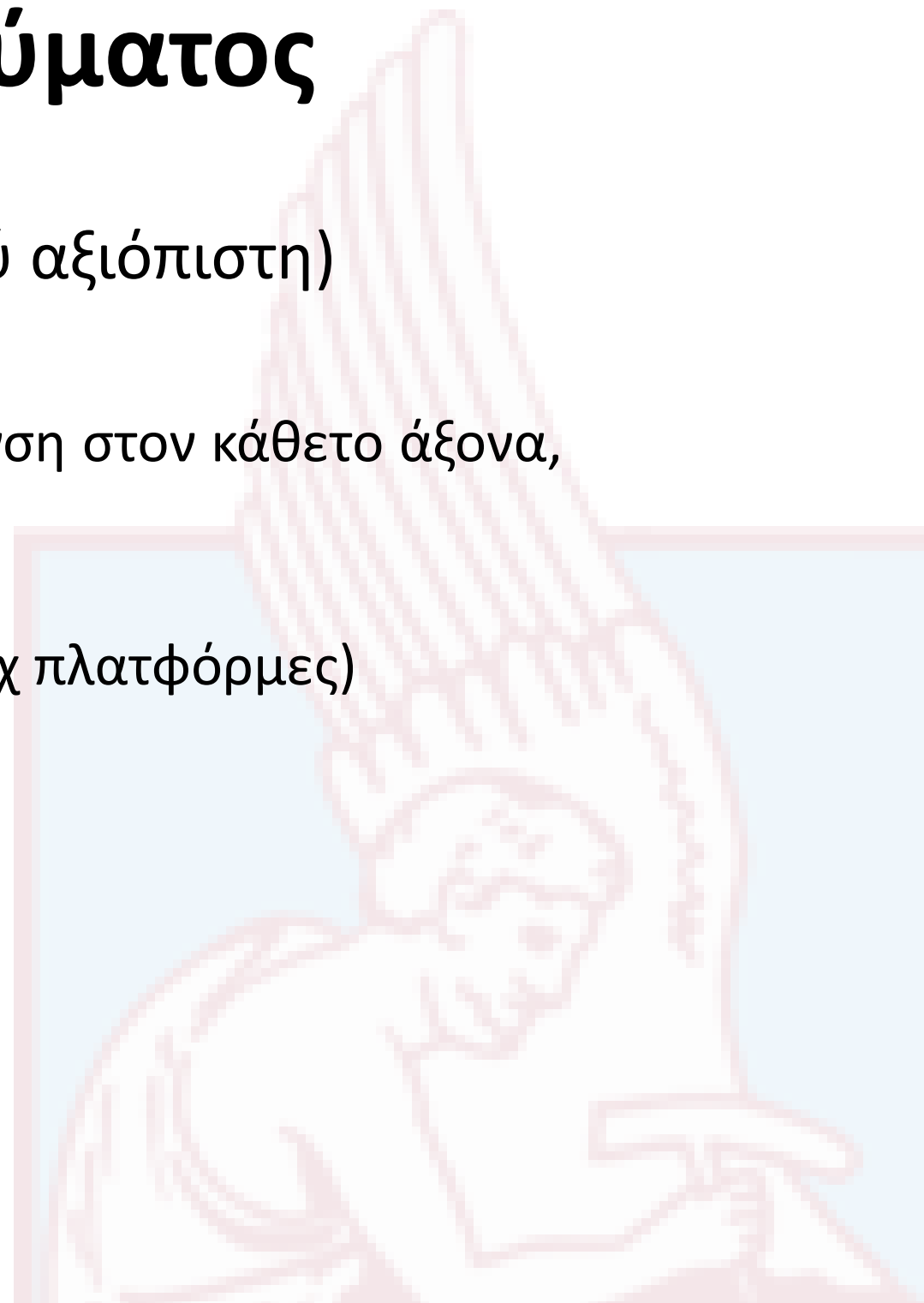


Γωνιακή διάχυση του Swell μιας καταιγίδας

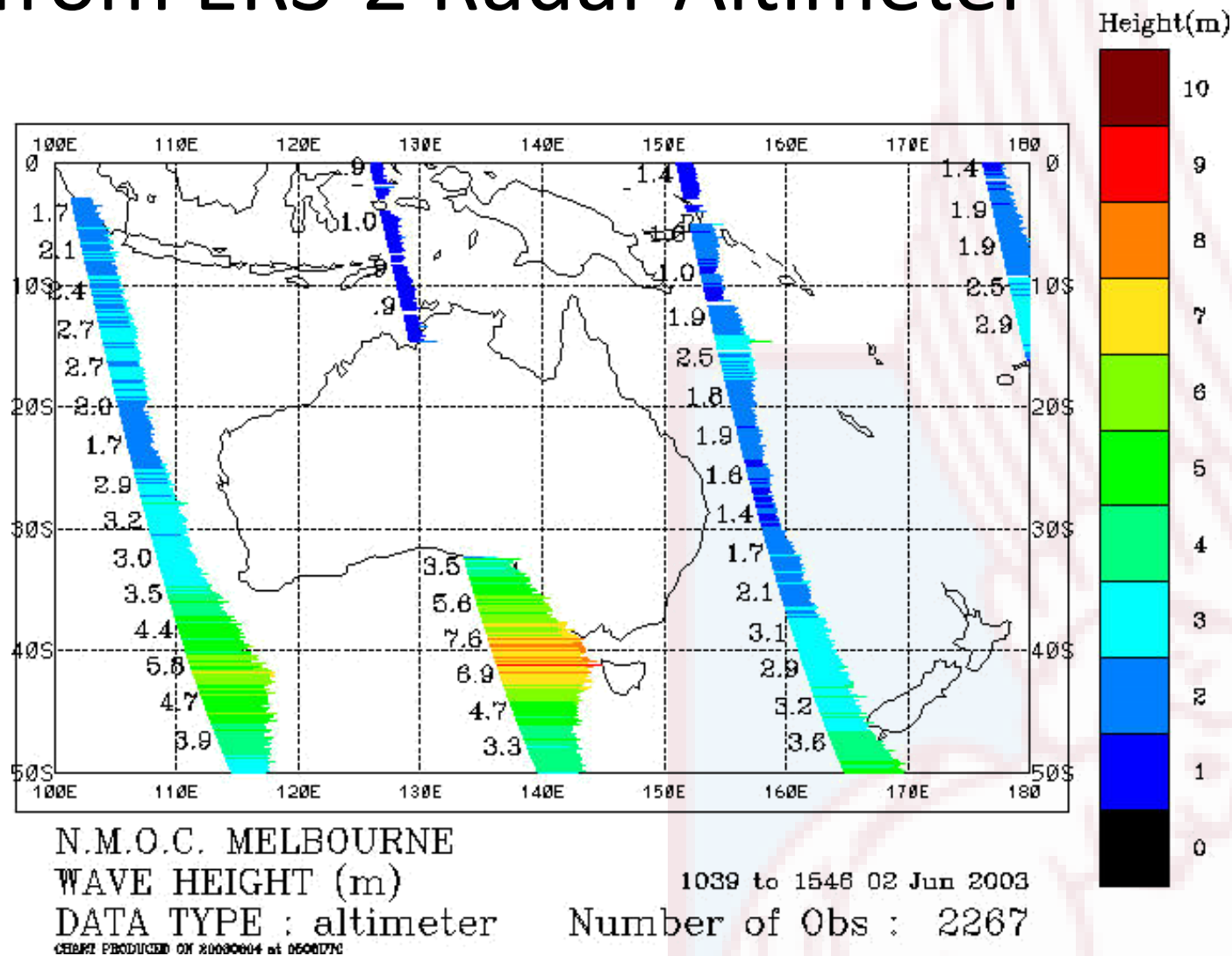


Μετρήσεις ύψους κύματος

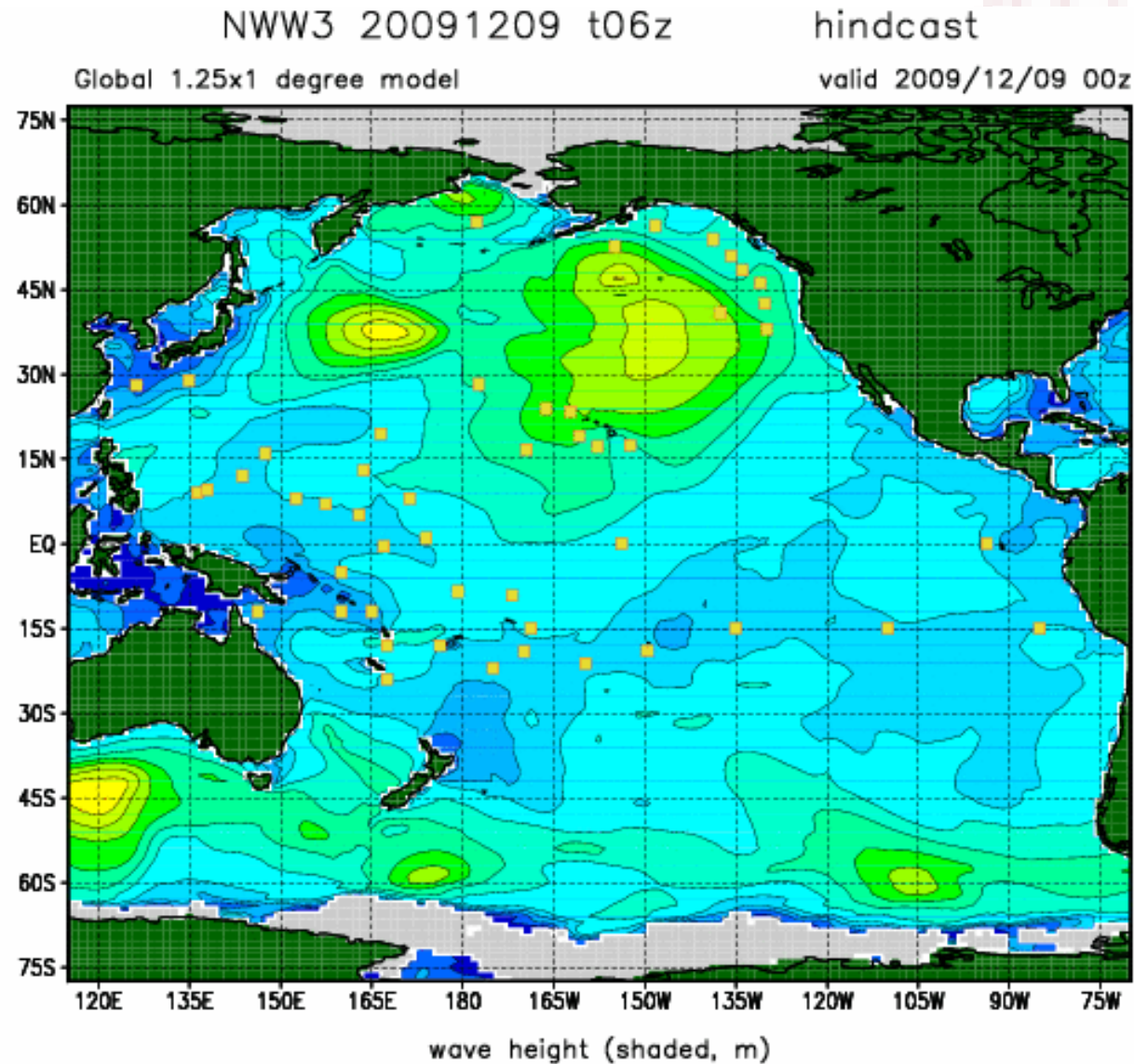
- Οπτική παρατήρηση (όχι πολύ αξιόπιστη)
- Με όργανα μέτρησης
 - Βuoys (μετρώντας την επιτάχυνση στον κάθετο άξονα, υπολογίζεται το ύψος)
 - Μετρητές πίεσής
 - Laser (Από μεγαλύτερο ύψος πχ πλατφόρμες)
- Τηλεπισκοπικά
 - Ραντάρ



Τηλεπισκοπικά: Waves from ERS-2 Radar Altimeter



Αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης κυματισμού



NOAA/NWS/NCEP Marine Modeling and Analysis Branch, 2009/12/09



Τέλος:

Η πρόγνωση ενός κύματος δεν μπορεί να είναι πιο ακριβής από την ακρίβεια πρόγνωσης του ανέμου που θα το δημιουργήσει!

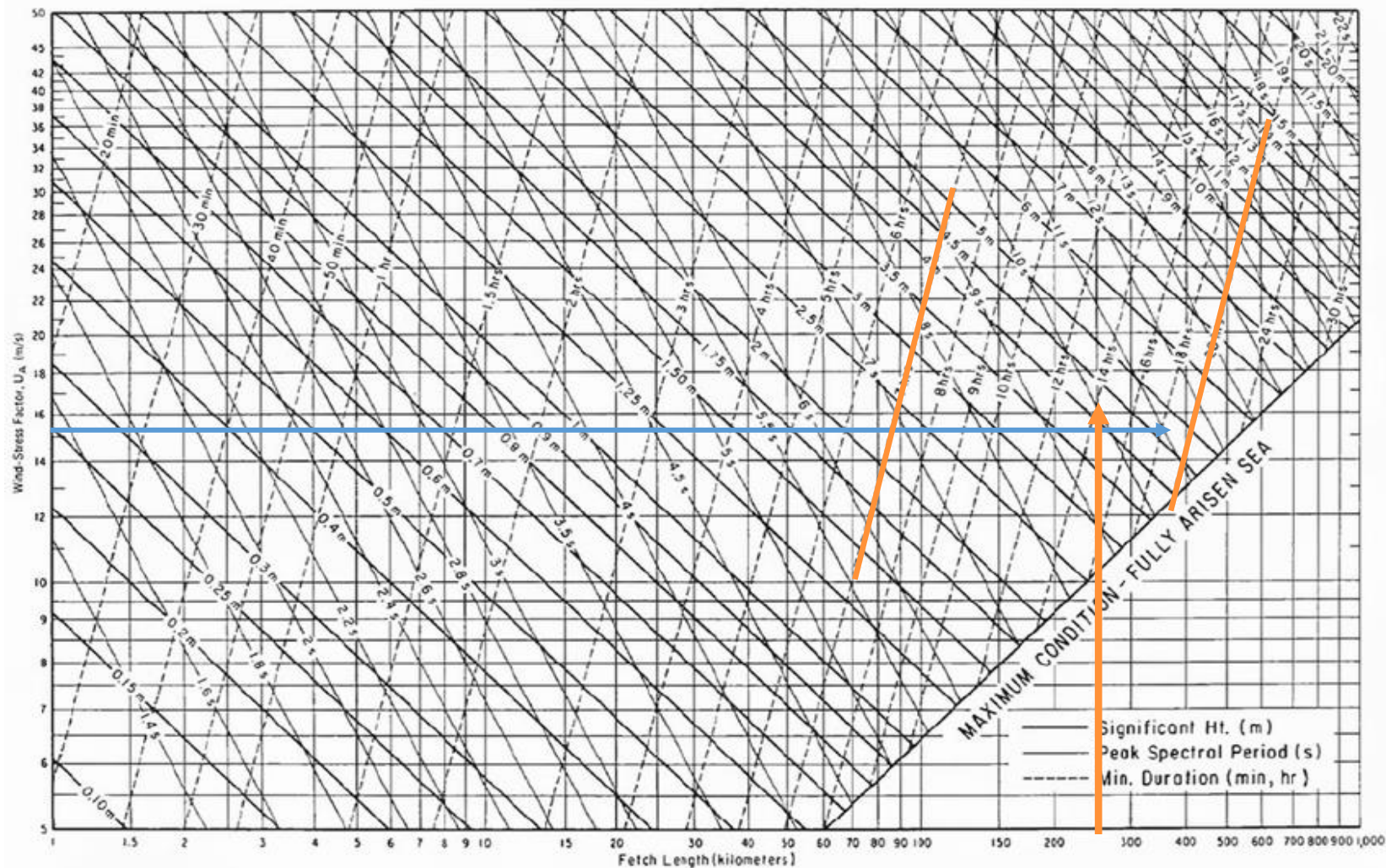
Κομφούκιος

Βιβλιογραφία

- Kamphuis J.W., Introduction to Coastal Engineering and Management, 2000, Advanced series on Ocean Engineering Vol.16, World Scientific Publishing
- Sorensen R.M., Basic Coastal Engineering (3rd Edition), 2006, Springer
- U.S.A.C.E., Coastal Engineering Manual, 2002
- U.S.A.C.E., Shore Protection Manual, 1984
- W.M.O., Guide to Wave Analysis and Forecasting (2nd edition), 1998
- Κουτίτας Χ., 1998, Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα, Εκδόσεις Ζήτη
- Καραμπάς Θ, Κρεστενίτης Γ, Κουτίτας Χ, 2015. Ακτομηχανική – Έργα Προστασία Ακτών. Σύνδεσμος Ελληνικών ακαδημαϊκών βιβλιοθηκών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου. ISBN: 978-960-603-378-0

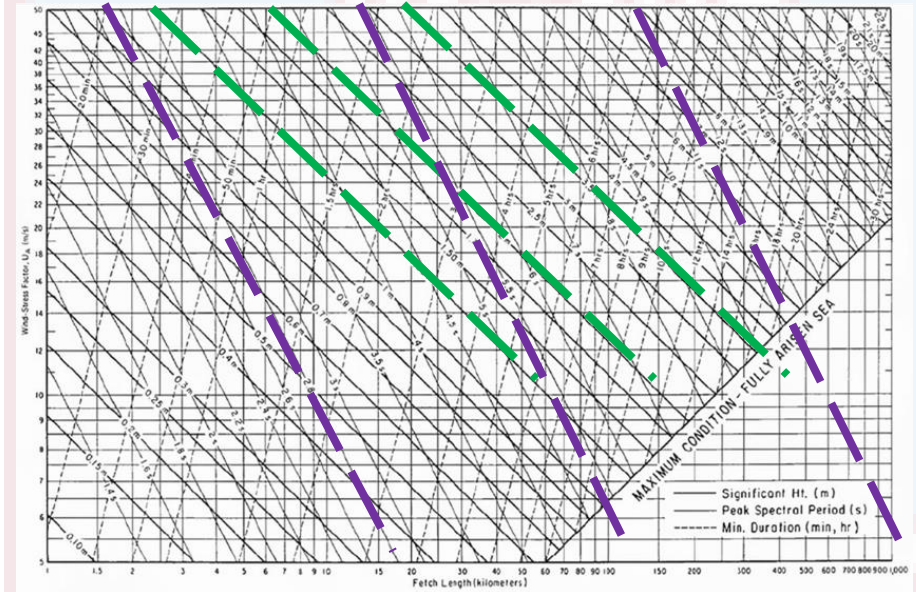
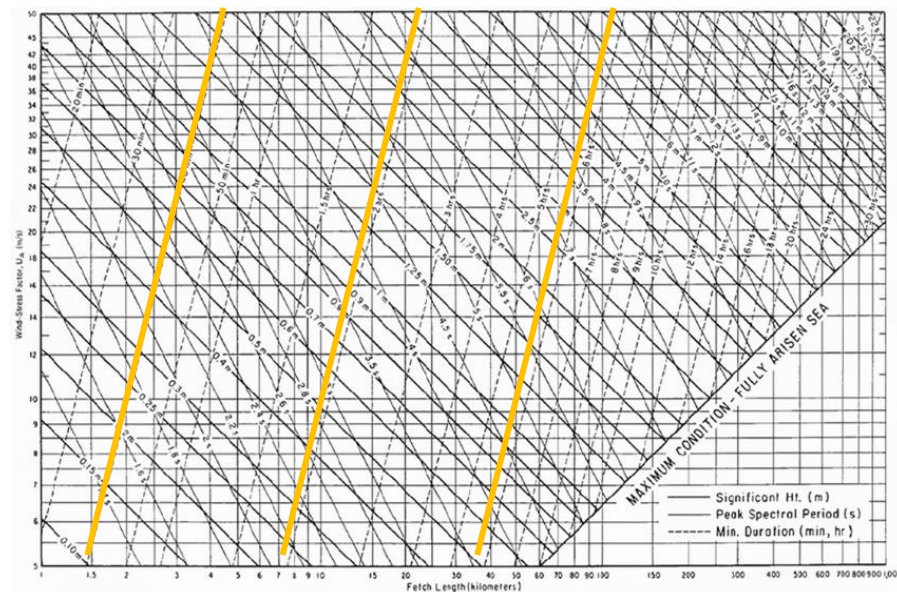
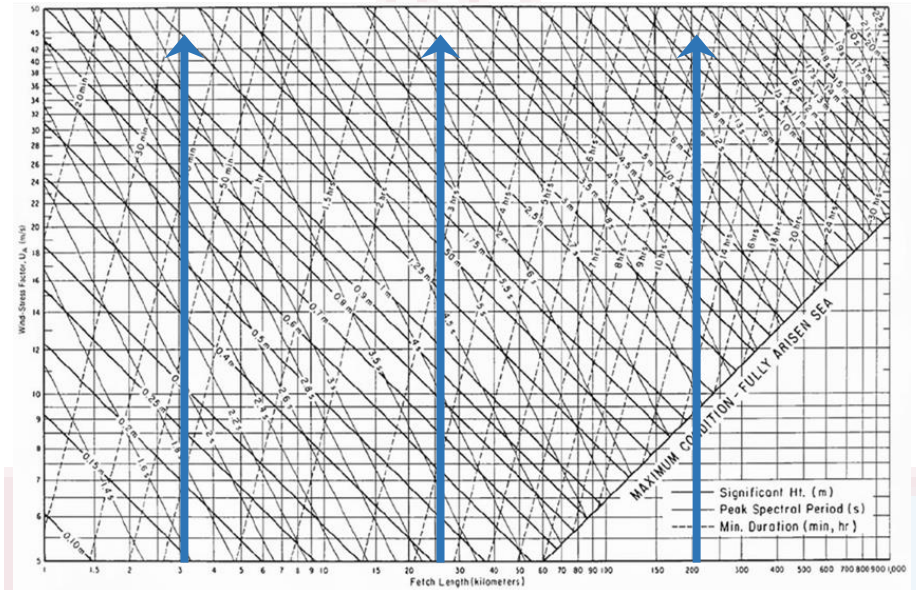
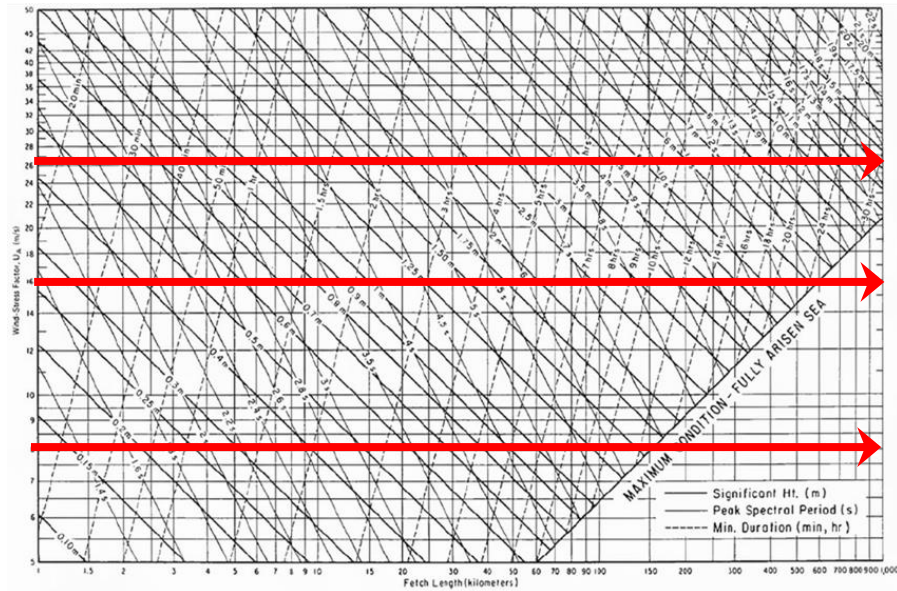
ΑΣΚΗΣΗ 8

- Υπολογίστε τα ζητούμενα της άσκησης 7 με χρήση των διαγραμμάτων SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

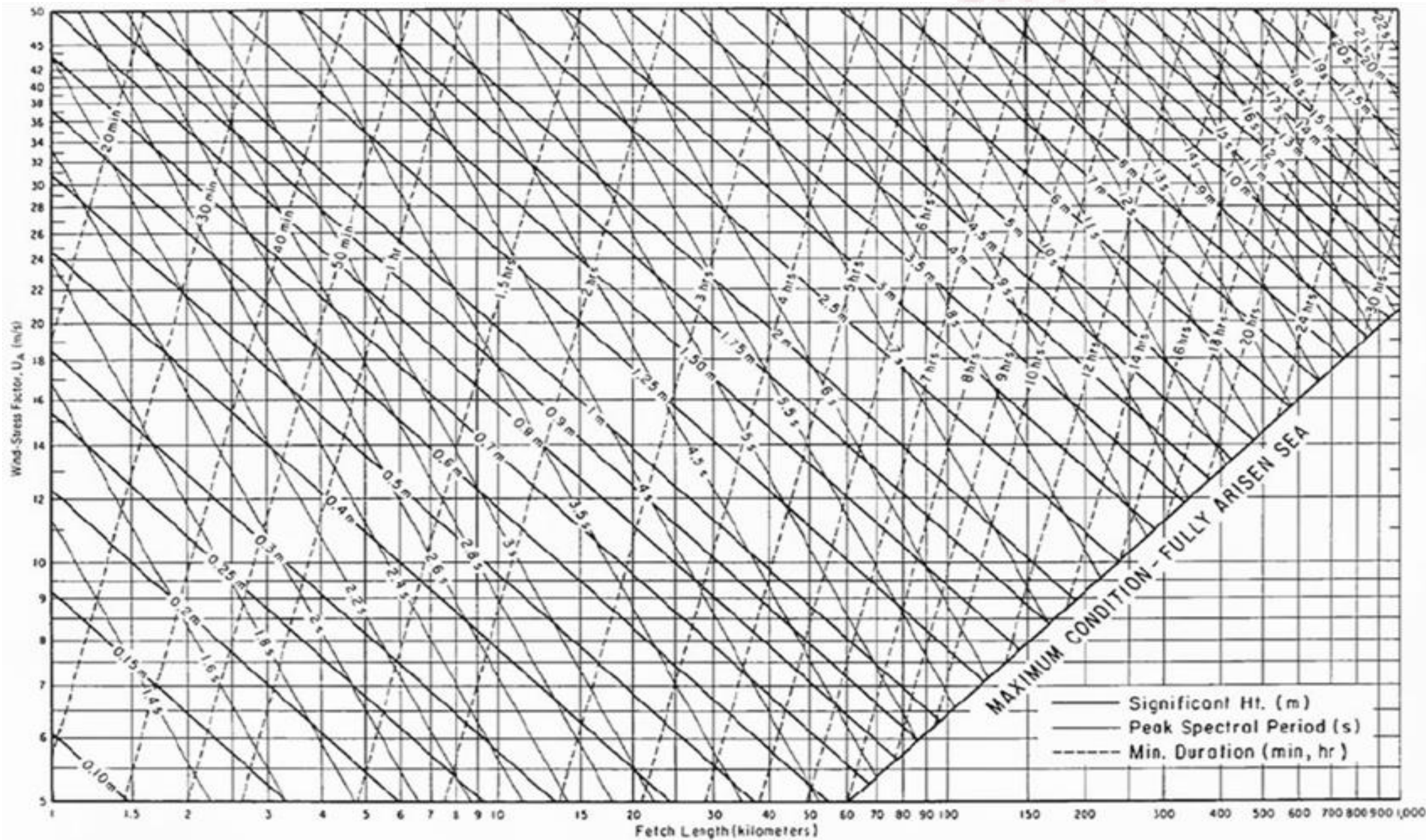
SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

1) Για $U_A = 26.38 \text{ m/s}$, $t_d = 1 \text{ h}$, Fetch = 250 Km

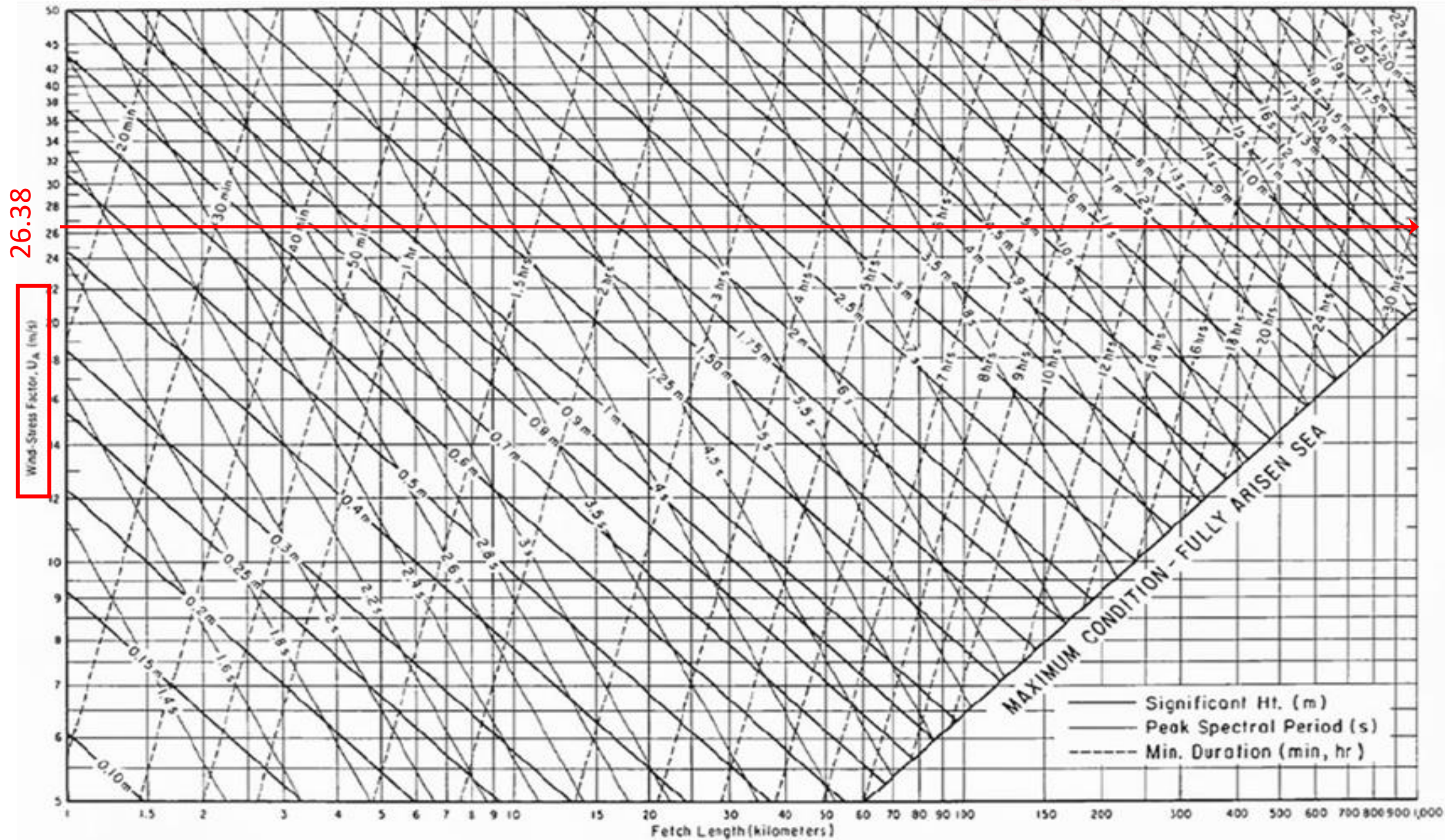
SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

1) Για $U_A = 26.38 \text{ m/s}$, $t_d = 1 \text{ h}$, Fetch = 250 Km

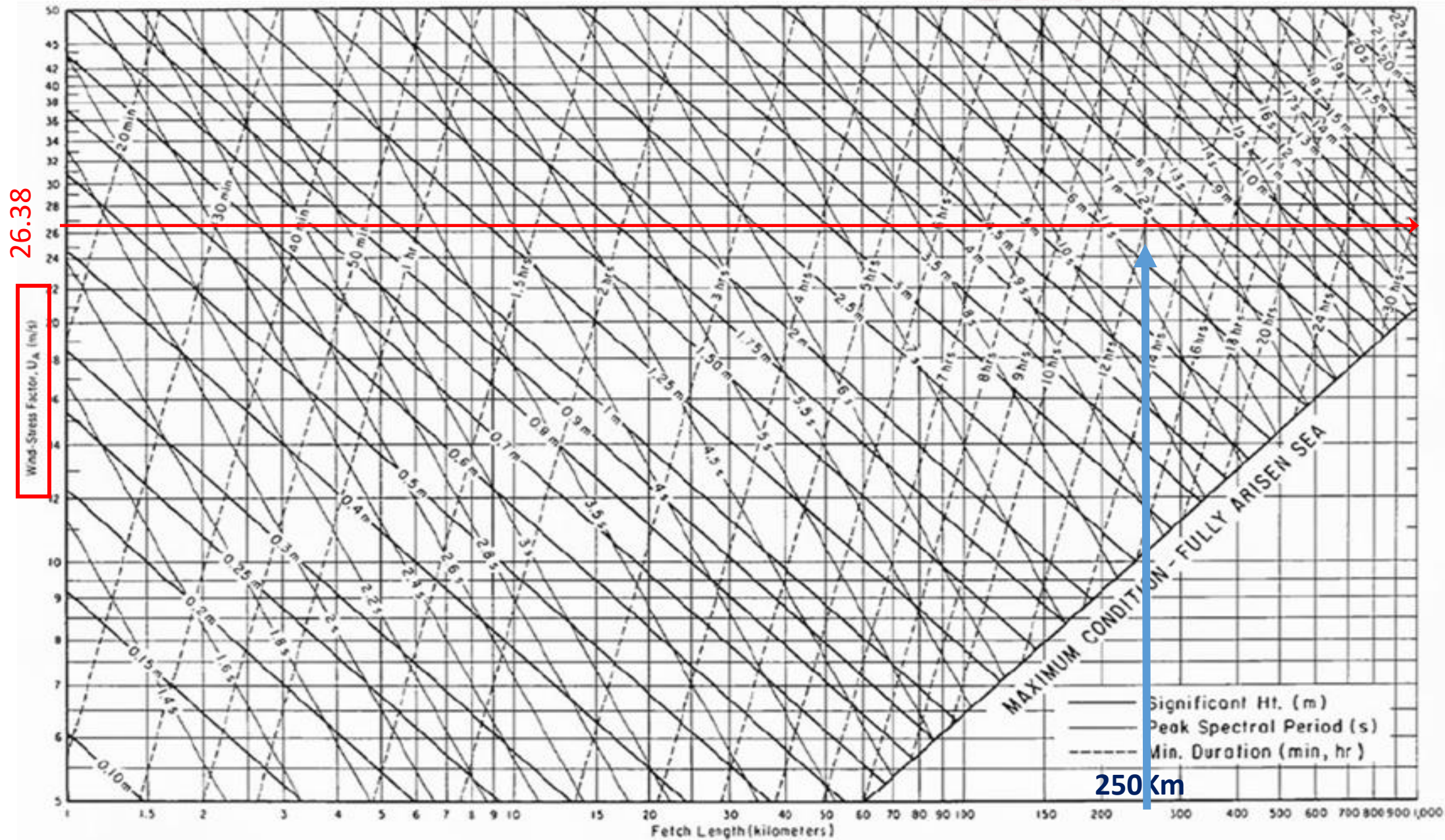
SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

1) Για $U_A = 26.38 \text{ m/s}$, $t_d = 1 \text{ h}$, Fetch = 250 Km

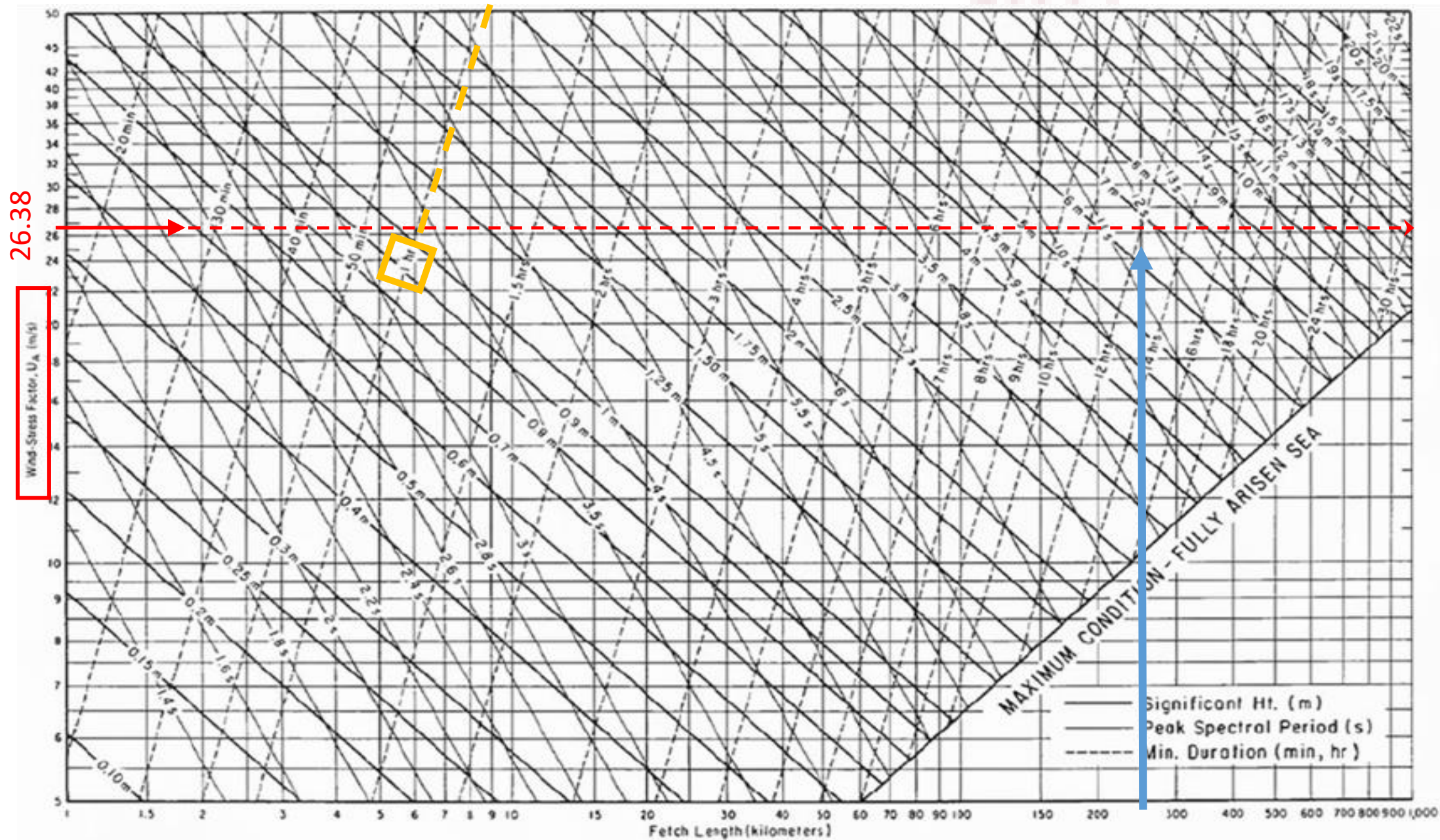
SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

1) Για $U_A = 26.38 \text{ m/s}$, $t_d = 1 \text{ h}$, Fetch = 250 Km

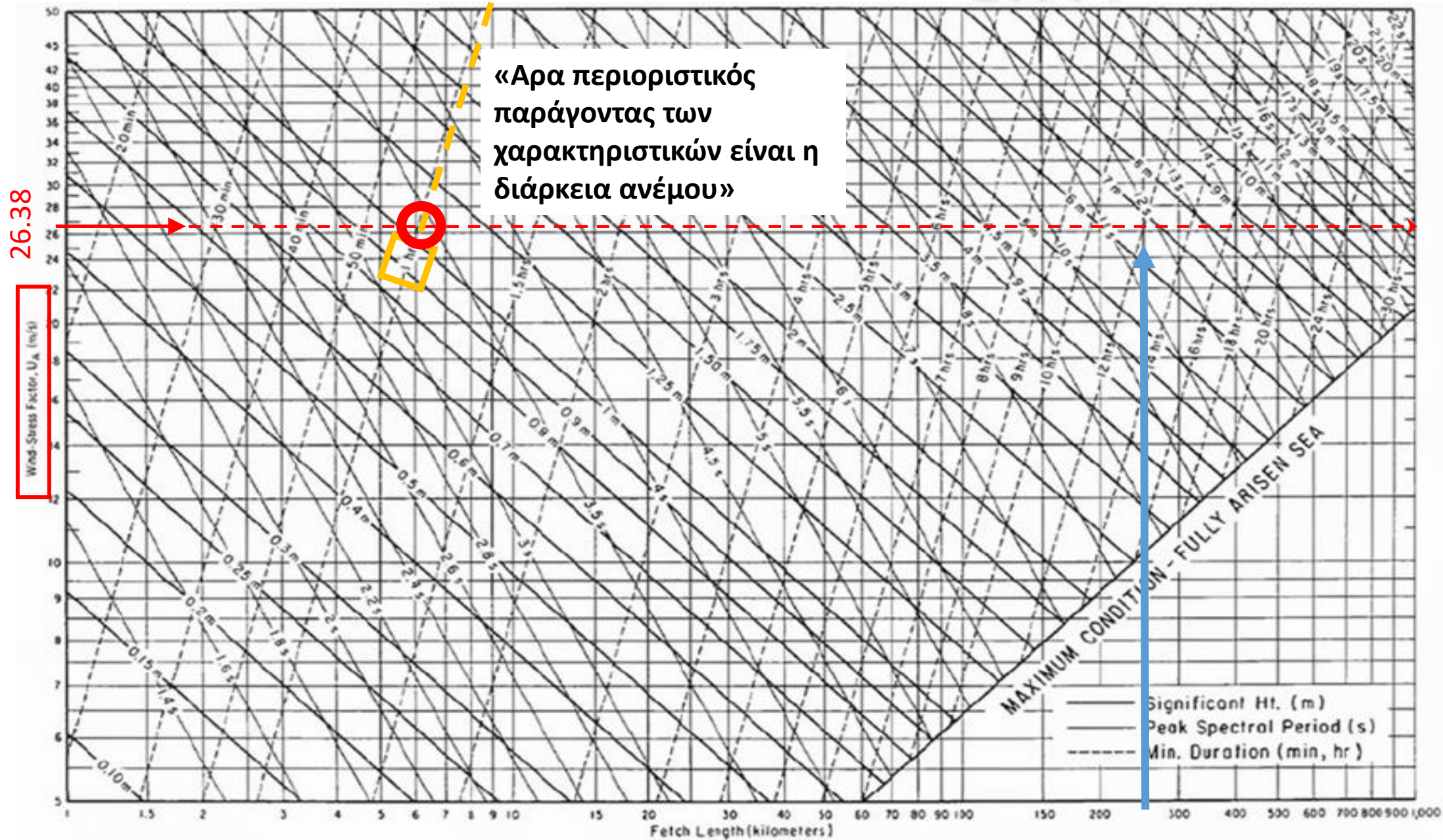
SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

1) Για $U_A = 26.38\text{m/s}$, $t_d=1\text{h}$, Fetch = 250Km

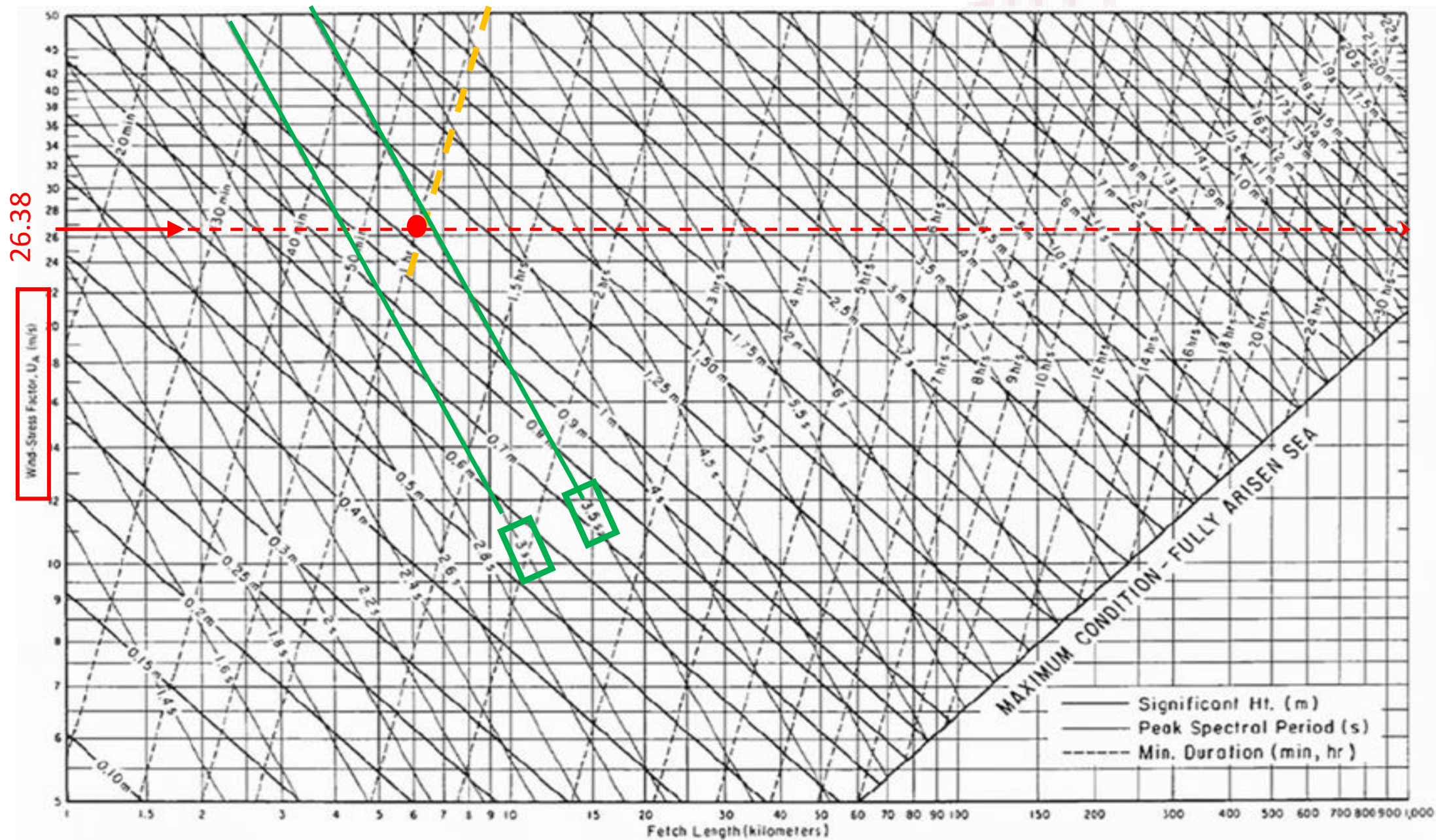
SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

1) Για $U_A = 26.38 \text{ m/s}$, $t_d = 1 \text{ h}$, Fetch = 250 Km

SMB

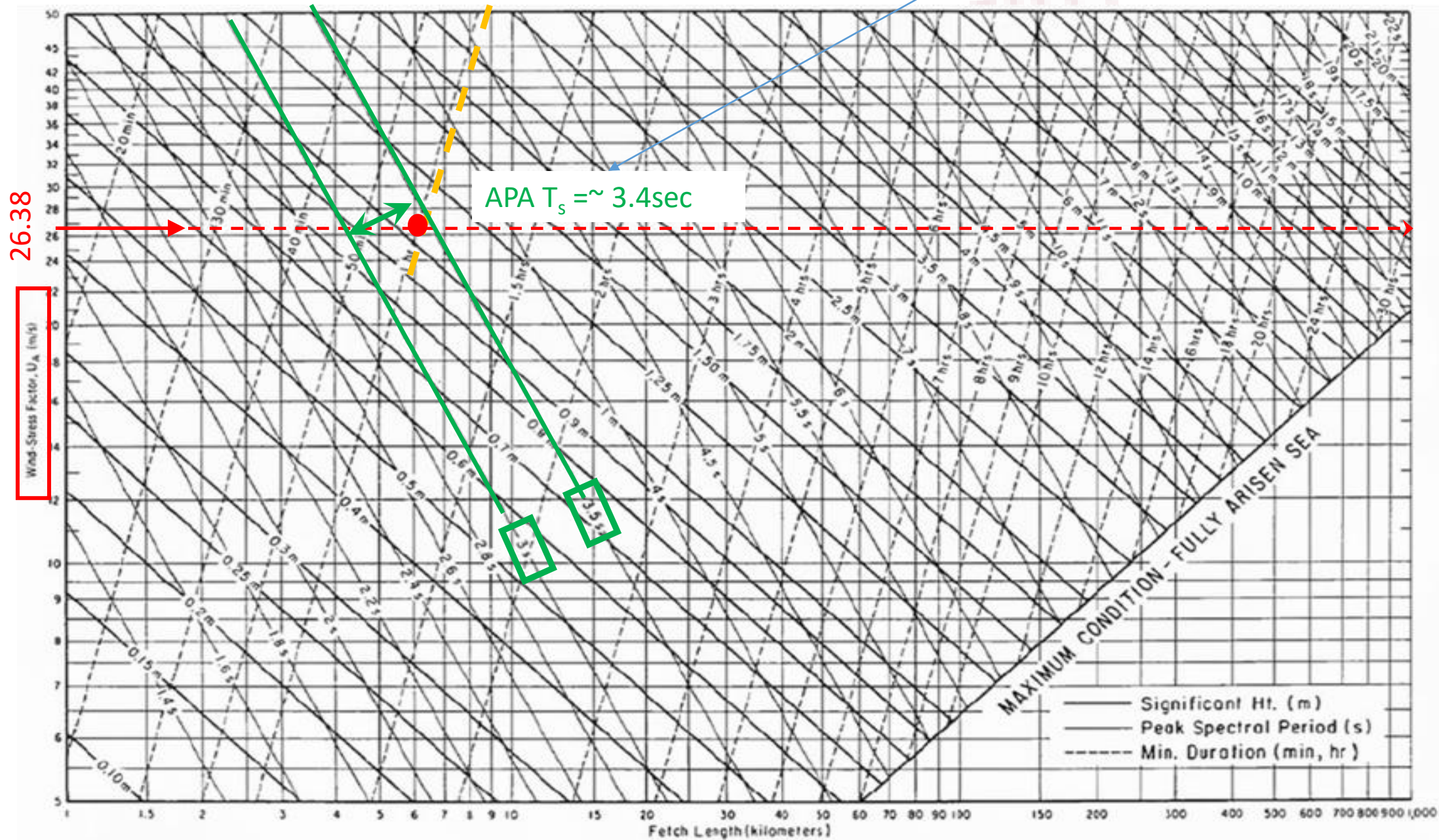


ΑΣΚΗΣΗ 8

1) Για $U_A = 26.38 \text{ m/s}$, $t_d = 1 \text{ h}$, Fetch = 250 Km

“eye interpolation”

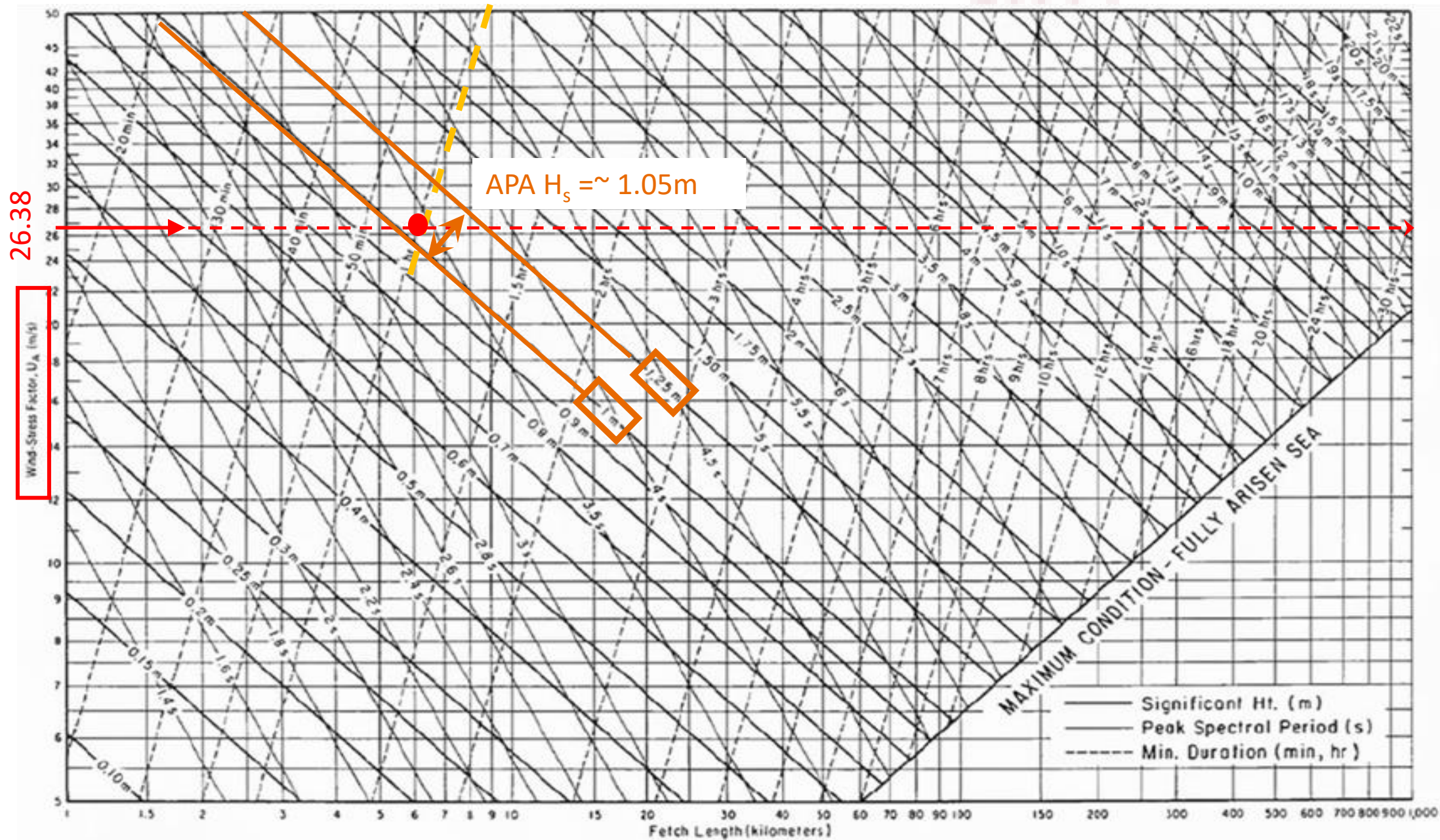
SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

1) Για $U_A = 26.38 \text{ m/s}$, $t_d = 1 \text{ h}$, Fetch = 250 Km

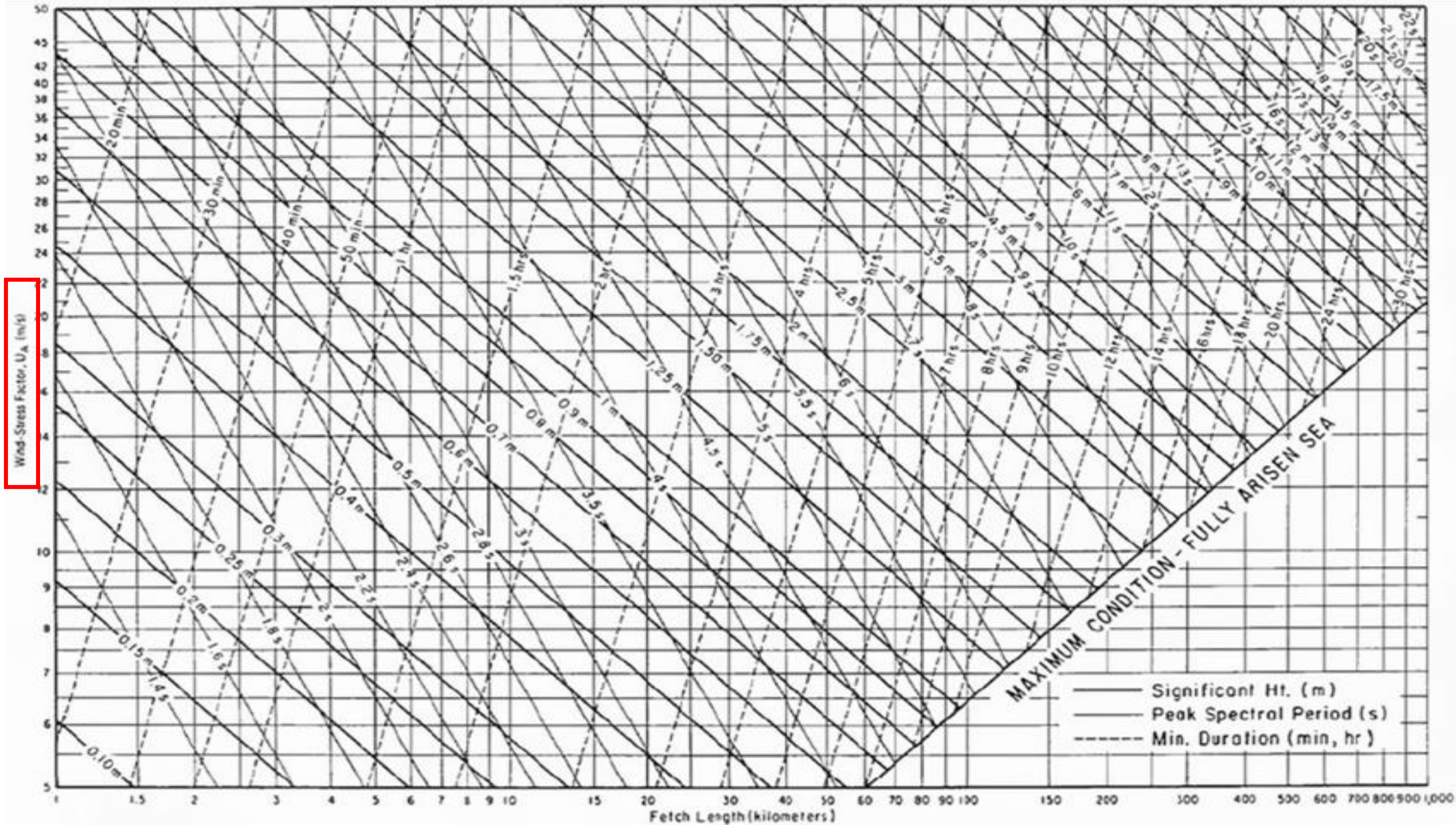
SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

2) Για $U_A = 26.38 \text{ m/s}$, $t_d = 24 \text{ h}$, Fetch = 250 Km

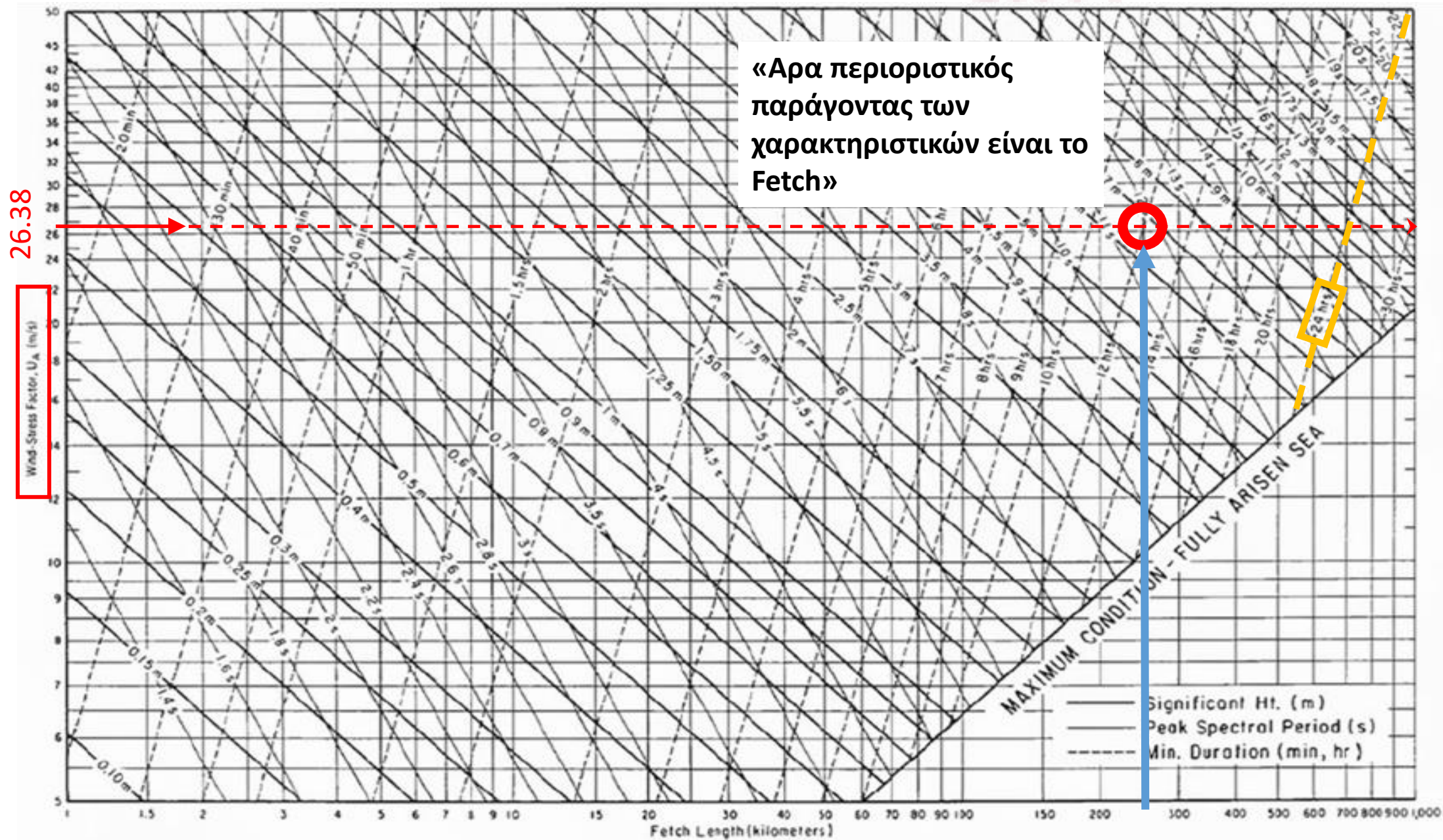
SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

2) Για $U_A = 26.38\text{m/s}$, $t_d=24\text{h}$, Fetch = 250Km

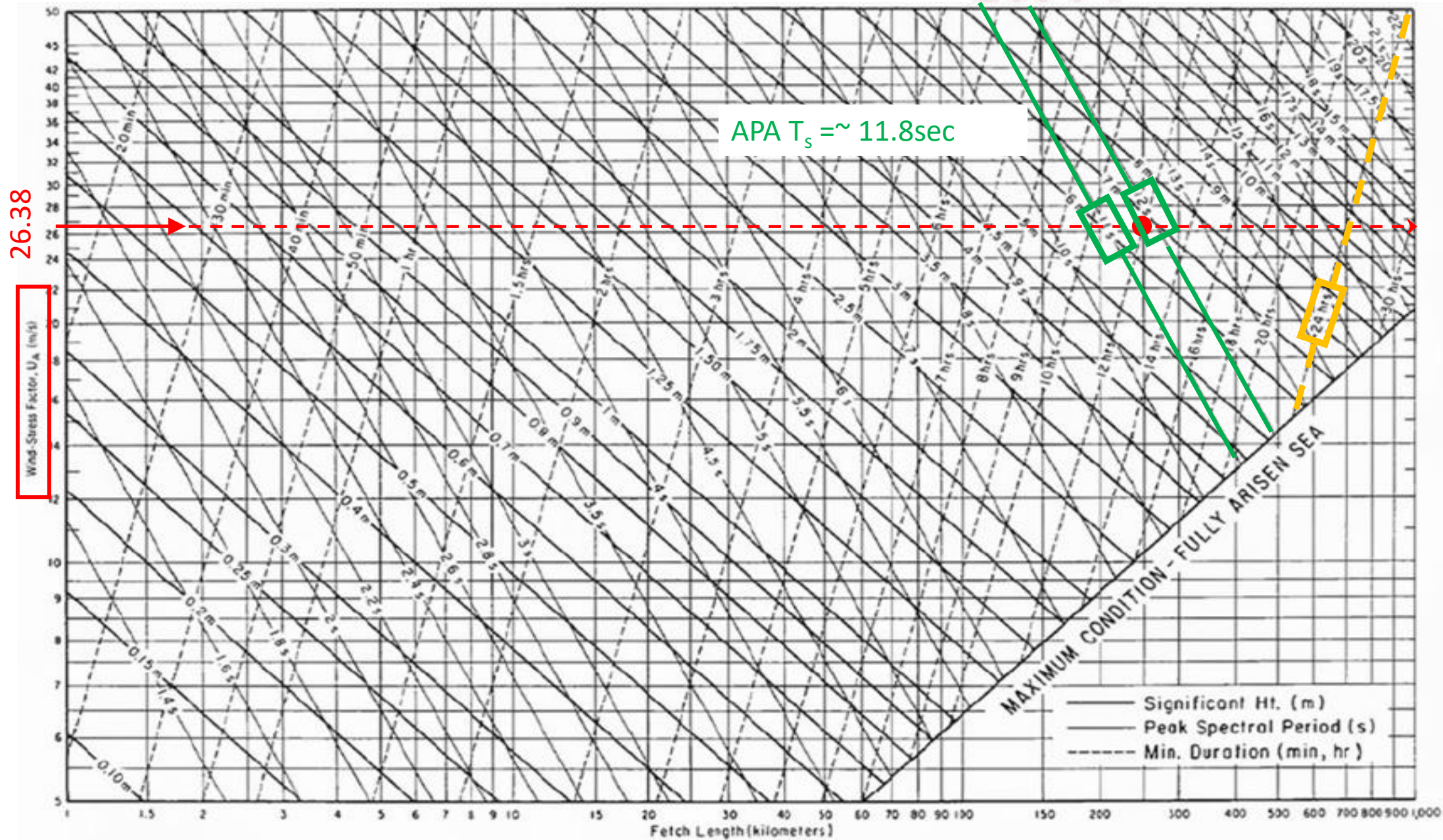
SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

2) Για $U_A = 26.38\text{m/s}$, $t_d=24\text{h}$, Fetch = 250Km

SMB



ΑΣΚΗΣΗ 8

2) Για $U_A = 26.38\text{m/s}$, $t_d=24\text{h}$, Fetch = 250Km

SMB

