

*Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου
Πατρών, Δευτέρα 28 Ιουνίου, 2010*

*Στοχαστική Προσομοίωση και
Εκτίμηση Ακραίων Γεγονότων Βροχής*

Ανδρέας Λαγγούσης

Πολιτικός Μηχανικός, ΕΜΠ

Μάστερ (M.Sc.) στους Πολ. Μηχ. και Μηχ. Περιβάλλοντος, MIT

Διδάκτωρ (Sc.D.) Πολ. Μηχ. και Μηχ. Περιβάλλοντος, MIT

Ακραία γεγονότα βροχής

Γαλλία, Ιούνιος 2010



Πολωνία, Μάιος 2010



Ευρώπη 05-06/2010:

- νεκροί > 40
- κόστος > 25 δις. €

ΗΠΑ, Αύγουστος 2005



⇒ Αντιπλημμυρικός σχεδιασμός:

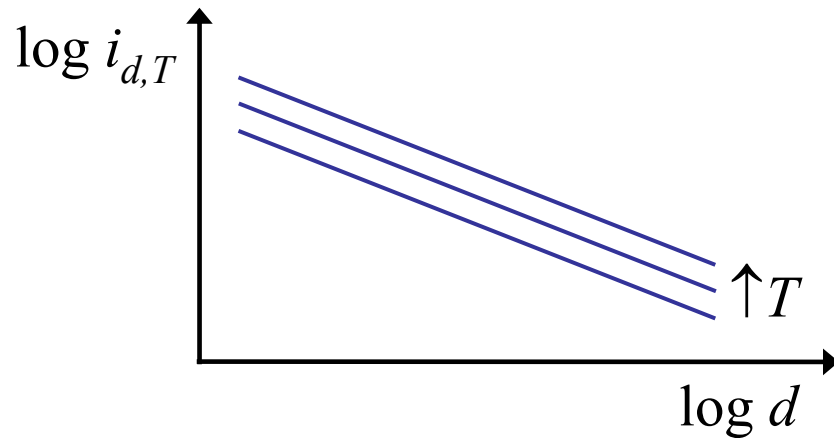
- Διαστασιολόγηση
 - Χωροθέτηση
 - Προγραμματισμός
- } Έργων (ταμιευτήρες, αναχώματα, δίκτυα...)
- Ζώνες πλημμυρικής επικινδυνότητας (60/2007 ΕΚ)

⇒ Εκτίμηση ακραίων βροχοπτώσεων:

Όμβριες καμπύλες... σχέσεις προσδιορισμού της συχνότητας εμφάνισης γεγονότων βροχής δεδομένης διάρκειας και έντασης

- TK Katrina
- νεκροί > 1800
 - κόστος > 80 δις. \$

Όμβριες καμπύλες



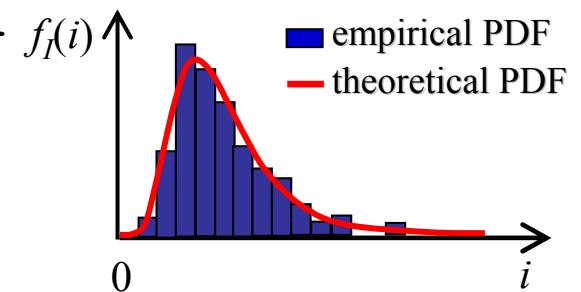
$i_{d,T}$: μέγιστη ένταση βροχής διάρκειας d που υπερβαίνεται, κατά μέσο όρο, μία φορά κάθε T έτη

T : περίοδος επαναφοράς γεγονότος

Εκτίμηση από ιστορικά δεδομένα:

- $I(d)$: μέση ένταση βροχής εντός χρονικής περιόδου διάρκειας d
- $I_{yr}(d) := \max \{I_1(d), I_2(d), \dots, I_{1yr/d}(d)\}$, ετήσιο μέγιστο του $I(d)$
- Προσαρμογή θεωρητικής συνάρτησης κατανομής στις εμπειρικές τιμές του $I_{yr}(d)$
- $i_{d,T}$: η τιμή του $I_{yr}(d)$ με πιθανότητα υπέρβασης $1yr/T$

Απλό πιθανοτικό προσομοίωμα



... μερικοί περιορισμοί

Ⓘ μικρού μήκους ιστορικό δείγμα (π.χ. 10-25 έτη) + χρήση τμήματος της υδρολογικής πληροφορίας (μόνο ετήσια μέγιστα) → **αβεβαιότητα εκτιμήσεων**

Ⓜ απαιτείται συνδυασμένη ανάλυση ιστορικών δεδομένων με “ιδιαιτέρα” χαρακτηριστικά

Τροπικοί κυκλώνες (TK)

- μικρή συχνότητα εμφάνισης
- φυσικά χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται συνεχώς (ένταση, ταχύτητα, μέγεθος...)
- περιορισμένος αριθμός παρατηρήσεων



⇒ **Σύνθετα στοχαστικά προσομοιώματα:** πολλαπλές πιθανοτικές συνιστώσες δομημένες με στόχο την φυσικομαθηματική περιγραφή ενός συστήματος

Ⓘ θεωρία πολυκλασματικής (multifractal) ομοιοθεσίας



βέλτιστη εκτίμηση μεγίστων βροχοπτώσεων από μικρού μήκους χρονοσειρές

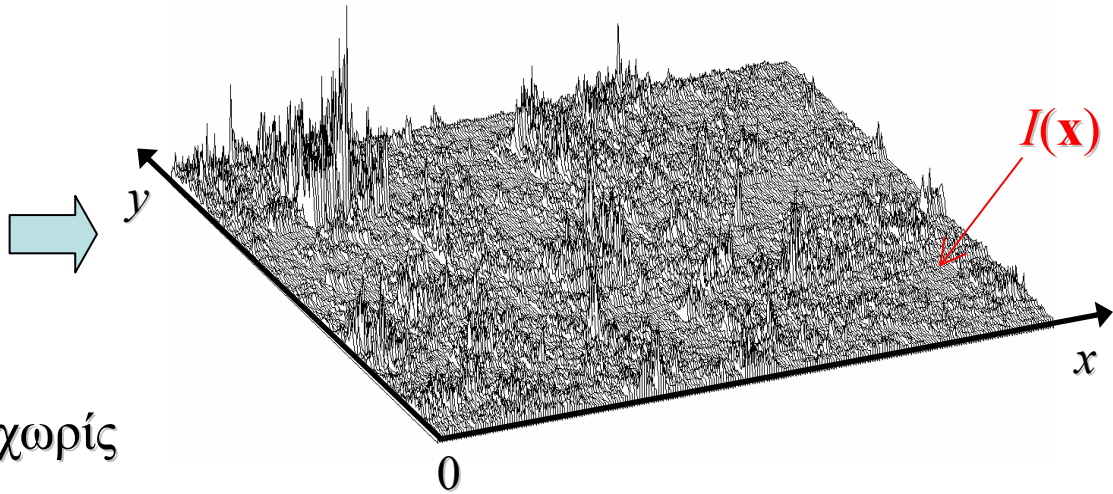
Ⓜ φυσικομαθηματικό προσομοίωμα + στοχαστική συνιστώσα



εκτίμηση μεγίστων βροχοπτώσεων από τροπικούς κυκλώνες (TK)

I) Πολυκλασματικά (multifractal) μοντέλα βροχής

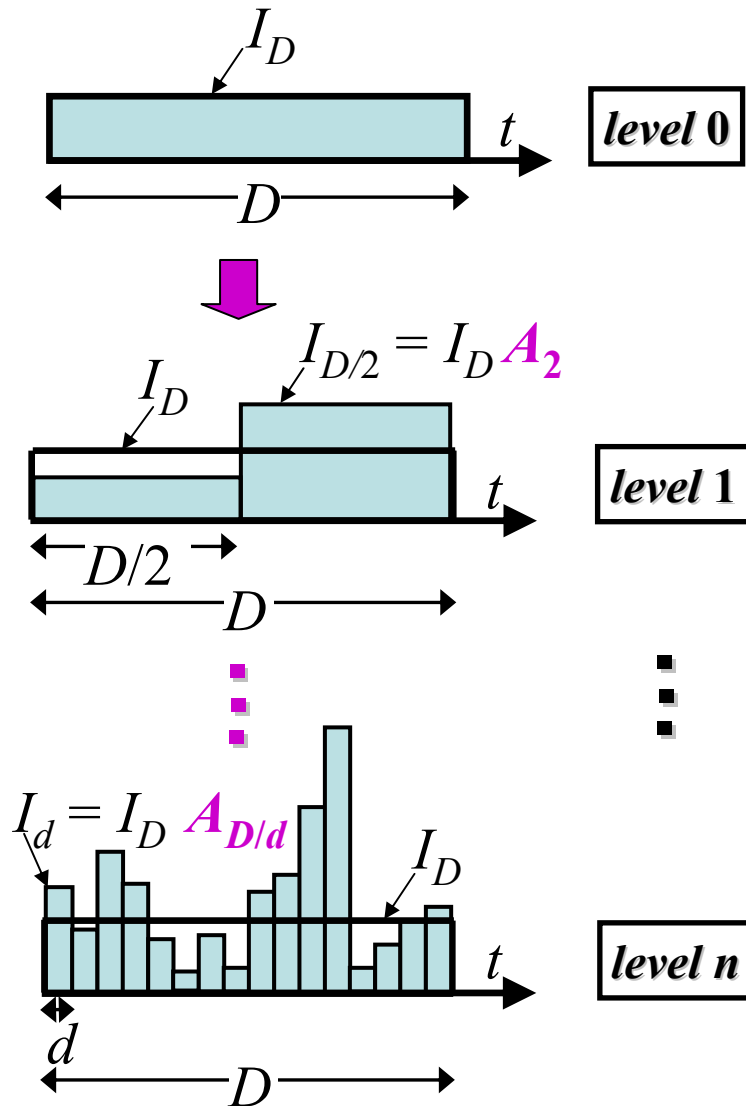
Πλεονεκτήματα:

- ✓ Φειδωλά σε παραμέτρους
 - ✓ Ρεαλιστικά πεδία βροχής
- ⇒ 
- ✓ Εκτίμηση όμβριων καμπυλών χωρίς προσομοίωση MC
 - ✓ Αποφυγή παραδοχών για την συνάρτηση κατανομής της μεταβλητής $I_{yr}(d)$
 - ✓ Αξιοποίηση του συνόλου της υδρολογικής πληροφορίας (όχι μόνο ετήσια μέγιστα)
 - *Ακόμα και 5 χρόνια ιστορικών δεδομένων αρκούν*
- ⇒ Αναλυτικές προσεγγιστικές σχέσεις υψηλής ακρίβειας (Langousis *et al.*, 2007)

...πρακτικά με αρκετά πλεονεκτήματα!

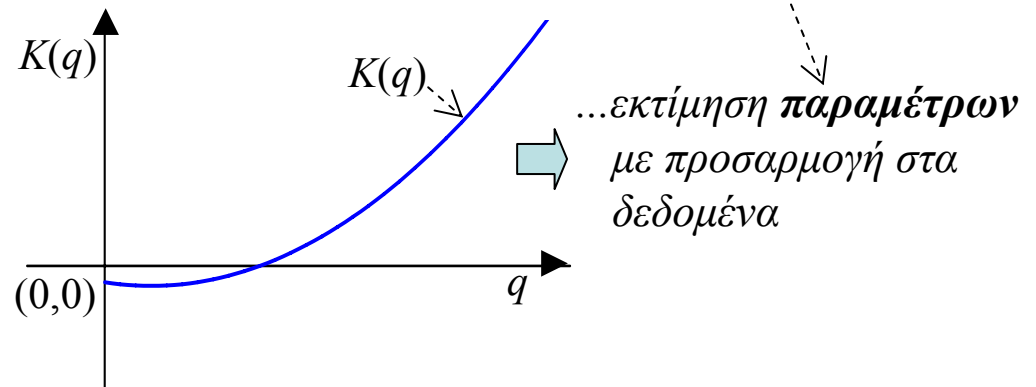
Multifractal για Μηχανικούς....

Κατασκευή:



Προϋπόθεση $\Rightarrow A_{D/d} = \underbrace{A_{2,1}, A_{2,2}, \dots, A_{2,n}}_{n = \log_2(D/d) \text{ iid μεταβλητές}}$

Ιδιότητα $\Rightarrow E[(A_{D/d})^q] \propto d^{-K(q)}$

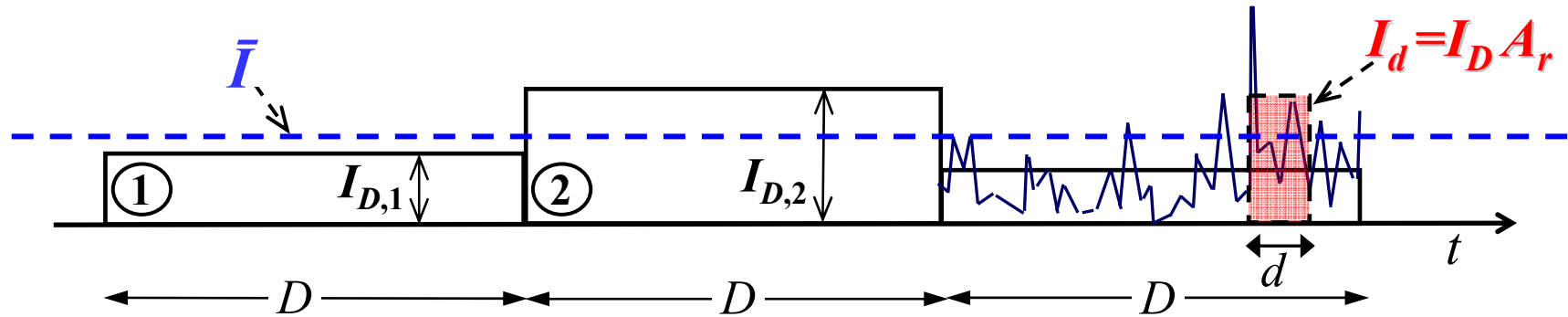


Δυσκολία $\left\{ \begin{array}{l} \dots \text{προσδιορισμός της κατανομής} \\ \text{της τυχαίας μεταβλητής } I_D \end{array} \right.$

.... προσεγγιστικές σχέσεις!

(Langousis and Veneziano, 2007)

Βροχή ως ακολουθία παλμών με δομή multifractal



\bar{I} : μέση ετήσια ένταση βροχής

$$\bar{I} = 1$$

D : μέση περίοδος επαναφοράς καταιγίδων (απο δεδομένα)

$$r = D/d$$

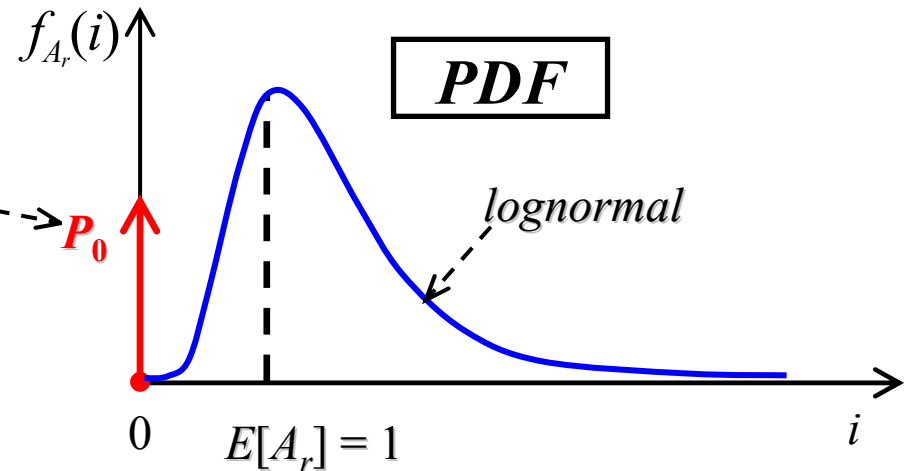
Τυχαία μεταβλητή $A_r \sim (\beta-LN)$

$$\diamond P[A_r = 0] = P_0 = 1 - r^{-C_\beta}$$

$$\diamond (\ln A_r | A_r > 0) \sim N[(C_\beta - C_{LN}) \ln r, 2C_{LN} \ln r]$$

C_β : ποσοστό ξηρών περιόδων εντός D

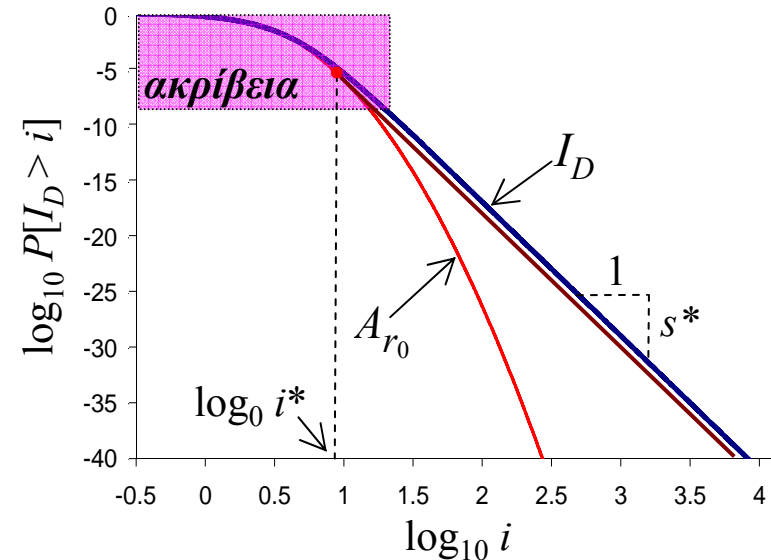
C_{LN} : ένταση διακυμάνσεων βροχής εντός υγρών περιόδων



Multifractal όμβριες καμπύλες για Μηχανικούς

⇒ $I_D \approx A_{r_0} + \text{σωστή ουρά}$

- r_0 τέτοιο ώστε να επιτυγχάνεται συμφωνία στο σώμα των κατανομών (ροπές τάξεως 2-3)
- προσαρμογή ουράς αλγεβρικού τύπου (ροπές μεγαλύτερης τάξεως)



➤ Αναλυτικές όμβριες καμπύλες $i_{d,T}$ (Langousis *et al.*, 2007)

$$T_{r,\gamma} \approx \begin{cases} \frac{D}{r} \left[(2\pi) 2 C_{LN} \left(\frac{\gamma - C_\beta}{2 C_{LN}} + \frac{1}{2} \right)^2 \ln(rr_0) \right]^{1/2} (rr_0)^{C_{LN} \left(\frac{\gamma - C_\beta}{2 C_{LN}} + \frac{1}{2} \right)^2 + C_\beta}, & \gamma \leq 2 - C_\beta - C_{LN} \\ \frac{D}{r} \left[(2\pi) 2 \ln(rr_0) \frac{(1 - C_\beta)^2}{C_{LN}} \right]^{1/2} (rr_0)^{\left[1 + (\gamma - 1) \frac{1 - C_\beta}{C_{LN}} \right]}, & \gamma > 2 - C_\beta - C_{LN} \end{cases}$$

$$r = D/d, \quad \gamma = \log_{rr_0}(i_{d,T})$$

Υπολογισμός όμβριων καμπυλών (1)

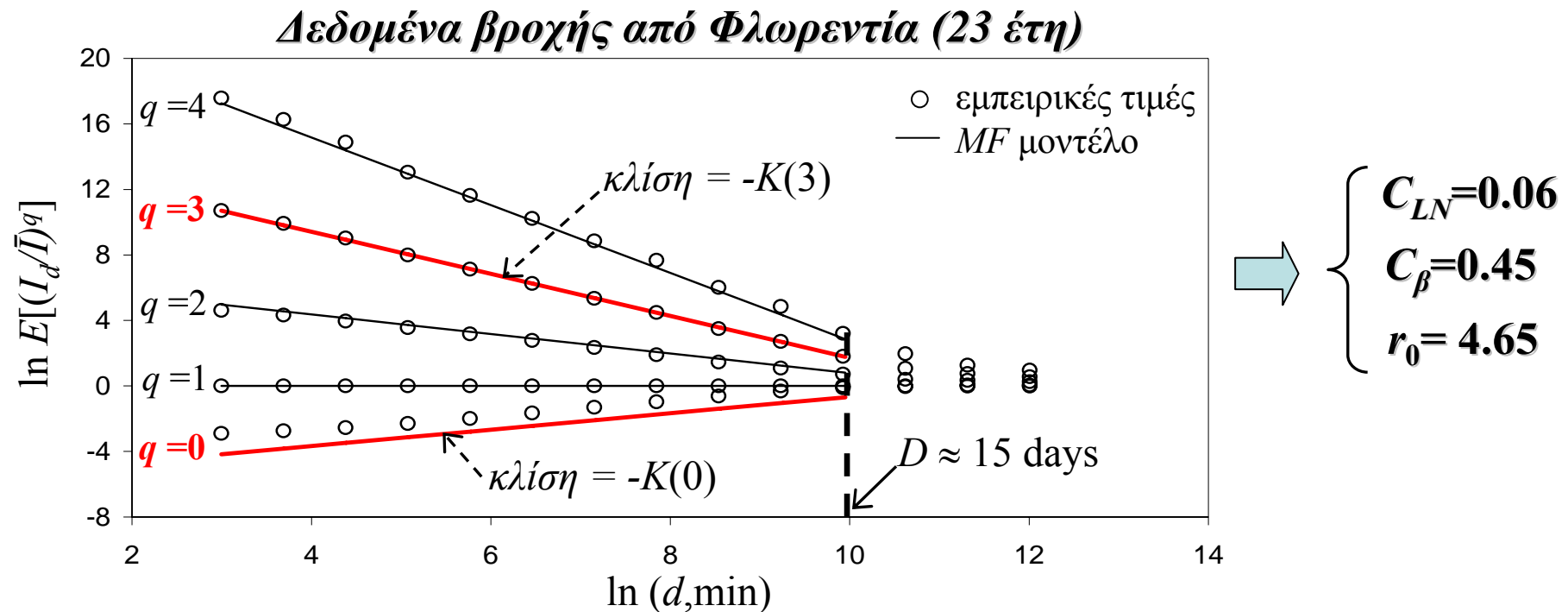
1) Εκτίμηση μέσης ετήσιας εντάσεως βροχής \bar{I} από δεδομένα.

3) $r_0(C_\beta, C_{LN})$ από διάγραμμα (Langousis et al. 2007)

2) Εκτίμηση C_β και C_{LN} από διάγραμμα ροπών $E[(I_d/\bar{I})^q]$ συναρτήσει της διάρκειας d

4) Επιλογή D έτσι ώστε $E[I_D^3] = \bar{I}^3 r_0^{K(3)}$

• $C_\beta = -K(0)$ • $C_{LN} = [K(3) + 2K(0)]/6$



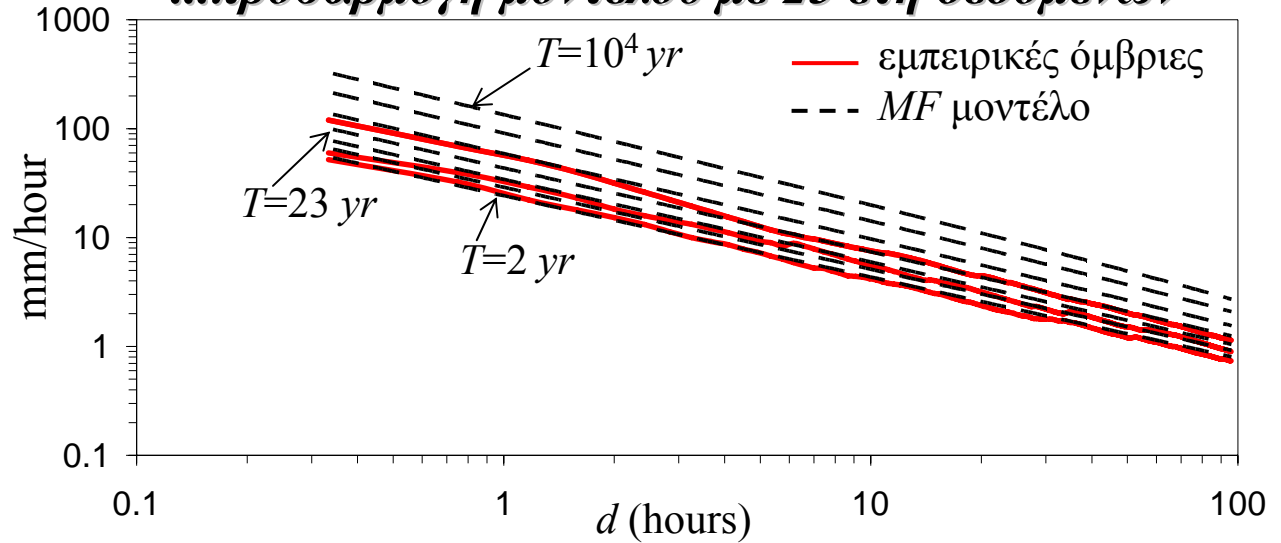
Υπολογισμός όμβριων καμπυλών (2)

5) Υπολογισμός
θεωρητικών τιμών
 $i_{d,T}$ από αναλυτικές
σχέσεις (για $\bar{I}=1$)

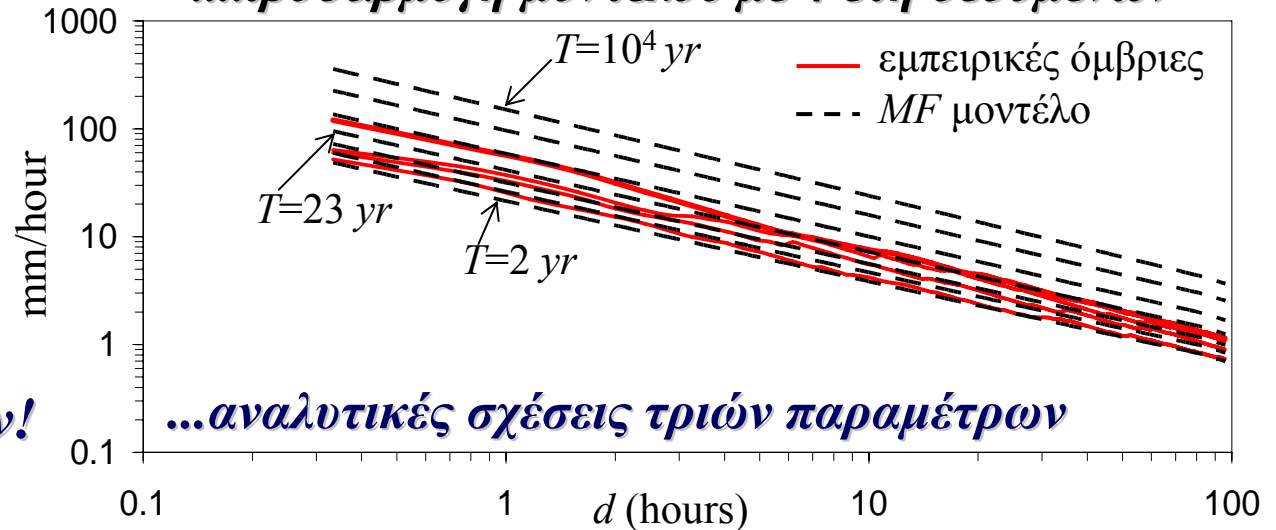
6) Πολλαπλασιασμός των
θεωρητικών τιμών $i_{d,T}$
με τη μέση ετήσια
ένταση βροχής \bar{I}

**...ικανοποιητικά
αποτελέσματα ακόμα
και με 4 έτη δεδομένων!**

...προσαρμογή μοντέλου με 23 έτη δεδομένων

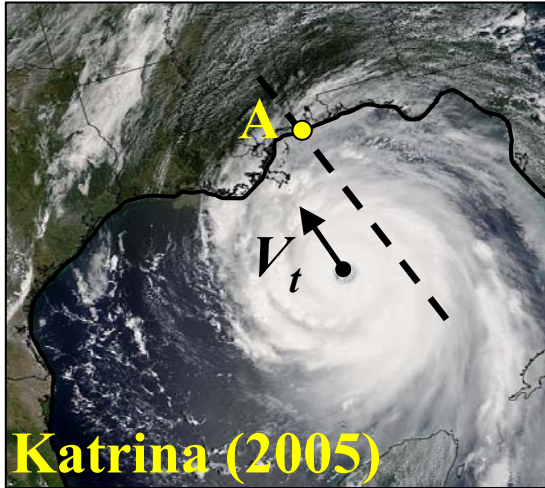


...προσαρμογή μοντέλου με 4 έτη δεδομένων



II) Όμβριες καμπύλες για ΤΚ

Μία καταιγίδα που δεν είναι σαν όλες τι άλλες...



Katrina (2005)

- καταστροφές από συνδυασμό ανέμων, βροχών και παλίρροιας
- μικρή συχνότητα εμφάνισης
- φυσικά χαρακτηριστικά (ένταση, ταχύτητα, μέγεθος...) που μεταβάλλονται συνεχώς
- ένταση βροχής που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ΤΚ και από την θέση ως προς το κέντρο της καταιγίδας
- Δορυφορικά στιγμιότυπα (PR) του πεδίου βροχής ανά 6-ωρο

Επικινδυνότητα βροχοπτώσεων από ΤΚ στην θέση A:

$\lambda_d(i)$: ρυθμός (γεγονότα/έτος) με τον οποίο η τυχαία μεταβλητή

$I_{max}(d)$ υπερβαίνει την τιμή i στην θέση A

μέγιστη ένταση βροχόπτωσης διάρκειας d , από ΤΚ, στην θέση A

⇒ Όμβριες καμπύλες:

$i_{d,T}$ με $T = 1/\lambda_d(i)$ (έτη)



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

λ : ρυθμός αφίξεως ΤΚ [γεγονότα/έτος]

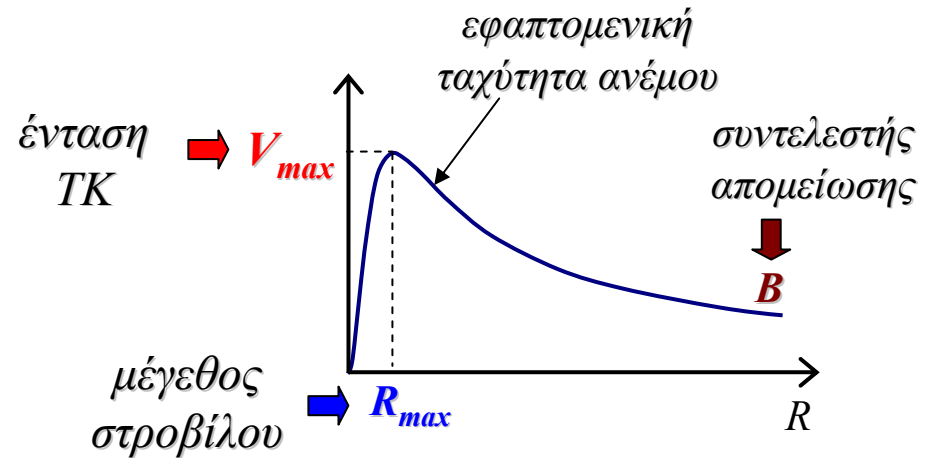
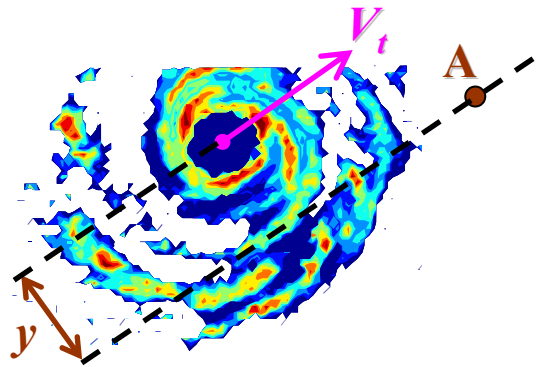
$P[I_{max}(d) > i | \omega]$: **στόχος**

$P[\omega]$: μοντέλο επαναφοράς ΤΚ (βιβλιογραφία)

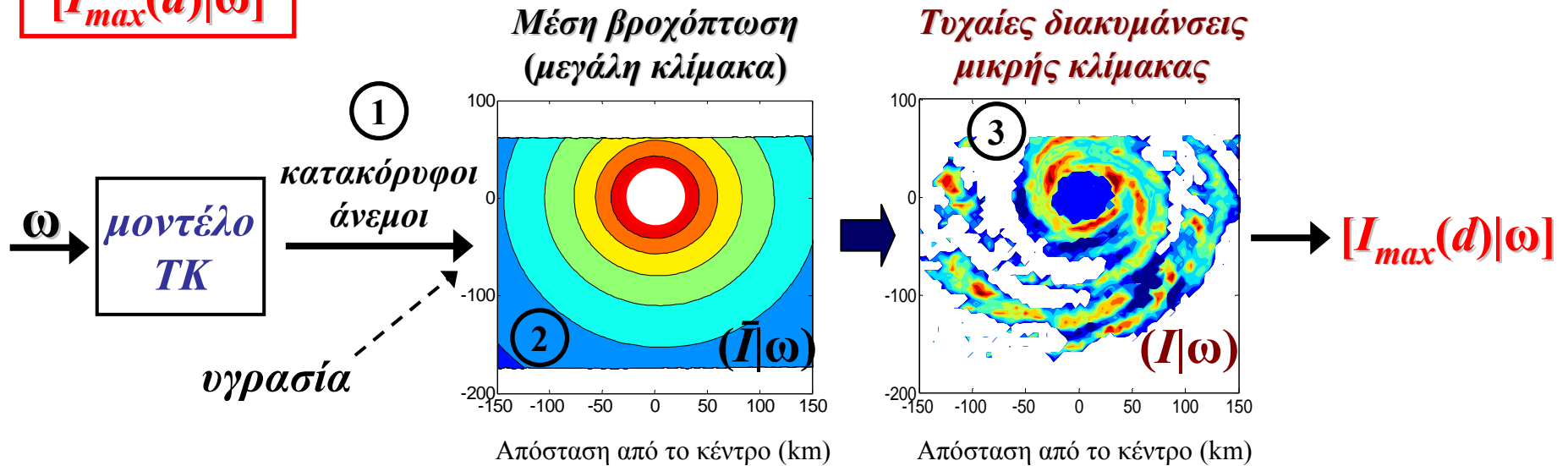
$d\omega$: χαρακτηριστικά ΤΚ

Εκτίμηση επικινδυνότητας

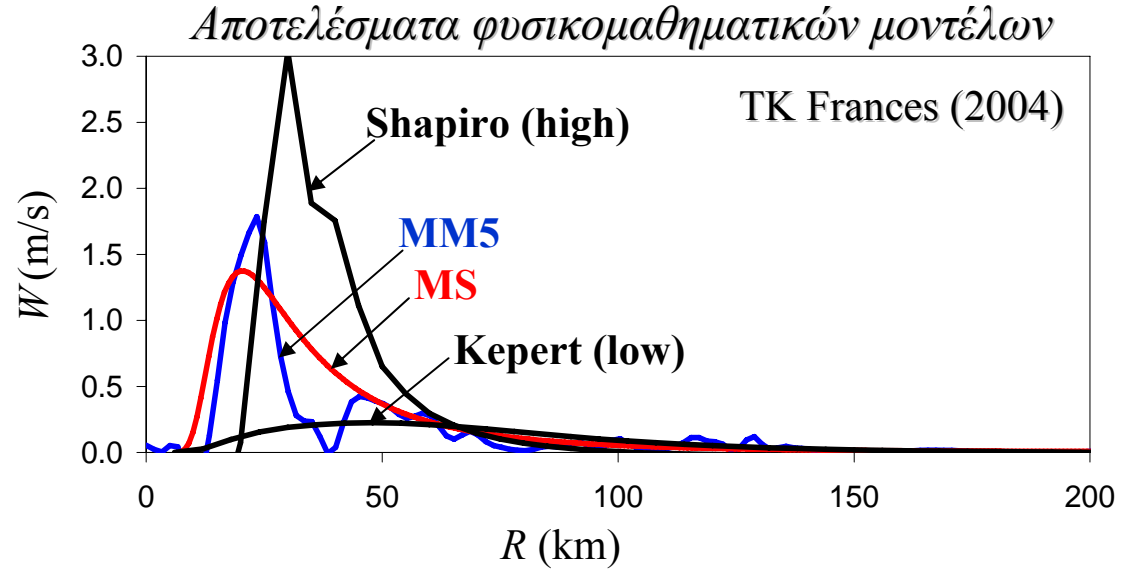
➤ παράμετροι $\omega = [V_{max}, R_{max}, B, V_t, y]$



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



Μοντέλο εκτίμησης μέσης βροχόπτωσης από ΤΚ

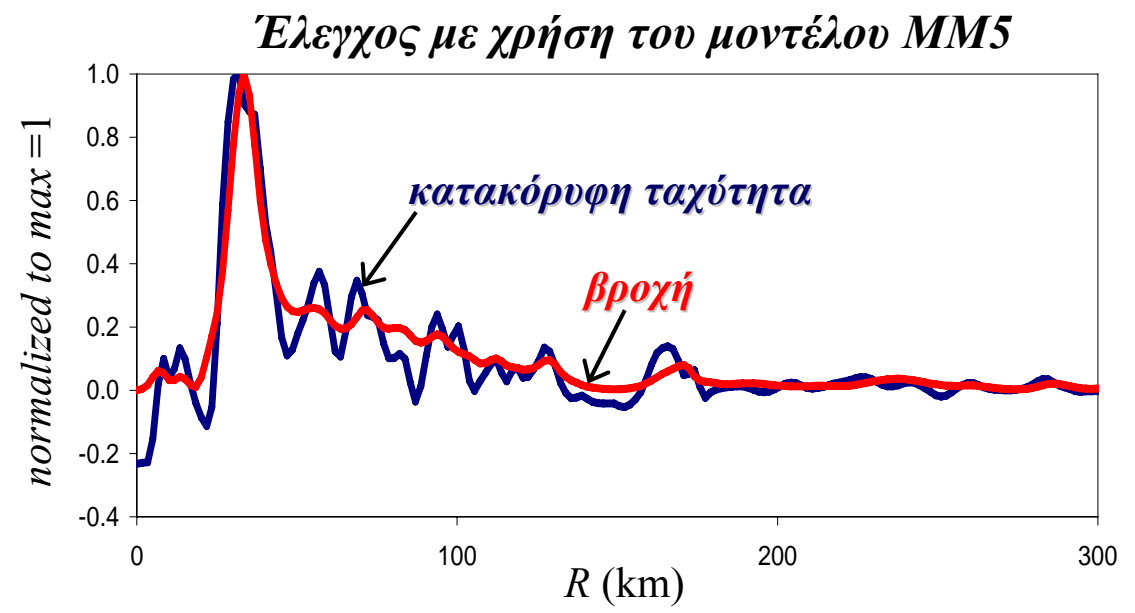


Κατακόρυφη ταχύτητα ανέμων

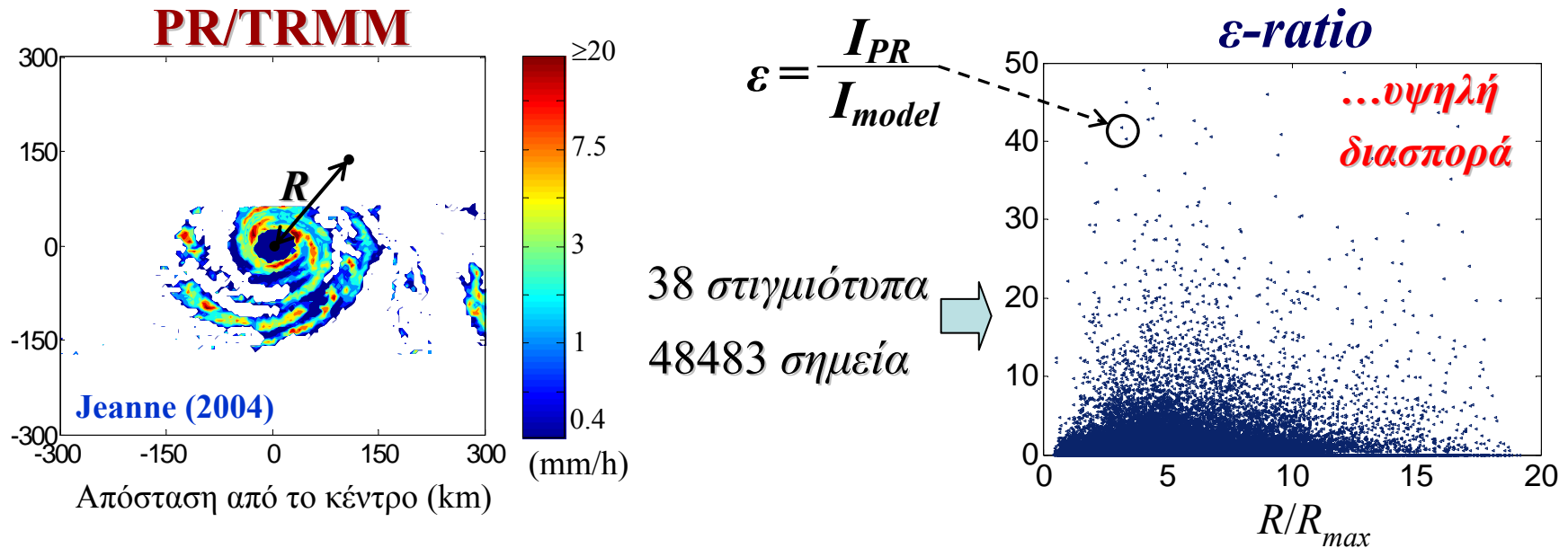
Βροχή:

$$\bar{I} = c W$$

\bar{I} → μεγάλης κλίμακας μέση βροχόπτωση
 c → περιεχόμενη υγρασία
 W → κατακόρυφη ταχύτητα

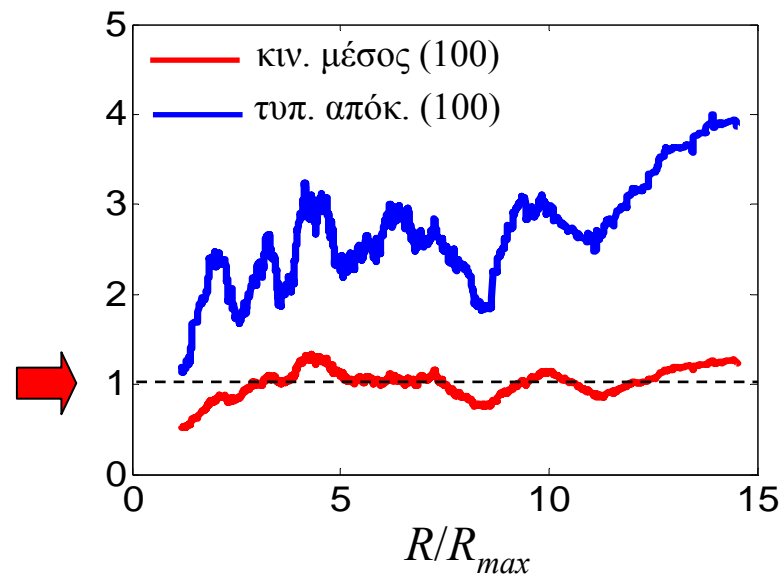


Βαθμονόμηση με χρήση δεδομένων PR



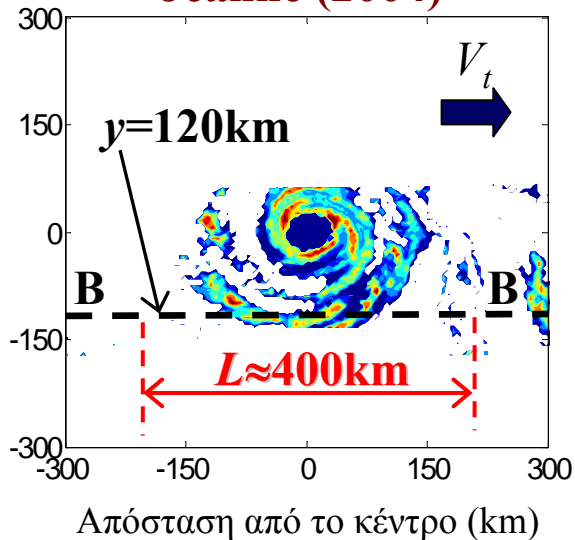
$B = 1$

↓
...σχεδόν
αμερόληπτη
εκτίμηση



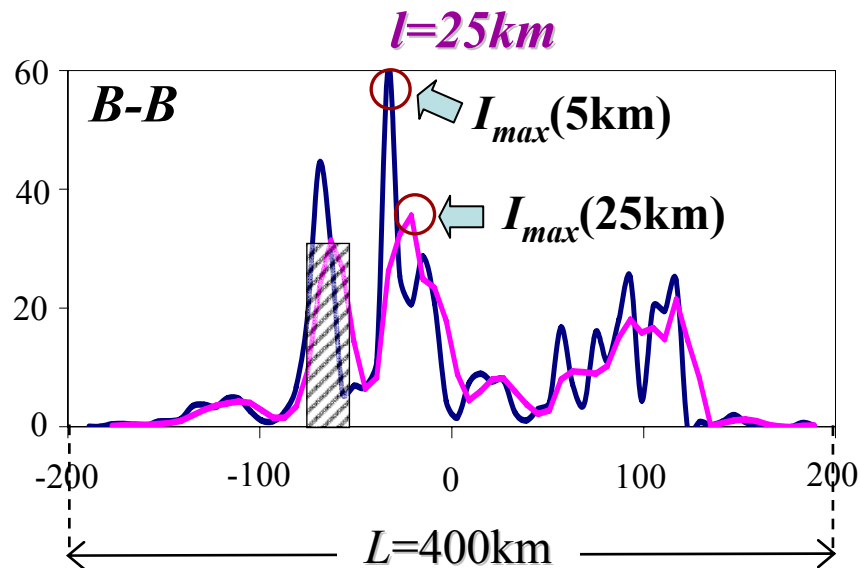
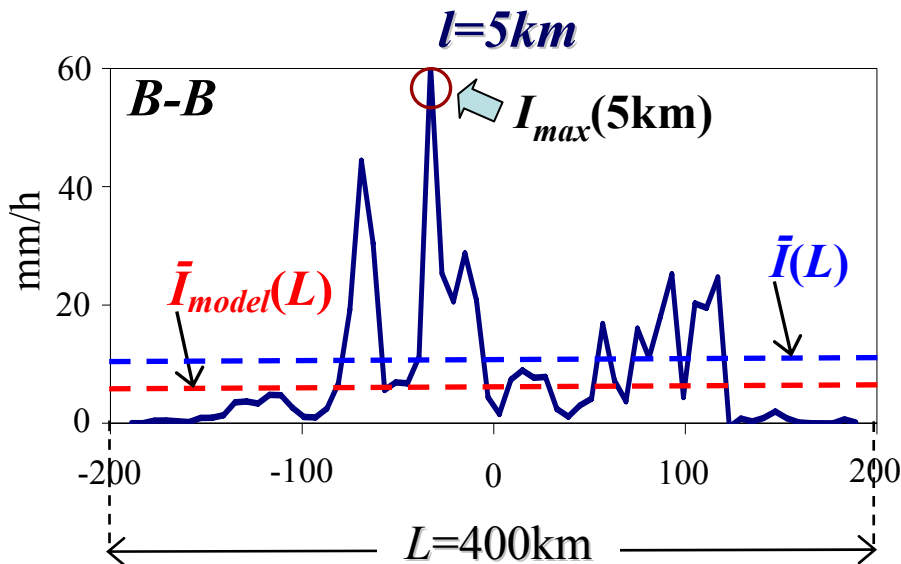
Στοχαστικό μοντέλο διακυμάνσεων $[I_{max}(l)|\omega]$

Jeanne (2004)



$$I_{max}(l) = \overbrace{\bar{I}_{model}(L)}^{(μεγάλη\ κλίμακα)} \underbrace{\beta}_{(μικρή\ κλίμακα)} \underbrace{\gamma_{max}(l)}^{(μικρή\ κλίμακα)}$$

εκτίμηση μοντέλου για τη μέση ένταση βροχής σε κλίμακα L
 τυχαία μεταβλητή για διακυμάνσεις μεγάλης κλίμακας
 συντελεστής μεγέθυνσης για το μέγιστο σε κλίμακα l



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

Κατανομή μεταβλητής $[\beta|\omega]$

$$\beta = \frac{\bar{I}(L)}{\bar{I}_{model}(L)} \rightarrow \begin{array}{l} \text{μέση ένταση βροχής} \\ \text{σε κλίμακα } L \end{array}$$

$\bar{I}_{model}(L)$ \rightarrow εκτίμηση μοντέλου

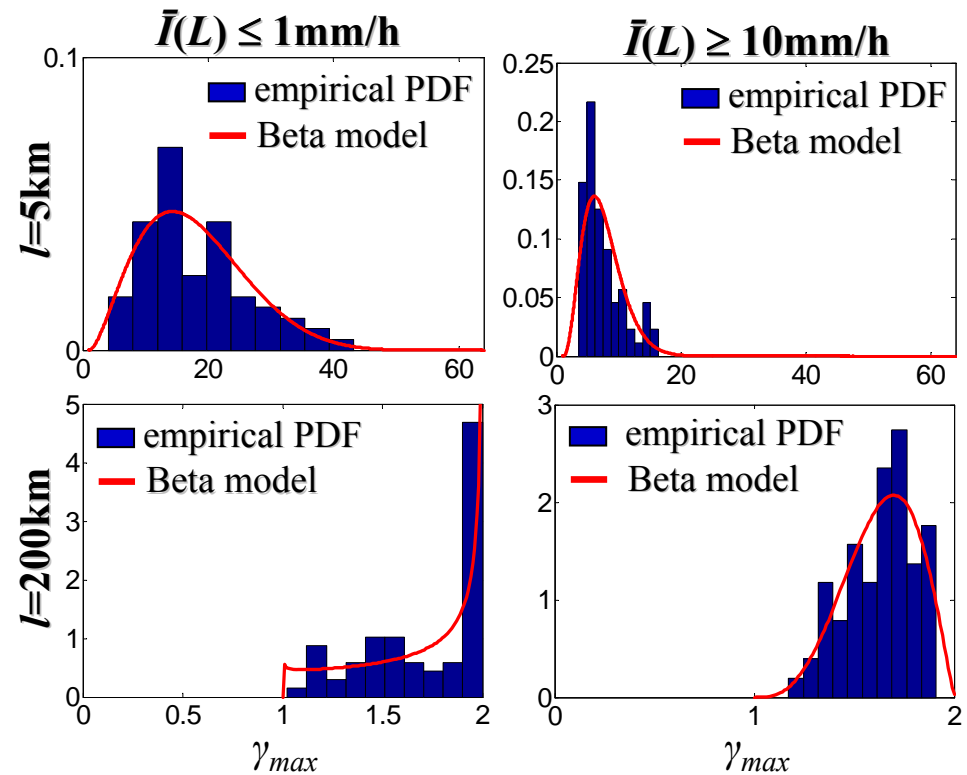
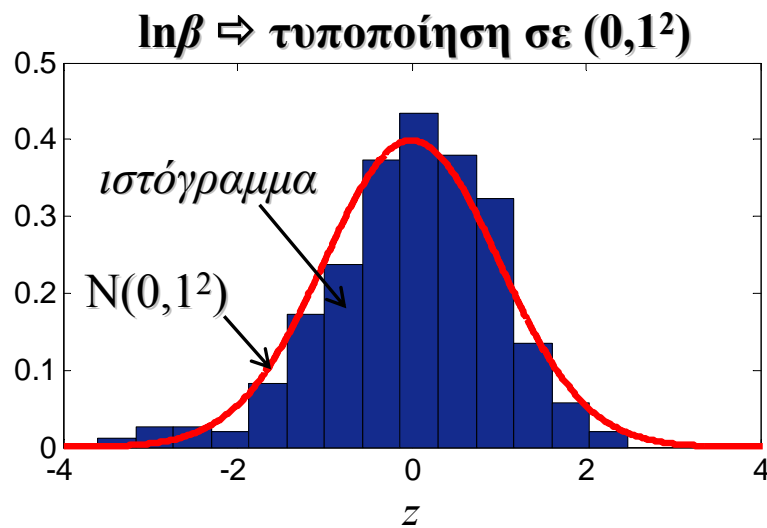
Κατανομή μεταβλητής $[\gamma_{max}(l)|\omega]$

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

$I_{max}(l)$ \rightarrow μέγιστη τιμή της εντάσεως βροχής σε κλίμακα l

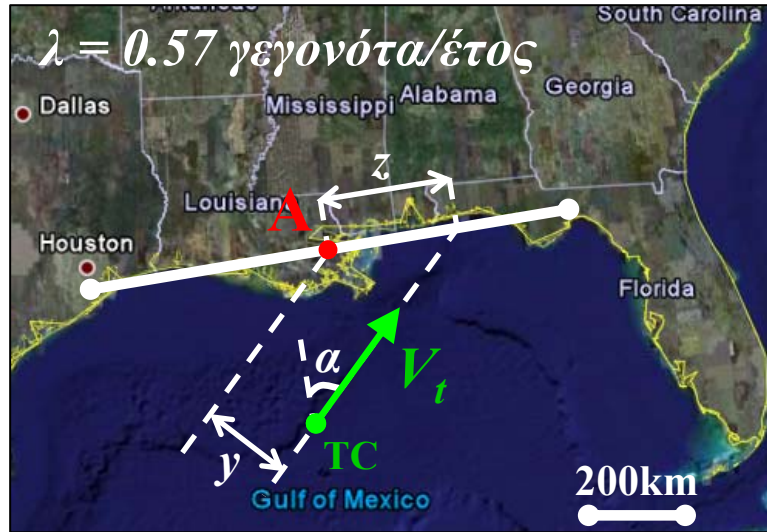
$\bar{I}(L)$ \rightarrow παραμετροποίηση σε όρους \bar{I}

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



Εφαρμογή στην Νέα Ορλεάνη

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



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

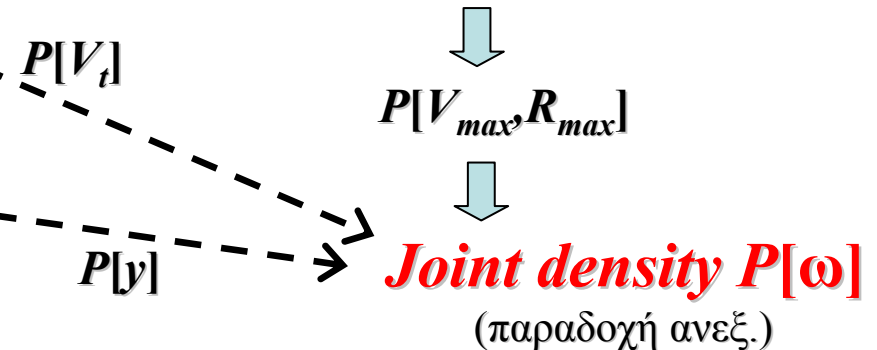
$$[R_{max} | \Delta P] \sim \left\{ \begin{array}{l} \text{lognormal with} \\ m = 3.962 - 0.00567 \Delta P, \sigma = 0.313 \\ \text{(Vickery et al., 2000)} \end{array} \right\}$$

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

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

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

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

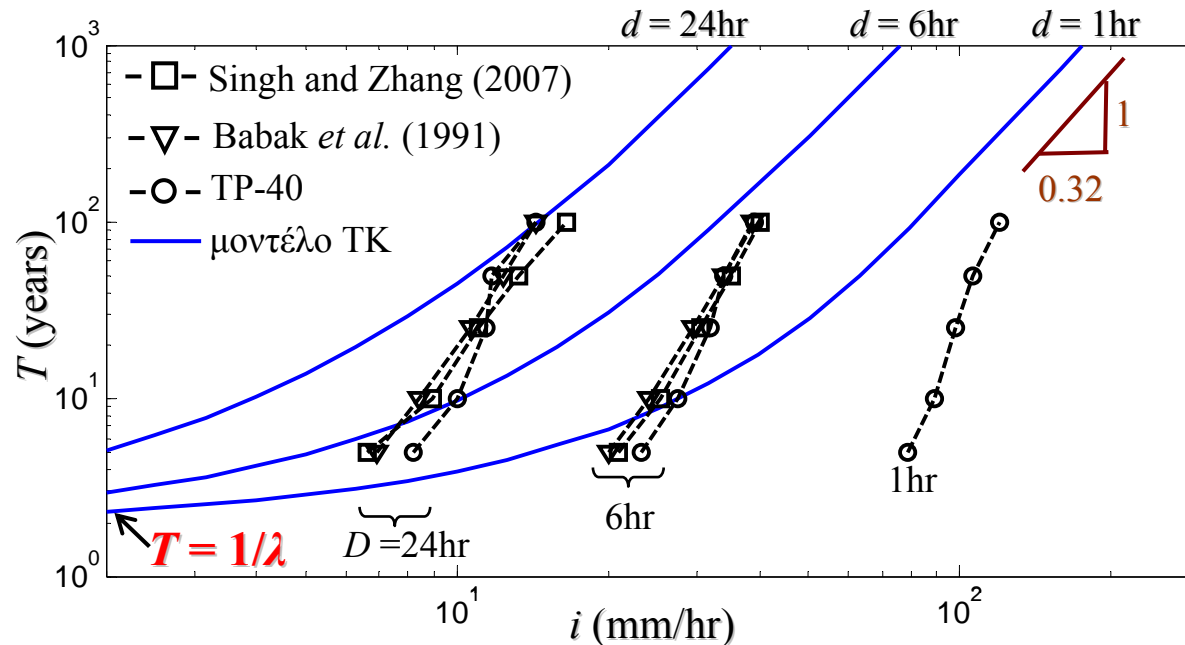
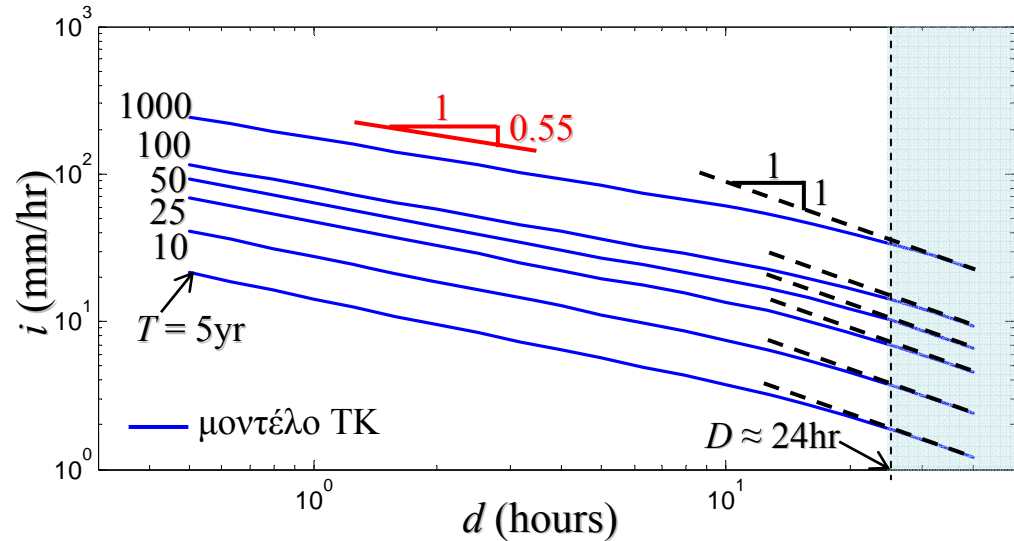


Εφαρμογή στην Νέα Ορλεάνη: Όμβριες καμπύλες

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”

Επιμέρους συμπεράσματα

➤ Αναπτύξαμε ένα μοντέλο υπολογισμού **μεγίστων εντάσεων βροχής** από τροπικούς κυκλώνες (TK) με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- $[I_{max}(d)|\omega]$ {
- **Ρητή παραμετροποίηση** των χαρακτηριστικών $\omega = [V_{max}, R_{max}, V_p, y]$ του TK
 - **Φυσικό μοντέλο** υπολογισμού του χωρικά και χρονικά μέσου πεδίου βροχής για TK με χαρακτηριστικά ω
 - **Στοχαστικό μοντέλο** για τις διακυμάνσεις του πεδίου βροχής σε διαφορετικές κλίμακες

➤ **Βαθμονόμηση και έλεγχος** με χρήση δορυφορικών δεδομένων PR

➤ **Εφαρμογή στην Νέα Ορλεάνη** { οι TK γίνονται κυρίαρχος παράγοντας επικινδυνότητας για **$d \geq 24h$** και **$T \geq 100$ years**

- Πρόσθετες δυνατότητες {
- Επέκταση του μοντέλου πέραν της ακτογραμμής (τοπογραφία)
 - Πρόγνωση μέγιστης βροχόπτωσης σε πραγματικό χρόνο για επικείμενους TK
 - Δυνατότητα συνδυασμού με μοντέλα εκτίμησης επικινδυνότητας για ανέμους, παλίρροια και κυματισμούς από TK

Γενικά συμπεράσματα

➤ **Σύνθετα στοχαστικά προσομοιώματα:** πολλαπλές πιθανοτικές συνιστώσες δομημένες με στόχο την φυσικομαθηματική περιγραφή ενός συστήματος.

Πλεονεκτήματα

- Δυνατότητα περιγραφής και δόμησης του προβλήματος σε όρους μηχανικού (σχέσεις αιτίου-αιτιατού)
- Χρήση του συνόλου της διαθέσιμης υδρολογικής πληροφορίας (μείωση της αβεβαιότητας εκτιμήσεως)
- Συνδυασμένη ανάλυση ιστορικών δεδομένων από διαφορετικές πηγές και με “ιδιαίτερα” χαρακτηριστικά

Πρόκληση

- Κατανόηση του φυσικού συστήματος και των δεδομένων
- Φυσικομαθηματική + πιθανοτική μοντελοποίηση των σχέσεων αιτίου-αιτιατού

Παραδείγματα

- βέλτιστη εκτίμηση όμβριων καμπύλων από μικρού μήκους χρονοσειρές
- εκτίμηση μεγίστων βροχοπτώσεων από τροπικούς κυκλώνες (TK)

Στοχαστική προσομοίωση: ιδέες και εφαρμογές

⇒ Οποudήποτε η αβεβαιότητα παίζει σημαντικό ρόλο.....

Υδρολογία

- Σχεδιασμός έναντι ακραίων υδρολογικών φαινομένων (π.χ. πλημμύρες, άνεμοι, θαλάσσιοι κυματισμοί...)
- Πρόγνωση επικείμενων καταστροφών σε πραγματικό χρόνο (π.χ. εξωτροπικοί κυκλώνες, χαλαζόπτωση)
- Κλιματική μεταβλητότητα και υδρολογικό ισοζύγιο (π.χ. διαστασιολόγηση έργων αποταμίευσης νερού)
- Συνδυασμένη ανάλυση υδρολογικών δεδομένων από μετρητικές διατάξεις (δορυφόροι, ραντάρ, βροχογράφοι) και μετεωρολογικά μοντέλα (GCMs)

Ενέργεια

- Μοντελοποίηση ενεργειακής ζήτησης ⇒ Μεταφορικά συστήματα
- Βέλτιστη διανομή ⇒ Κατασκευές
- Παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (άνεμος, ηλιοφάνεια, κυματισμοί, υδροδυναμικό) ⇒ Περιβάλλον & Υγεία
- ⇒ Ασφάλεια