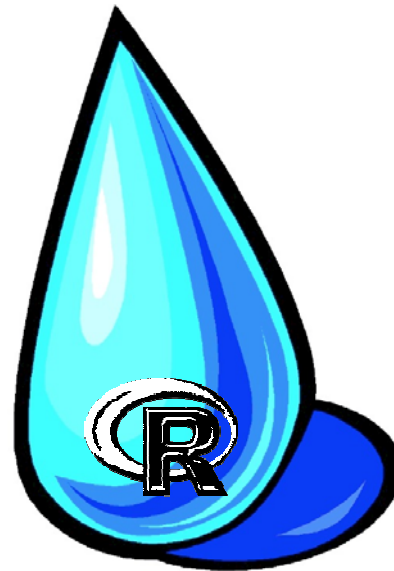




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟ ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΥΨΩΝ ΒΡΟΧΗΣ ΣΕ ΩΡΙΑΙΑ



Παναγιώτης Κοσσιέρης
Αθήνα, Ιανουάριος 2012

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Δομή της παρουσίασης

1. Προσομοίωση του φαινομένου της βροχής σε μικρές χρονικές κλίμακες
2. Το πρόβλημα του επιμερισμού
3. Θεωρητικό υπόβαθρο του υπολογιστικού συστήματος
4. Παρουσίαση του προγράμματος
5. Εφαρμογή του προγράμματος

Δυσκολίες προσομοίωσης της βροχής σε μικρές χρονικές κλίμακες

- ❖ Η μελέτη και προσομοίωση της δομής της βροχής σε μικρές χρονικές κλίμακες είναι μια αρκετά ενδιαφέρουσα, αλλά δύσκολη εργασία
- ❖ Η βροχόπτωση σε κλίμακες μικρότερες της μηνιαίας εμφανίζεται:
 - Ως διαλείπον φαινόμενο (εναλλαγή βροχερών-στεγνών περιόδων)
 - Ορισμός του επεισοδίου ή γεγονότος βροχής
 - Ύψος βροχής, διάρκεια και ένταση επεισοδίου βροχής, χρόνος διακοπής κλπ.
 - Με έντονη στοχαστική εξάρτηση των διαδοχικών μεταβλητών
 - Με μεγάλη διακύμανση των τιμών των μεταβλητών
- ❖ Οι ανελίξεις των υδρολογικών μεταβλητών εμφανίζουν:
 - Υψηλό συντελεστή μεταβλητότητας
 - Υψηλό συντελεστή ασυμμετρίας
 - Διαλείπουσα συμπεριφορά (δομική ασυνέχεια χρονοσειρών)

Μοντέλα προσομοίωσης της βροχής σε μικρές χρονικές κλίμακες

- ❖ Τα κλασικά γραμμικά μοντέλα δευτέρας τάξης (autoregressive, ARMA κλπ.) :
 - Αδυνατούν να συλλάβουν τη συνολική δομή εξάρτησης που παρουσιάζει η στοχαστική διαδικασία της βροχής στις πυκνές χρονικές κλίμακες
 - Αποτυγχάνουν να αναπαράγουν τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά και τη δομική ασυνέχεια που παρουσιάζουν οι χρονοσειρές των υψών βροχής
- ❖ Τα μαθηματικά εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί περιλαμβάνουν :
 - Τις αλυσίδες Μαρκόφ
 - Τις εναλλασσόμενες ανανεωτικές ανελίξεις
 - Τις ανελίξεις Poisson και τη γενικότερη κατηγορία σημειακών ανελίξεων

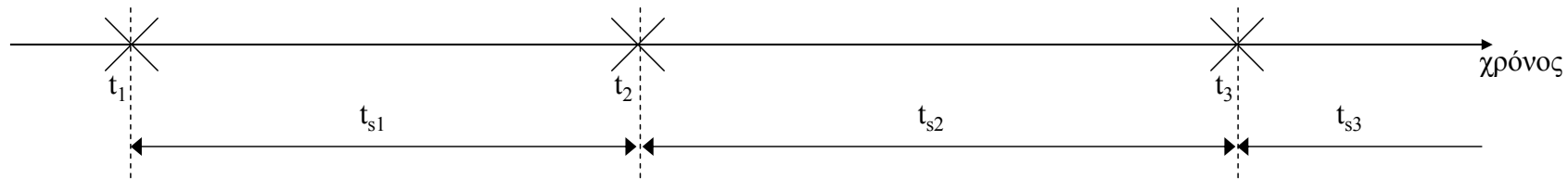
Μοντέλα σημειακών ανελίξεων

❖ Τα μοντέλα σημειακών ανελίξεων (Poisson) :

- Προσομοιώνουν τη βροχή σε συνεχή χρόνο μέσω κάποιας στοχαστικής ανέλιξης τυχαίων σημείων (συνήθως Poisson ανέλιξη)
- Προσομοιώνουν τις κατακρημνίσεις μέσω θεωρητικών παλμών, σημειακών ή ορθογωνικών, ομαδοποιημένων ή μεμονωμένων
- Υιοθετούν την έννοια του επεισοδίου βροχής ώστε να αποδοθεί σ' αυτό ένας χρόνος εμφάνισης, μια διάρκεια και ένα ύψος ή ένταση βροχής
- Περιλαμβάνουν αναλυτικές μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των θεωρητικών στατιστικών μεγεθών και την εύρεση των παραμέτρων τους
- Αναπαράγουν τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της βροχής, σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες για ένα σύνολο παραμέτρων
- Ενσωματώνουν και αναπαράγουν συγκεκριμένη δομή εξάρτησης για την ανέλιξη της έντασης της βροχής, θεωρούμενη σε συνεχή χρόνο (πλήρη ανεξαρτησία, Μαρκοβιανή δομή, μη Μαρκοβιανή δομή)

Η ανέλιξη Poisson

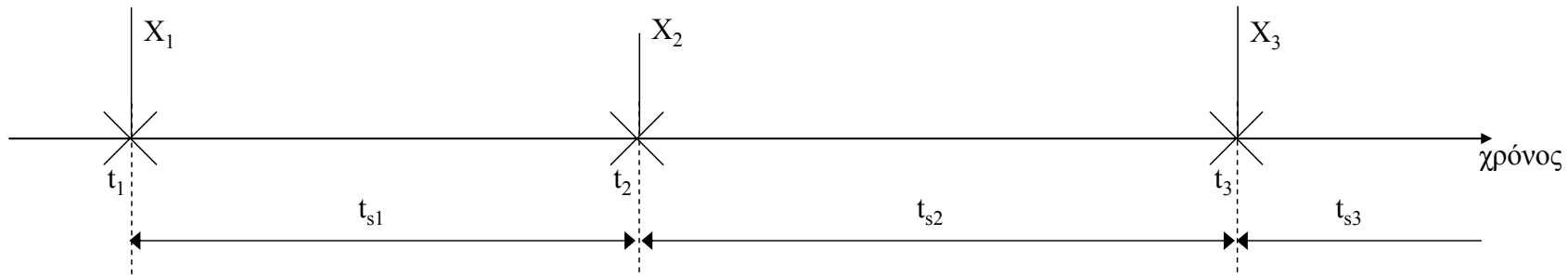
- ❖ Η μονοπαραμετρική χρονική ανέλιξη Poisson είναι η πιο απλή, αλλά συγχρόνως πιο διαδεδομένη, σημειακή ανέλιξη για τη προσομοίωση της εμφάνισης τυχαίων γεγονότων (βροχής) σε συνεχή χρόνο ή χώρο



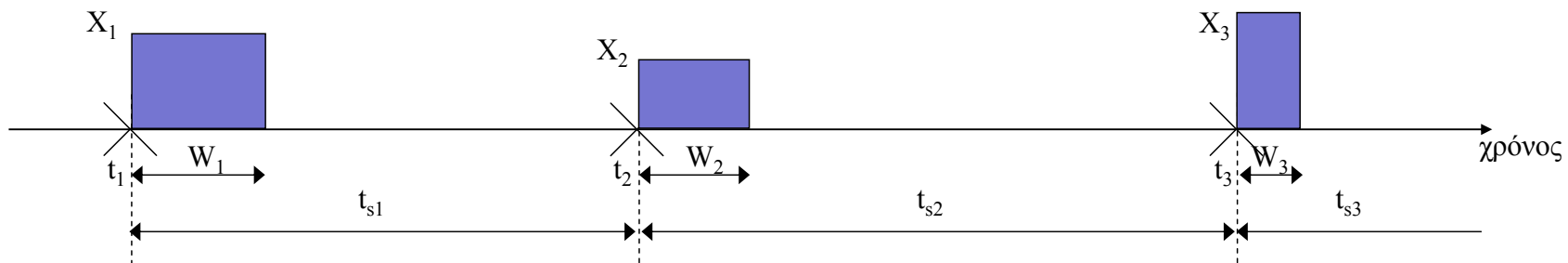
- ❖ Για τη σημειακή ανέλιξη Poisson, με παράμετρο λ , ισχύει ότι :
 - Οι χρόνοι διαδοχής t_{si} είναι ανεξάρτητες τ.μ. που ακολουθούν την εκθετική κατανομή, με παράμετρο λ (ικανή και αναγκαία συνθήκη)
 - Οι χρόνοι άφιξης t_i είναι ανεξάρτητες τ.μ. που ακολουθούν τη γάμα κατανομή, δυο παραμέτρων
 - Ο αριθμός των αφίξεων στο χρονικό διάστημα $(0, T]$ ακολουθεί την Poisson κατανομή, με παράμετρο λT
- ❖ Η χρήση της ανέλιξης Poisson στο τομέα της τεχνικής υδρολογίας δικαιολογείται από την ιδιότητα «απουσίας μνήμης» που χαρακτηρίζει τις εκθετικά κατανομημένες μεταβλητές (χρόνοι διαδοχής t_{si})

Μοντέλα ανέλιξης Poisson

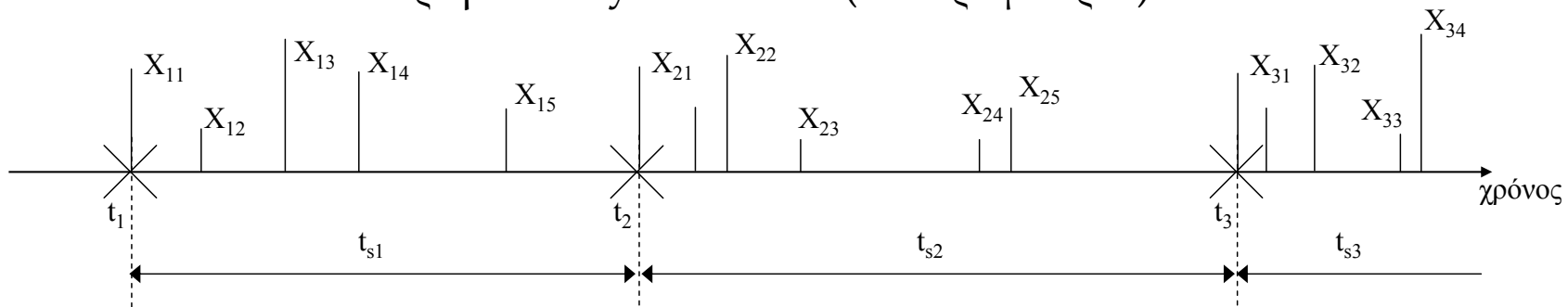
❖ Μοντέλο λευκού θορύβου Poisson (2 παράμετροι)



❖ Μακροβιανό μοντέλο ορθογωνικών παλμών (3 παράμετροι)

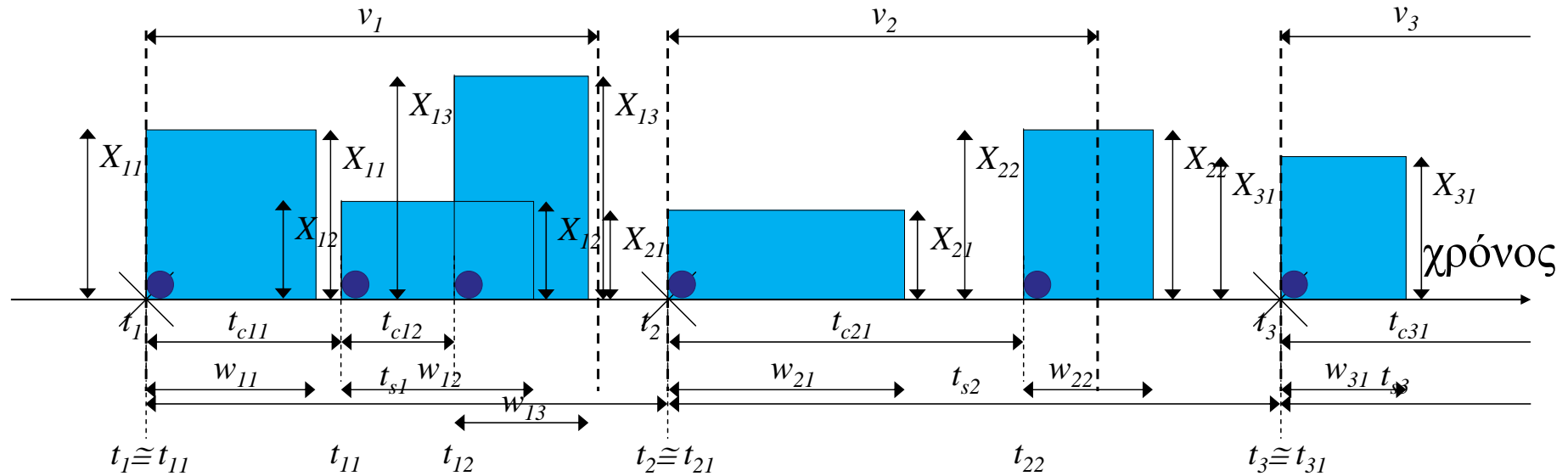


❖ Μοντέλο λευκού θορύβου Neyman-Scott (4 παράμετροι)



Μοντέλο σημειακής ανέλιξης Bartlett-Lewis

(Rodriguez-Iturbe et al., 1987, 1988)



Οι αφίξεις των καταιγίδων t_i παράγονται από μια Poisson διαδικασία (παραμέτρου λ)

Οι αφίξεις των παλμών t_{cij} παράγονται από μια Poisson διαδικασία (παραμέτρου β)

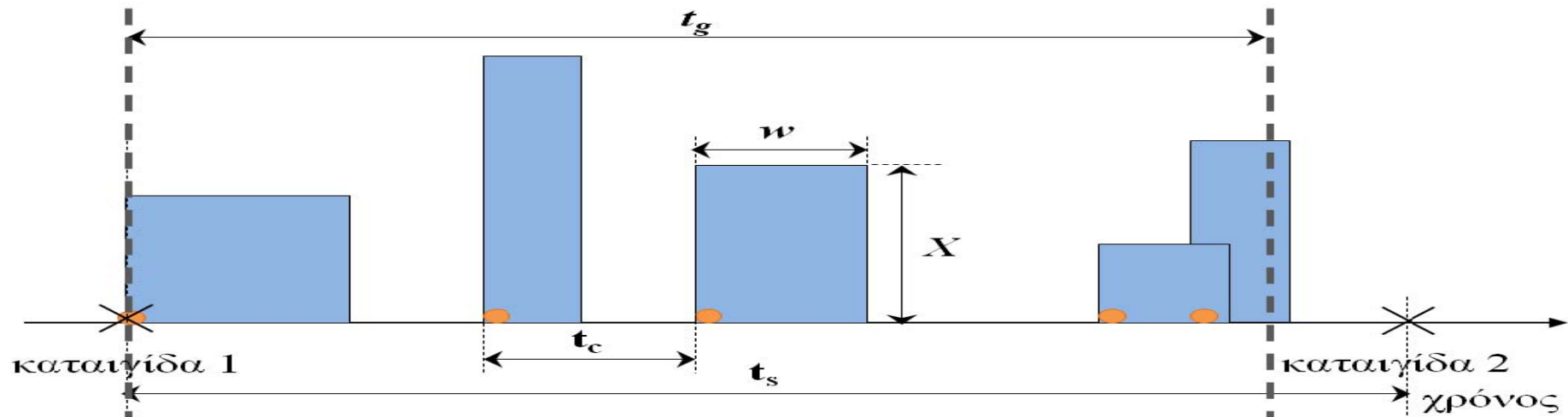
Το χρονικό διάστημα v_i μέσα στο οποίο παράγονται οι παλμοί ακολουθεί εκθετική κατανομή (παραμέτρου γ)

Οι εντάσεις των παλμών X_{ij} παράγονται από συγκεκριμένη κατανομή

Κάθε παλμός έχει διάρκεια W_{ij} που ακολουθεί εκθετική κατανομή (παραμέτρου η)

Μοντέλο σημειακής ανέλιξης Bartlett-Lewis

(Rodriguez-Iturbe et al., 1987, 1988)



$t_s \sim \text{EXP}(\lambda)$ για BLRPM, RBLRPM, RPBLGM

$X \sim \begin{cases} \text{EXP}(1/m_X) \text{ για RBLRPM} \\ \text{GAM}(p, \delta) \text{ για RPBLGM} \end{cases}$

$w \sim \text{EXP}(\eta)$

BLRPM

Σταθερές για όλες τις καταιγίδες

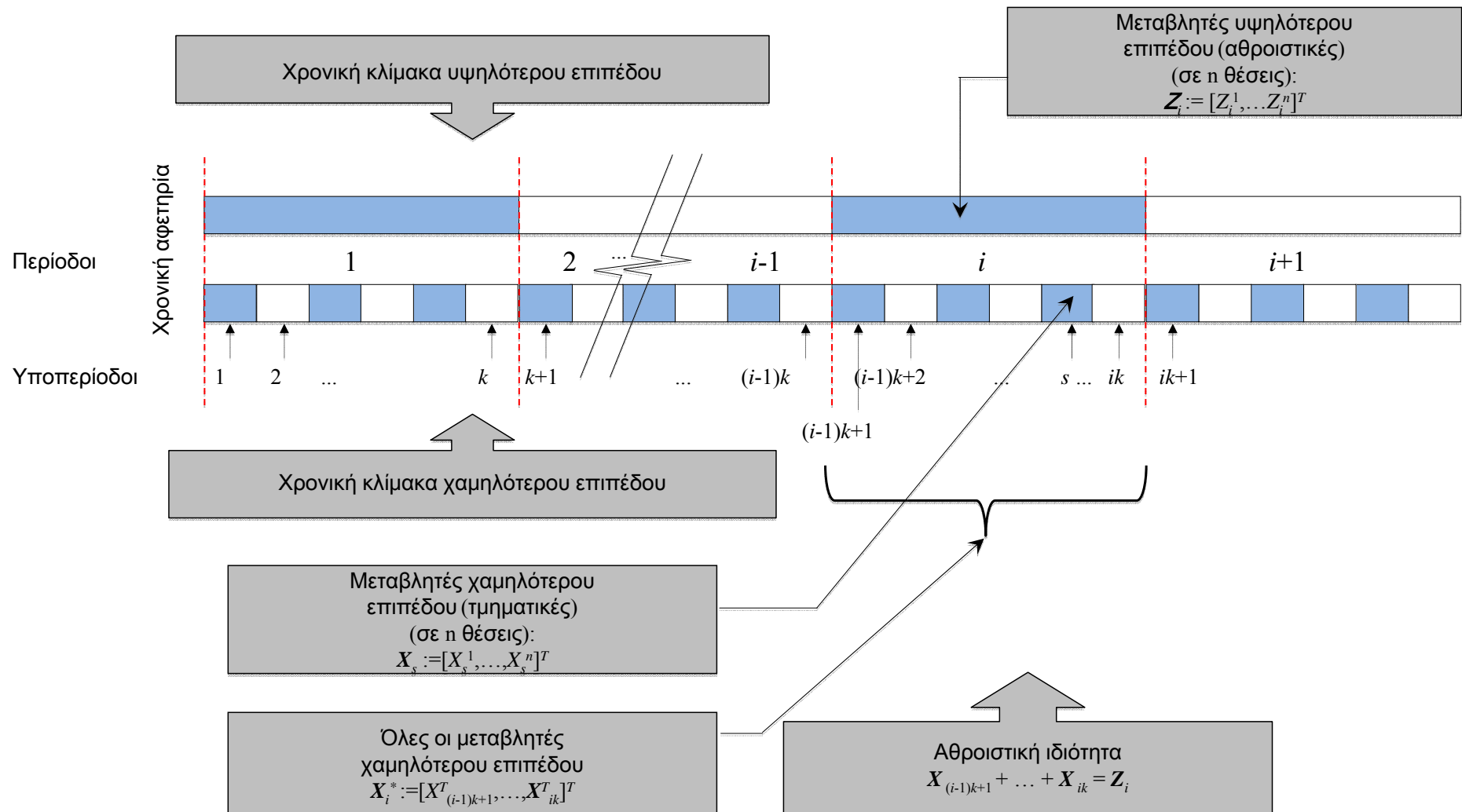
$t_c \sim \text{EXP}(\beta)$

$t_g \sim \text{EXP}(\gamma)$

RBLRPM, RPBLGM

$\eta \sim \text{GAM}(\alpha, \nu) \Rightarrow \begin{cases} \beta = \kappa_* \eta \\ \gamma = \varphi_* \eta \end{cases}$

Το πρόβλημα του επιμερισμού (1)



Το πρόβλημα του επιμερισμού (2)

❖ Τα μοντέλα επιμερισμού :

- Επιδιώκουν τη πύκνωση των σημείων μιας ήδη υπάρχουσας χρονοσειράς, συνθετικής ή ιστορικής, παράγοντας ένα σύνολο από ενδιάμεσα σημεία
- Συνδέουν τις χρονοσειρές διαφορετικών χρονικών επιπέδων, που διακρίνονται από διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά
- Συνδυάζονται με σειριακά μοντέλα τα οποία παράγουν τις τιμές των μεταβλητών της υψηλότερης χρονικής κλίμακας
- Χρησιμοποιούνται για :
 - Τον εμπλουτισμό ιστορικών βροχομετρικών δεδομένων (λεπτές κλίμακες)
 - Τη μελέτη πλημμυρών και καταιγίδων (σύνθεση λεπτομερέστερων υετογραφημάτων)
 - Για την αναγωγή των σεναρίων κλιματικής αλλαγής σε λεπτότερες κλίμακες
 - Για τη προσομοίωση της λειτουργίας των υδροσυστημάτων
- Ο συνδυασμός ενός σειριακού μοντέλου με ένα μοντέλο επιμερισμού έχει σαν αποτέλεσμα τη διατήρηση των ιδιοτήτων και της δομής των μεταβλητών στα δυο διαφορετικά χρονικά επίπεδα

❖ Στα μοντέλα επιμερισμού γενικής χρήσης η παραγωγή των τμηματικών μεταβλητών γίνεται μέσω ενός υβριδικού σχήματος που συνδυάζει και τις δυο χρονικές κλίμακες ταυτόχρονα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το μοντέλο των Valencia και Schaake (1972,1973)

Το μοντέλο επιμερισμού

- ❖ Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου BL βελτιώνεται, αν συνδυαστεί με μια κατάλληλη τεχνική επιμερισμού.
- ❖ Ένα τέτοιο συνδυασμό πρότειναν οι Κουτσογιάννης και Onof (2000, 2001) για τον επιμερισμό ημερήσιων υψών βροχής σε ωριαία.
- ❖ Έστω ότι γνωρίζουμε την ακολουθία των μεταβλητών Z_p του υψηλότερου χρονικού επιπέδου (ημερήσιο). Από το μοντέλο BL παράγονται οι συνθετικές μεταβλητές X_s του χαμηλότερου χρονικού επιπέδου (ωριαίο).
- ❖ Οι μεταβλητές X_s τροποποιούνται, παράγοντας τελικά τις X_s , έτσι ώστε οι χρονοσειρές των δυο χρονικών επιπέδων να έρθουν σε συμφωνία και να ικανοποιείται η αθροιστική ιδιότητα:
$$Z_p = \sum_{j=1}^k X_j$$
- ❖ Η διαδικασία συνόρθωσης που εφαρμόζεται για τη τροποποίηση, πρέπει να μην επηρεάζει την στοχαστική δομή που εισάγεται από το μοντέλο BL.

Διαδικασίες συνόρθωσης (Κουτσογιάννης και Μανέτας, 1996)

❖ Αναλογική διαδικασία συνόρθωσης

$$X_s = \bar{X}_s \left(Z / \sum_{j=1}^k \bar{X}_j \right) \quad (s=1, \dots, k)$$

- Η απλούστερη στην εφαρμογή
- Ακριβής ως προς τη διατήρηση των κατανομών, των ανεξάρτητων μεταβλητών X_s που ακολουθούν την κατανομή γάμα με κοινή παράμετρο κλίμακας
- Καλή προσέγγιση των κατανομών των εξαρτημένων μεταβλητών X_s που ακολουθούν την κατανομή γάμα
- Δεν παράγει αρνητικές τιμές

❖ Γραμμική διαδικασία συνόρθωσης

$$X_s = \bar{X}_s + \lambda_s \left(Z - \sum_{j=1}^k \bar{X}_j \right) \quad (s=1, \dots, k)$$

- Ακριβής ως προς τη διατήρηση των κατανομών των εξαρτημένων ή ανεξάρτητων μεταβλητών που ακολουθούν την κανονική κατανομή
- Ακριβής ως προς τη διατήρηση των ροπών δεύτερης τάξης των εξαρτημένων ή ανεξάρτητων μεταβλητών οποιασδήποτε κατανομής
- Παράγει αρνητικές τιμές (οι οποίες διορθώνονται μέσω επαναλήψεων)

❖ Διαδικασία συνόρθωσης δύναμης

$$X_s = \bar{X}_s \left(Z / \sum_{j=1}^k \bar{X}_j \right)^{\lambda_s / \eta_s} \quad (s=1, \dots, k)$$

- Ταυτίζεται με την αναλογική διαδικασία για στάσιμες ανεξίτητες
- Η εφαρμογή της απαιτεί επαναλήψεις
- Δεν παράγει αρνητικές τιμές
- Δεν είναι ακριβής ως προς τη διατήρηση των κατανομών, εκτός από ειδικές περιπτώσεις

Επιλογή της κατάλληλης διαδικασίας συνόρθωσης

- ❖ Παραδοχή στάσιμης ανέλιξης
 - η διαδικασία συνόρθωσης δύναμης ταυτίζεται με την αναλογική
- ❖ Μεγάλο ποσοστό μηδενικών τιμών για τα ύψη βροχής
 - η γραμμική διαδικασία συνόρθωσης δεν είναι ιδανική
- ❖ Παραδοχή γάμα κατανομής για μη μηδενικά ύψη βροχής
- ❖ Παραδοχή ασθενούς δομής αυτοσυσχέτισης



Τελικά επιλέγεται η αναλογική διαδικασία συνόρθωσης

Πηγές μεροληψίας

- ❖ Η παραδοχή της στοχαστικής ανεξαρτησίας για την διαδικασία της βροχόπτωσης στις λεπτές χρονικές κλίμακες είναι αβάσιμη
- ❖ Η έντονη μεταβλητότητα του πλήθους των μηδενικών υψών βροχής σε μια περίοδο, αποτελεί την κύρια πηγή μεροληψίας
- ❖ Για την μείωση της μεροληψίας που εισάγεται στα στατιστικά μεγέθη (δομή αυτοσυσχέτισης και ασυμμετρία), που δεν διατηρούνται ρητά από την αναλογική διαδικασία συνόρθωσης, απαιτείται εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας

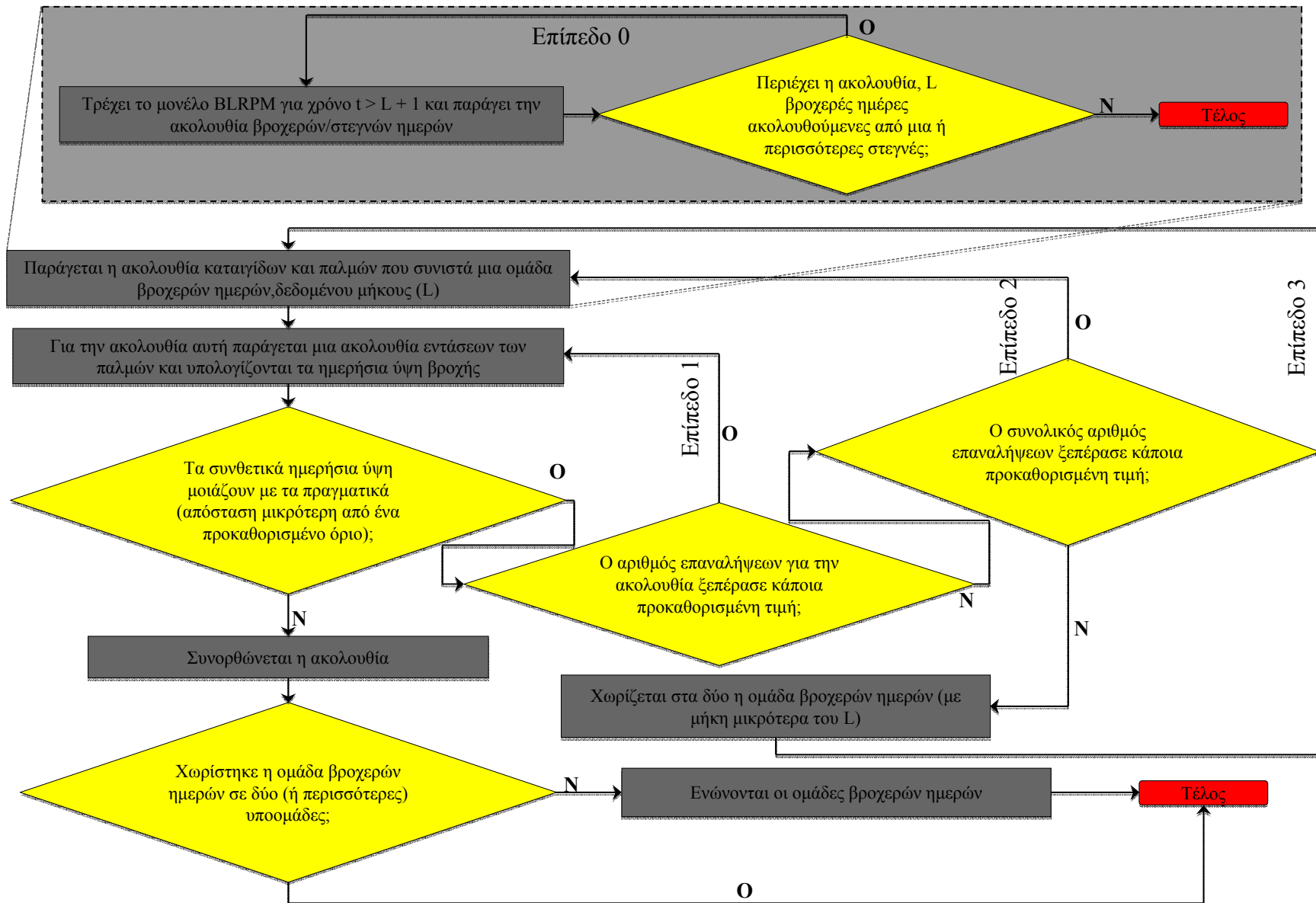
Επαναληπτική διαδικασία (1)

- ❖ Για μια συγκεκριμένη βροχερή περίοδο, το μοντέλο (Bartlett – Lewis) παράγει πολλές ακολουθίες ωριαίων υψών βροχής, από τις οποίες επιλέγεται για τροποποίηση (συνόρθωση) εκείνη που βρίσκεται σε μεγαλύτερη συμφωνία με τη γνωστή ακολουθία ημερήσιων υψών βροχής.
- ❖ Για μια μακρά περίοδο προσομοίωσης, η επαναληπτική διαδικασία σε συνδυασμό με τη διαδικασία συνόρθωσης μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλο υπολογιστικό χρόνο
- ❖ Διαφορετικές ομάδες βροχερών ημερών, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται τουλάχιστον μια στεγνή μέρα, μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητες. Αυτή η εμπειρική παρατήρηση είναι συνεπής με το μοντέλο BL, σύμφωνα με το οποίο οι αφίξεις των καταιγίδων δίνονται από την ανέλιξη Poisson.
- ❖ Αυτό μας επιτρέπει να διαχειριστούμε την κάθε ομάδα βροχερών ημερών ανεξάρτητα από τις άλλες, με αποτέλεσμα ο υπολογιστικός χρόνος να μειώνεται ραγδαία.

Επαναληπτική διαδικασία (2)

- ❖ Τελικά, για κάθε ομάδα βροχερών ημερών, το μοντέλο BL τρέχει αρκετές φορές, μέχρι η απόκλιση των ημερήσιων συνθετικών και ιστορικών υψών βροχής να γίνει μικρότερη από κάποιο όριο.
- ❖ Στην περίπτωση που η ομάδα βροχερών ημερών έχει πολύ μεγάλο μήκος, είναι πρακτικά αδύνατο να παράγουμε μια ακολουθία βροχερών ημερών, η οποία να βρίσκεται σε σχετική συμφωνία με την αντίστοιχη ιστορική. Στην περίπτωση αυτή, η ακολουθία διαιρείται σε υπό-ακολουθίες. Τελικά, την κάθε υπό-ακολουθία την διαχειριζόμαστε ανεξάρτητα από τις άλλες.

Διάγραμμα ροής

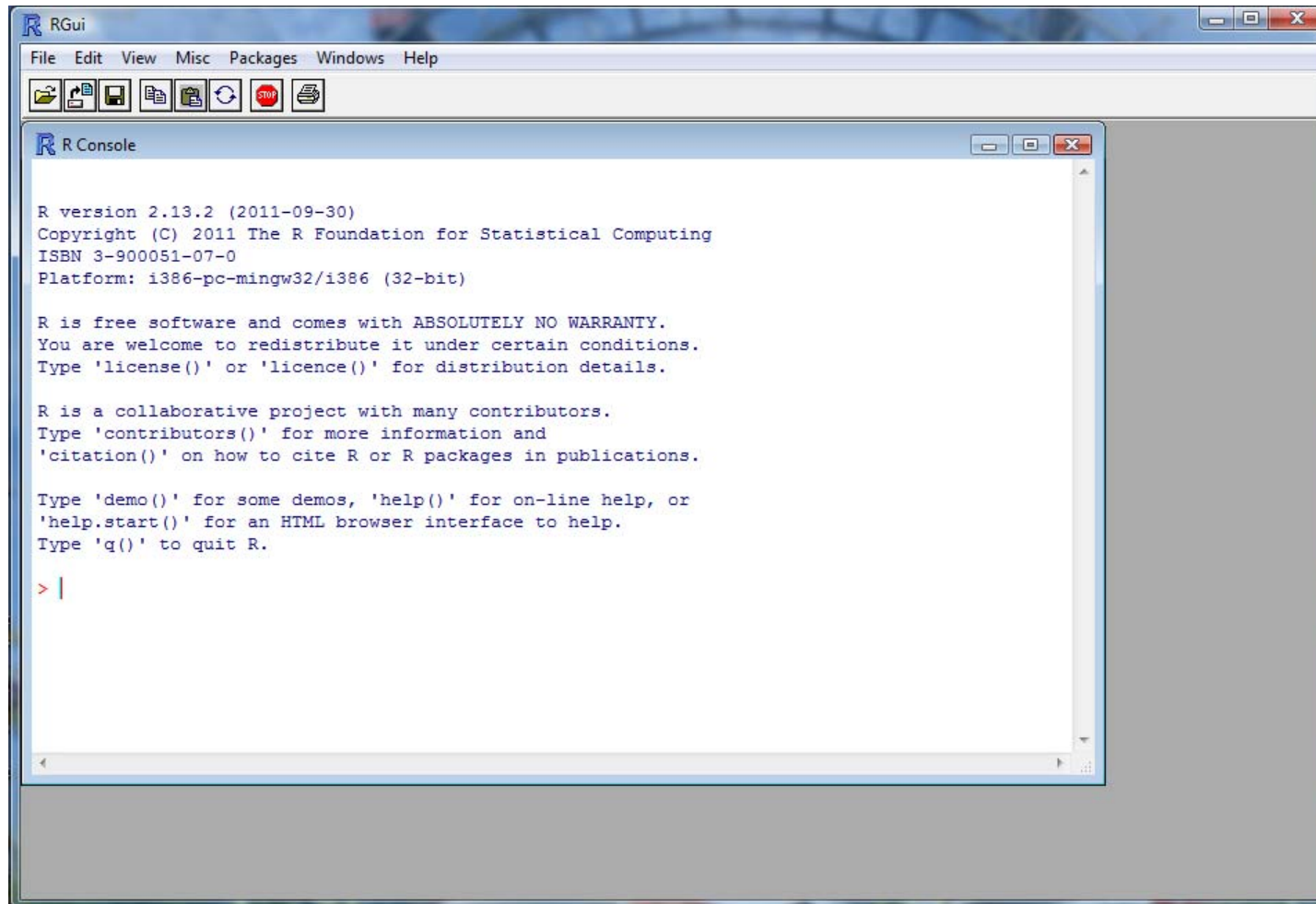


Το προγραμματιστικό περιβάλλον R (1)

- ❖ Η R είναι γλώσσα προγραμματισμού και συνοδεύεται από ένα πλήρες περιβάλλον επεξεργασίας δεδομένων, υπολογισμών και γραφημάτων
- ❖ Χρησιμοποιείται κυρίως, για την στατιστική ανάλυση δεδομένων, καθώς περιλαμβάνει πλήθος εντολών και στατιστικών συναρτήσεων
- ❖ Έχει την ικανότητα να διαχειρίζεται, να αναλύει και να επεξεργάζεται τεράστιους όγκους δεδομένων, με μεγάλη ταχύτητα
- ❖ Είναι γλώσσα ελεύθερου λογισμικού (GPL)
 - Δεν έχει εμπορική υποστήριξη
 - Συντηρείται εξ ολοκλήρου από ένα διεθνές κύκλωμα εθελοντών
- ❖ Παρέχει μια πλούσια βιβλιοθήκη πακέτων συναρτήσεων, η οποία εμπλουτίζεται συνεχώς από χρήστες που αναρτούν τις δικές τους συναρτήσεις, υπό μορφή πακέτων (ελεύθερα)
- ❖ Έχει την δυνατότητα να συνδέεται με άλλες, πολύ πιο γρήγορες γλώσσες προγραμματισμού

Το προγραμματιστικό περιβάλλον R (2)

- ❖ Όλες οι συναρτήσεις και εντολές καλούνται, εκτελούνται και αποτυπώνονται στο περιβάλλον εργασίας της R.



```
RGui
File Edit View Misc Packages Windows Help
R Console
R version 2.13.2 (2011-09-30)
Copyright (C) 2011 The R Foundation for Statistical Computing
ISBN 3-900051-07-0
Platform: i386-pc-mingw32/i386 (32-bit)

R is free software and comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY.
You are welcome to redistribute it under certain conditions.
Type 'license()' or 'licence()' for distribution details.

R is a collaborative project with many contributors.
Type 'contributors()' for more information and
'citation()' on how to cite R or R packages in publications.

Type 'demo()' for some demos, 'help()' for on-line help, or
'help.start()' for an HTML browser interface to help.
Type 'q()' to quit R.

> |
```

Το πακέτο HyetosR

- ❖ Η μεθοδολογία επιμερισμού που αναλύθηκε, υλοποιήθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον R
- ❖ Το πακέτο συναρτήσεων HyetosR, πραγματοποιήθηκε με σκοπό να παρέχει ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την προσομοίωση της βροχής, σε μικρές χρονικές κλίμακες
- ❖ Στη παρούσα φάση αποτελείται από τρεις συναρτήσεις και παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα επιλογής:
 - των παραμέτρων του μοντέλου BL
 - των παραμέτρων της επαναληπτικής διαδικασίας
 - της γραφικής απεικόνισης των στατιστικών μεγεθών
 - για την εισαγωγή και εξαγωγή βροχομετρικών δεδομένων
 - της εκτύπωσης των υετογραφημάτων

Συναρτήσεις του πακέτου HyetosR

❖ **disag.test.mode**

- Τα συνθετικά ωριαία ύψη βροχής παράγονται από επιμερισμό ημερήσιων.
- Η ημερήσια χρονοσειρά προέρχεται από συνάθροιση ωριαίων, τα οποία είτε παράγονται από το μοντέλο BL είτε προέρχονται από βροχομετρικά δεδομένα.
- Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της καταλληλότητας της μεθόδου επιμερισμού και των παραμέτρων του μοντέλου BL.

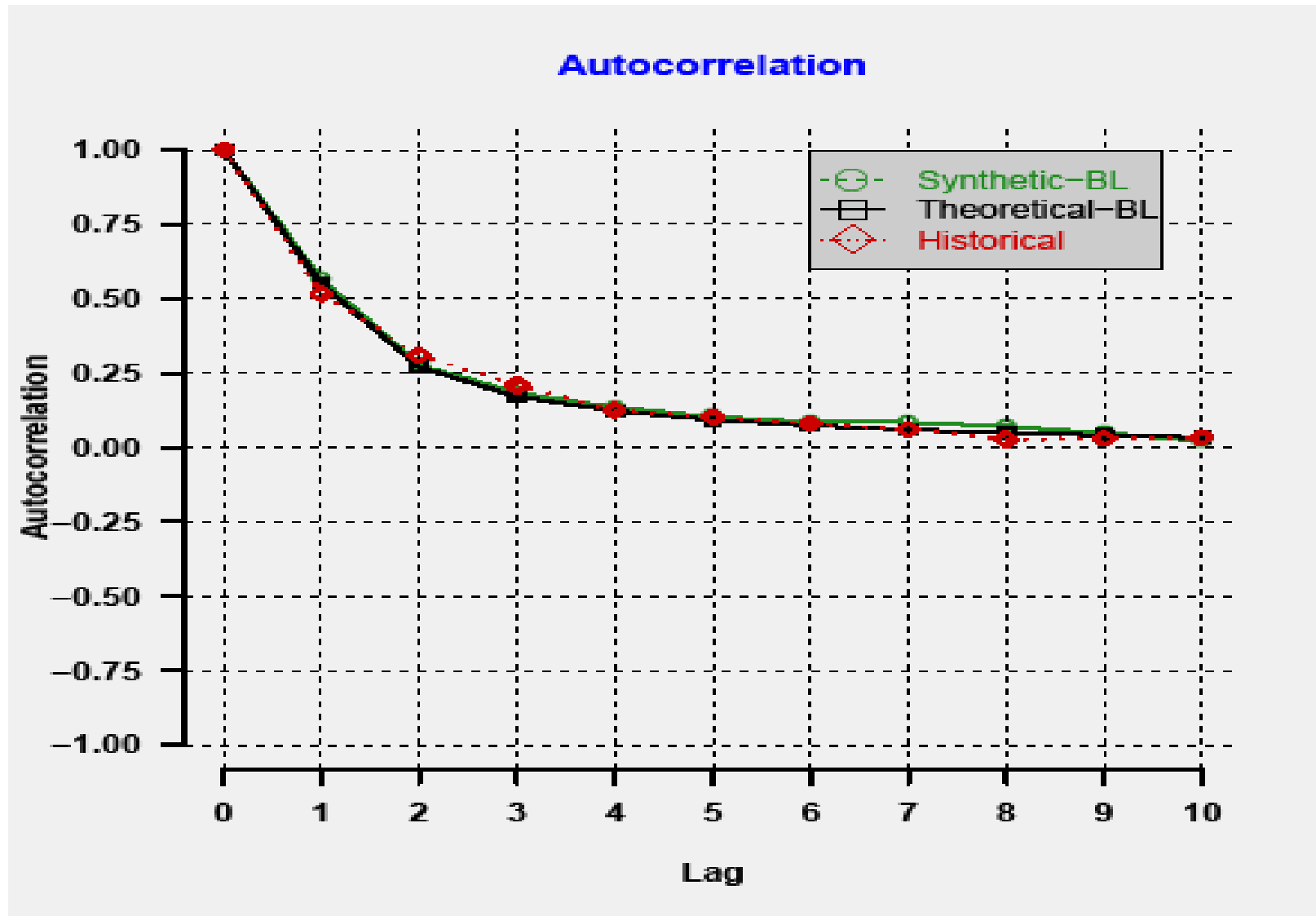
❖ **operat.mode**

- Τα συνθετικά ωριαία ύψη βροχής παράγονται από επιμερισμό ημερησίων.
- Τα ιστορικά ημερήσια ύψη βροχής διαβάζονται από κάποιο εξωτερικό αρχείο.
- Η συνάρτηση αυτή δεν επιτρέπει τη σύγκριση καθώς δεν διατίθενται ωριαία βροχομετρικά δεδομένα

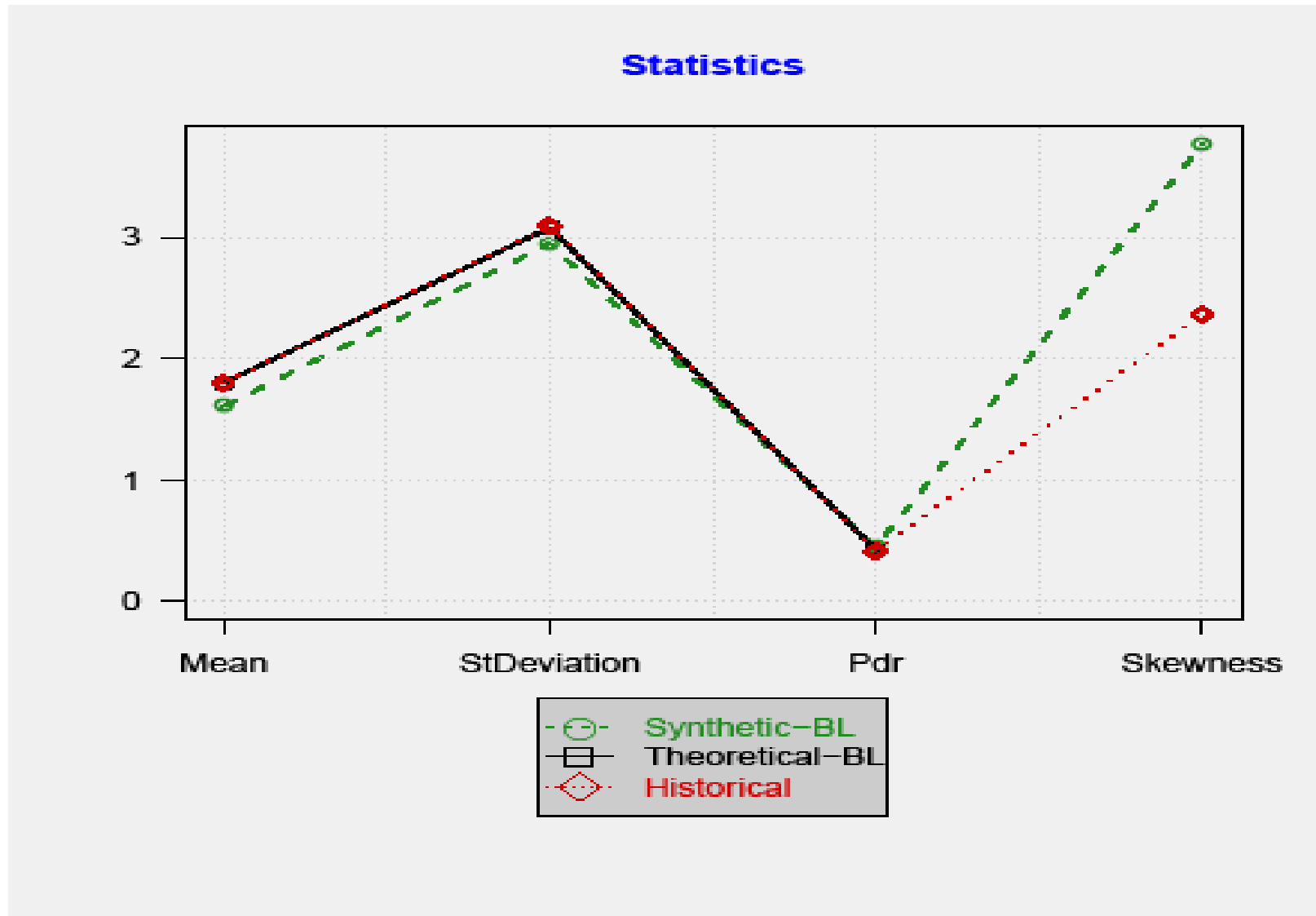
❖ **BLts**

- Τα συνθετικά ύψη βροχής παράγονται απευθείας από το μοντέλο BL και όχι από επιμερισμό ημερησίων.
- Η χρονική κλίμακα και το μήκος της συνθετικής χρονοσειράς επιλέγονται από το χρήστη

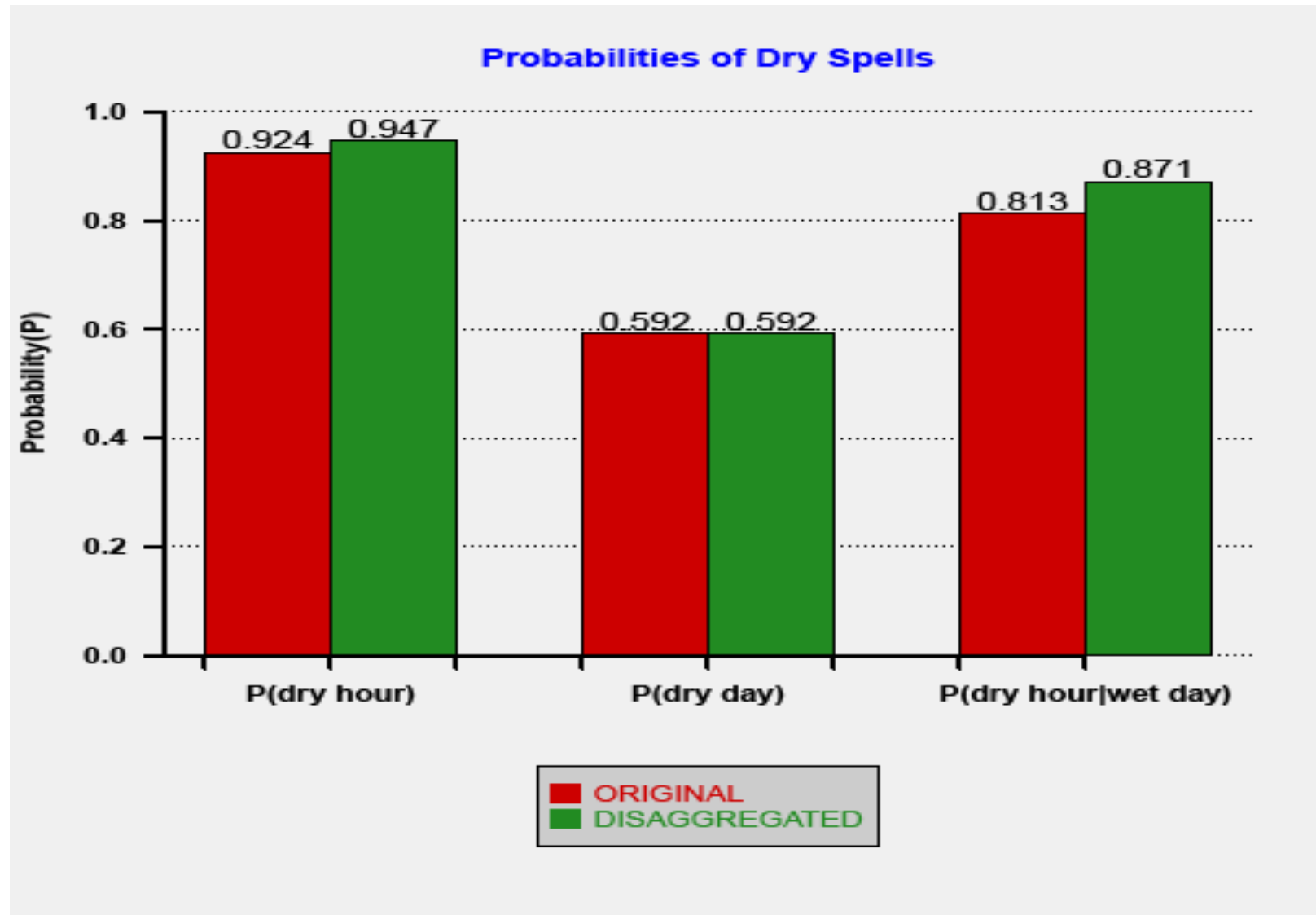
Παραδείγματα γραφημάτων (1)



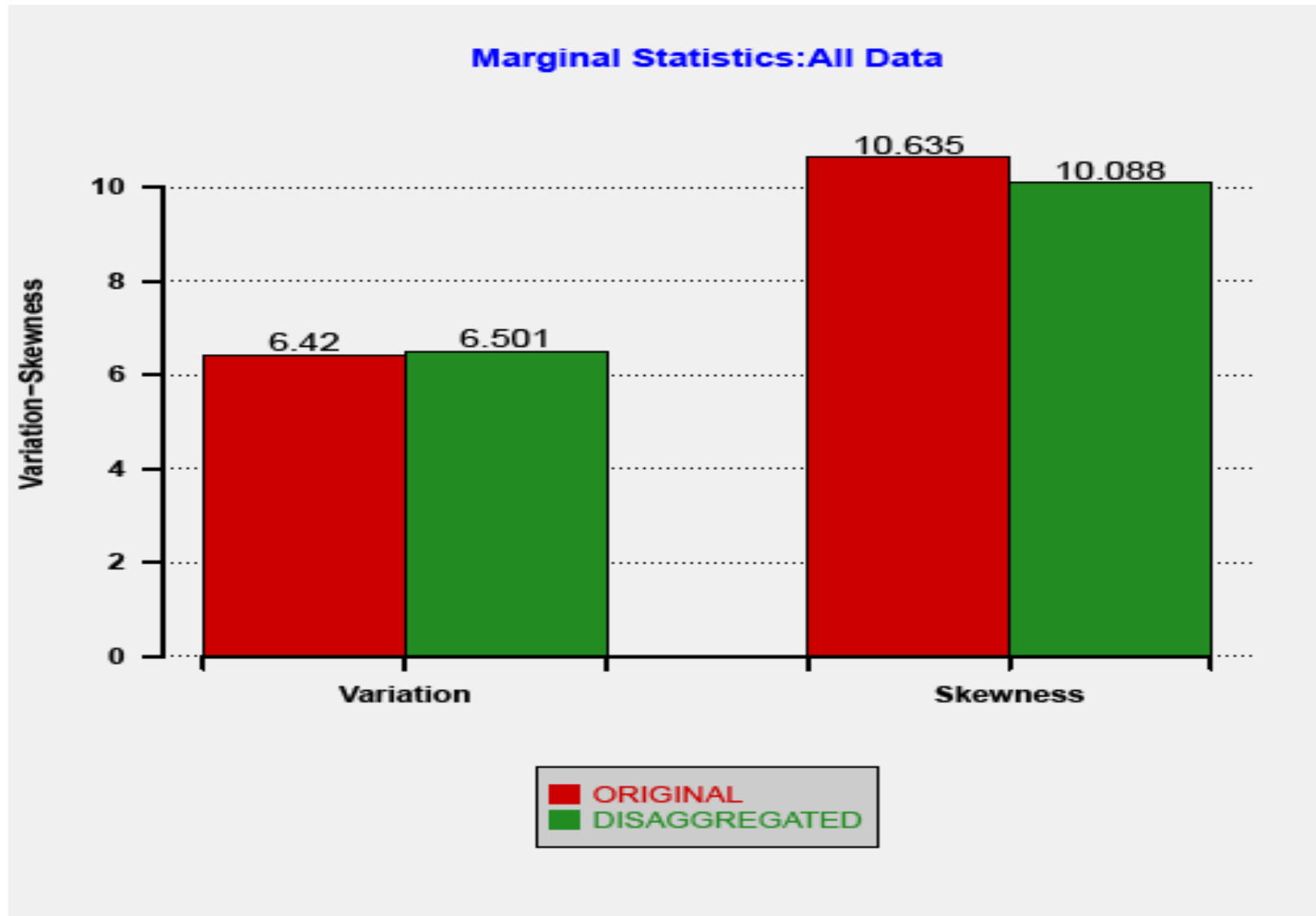
Παραδείγματα γραφημάτων (2)



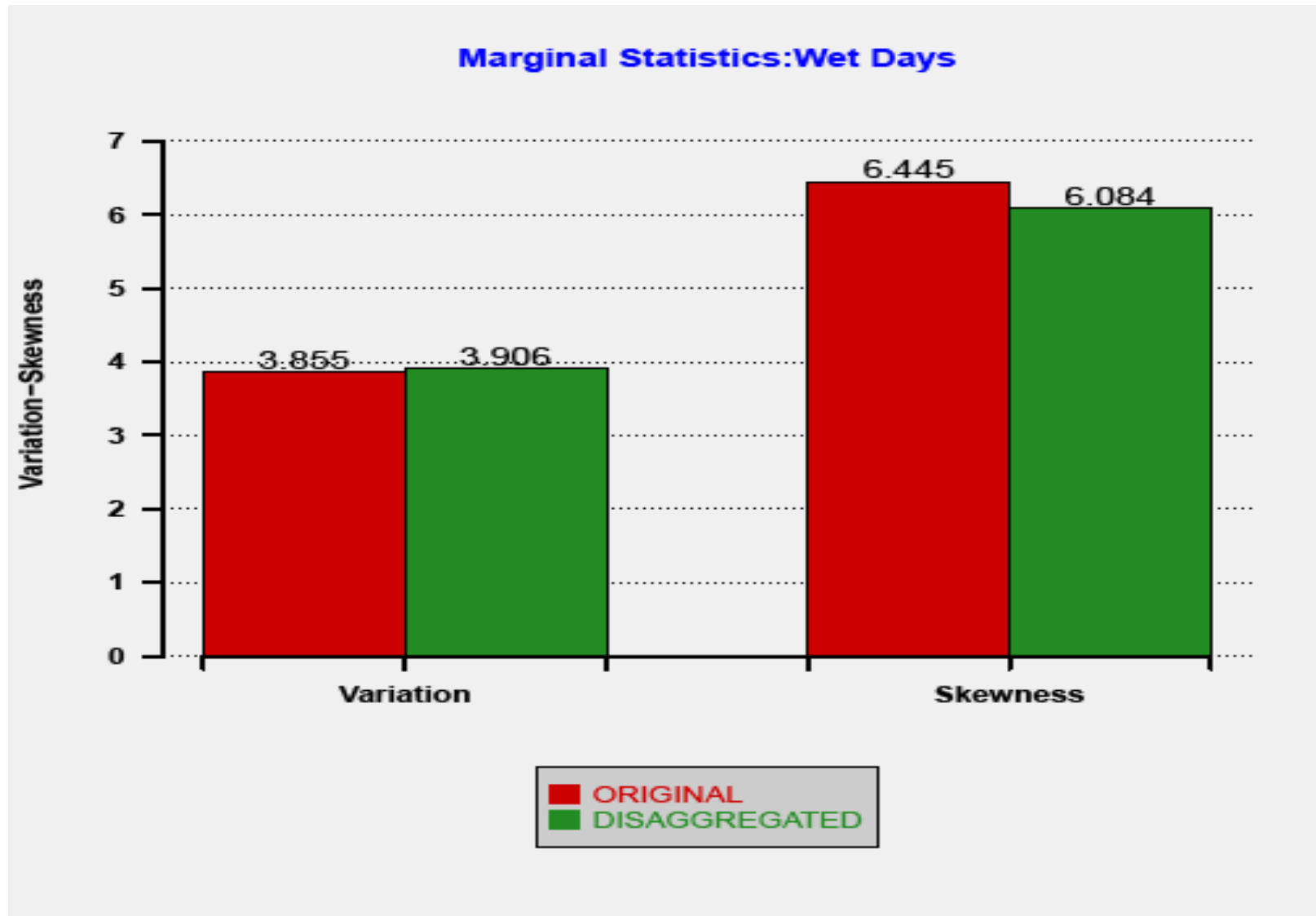
Παραδείγματα γραφημάτων (3)



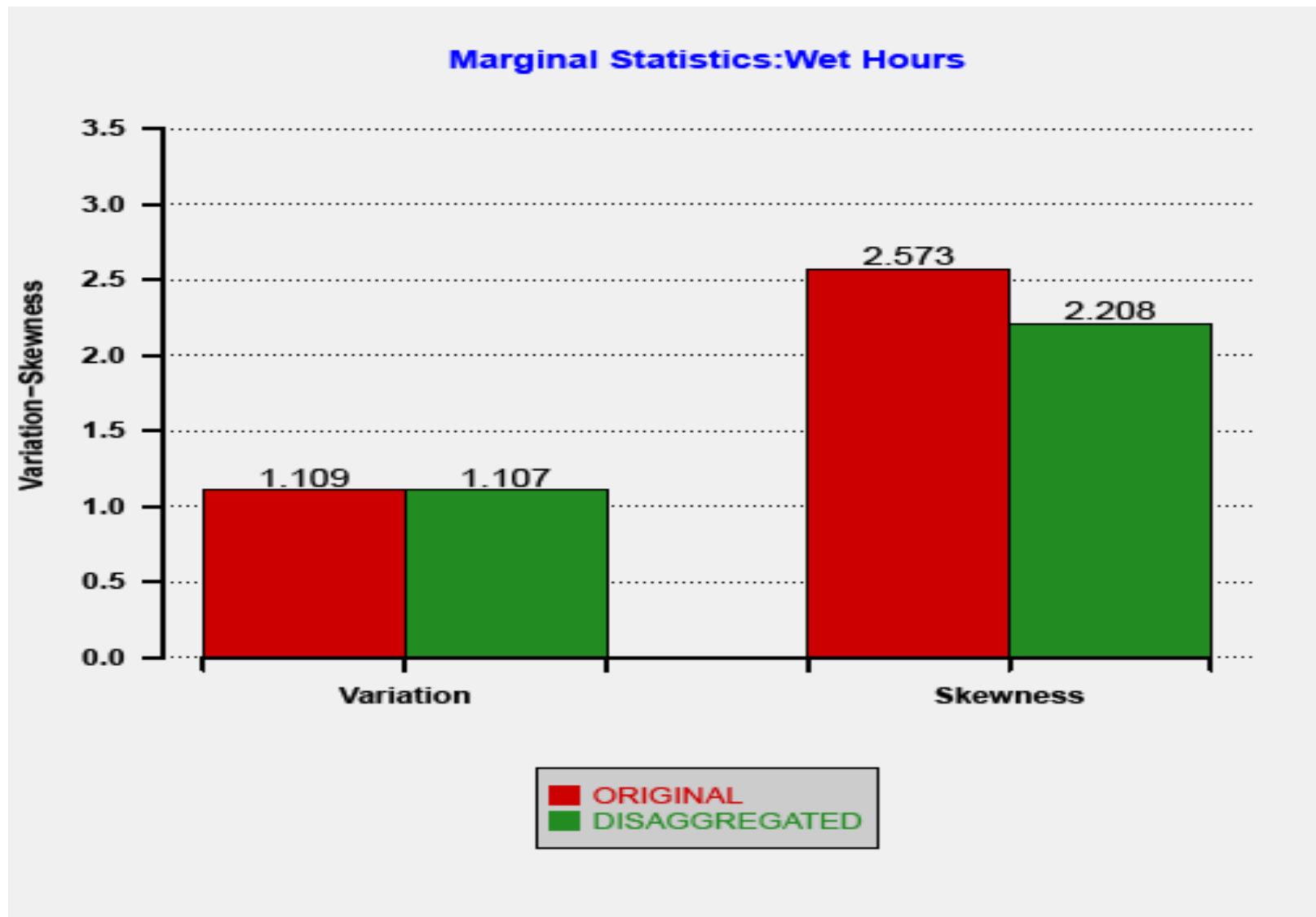
Παραδείγματα γραφημάτων (4)



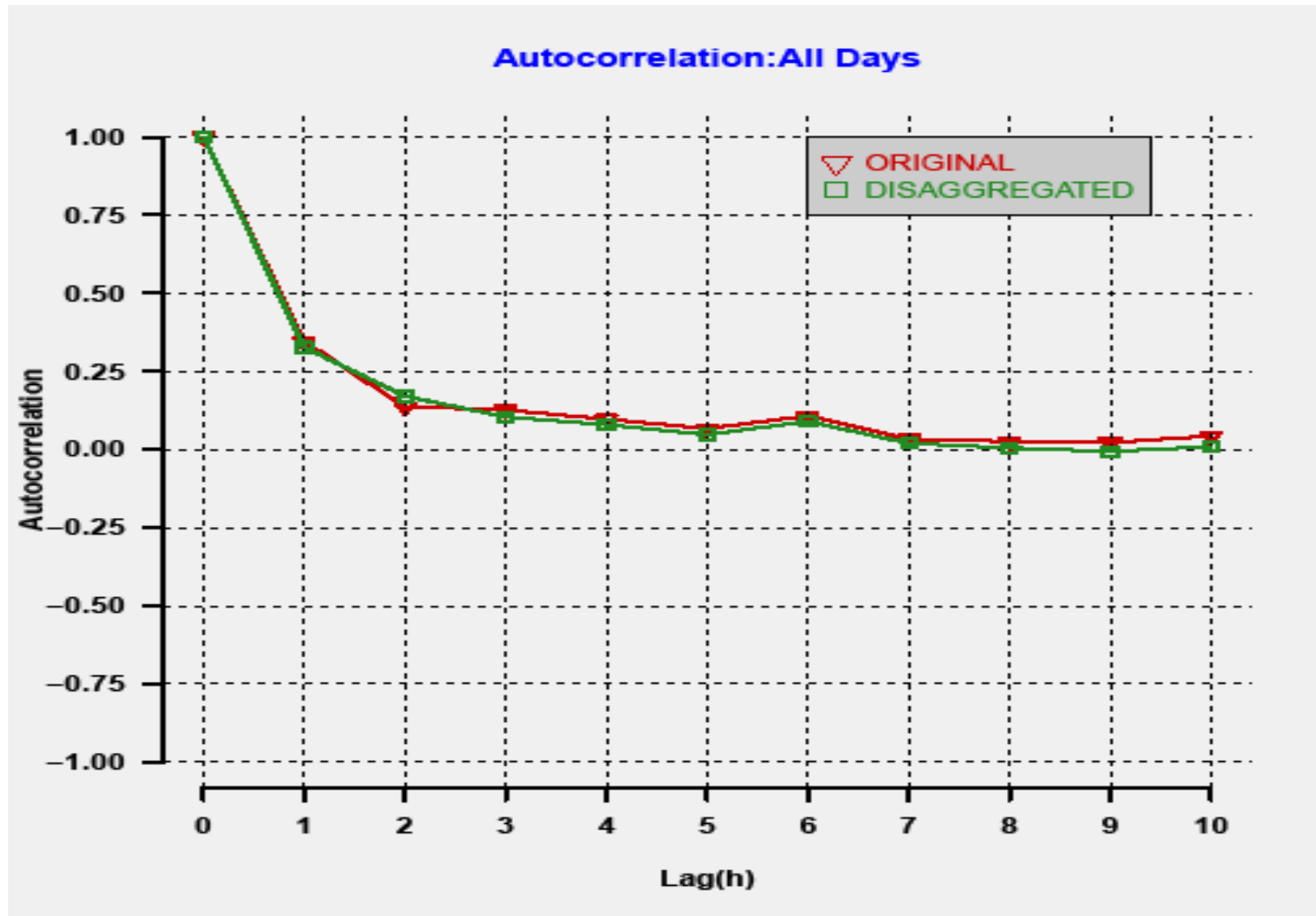
Παραδείγματα γραφημάτων (5)



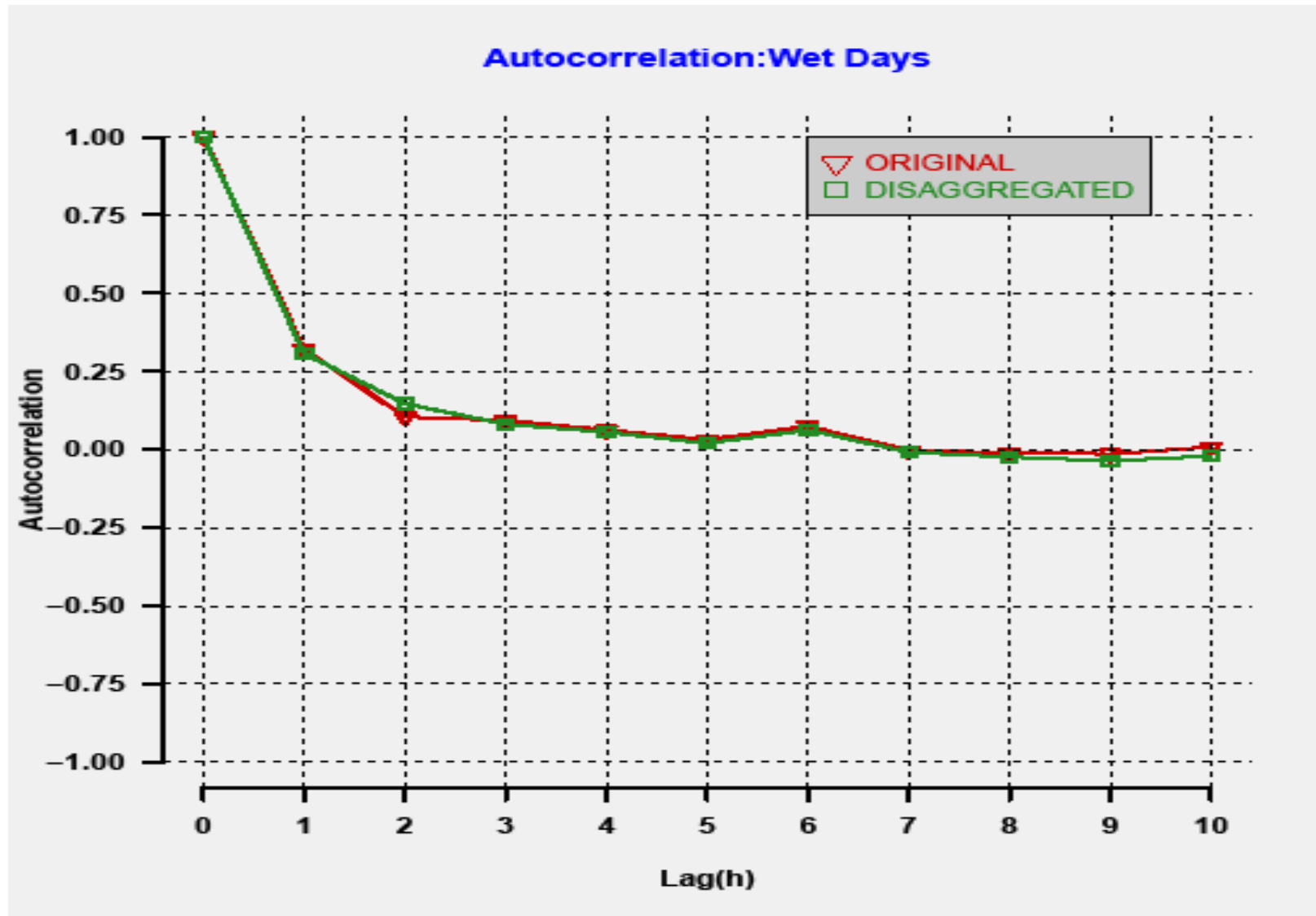
Παραδείγματα γραφημάτων (6)



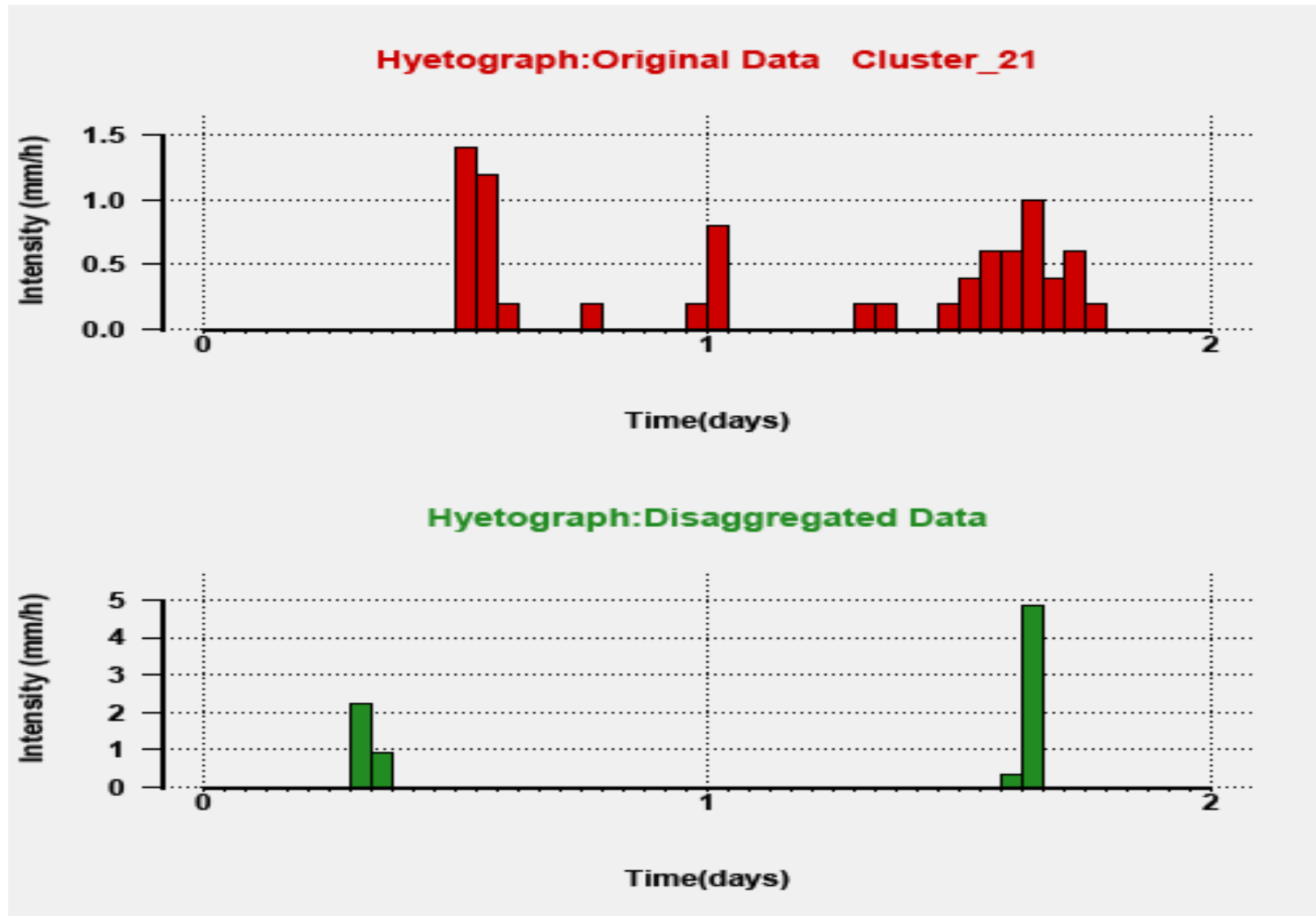
Παραδείγματα γραφημάτων (7)



Παραδείγματα γραφημάτων (8)



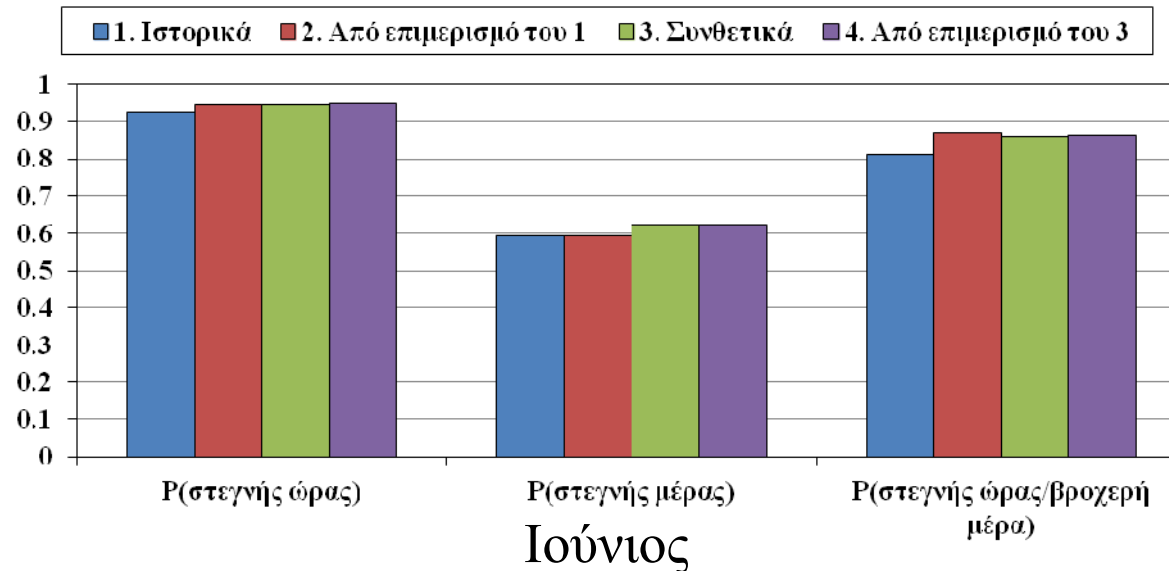
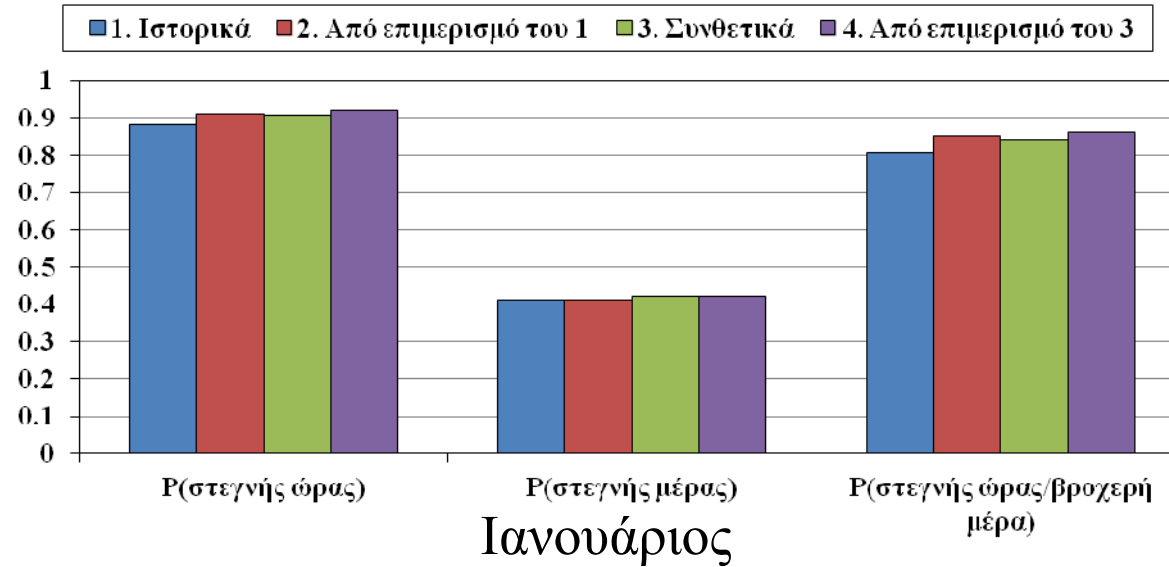
Παραδείγματα γραφημάτων (9)



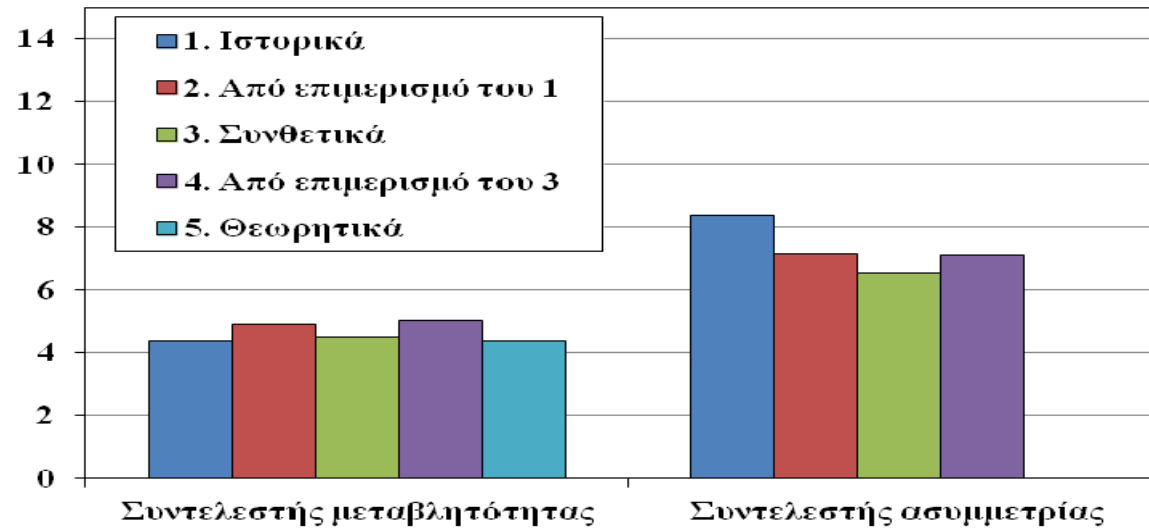
Εφαρμογή

Βροχομετρικός σταθμός		Dane End (Αγγλία)	
Μήνας		Ιανουάριος	Ιούνιος
Μήκος δεδομένων (χρόνια)		13	13
Πλήθος βροχερών ημερών		237	156
Πλήθος ομάδων βροχερών ημερών		74	62
Μηνιαία Βροχόπτωση	Μέση τιμή (mm)	55.677	50.200
	Τυπική Απόκλιση (mm)	24.576	32.274
Ημερήσια Βροχόπτωση	Μέση τιμή (mm)	1.796	1.673
	Τυπική Απόκλιση (mm)	3.094	3.833
Ωριαία Βροχόπτωση	Μέση τιμή (mm)	0.075	0.067
	Τυπική Απόκλιση (mm)	0.328	0.443
Πιθανότητα στεγνής περιόδου	Ημερήσια	0.412	0.592
	Ωραία	0.886	0.924
Παράμετροι μοντέλου Bartlett-Lewis	α (-)	6.455019	3.9529358
	κ (-)	0.247635	0.1479426
	φ (-)	0.1596294	0.0394698
	λ (d ⁻¹)	0.7631448	0.4596792
	ν (d)	0.145415642	0.0141872
	μ_x (mm d ⁻¹)	34.6752576	158.1091152
	σ_x (mm d ⁻¹)	15.9245688	55.6506624

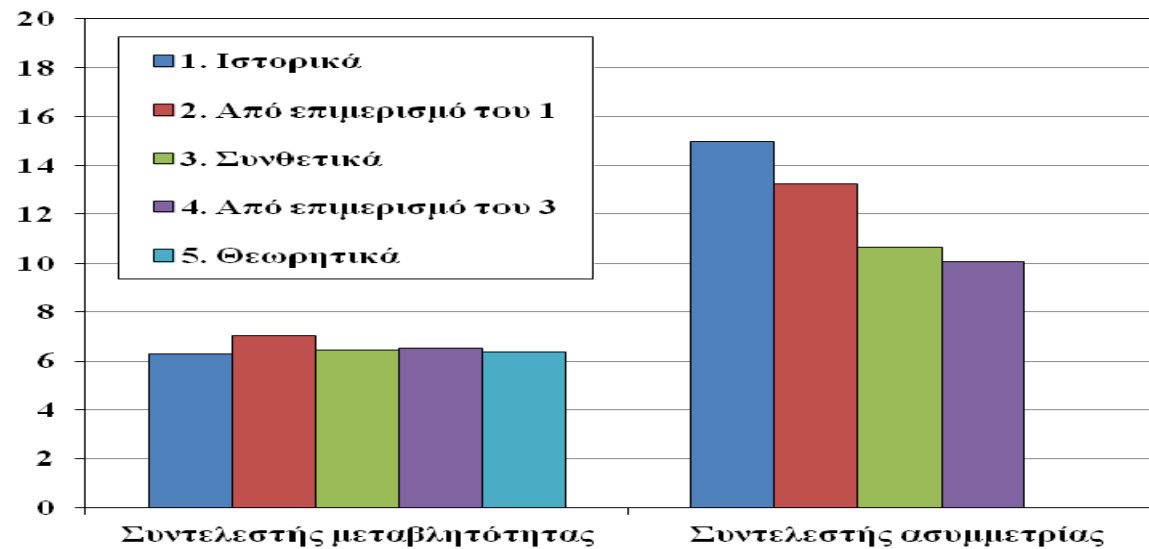
Πιθανότητα εμφάνισης βροχερών/στεγνών περιόδων



Περιθώριες ροπές

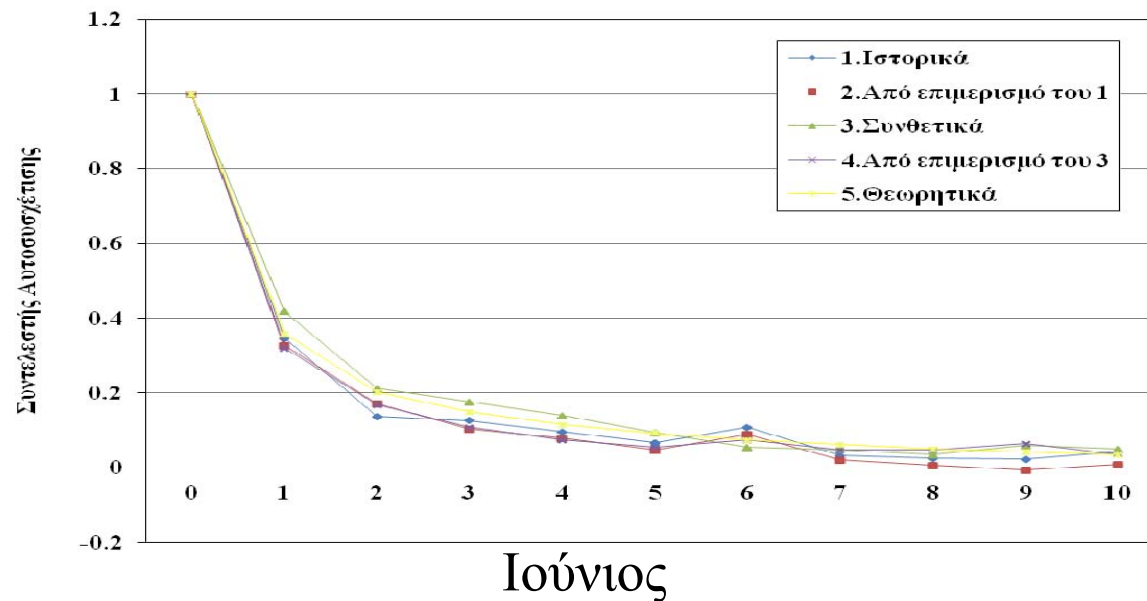
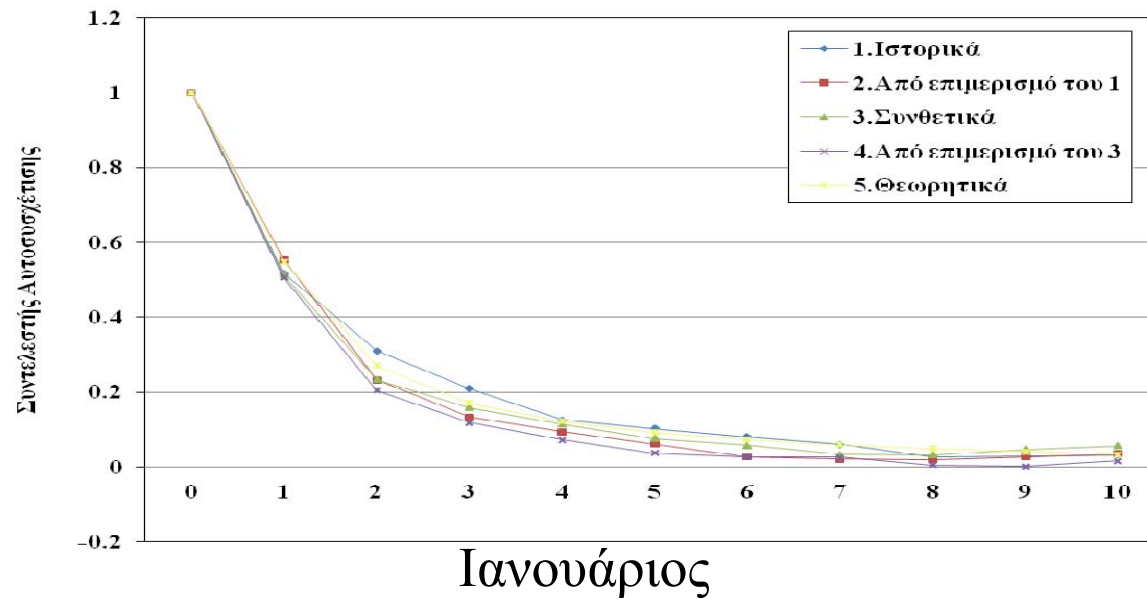


Ιανουάριος

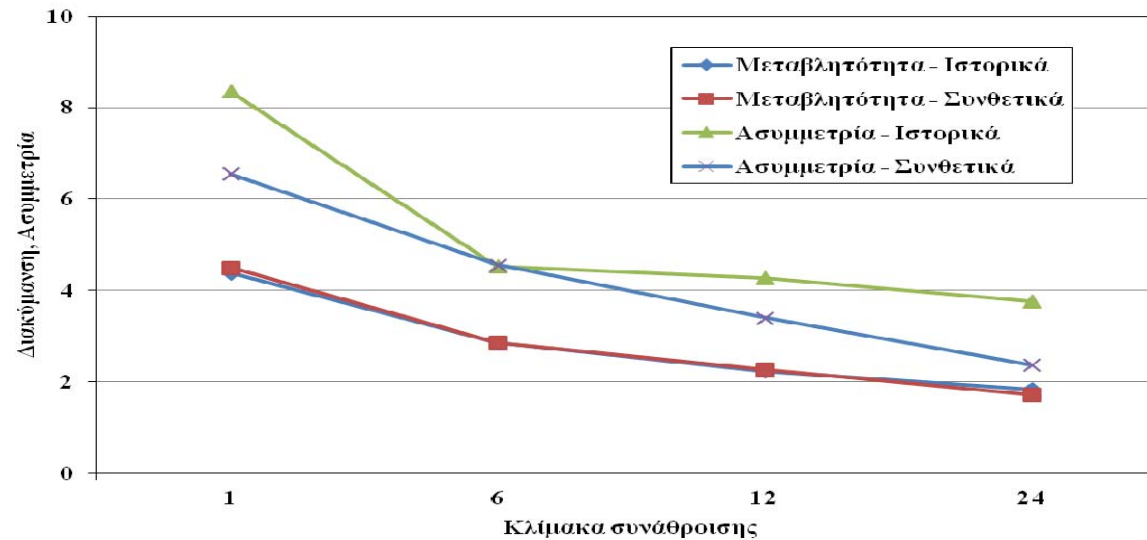


Ιούνιος

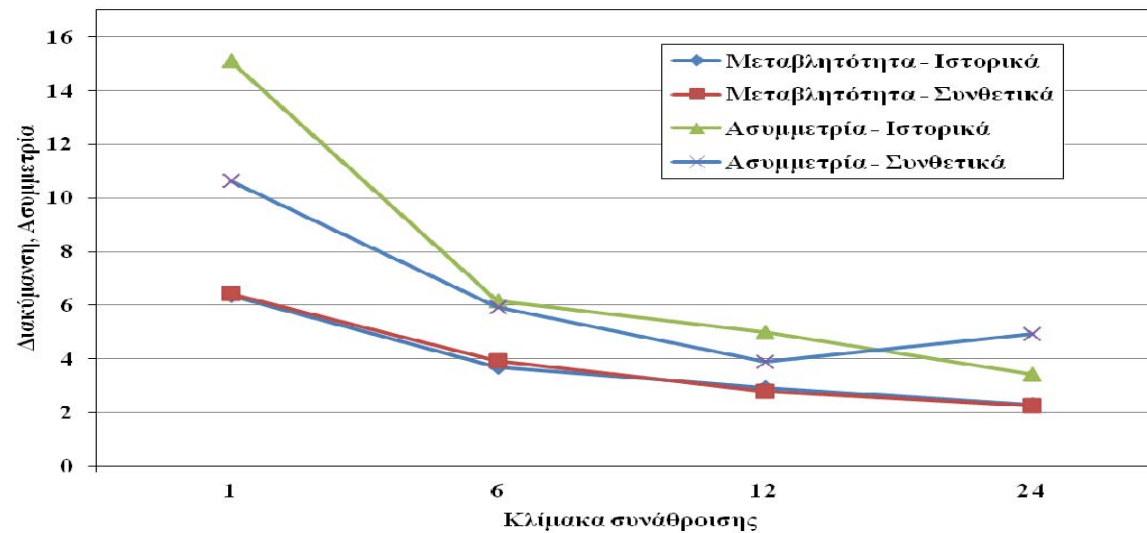
Αυτοσυσχέτιση



Περιθώριες ροπές ενδιάμεσων χρονικών κλιμάκων

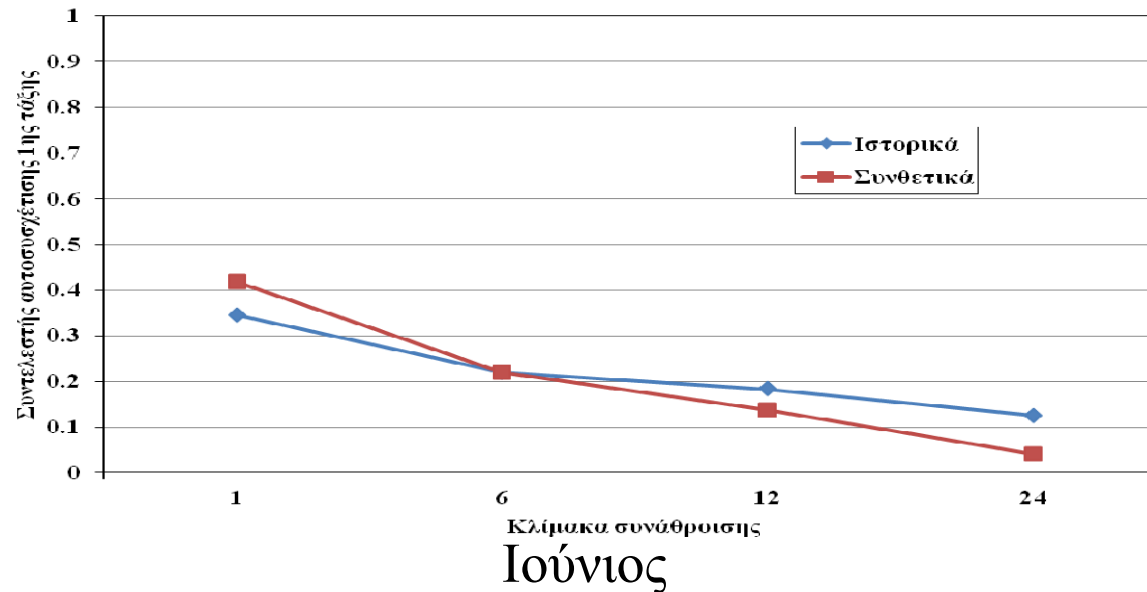
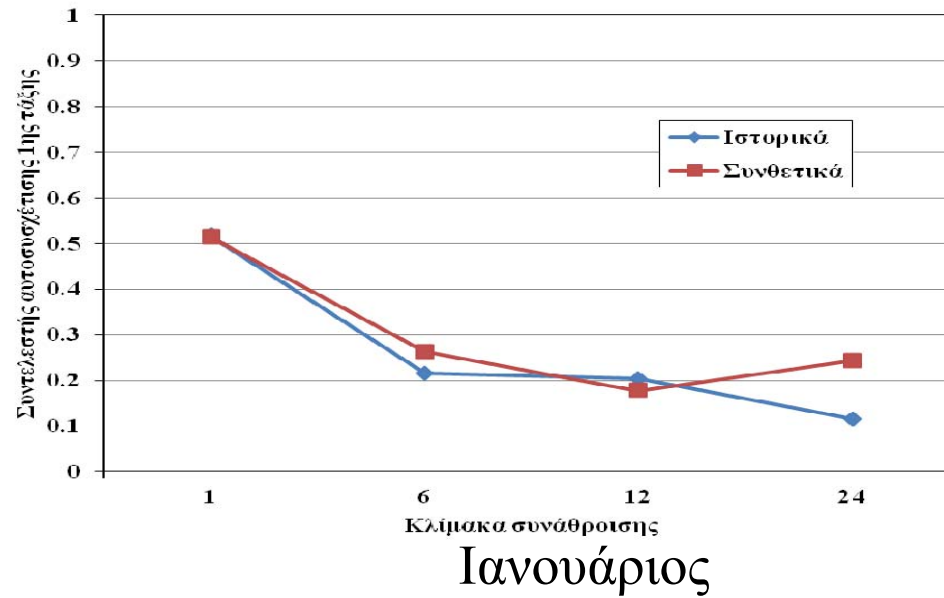


Ιανουάριος

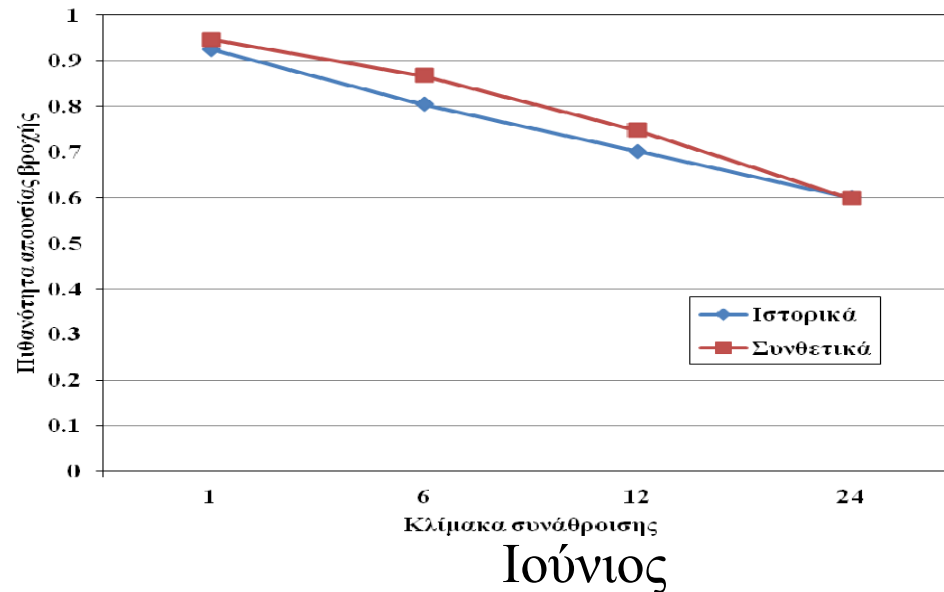
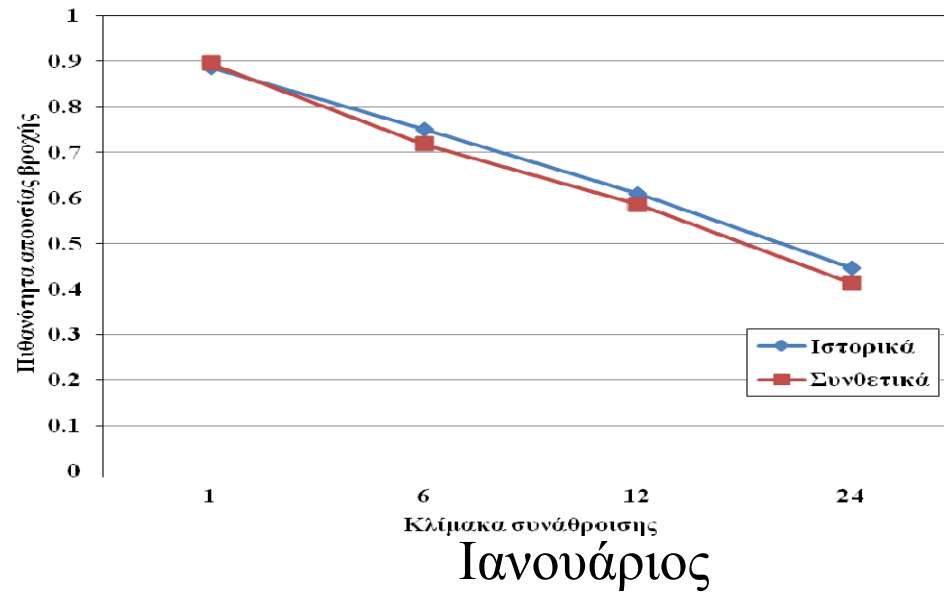


Ιούνιος

Συντελεστής αυτοσυσχέτισης 1^{ης} τάξης



Πιθανότητα απουσίας βροχής



Ευχαριστώ πολύ