

Τμήμα Πολιτικών και Περιβαλλοντολόγων Μηχανικών  
Τεχνολογικό Ινστιτούτο Μασαχουσέτης (MIT)

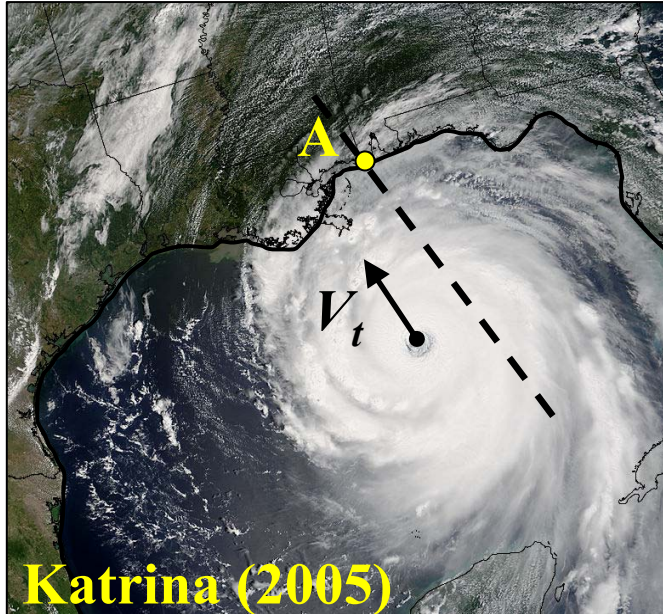
*Εκτίμηση Επικινδυνότητας  
Βροχοπτώσεων από Τροπικούς  
Κυκλώνες*

Ανδρέας Λαγγούσης

Τρίτη 23 Ιουνίου, 2009

# Αντικείμενο

## Επικινδυνότητα βροχοπτώσεων από ΤΚ στην θέση Α:



$\lambda_D(i)$ : ρυθμός με τον οποίο η τυχαία μεταβλητή  $I_{max}(D)$  υπερβαίνει την τιμή  $i$  στην θέση Α (γεγονότα/έτος)

$I_{max}(D)$ : μέγιστη ένταση βροχόπτωσης διάρκειας  $D$  στην θέση Α

Διακινδύνευση

$$\Rightarrow \lambda_D(i) = \lambda \int_{\text{all } \omega} P[I_{max}(D) > i | \omega] P[\omega] d\omega$$

ρυθμός αφίξεως ΤΚ  
[γεγονότα/έτος]

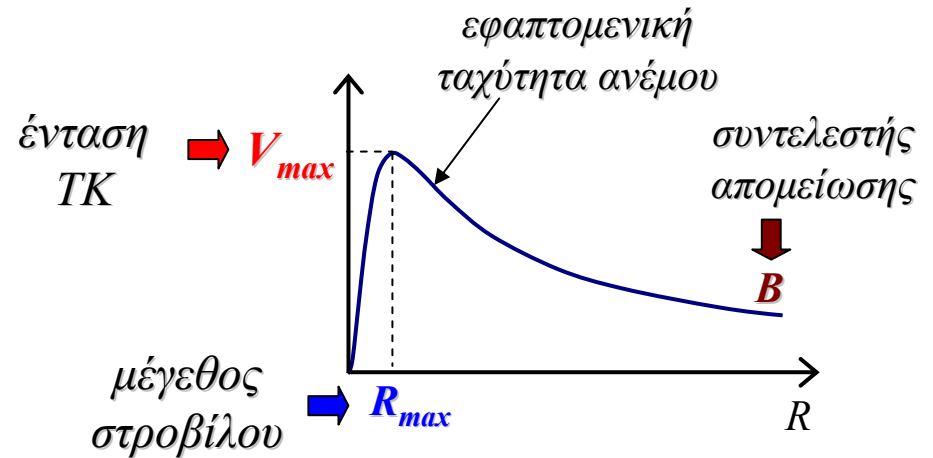
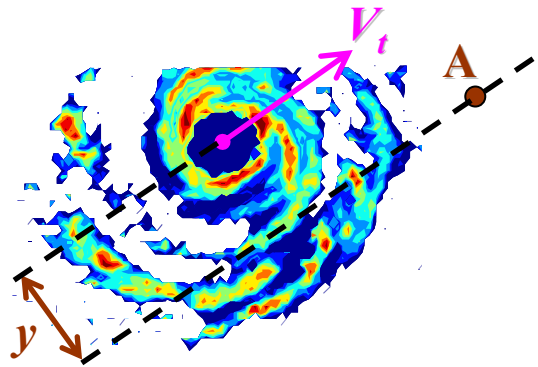
χαρακτηριστικά  
ΤΚ

στόχος

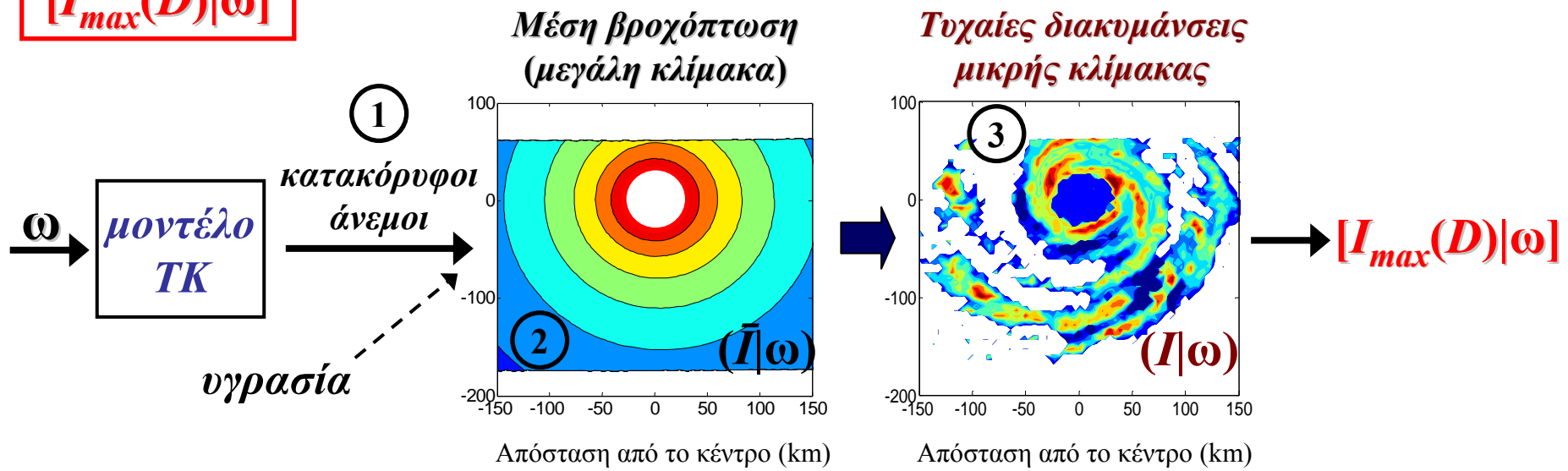
μοντέλο επαναφοράς ΤΚ  
(βιβλιογραφία)

# Εκτίμηση επικινδυνότητας

➤ παράμετροι  $\omega = [V_{max}, R_{max}, B, V_t, y]$



$$[I_{max}(D)|\omega]$$



# Διάγραμμα παρουσιάσεως

## Μέρος 1: Ταχύτητες εντός του ΟΣ

- Υπάρχοντα μοντέλα οριακού στρώματος (ΟΣ) για ΤΚ  $\Rightarrow$  περιορισμοί
- Βελτιωμένο μοντέλο οριακού στρώματος **MS**
- Πεδία ταχυτήτων  $\Rightarrow$  σύγκριση με **MM5**

## Μέρος 3: Τυχαίες διακυμάνσεις

- Διακυμάνσεις του πεδίου βροχής σε κλίμακα ΤΚ
- Τυχαίες διακυμάνσεις μικρότερης κλίμακας

## Μέρος 2: Βροχή από ανέμους

- **MS** + υγρασία  $\Rightarrow$  **MSR** (βροχή)
- Βαθμονόμηση με χρήση δορυφορικών δεδομένων **PR** (precipitation radar)

## Μέρος 4: Εφαρ. στην Νέα Ορλεάνη

- Μοντέλο επαναφοράς χαρακτηριστικών  $\omega$  του ΤΚ
- Θεωρητικές όμβριες καμπύλες για ΤΚ
- Σύγκριση με ιστορικά αποτελέσματα μεγίστων τιμών βροχόπτωσης (όλοι οι τύποι καταιγίδων)

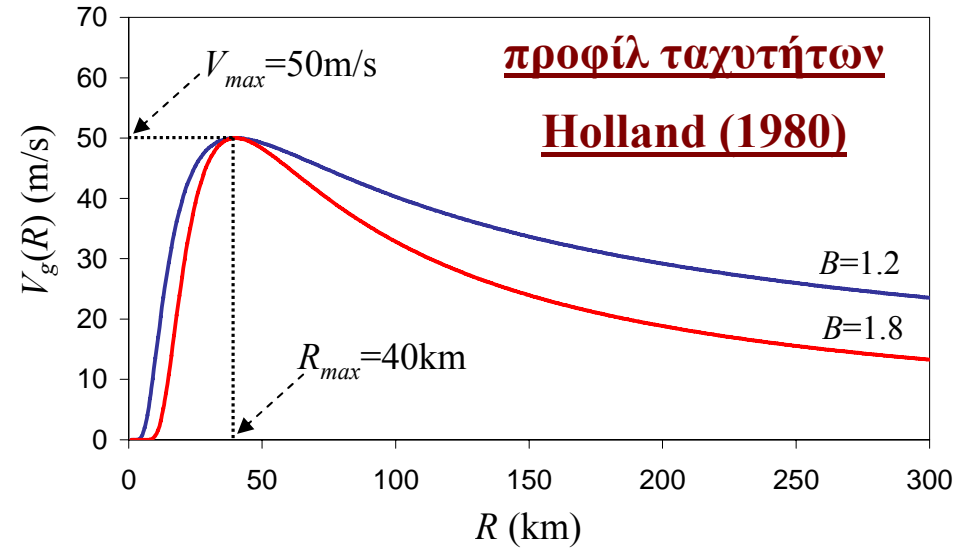
➤ Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις

# 1. Επίλυση εξισώσεων οριακού στρώματος

συνθήκη άνω ορίου

$$U=0 \quad V=V_g \quad \rightarrow$$

$$\frac{\partial W}{\partial Z} = \frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{\partial V}{\partial Z} = 0$$



κυρίως στρόβιλος

άνω όριο ΟΣ ( $Z=H$ )

$W_H$

εξισώσεις ΟΣ

$$U \frac{\partial U}{\partial R} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \theta} + W \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{V_g^2 - V^2}{R} + f(V_g - V) = K \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2}$$

$$U \frac{\partial V}{\partial R} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \theta} + W \frac{\partial V}{\partial Z} + \frac{UV}{R} + fU = K \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2}$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(RU)}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0$$

$U$ : ακτινική  $V$ : εφαπτομενική  
 $W$ : κατακόρυφη

στερεό όριο ( $Z=0$ )

συρτικές τάσεις με συντελεστή συμπαράσυρσης  $C_D$

# Μοντέλο οριακού στρώματος 1: Kerpert (2001)

## Χαρακτηριστικά:

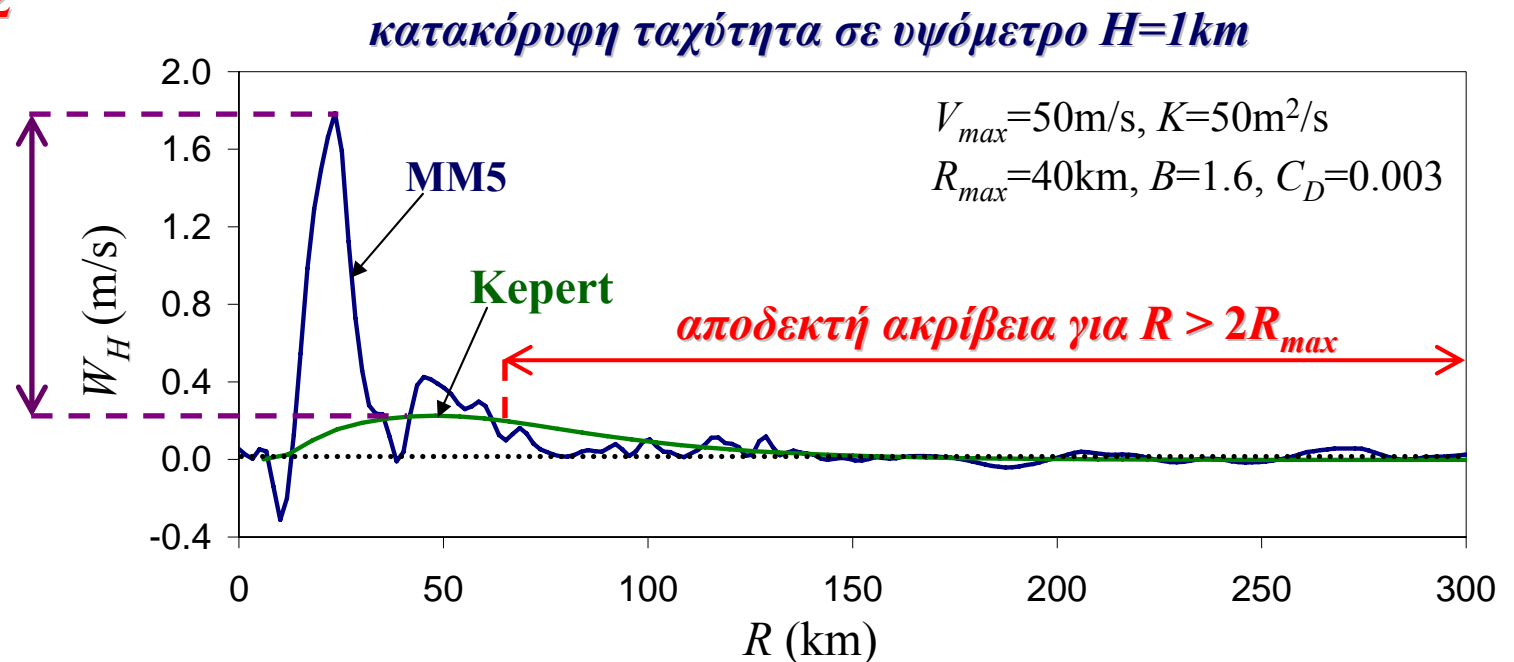
- Αναλυτική λύση
- Μεταβαλλόμενο πεδίο ταχυτήτων στην κατακόρυφη διεύθυνση
- Συνυπολογισμός κίνησης TK

## × Γραμμικοποίηση εξισώσεων ΟΣ

## Απώλεια ακρίβειας σε περιπτώσεις:

- υψηλών οριζοντίων κλίσεων  $\Rightarrow R < 2R_{max}$
- υψηλών κατακορύφων κλίσεων  $\Rightarrow C_D \rightarrow \infty$
- υψηλών ταχυτήτων κίνησης TK  $\Rightarrow V_t > 5\text{m/s}$
- αδρανειακής ουδετερότητας  $\Rightarrow B > 1.8$

συντ. αποκ. 6



# Μοντέλο οριακού στρώματος 2: Shapiro (1983)

## Χαρακτηριστικά:

- ❖ Σταθερές ταχύτητες κατά την κατακόρυφο
- ❖ Συνυπολογισμός κίνησης ΤΚ

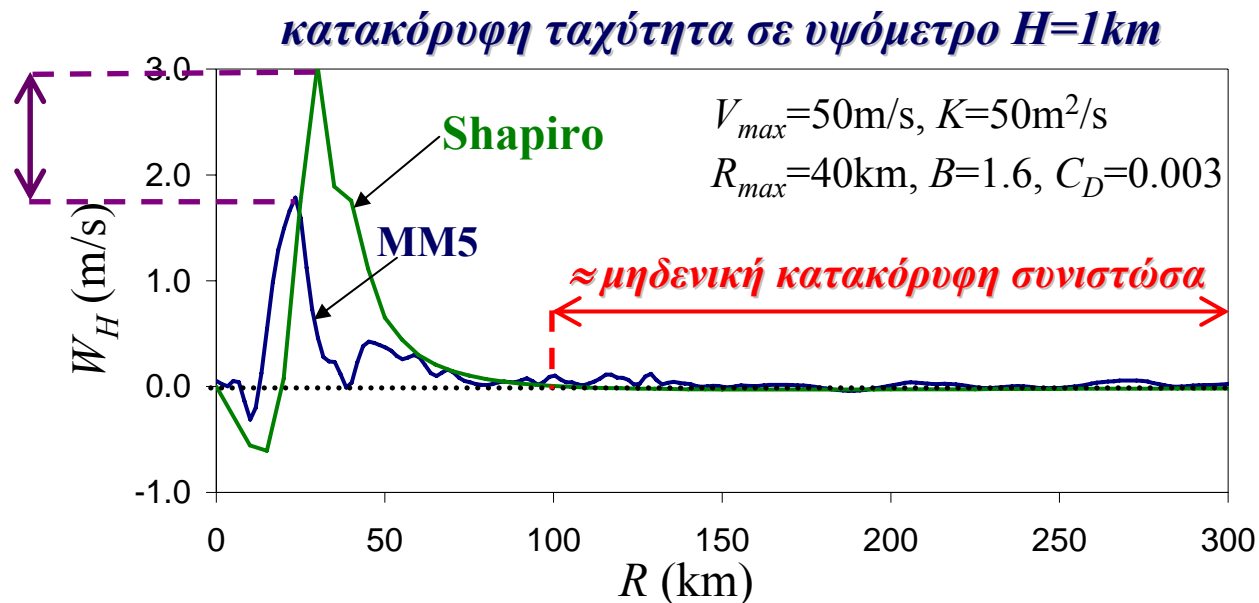
## Περιορισμοί:

- ✗ Υψηλές ακτινικές ταχύτητες
- ✗ Αριθμητική ευστάθεια για  $R > R_{max}$  προϋποθέτει



- σταθερό ύψος ΟΣ  $\Rightarrow H=1000\text{m}$
- συντελεστή κατακόρυφης διάχυσης  $K=50000\text{ m}^2/\text{s}$
- βήμα διακριτοποίησης  $\Rightarrow \Delta R = 5\text{km}$

συντ. αποκ. 2





# Μοντέλο οριακού στρώματος 3: Smith (1968)

## Μέθοδος ολοκλήρωσης της ποσότητας κίνησης Karman & Pohlhausen:

- ❖ Η μεταβολή των ταχυτήτων  $V$  και  $U$  κατά  $Z$  ακολουθεί τις εξισώσεις Ekman:

$$V(R,Z) = V_g(R) f[Z/\delta(R)]$$

Holland (1980)

κλίμακα  
ύψους ΟΣ

$$U(R,Z) = E(R) V_g(R) g[Z/\delta(R)]$$

συντελεστής  
εύρους

### Smith (1968): Λύσεις Ekman

$$f(\eta) = -e^{-\eta} (a_1 \sin \eta + a_2 \cos \eta)$$
$$g(\eta) = 1 - e^{-\eta} (a_1 \cos \eta + a_2 \sin \eta)$$

- ❖ Αντικατάσταση  $U$  και  $V$  στις εξισώσεις ΟΣ
- ❖ Ολοκλήρωση στην κατακόρυφη διεύθυνση και συνυπολογισμός οριακ. συνθηκών
- ❖ Επίλυση συστήματος συνήθων διαφορικών εξισώσεων με αγνώστους  $E(R)$  και  $\delta(R)$

### Περιορισμοί:

- ❖ Στάσιμοι τροπικοί κυκλώνες
- ❖  $a_1, a_2 = \text{σταθ.} \Rightarrow$  Συνθήκες μη ολίσθησης στο στερεό όριο



# Τροποποιημένο μοντέλο για κινούμενους ΤΚ

➤ Πεδίο ταχυτήτων (κινούμενο σύστ. συντεταγμένων):

**MS model**

$$\left. \begin{aligned} V(R,\theta,Z) &= \Omega \left[ R, \theta, \frac{Z}{\delta(R,\theta)} \right] \\ U(R,\theta,Z) &= E(R,\theta) \Psi \left[ R, \theta, \frac{Z}{\delta(R,\theta)} \right] \end{aligned} \right\} \Rightarrow W_H(R,\theta) = -\frac{1}{R} \int_0^H \frac{\partial(RU)}{\partial R} + \frac{\partial V}{\partial \theta} dZ$$

συναρτήσεις  $\Omega$  &  $\Psi$ :

$$\begin{cases} \Psi(r,\theta,\eta) = g(r,\theta,\eta) V_t \cos\theta + f(r,\theta,\eta) (V_g - V_t \sin\theta) - V_t \cos\theta \\ \Omega(r,\theta,\eta) = g(r,\theta,\eta) (V_g - V_t \sin\theta) - f(r,\theta,\eta) V_t \cos\theta + V_t \sin\theta \end{cases}$$

↘ ταχύτητα κίνησης

συναρτήσεις  $f$  &  $g$ :

$$\begin{cases} f(R,\theta,\eta) = -e^{-\eta} [a_1(R,\theta) \sin \eta + a_2(R,\theta) \cos \eta] \\ g(R,\theta,\eta) = 1 - e^{-\eta} [a_1(R,\theta) \cos \eta + a_2(R,\theta) \sin \eta] \end{cases}$$

↙ συρτικές τάσεις

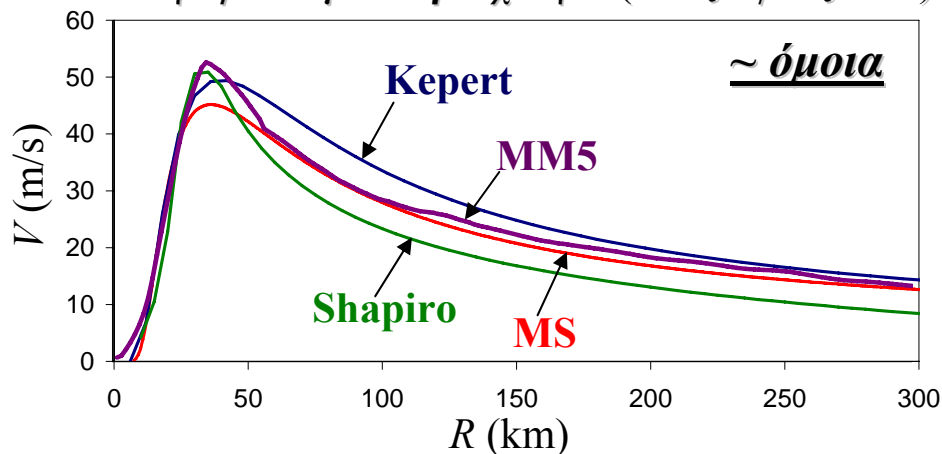
↘ επίλυση γραμμικού συστήματος  
για  $a_1$  και  $a_2$

➤ Επίλυση συστήματος  $\Delta E$  μερικών παραγώγων με αγνώστους  $E(R,\theta)$   
και  $\delta(R,\theta)$

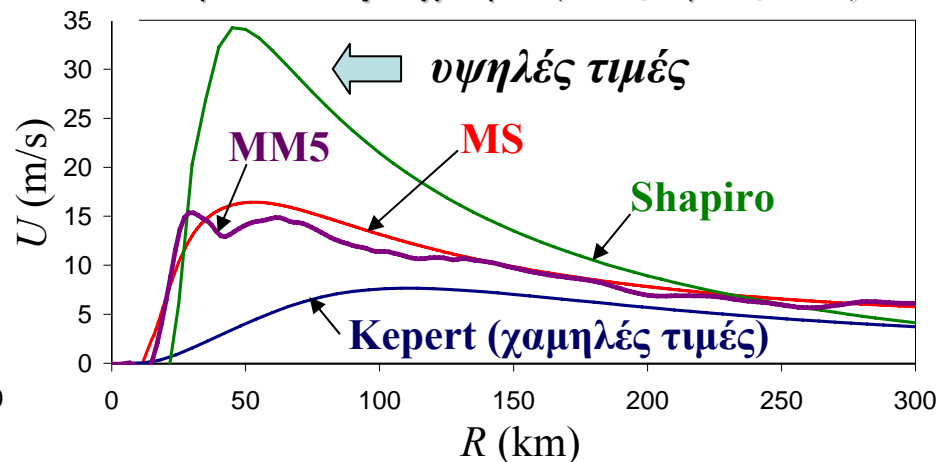
# Σύγκριση μοντέλων: στάσιμοι κυκλώνες

$$(V_{max}=50\text{m/s}, R_{max}=40\text{km}, B=1.6, K=50\text{m}^2/\text{s}, C_D=0.003)$$

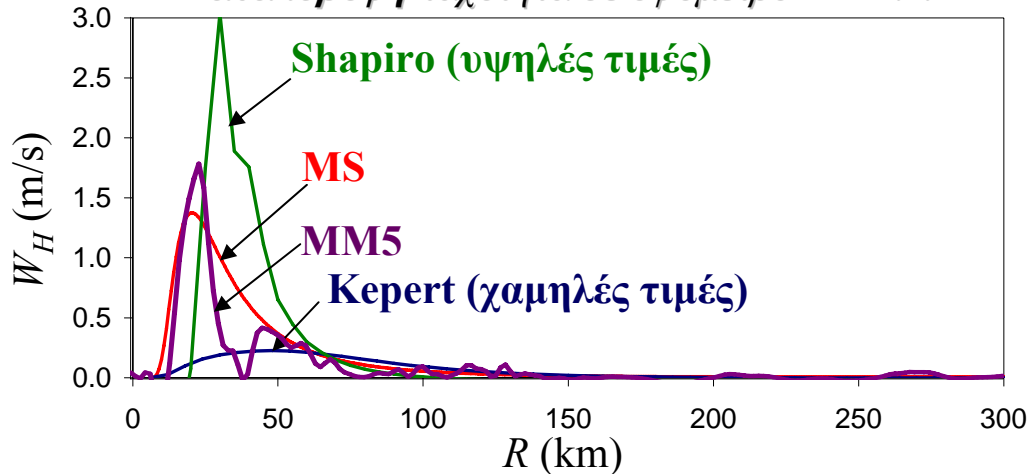
Μέση εφαπτομενική ταχύτητα (έντός ύψους 1km)



Μέση ακτινική ταχύτητα (έντός ύψους 1km)



Κατακόρυφη ταχύτητα σε υψόμετρο  $H=1\text{km}$

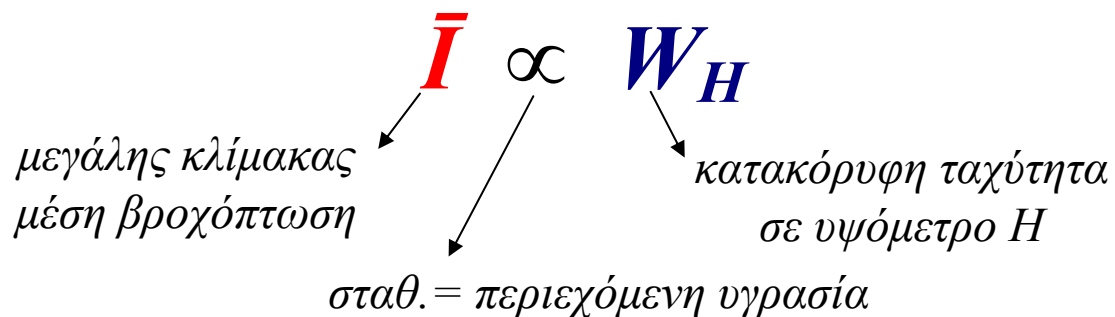


παρόμοια αποτελέσματα για  
κινούμενους τροπικούς  
κυκλώνες...

## 2. Βροχή από ακτινική σύγκλιση υδρατμών

### Παραδοχή:

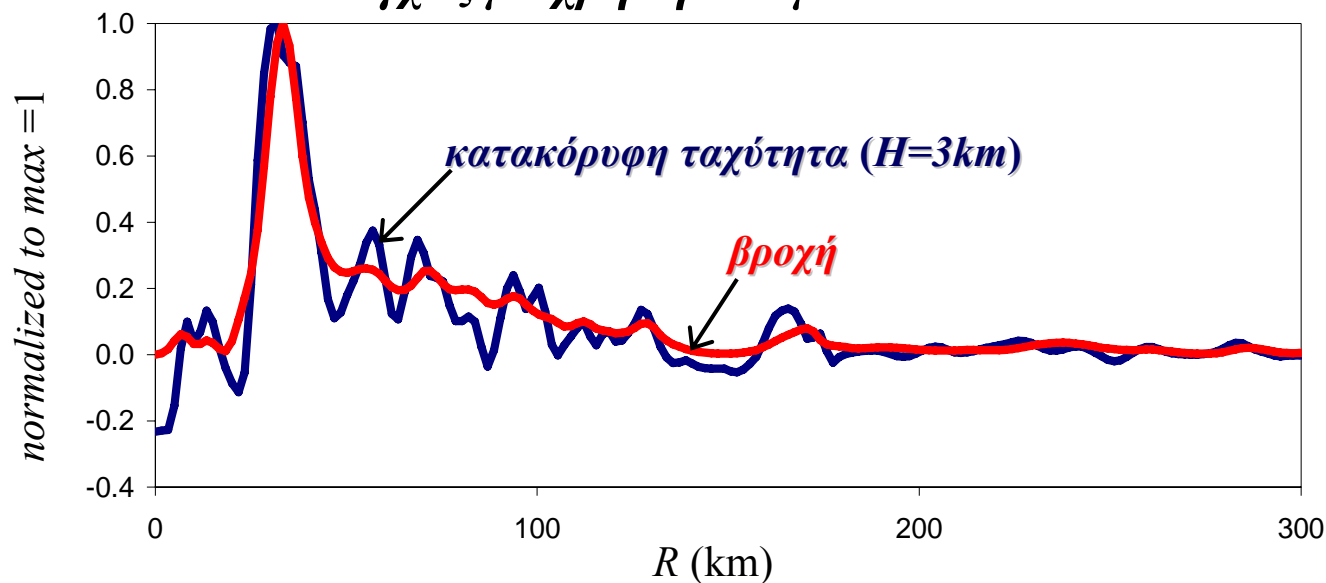
**βροχή** = ρυθμός απαγωγής υδρατμών από το άνω όριο του οριακού στρώματος



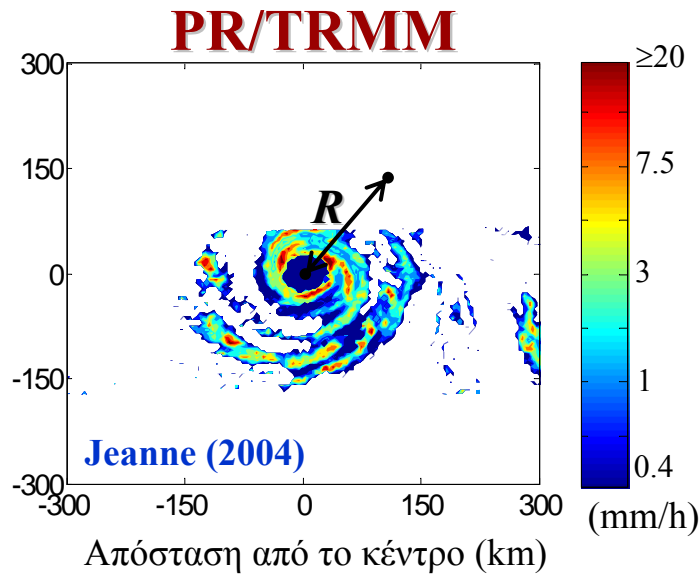
**MSR model**

υπολογισμός  $W_H$   
από μοντέλο **MS**...

### Έλεγχος με χρήση του μοντέλου MM5

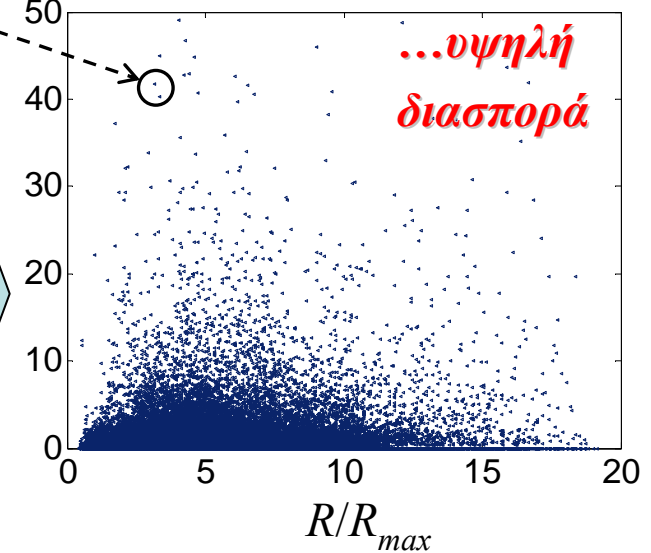


# Βαθμονόμηση με χρήση δεδομένων PR



$$\varepsilon = \frac{I_{PR}}{I_{MSR}}$$

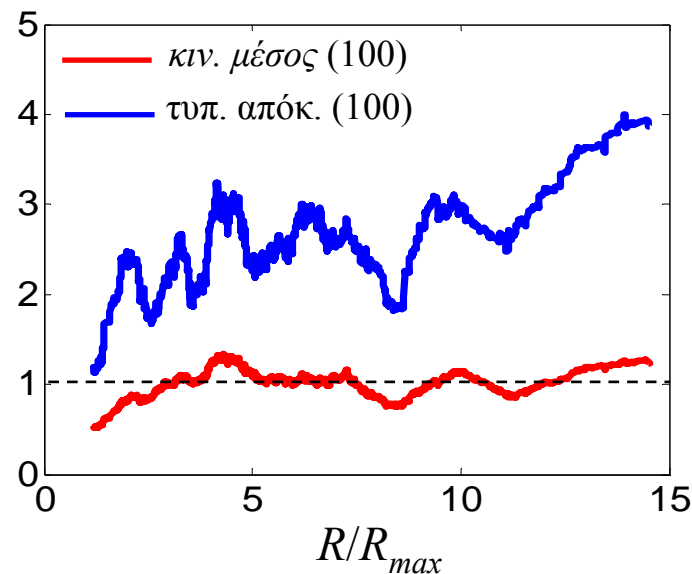
**$\varepsilon$ -ratio**



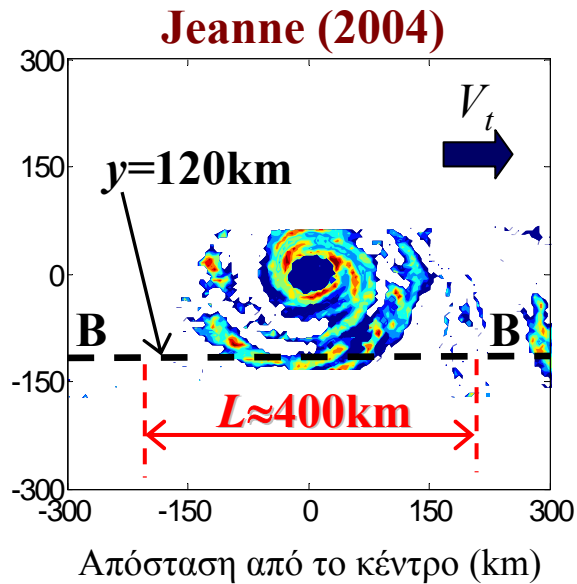
**$B=1$**



...σχεδόν  
αμερόληπτη  
εκτίμηση



### 3. Στοχαστικό μοντέλο διακυμάνσεων $[I_{max}(l)|\omega]$



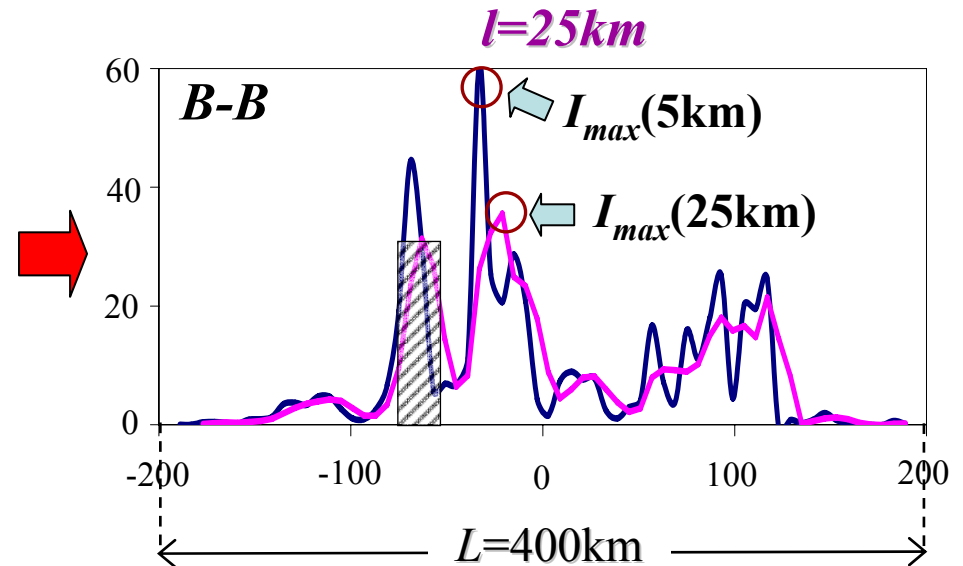
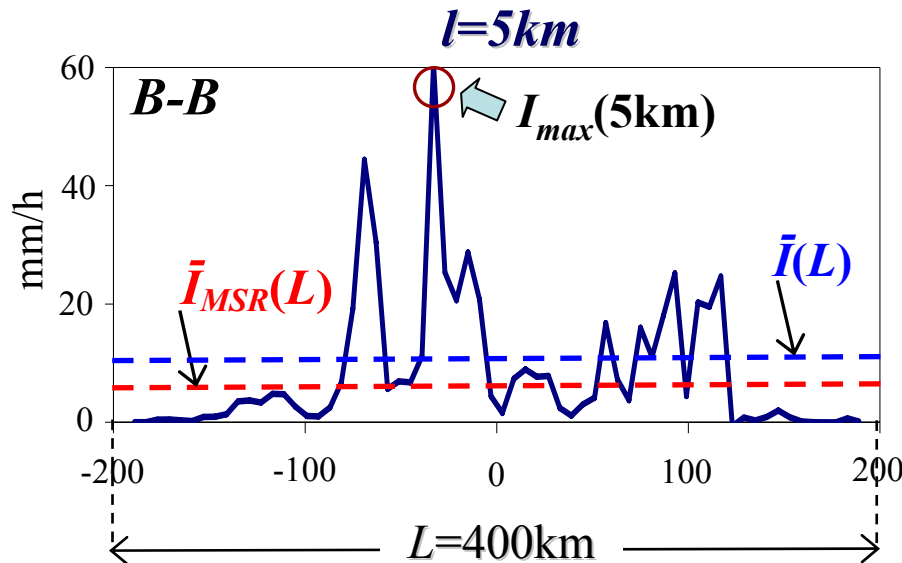
$$I_{max}(l) = \overline{I}_{MSR}(L) \beta \gamma_{max}(l)$$

(μεγάλη κλίμακα) (μικρή κλίμακα)

εκτίμηση μοντέλου MSR για τη μέση ένταση βροχής σε κλίμακα  $L$

τυχαία μεταβλητή για διακυμάνσεις μεγάλης κλίμακας

συντελεστής μεγέθυνσης για το μέγιστο σε κλίμακα  $l$



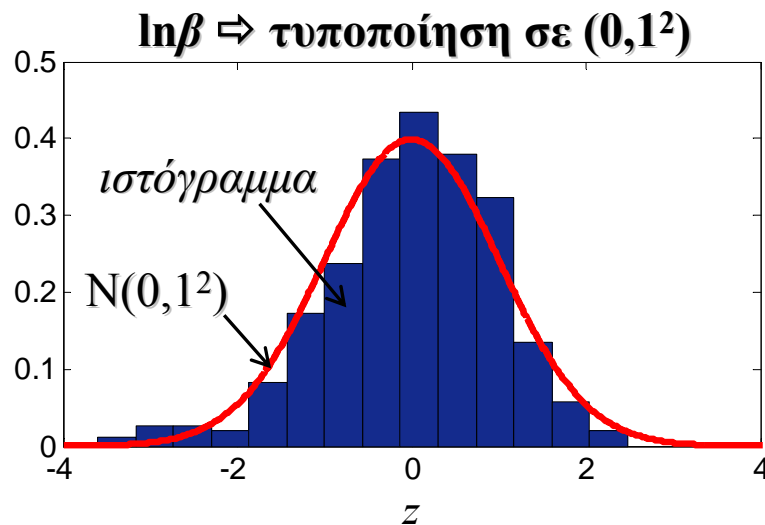
# Κατανομή μεταβλητών $[\beta|\omega]$ και $[\gamma_{max}(l)|\omega]$

## Κατανομή μεταβλητής $[\beta|\omega]$

$$\beta = \frac{\bar{I}(L)}{\bar{I}_{MSR}(L)}$$

$\bar{I}(L)$  → μέση ένταση βροχής σε κλίμακα  $L$   
 $\bar{I}_{MSR}(L)$  → εκτίμηση μοντέλου MSR

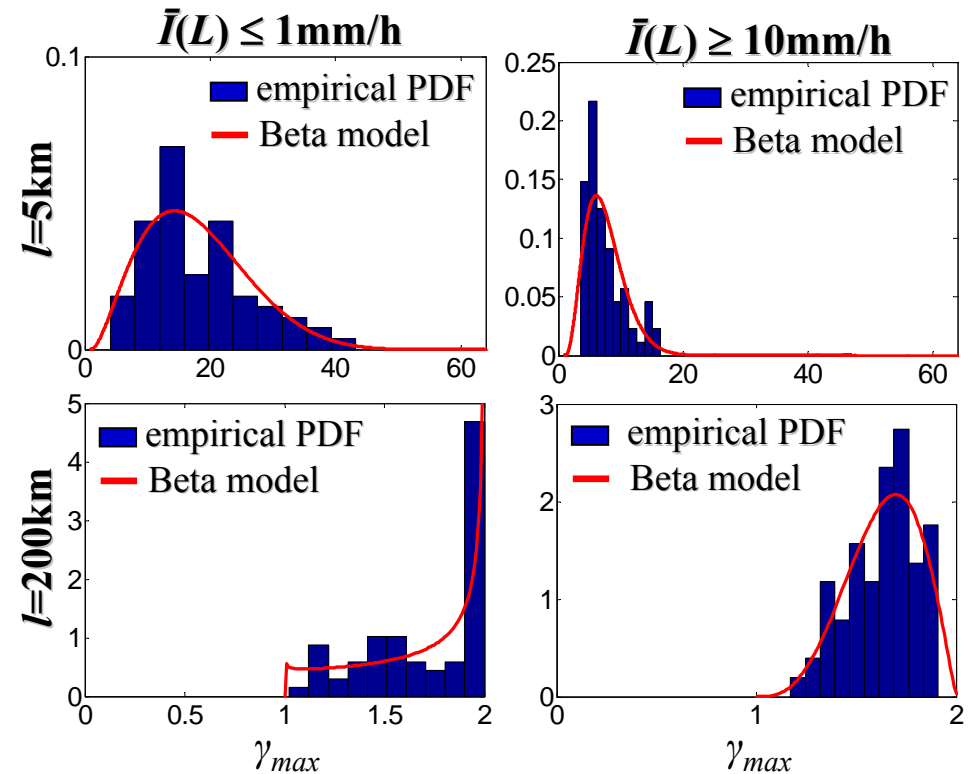
...  $\beta(\gamma, \bar{I}_{MSR}) \sim \text{lognormal}$



## Κατανομή μεταβλητής $[\gamma_{max}(l)|\omega]$

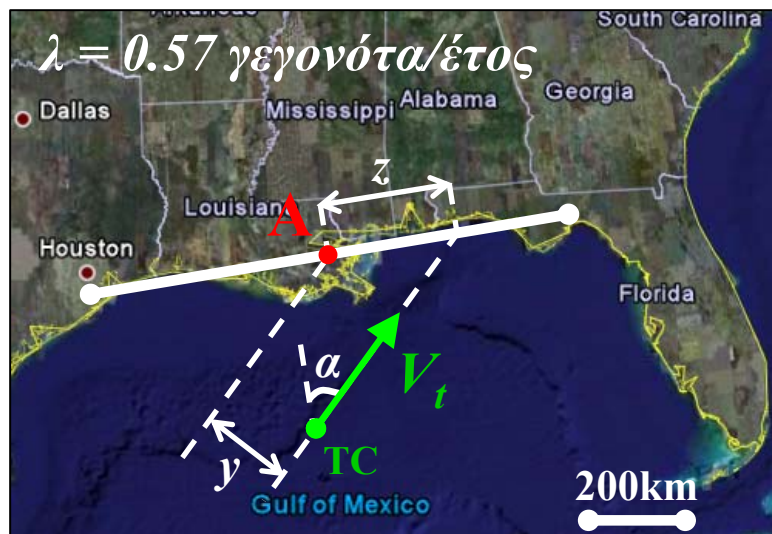
$$\gamma_{max}(l) = \frac{I_{max}(l)}{\bar{I}(L)}$$

$I_{max}(l)$  → μέγιστη τιμή της εντάσεως βροχής σε κλίμακα  $l$   
 $\bar{I}(L)$  → μέση ένταση βροχής σε κλίμακα  $L$   
 παραμετροποίηση σε όρους  $\bar{I}$



# 4. Εφαρμογή στην Νέα Ορλεάνη

➤ Μοντέλο επαναφοράς  $\omega = [V_{max}, R_{max}, V_t, y]$  **...και  $B = 1$**



$$[V_{max}|\Delta P] \sim \left\{ \begin{array}{l} \text{lognormal with} \\ m = 4.8 \Delta P^{0.559}, \sigma = 0.15 \text{ m} \\ \text{(Willoughby and Rahn, 2004)} \end{array} \right\} \text{(ανεξ.)}$$

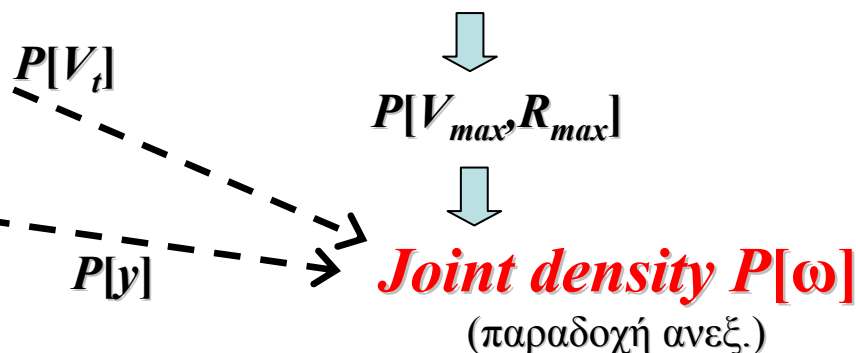
$$[R_{max}|\Delta P] \sim \left\{ \begin{array}{l} \text{lognormal with} \\ m = 3.962 - 0.00567 \Delta P, \sigma = 0.313 \\ \text{(Vickery et al., 2000)} \end{array} \right\}$$

$$\Delta P \text{ (hPa)} \sim \left\{ \begin{array}{l} \text{shifted lognormal with} \\ m_{\ln \Delta P} = 3.15, \sigma_{\ln \Delta P} = 0.68, \\ \text{Shift par.} = 18 \text{ hPa (IPET, 2006)} \end{array} \right\}$$

$$V_t \sim \left\{ \begin{array}{l} \text{LN with } m = 6 \text{ m/s \& } \sigma = 2.5 \text{ m/s} \\ \text{(Vickery et al., 2000, Chen et al. 2006)} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} z \sim \text{U}[-500 \text{ km}, 500 \text{ km}] \\ \alpha \sim \text{N}[-5.4^\circ, (34.9^\circ)^2] \\ \text{(IPET, 2006)} \end{array} \right\} \text{(ανεξ.)}$$

$$y = -z \cos(\alpha)$$



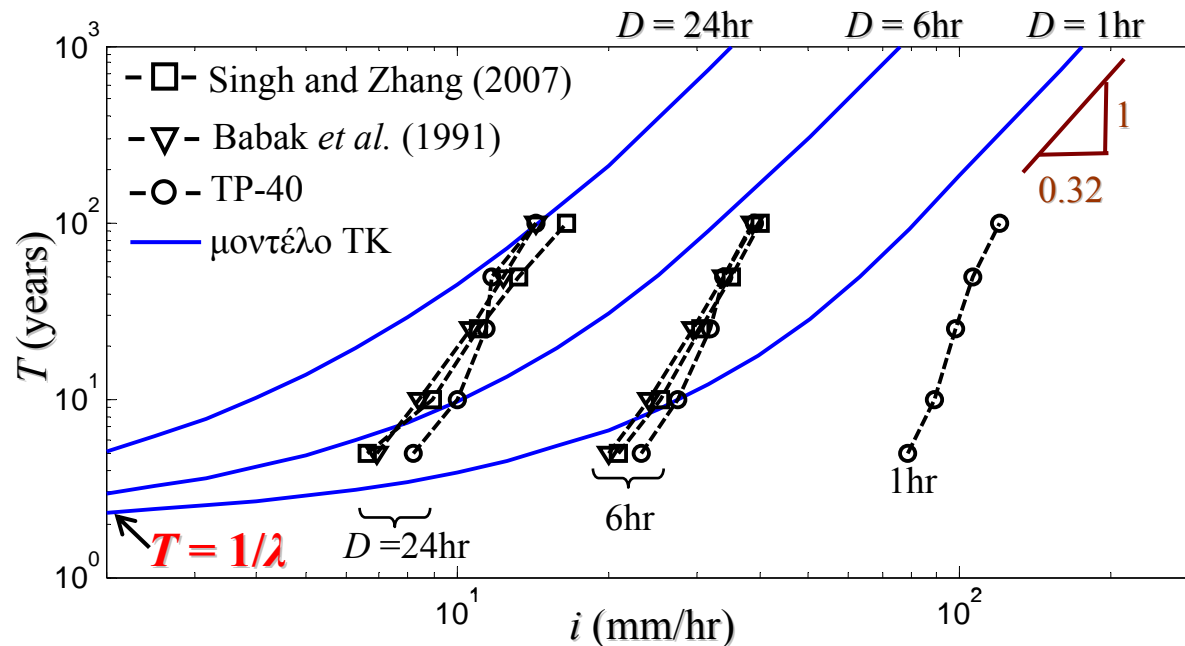
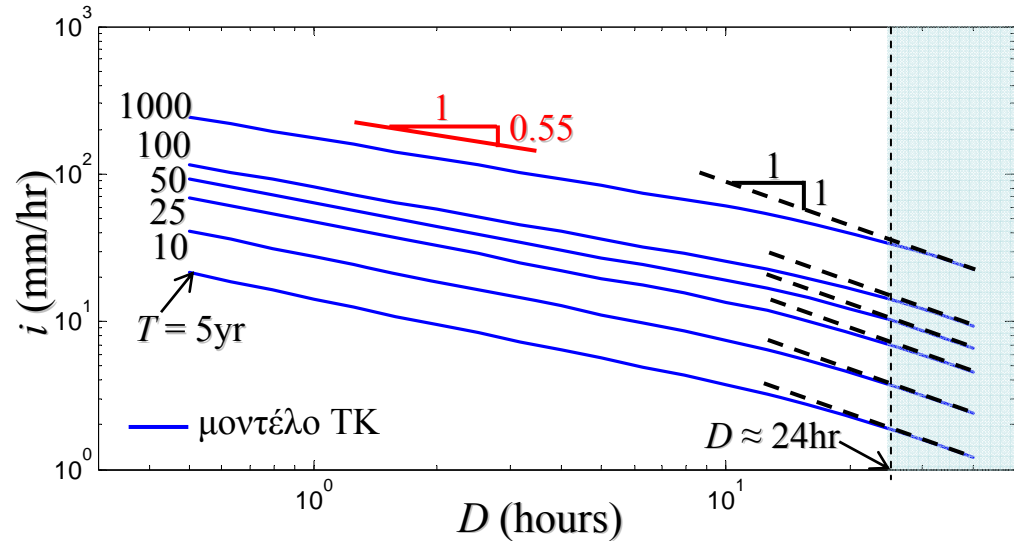


# Εφαρμογή στην Νέα Ορλεάνη: Όμβριες καμπύλες

## Όμβριες καμπύλες (IDFs):

$$\lambda_D(i) = \lambda \int_{\text{all } \omega} P[I_{\max}(D) > i | \omega] P[\omega] d\omega$$

**IDFs:** ένταση βροχής  $i$  ως συνάρτηση των  $D$  και  $T = 1/\lambda_D(i)$  (years)



➤ Για υψηλές τιμές των  $D$  και  $T$  οι TK είναι ο κύριος παράγοντας επικινδυνότητας.

➤ Για χαμηλές τιμές του  $D$  ισχύει το ρητό: “convection is convection”

# Συμπεράσματα (1)

- Αναπτύξαμε ένα μοντέλο υπολογισμού **μεγίστων εντάσεων βροχής** απο τροπικούς κυκλώνες (TK) με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
  - **Ρητή παραμετροποίηση** των χαρακτηριστικών  $\omega = [V_{max}, R_{max}, V_p, \gamma]$  του TK
  - **Φυσικό μοντέλο** (MSR) υπολογισμού του **χωρικά και χρονικά μέσου πεδίου βροχής** για TK με χαρακτηριστικά  $\omega$
  - **Στοχαστικό μοντέλο** για τις **διακυμάνσεις** του πεδίου βροχής σε **διαφορετικές κλίμακες**
  - **Βαθμονόμηση και έλεγχος** με χρήση δορυφορικών δεδομένων PR

## Συμπεράσματα (2)

### Χρήσεις μοντέλου:

- ❖ Χαρακτηρισμός του μέσου πεδίου ανέμων: **MS model**
- ❖ Συνάρτηση κατανομής της μέγιστης εντάσεως βροχής για TK με παραμέτρους  $\omega$ :  
**MSR + στοχαστικό μοντέλο**
- ❖ Υπολογισμός έντασης βροχής σχεδιασμού για διαφορετικούς συνδυασμούς ( $D, T$ )
- ❖ Αποτίμηση επικινδυνότητας TK σε σχέση με άλλους τύπους καταιγίδων
- ❖ Δυνατότητα συνδυασμού με μοντέλα εκτίμησης επικινδυνότητας από ανέμους, παλίρροια και κυματισμούς

# Μελλοντικές κατευθύνσεις

- ❖ Ανάπτυξη παραμετρικών εκφράσεων για υπολογισμό του  $\bar{I}_{MSR}$
- ❖ Επέκταση του μοντέλου πέραν της ακτογραμμής (τοπογραφία)
- ❖ Πρόγνωση μέγιστης βροχόπτωσης σε πραγματικό χρόνο για επικείμενους ΤΚ
- ❖ Εκτίμηση επικινδυνότητας ανέμων από τροπικούς κυκλώνες