

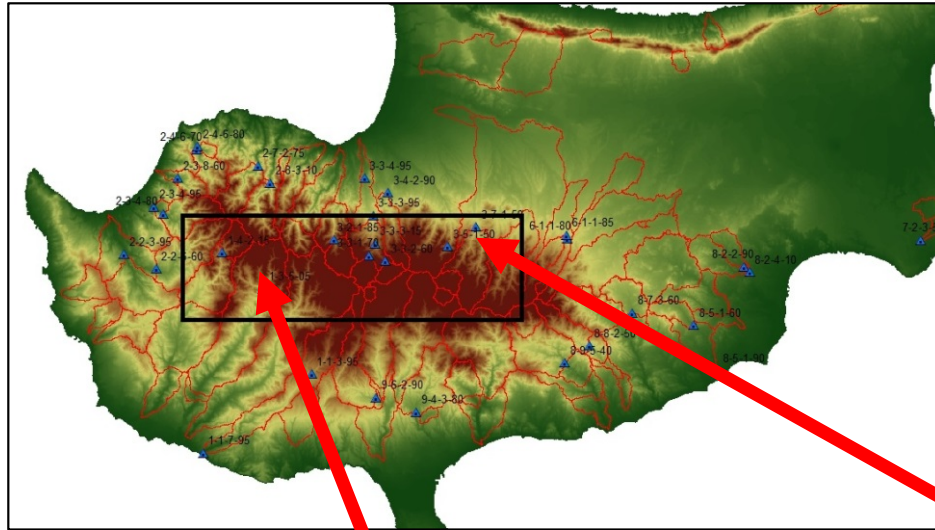
Εφαρμογή προσομοίωσης Monte  
Carlo για την παραγωγή  
πλημμυρικών υδρογραφημάτων σε  
Μεσογειακές λεκάνες

Μαστροθεόδωρος Θεόδωρος  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Δεκέμβριος 2013

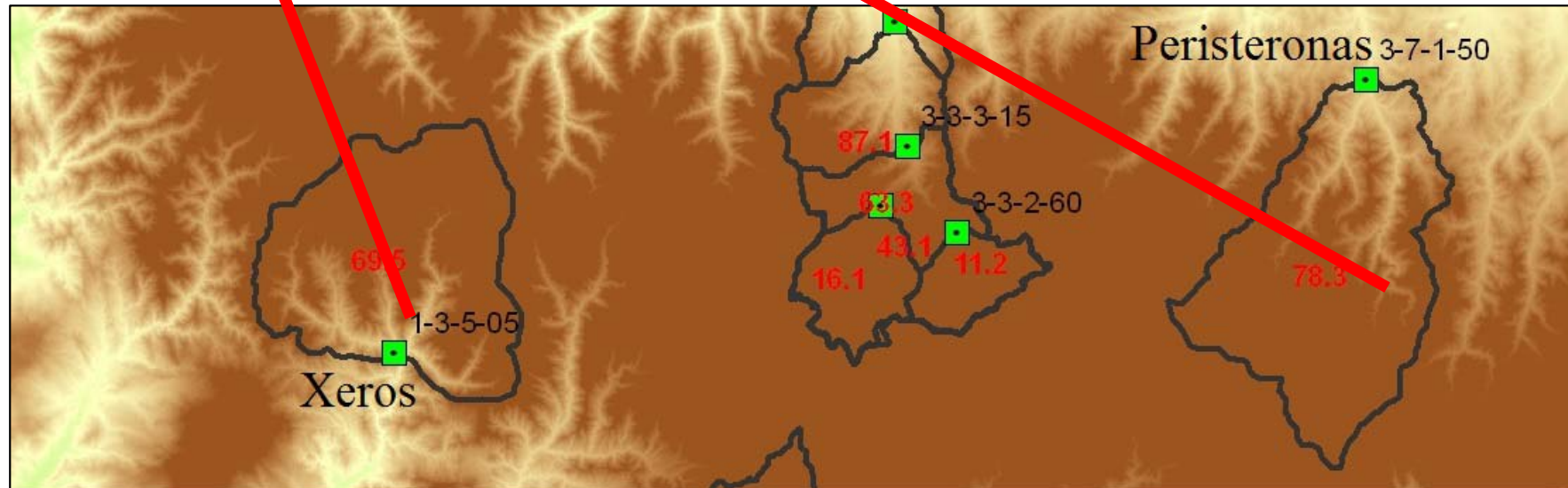
# Σκοπός και διάρθρωση

- Μελέτη μηχανισμών γένεσης πλημμύρας σε μεσογειακές λεκάνες με ξηρό κλίμα (Κύπρος)
- Αξιολόγηση υδρολογικών μεθόδων εύκολα εφαρμόσιμων (SCS-CN με μοναδιαίο υδρογράφημα)
- Ανάπτυξη εννοιολογικών μοντέλων και βελτιστοποίηση των παραμέτρων για διάφορα περιστατικά
- Εκτίμηση αβεβαιότητας με προσομοίωση MC

# Υπό μελέτη λεκάνες

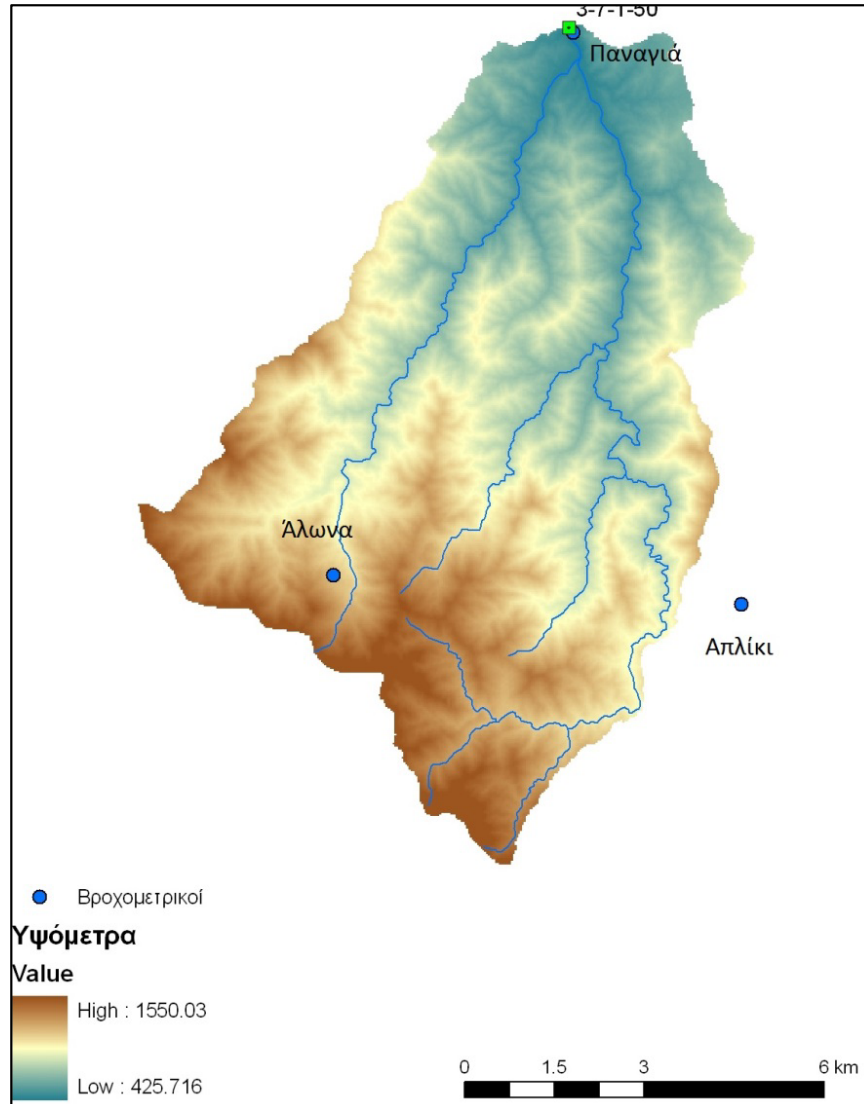


- Δύο λεκάνες στο όρος Τρόδος στην Κύπρο (Περιστερώννας, 77 km<sup>2</sup> & Ξερός, 69 km<sup>2</sup>)

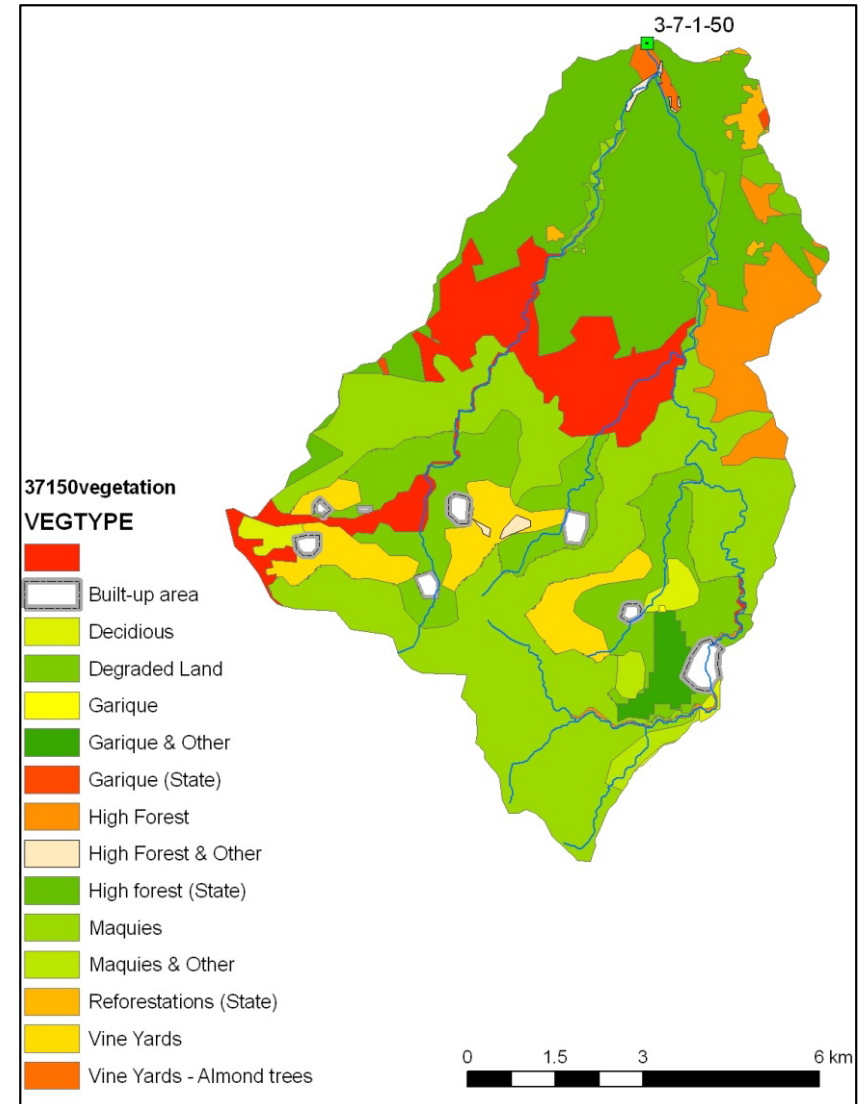


# Λεκάνη Περιστερώννα

## Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

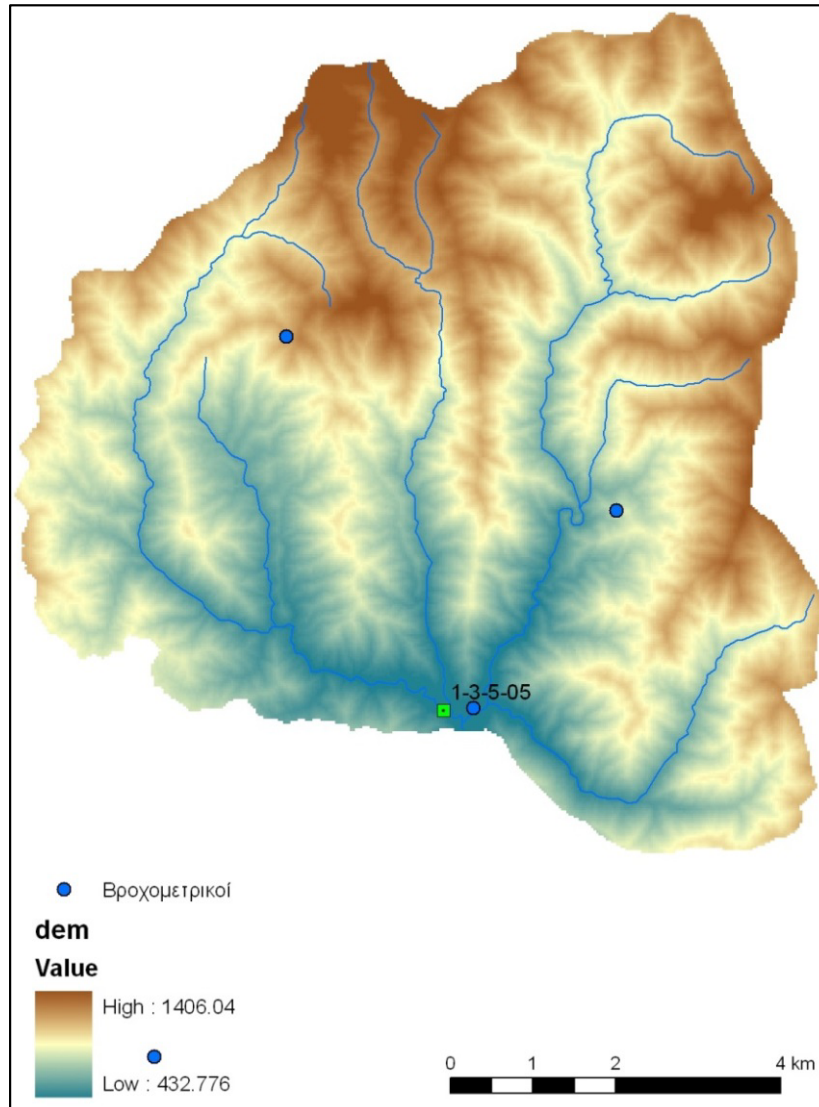


## Χρήσεις γης

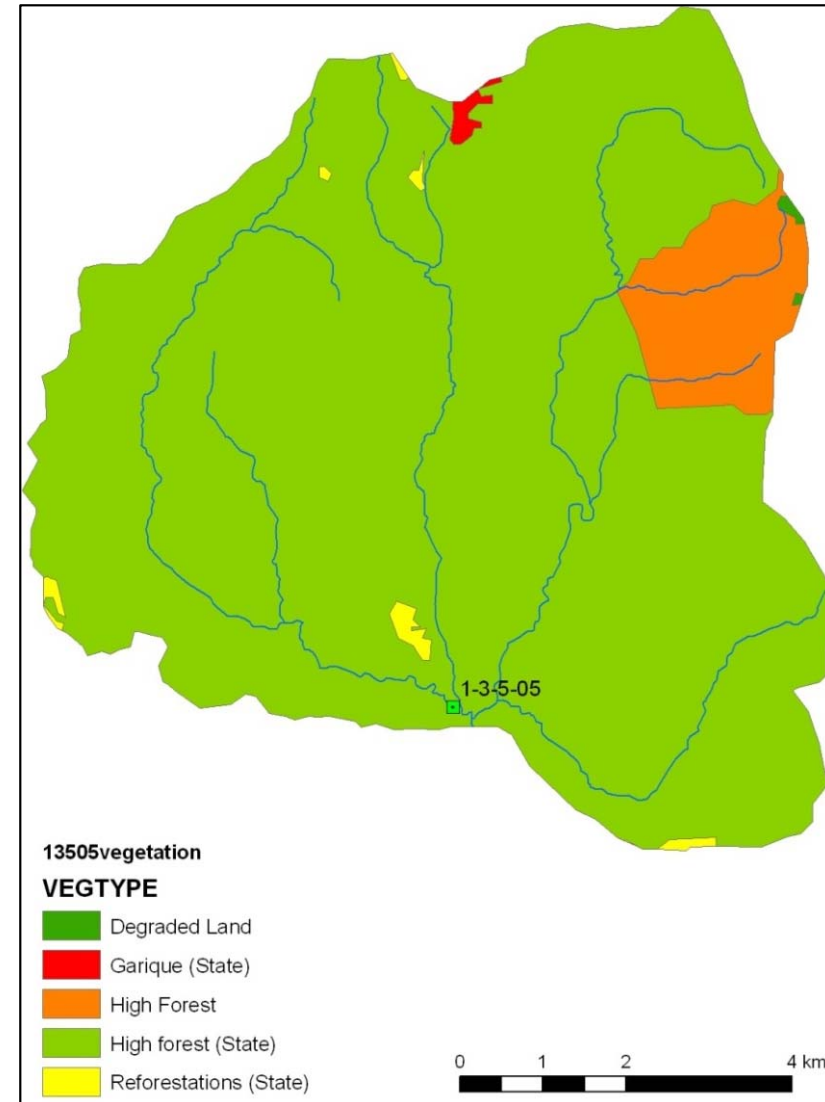


# Λεκάνη Ξερού

Ψηφιακό μοντέλο εδάφους



Χρήσεις γης



# Κοινά υδρολογικά χαρακτηριστικά

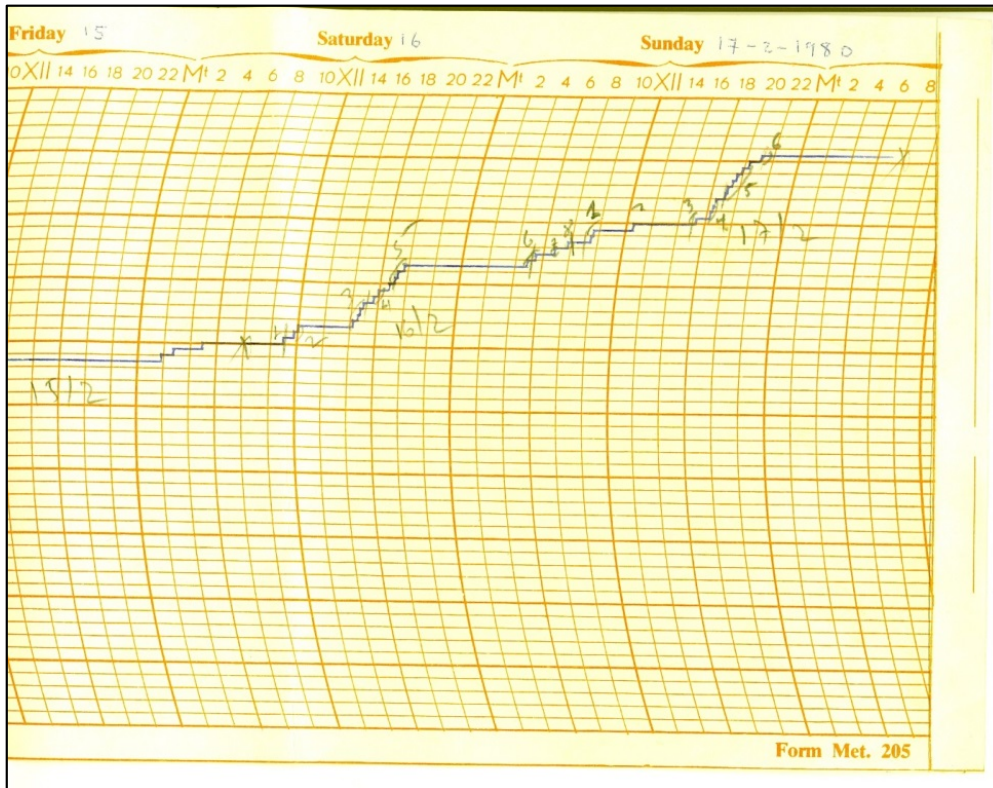
- Μεσογειακό κλίμα
  - Μηδενική (σχεδόν) παροχή το καλοκαίρι
  - Flash floods το χειμώνα
  - Εδαφική υγρασία << σημείο κορεσμού
- Γεωλογικό υπόβαθρο: Οφιόλιθος Τροόδους
  - Χαμηλή περατότητα
  - Υψηλές πλημμυρικές αιχμές (200m<sup>3</sup>/s στον Περιστερώνα, η μέγιστη παροχή στην Κύπρο)

# Διαφοροποιήσεις στις δύο λεκάνες

- Προσανατολισμός
  - Περιστερώνας: βόρειος
  - Ξερός: νότιος
- Χρήσεις γης
  - Περιστερώνας: ποικίλες (μακία βλάστηση, αμπελώνες, κατοικημένες εκτάσεις)
  - Ξερός: υψηλό δάσος σε ολόκληρη την έκταση

# Συλλογή πρωτογενών δεδομένων

Δεδομένα βροχής σε καταγραφικές ταινίες (TAY)



Δεδομένα απορροής σε φύλλα excel (Γαλιούνα, 2011)

| date     | t [hr] | X        | Ψ        | σημείο X-0 | dh [mm] | H [mm] | date        | rain |
|----------|--------|----------|----------|------------|---------|--------|-------------|------|
| 9/2/1979 | 8.04   | 0.03729  | 6.3207   | 8          | 6.32    | 6.32   |             |      |
| 9/2/1979 | 8.11   | 0.11419  | 7.35528  |            | 7.36    | 7.36   | 9/2/79 8:06 | 1.03 |
| 9/2/1979 | 8.13   | 0.132549 | 6.46701  |            | 6.47    | 6.47   | 9/2/79 8:07 | 0.00 |
| 9/2/1979 | 8.13   | 0.133921 | 6.69954  |            | 6.70    | 6.70   | 9/2/79 8:08 | 0.23 |
| 9/2/1979 | 8.14   | 0.13629  | 7.10119  |            | 7.10    | 7.10   | 9/2/79 8:08 | 0.40 |
| 9/2/1979 | 8.14   | 0.138785 | 7.52398  |            | 7.52    | 7.52   | 9/2/79 8:08 | 0.42 |
| 9/2/1979 | 8.16   | 0.164376 | 7.8618   |            | 7.86    | 7.86   | 9/2/79 8:09 | 0.34 |
| 9/2/1979 | 8.17   | 0.16712  | 8.32687  |            | 8.33    | 8.33   | 9/2/79 8:10 | 0.47 |
| 9/2/1979 | 8.17   | 0.16924  | 8.68624  |            | 8.69    | 8.69   | 9/2/79 8:10 | 0.36 |
| 9/2/1979 | 8.22   | 0.217556 | 8.87566  |            | 8.88    | 8.88   | 9/2/79 8:13 | 0.19 |
| 9/2/1979 | 8.31   | 0.314061 | 9.23337  |            | 9.23    | 9.23   | 9/2/79 8:18 | 0.36 |
| 9/2/1979 | 8.32   | 0.318676 | 0.015527 |            | 0.02    | 9.25   | 9/2/79 8:19 | 0.02 |
| 9/2/1979 | 8.40   | 0.401438 | 2.04367  |            | 2.04    | 11.28  | 9/2/79 8:24 | 2.03 |
| 9/2/1979 | 8.44   | 0.439576 | 2.50811  |            | 2.51    | 11.74  | 9/2/79 8:26 | 0.46 |
| 9/2/1979 | 8.50   | 0.500313 | 2.80302  |            | 2.80    | 12.04  | 9/2/79 8:30 | 0.29 |
| 9/2/1979 | 8.55   | 0.550623 | 3.33068  |            | 3.33    | 12.56  | 9/2/79 8:33 | 0.53 |
| 9/2/1979 | 8.58   | 0.575467 | 3.54166  |            | 3.54    | 12.78  | 9/2/79 8:34 | 0.21 |
| 9/2/1979 | 8.58   | 0.575467 | 3.54166  |            | 3.54    | 12.78  | 9/2/79 8:34 | 0.00 |
| 9/2/1979 | 8.71   | 0.71061  | 4.44837  |            | 4.45    | 13.68  | 9/2/79 8:42 | 0.91 |
| 9/2/1979 | 8.75   | 0.747252 | 4.65914  |            | 4.66    | 13.89  | 9/2/79 8:44 | 0.21 |
| 9/2/1979 | 8.80   | 0.79619  | 4.95426  |            | 4.95    | 14.19  | 9/2/79 8:47 | 0.30 |
| 9/2/1979 | 8.89   | 0.891698 | 5.14285  |            | 5.14    | 14.38  | 9/2/79 8:53 | 0.19 |
| 9/2/1979 | 8.99   | 0.986832 | 5.26803  |            | 5.27    | 14.50  | 9/2/79 8:59 | 0.13 |
| 9/2/1979 | 9.08   | 1.08222  | 5.43548  |            | 5.44    | 14.67  | 9/2/79 9:04 | 0.17 |

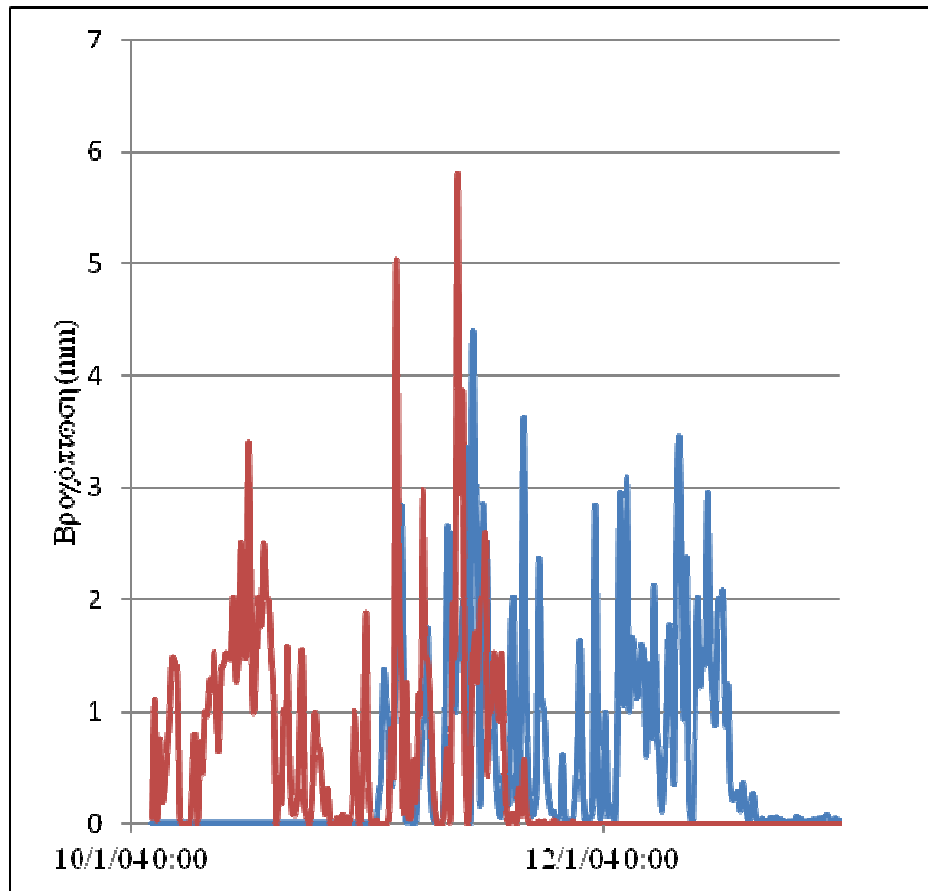


# Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων

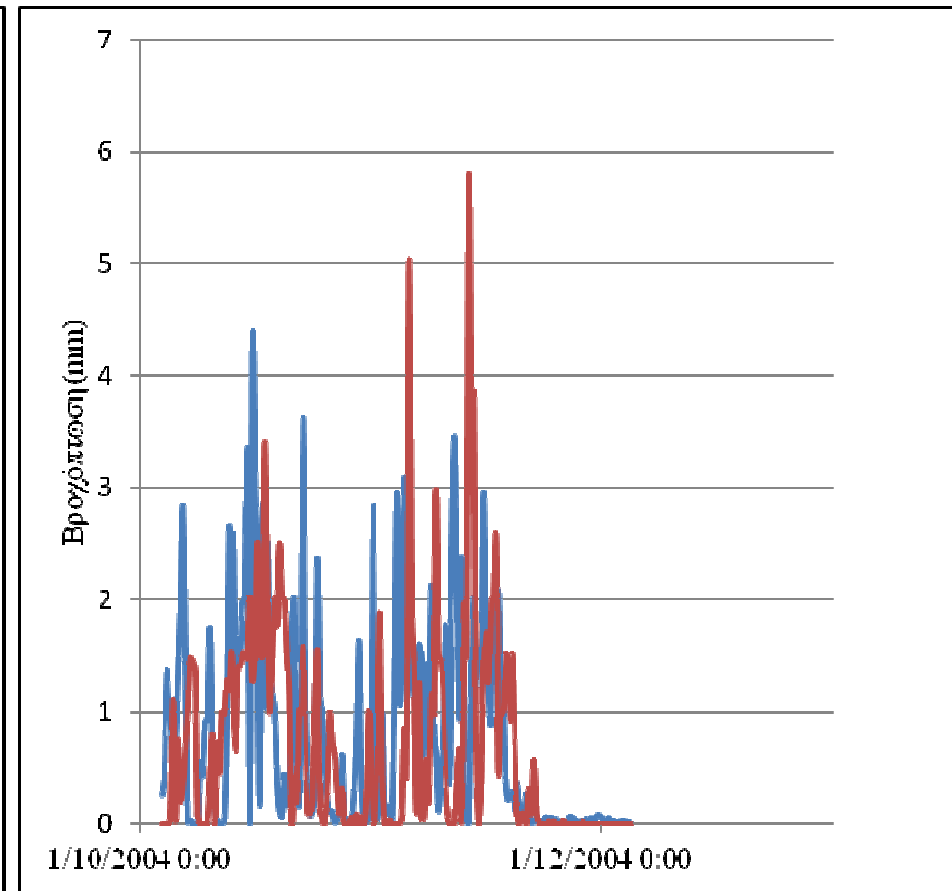
- Διόρθωση χονδροειδών σφαλμάτων
- Κανονικοποίηση χρονικού βήματος (15 λεπτά)
- Συμπλήρωση ελλείψεων
- Απόρριψη βροχομετρικών δεδομένων με εμφανή σφάλματα
- Απόρριψη περιστατικών με ελλιπή δεδομένα
- Τελική επιλογή 33 συνολικά περιστατικών (17 στον Περιστερώνα & 16 στον Ξερό)

# Παράδειγμα διόρθωσης χονδροειδούς σφάλματος

Μετακίνηση βροχομετρικών δεδομένων ενός σταθμού κατά 24 ώρες λόγω εμφανούς ασυμφωνίας μεταξύ γειτονικών σταθμών (Απλίκι & Αλώνια στον ποταμό Περιστερώννα).



Πριν τη μετακίνηση



Μετά τη μετακίνηση

# Συντελεστές απορροής

- Υπολογισμός συντελεστών απορροής επεισοδίου ( $c_1$ ) & αιχμής ( $c_2$ )
- Ελαφρά θετική συσχέτιση  $c_1$  &  $c_2$
- Σύγκριση λεκανών: εμφανείς διαφορές πιθανόν λόγω διαφορετικών χρήσεων γης

| Υδρολογική λεκάνη | Προτεινόμενο $c$ (ΟΜΟΕ) | Μέσος όρος $c_2$ |
|-------------------|-------------------------|------------------|
| Περιστερώνας      | 0.470                   | 0.648            |
| Ξερός             | 0.460                   | 0.321            |

- Αδυναμία των προτεινόμενων συντελεστών να αποτυπώσουν την πραγματικότητα

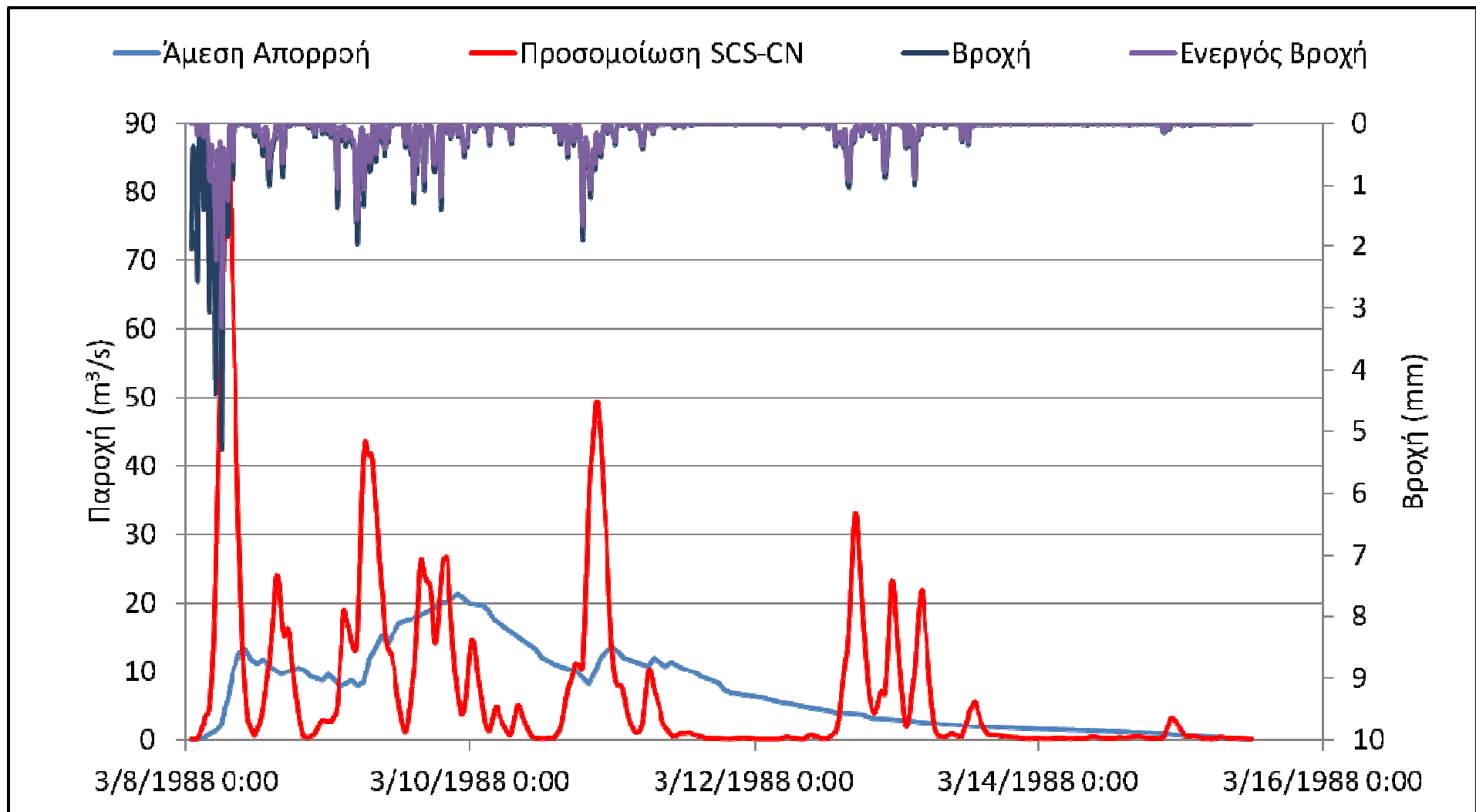
# Μέθοδος SCS-CN & μοναδιαίο υδρογράφημα

- SCS-CN
  - Υπολογισμός ενεργού βροχόπτωσης από ολική
  - Παράμετροι  $a$  (αρχικές απώλειες) και  $S$  (μέγιστη υδατοϊκανότητα)
- Παραμετρικό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα
  - Μετατροπή ενεργού βροχής σε απορροή
  - Γραμμικός κλάδος ανόδου και εκθετικός καθοδικός
  - Χρόνος ανόδου  $t_p = bt_c + \frac{D}{2}$ , όπου  $t_c$  χρόνος συγκέντρωσης (Giandotti) και  $D$  η διάρκεια βροχής ίση με 10 λεπτά.
  - Χρόνος βάσης  $t_b = t_c + D$
- Βελτιστοποίηση  $a$ ,  $S$  &  $b$  σε κάθε περιστατικό
- Υπολογιστική διαδικασία σε Matlab

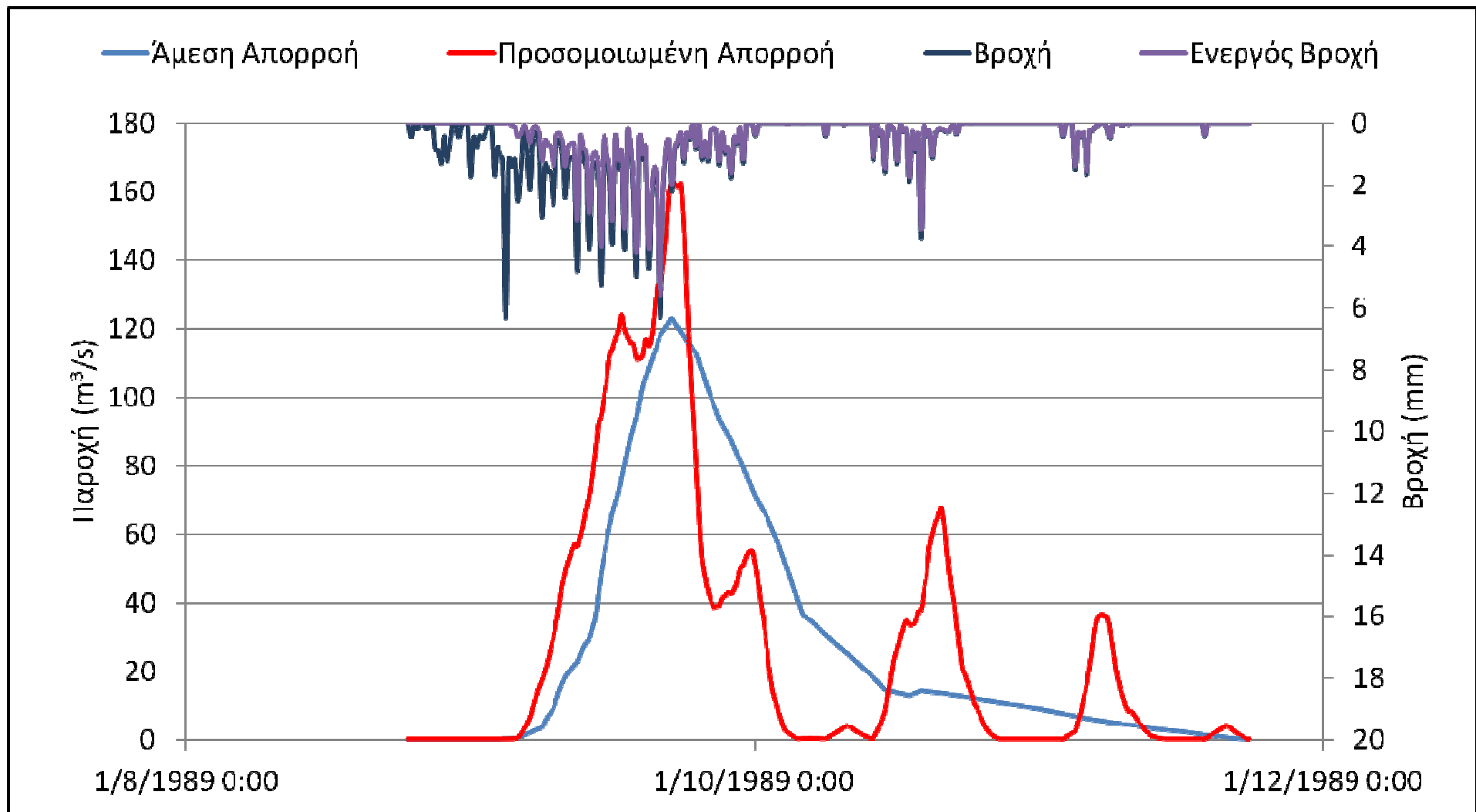
# Βελτιστοποίηση

- Ελαχιστοποίηση σταθμισμένου αθροίσματος τριών σφαλμάτων
  1. Αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα προσομοιωμένης απορροής σε όλα τα χρονικά βήματα ( $E_1$ )
  2. Τετραγωνικό σφάλμα πλημμυρικής αιχμής ( $E_2$ )
  3. Σφάλμα μέσης παροχής ( $E_3$ )
- Σύνολο:  $TE = E_1 + 10E_2 + 10^6E_3$
- Το τελευταίο βάρος επιλέχθηκε με κριτήριο τη διασφάλιση της εξίσωσης προσομοιωμένου & άμεσου πλημμυρικού όγκου

# 1<sup>ο</sup> παράδειγμα προσομοίωσης (Περιστερώννας)



# 2<sup>ο</sup> παράδειγμα προσομοίωσης (Περιστερώννας)



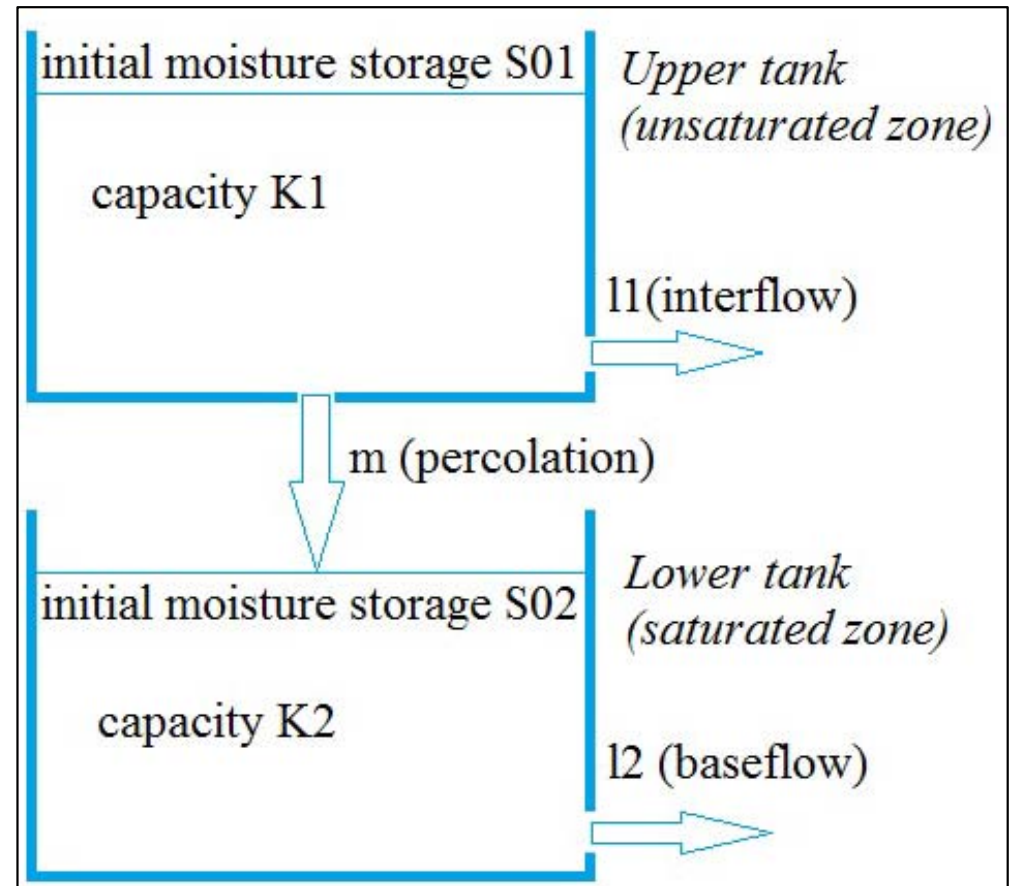
# Αξιολόγηση μεθόδου SCS-CN

- Σημαντική υπερεκτίμηση πλημμυρικών αιχμών
- Πιο απότομοι κλάδοι ανόδου-καθόδου και περισσότερες αιχμές από το παρατηρημένο
- **Συμπέρασμα:** Μη ικανοποιητική προσομοίωση των παρατηρημένων υδρογραφημάτων διότι αγνοείται η ροή διά μέσου του εδάφους (Hortonian model)

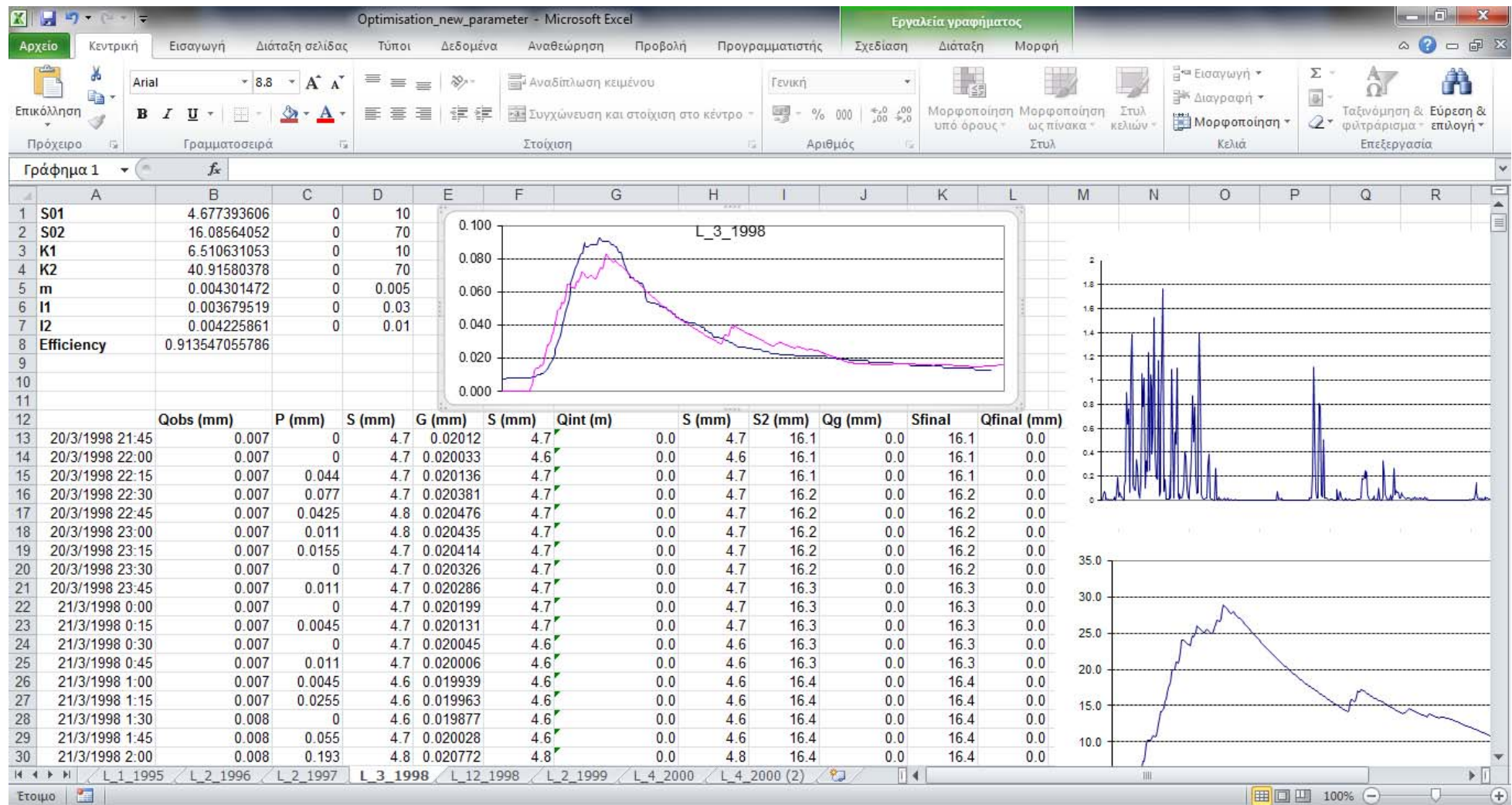


# Ανάπτυξη εννοιολογικών μοντέλων για προσομοίωση περιστατικών

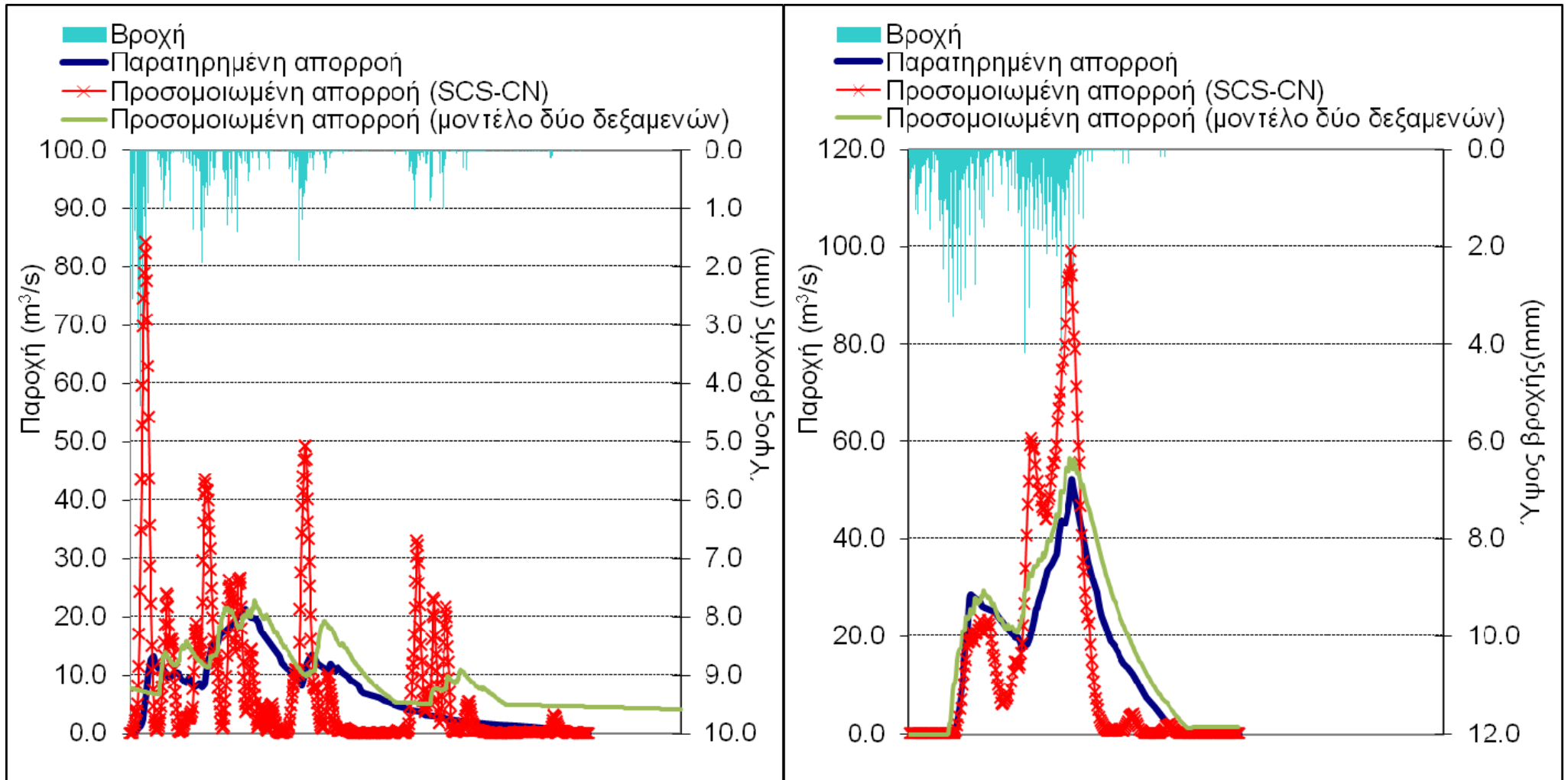
- Εφαρμογή εναλλακτικών μοντέλων δύο δεξαμενών για την προσομοίωση της ροής διαμέσου του εδάφους
- Τελικό μοντέλο με πέντε μεταβλητές & δύο αρχικές συνθήκες



# Εφαρμογή μοντέλου σε υπολογιστικό φύλλο excel



# Σύγκριση μοντέλων



# Στατιστική ανάλυση παραμέτρων

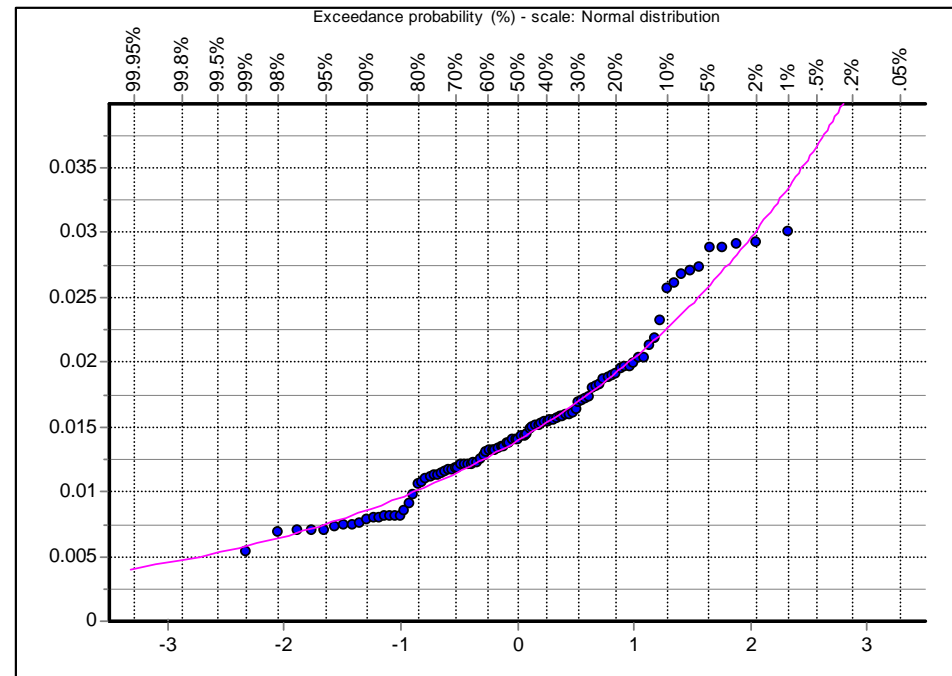
- Πολλαπλές βελτιστοποιήσεις για κάθε περιστατικό: διαφορετικά σύνολα παραμέτρων παράγουν πολύ καλά υδρογραφήματα (“equifinality”)
- Εφαρμογή θεωρητικής στατιστικής κατανομής σε κάθε παράμετρο (100 σύνολα παραμέτρων στον Περιστερώνα, 82 στον Ξερό)

# Παραδείγματα στατιστικής ανάλυσης

Πέντε σύνολα παραμέτρων με παρόμοια επίδοση («Efficiency», με μέγιστη τιμή τη μονάδα, Μάρτιος 1988, Περιστερώνας)

| Βελτιστοποιήσεις: | 1 <sup>η</sup> | 2 <sup>η</sup> | 3 <sup>η</sup> | 4 <sup>η</sup> | 5 <sup>η</sup> |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $S_{01}$          | 18.4           | 7.0            | 10.8           | 2.7            | 9.950          |
| $S_{02}$          | 44.9           | 55.0           | 59.7           | 52.6           | 53.848         |
| $K_1$             | 52.9           | 43.0           | 45.7           | 37.9           | 45.882         |
| $K_2$             | 27.382         | 37.000         | 40.606         | 37.038         | 35.837         |
| $m$               | 0.0010         | 0.0012         | 0.0012         | 0.0012         | 0.0011         |
| $I_1$             | 0.0140         | 0.0150         | 0.0154         | 0.0143         | 0.0148         |
| $I_2$             | 0.0052         | 0.0060         | 0.0050         | 0.0060         | 0.0060         |
| Efficiency        | 0.809          | 0.813          | 0.809          | 0.810          | 0.813          |

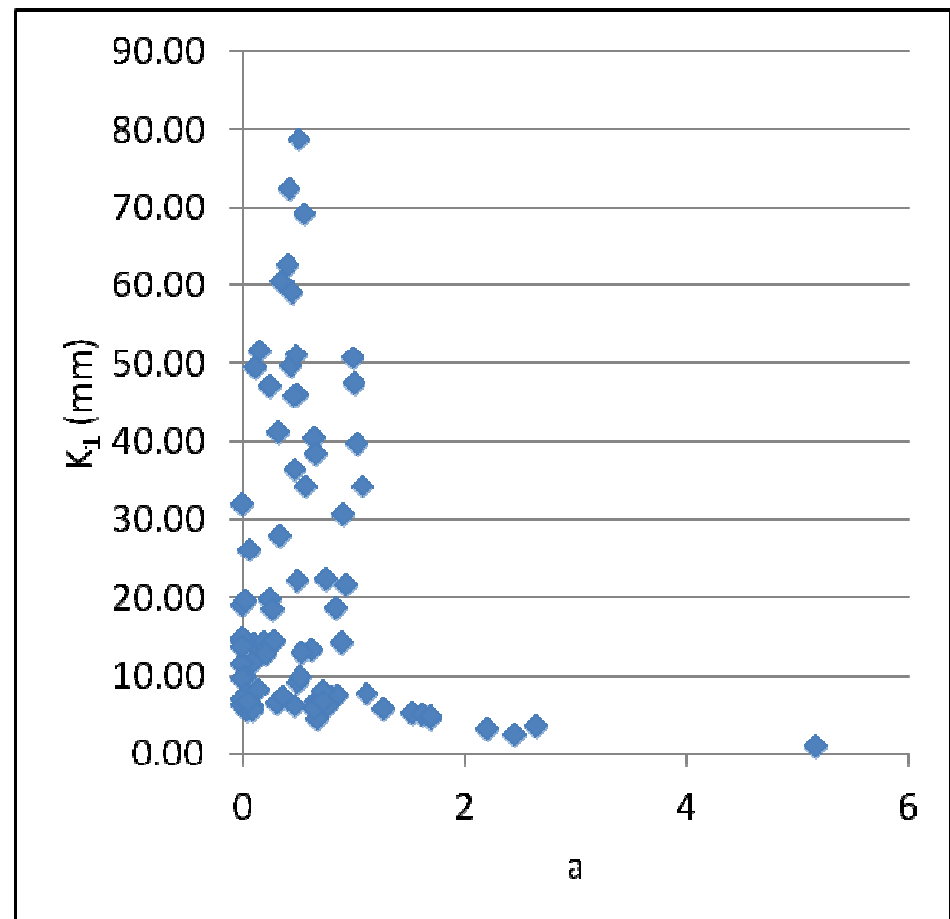
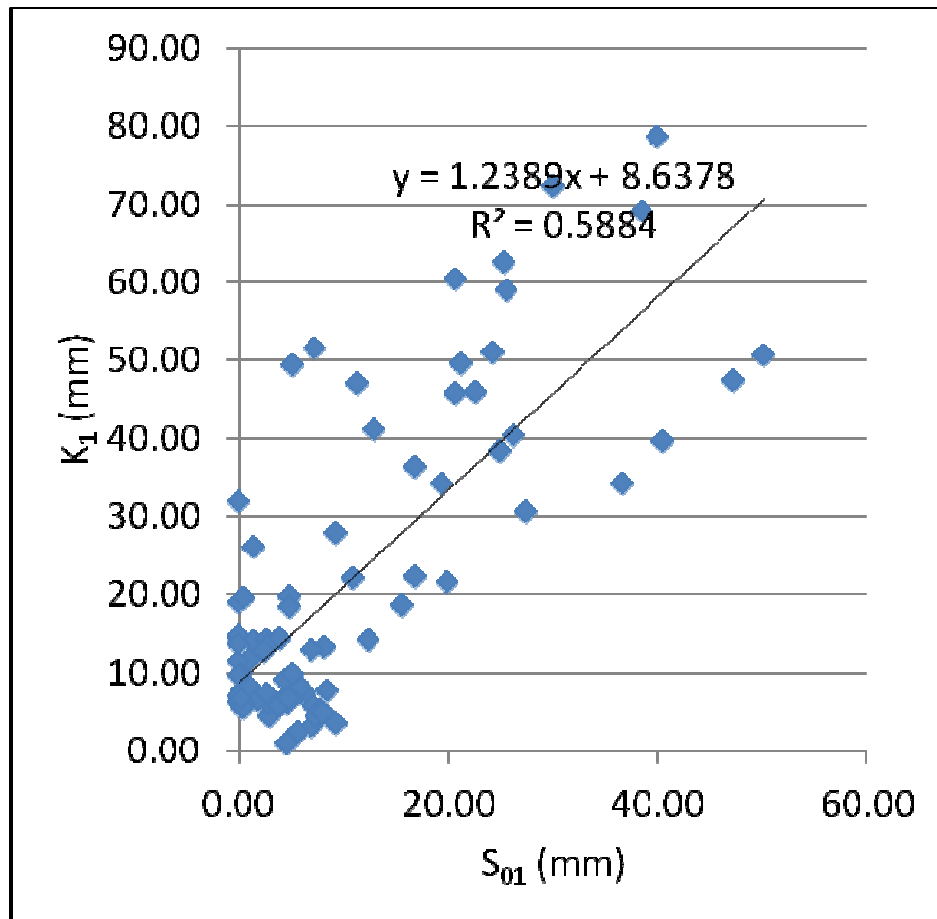
Στατιστική ανάλυση για την παράμετρο  $I_1$  στον ποταμό Περιστερώνα



# Συσχετίσεις μεταξύ παραμέτρων

- Εντοπίστηκε συσχέτιση μεταξύ αρχικής στάθμης-χωρητικότητας σε τρεις από τις τέσσερις δεξαμενές στις δύο λεκάνες
- Για την αποφυγή πολυμεταβλητής ανάλυσης, οι συσχετίσεις εξαλείφτηκαν με αντικατάσταση της αρχικής στάθμης με ποσοστό πλήρωσης στη συνολική χωρητικότητα
- Το νέο μοντέλο δεν παρουσίασε συσχετίσεις

# Παράδειγμα συσχέτισης



*Συσχέτιση χωρητικότητας και αρχικής στάθμης της άνω δεξαμενής στον Ξερό ποταμό πριν (αριστερά) και μετά την αντικατάσταση με τα ποσοστά πλήρωσης (δεξιά)*

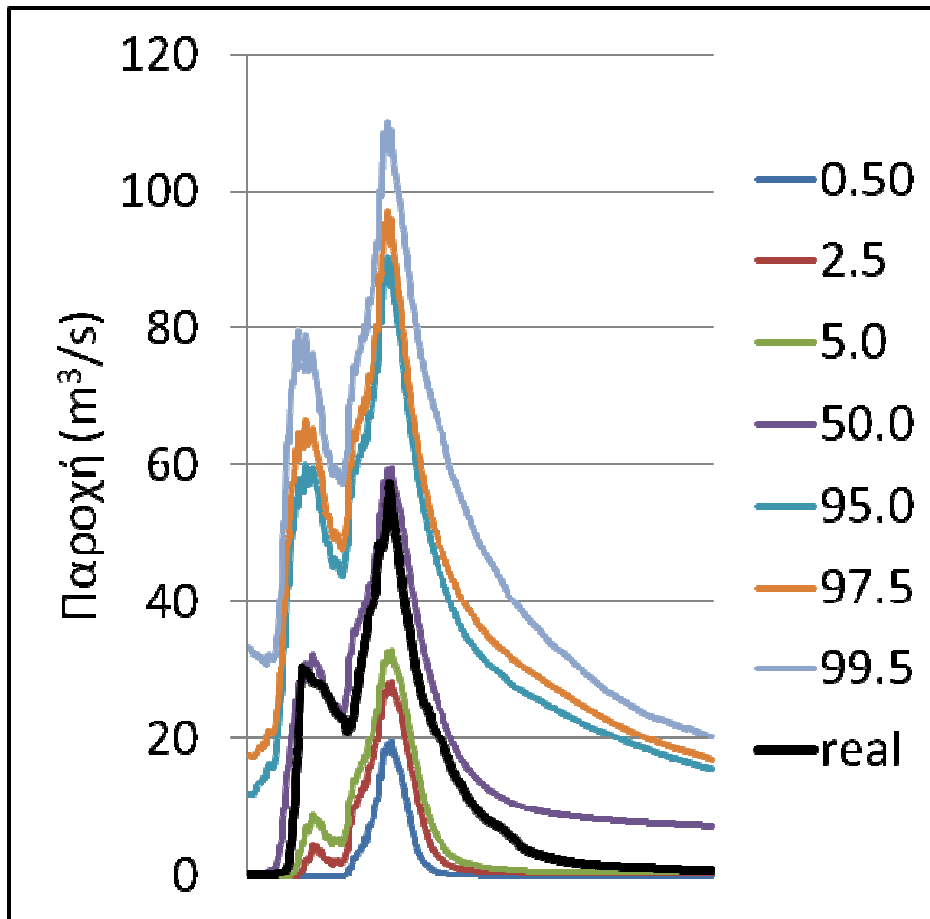
# Προσομοίωση MC

- 10 000 συνθετικά σύνολα παραμέτρων για κάθε περιστατικό από τις αντίστοιχες κατανομές
- Εφαρμογή μοντέλου δύο δεξαμενών
- Υπολογισμός μέσης απορροής και διάφορων ποσοστημορίων
- Παρατηρημένη αιχμή: 54% ποσοστημόριο (η προσομοίωση MC υποεκτιμά ελαφρά την αιχμή)
- Υπολογιστική διαδικασία σε Matlab

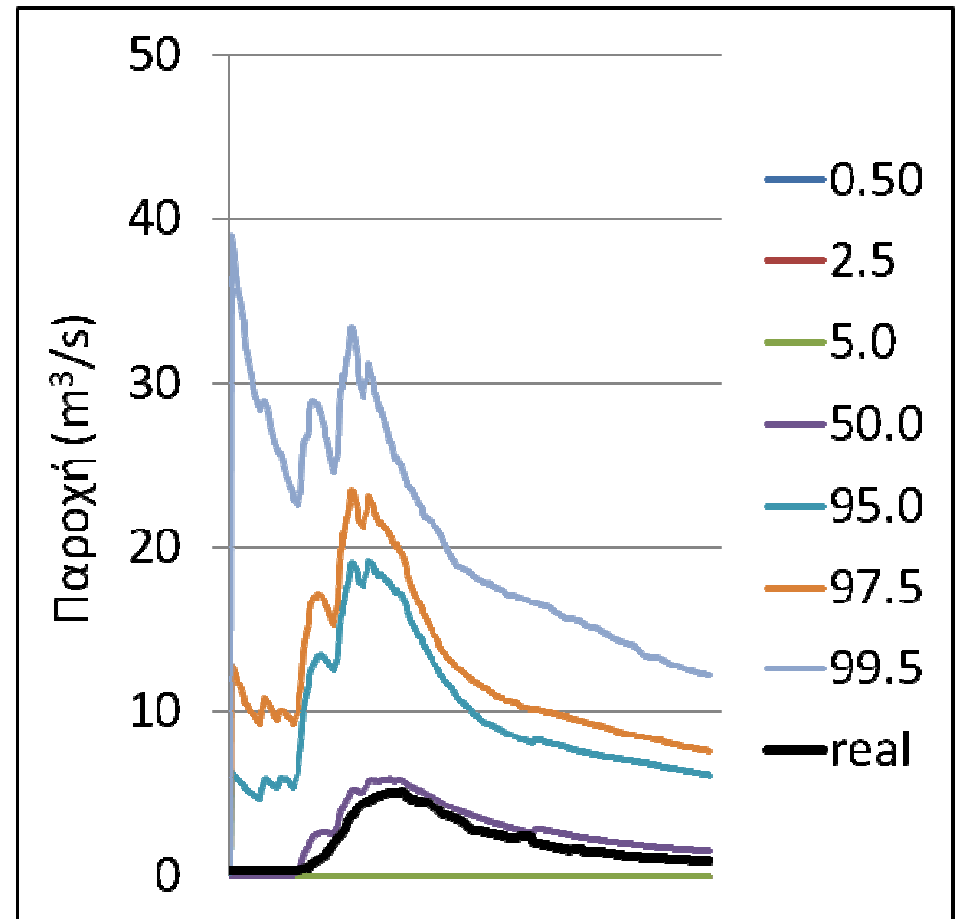


# Δύο παραδείγματα ικανοποιητικής προσομοίωσης

Περιστερώνας (Ιανουάριος 2004)



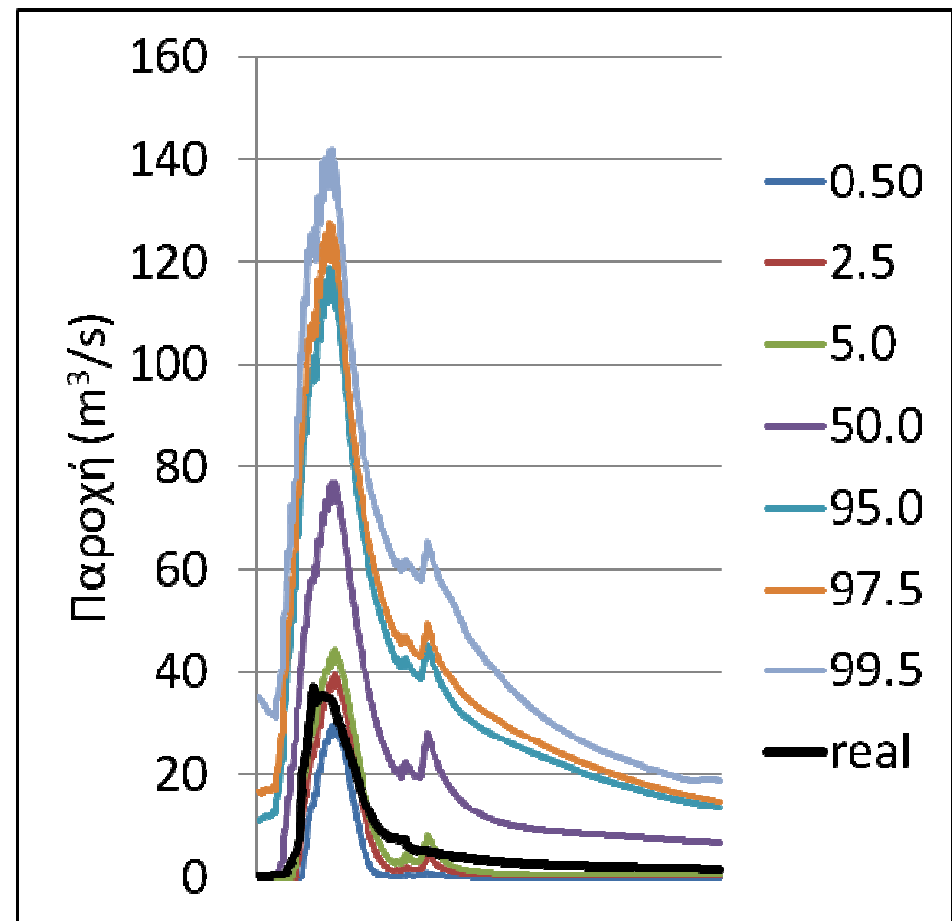
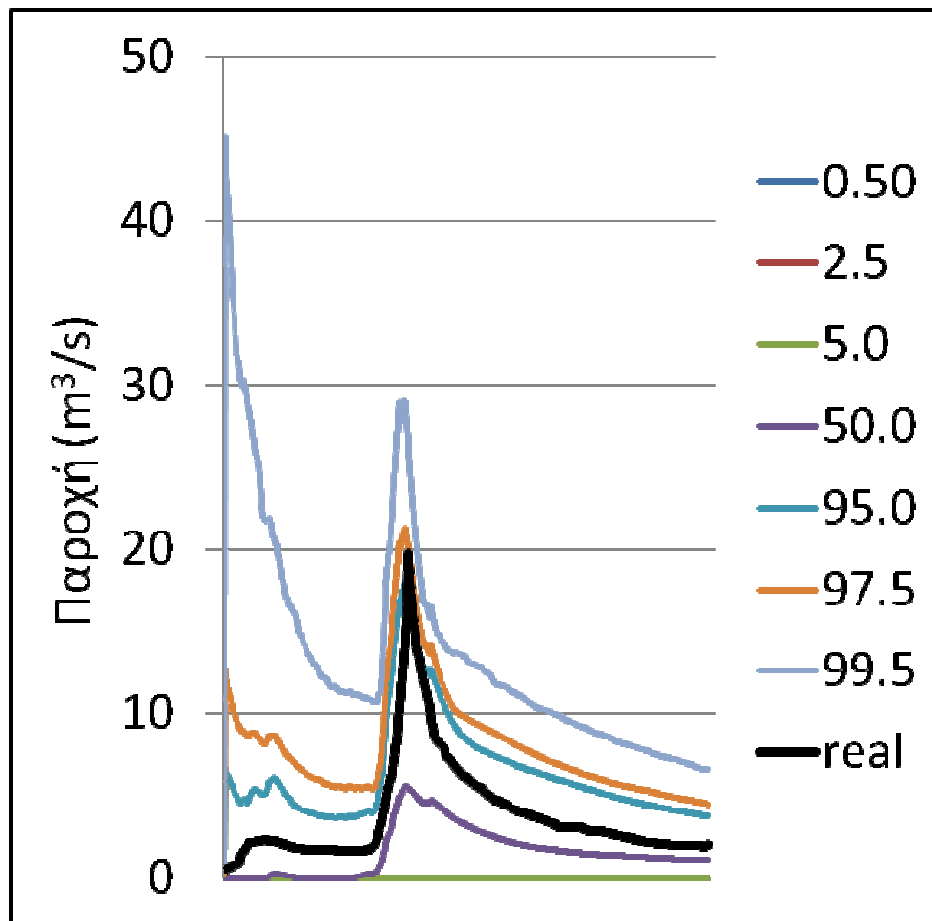
Ξερός (Δεκέμβριος 1988)



# Δύο παραδείγματα μη ικανοποιητικής προσομοίωσης

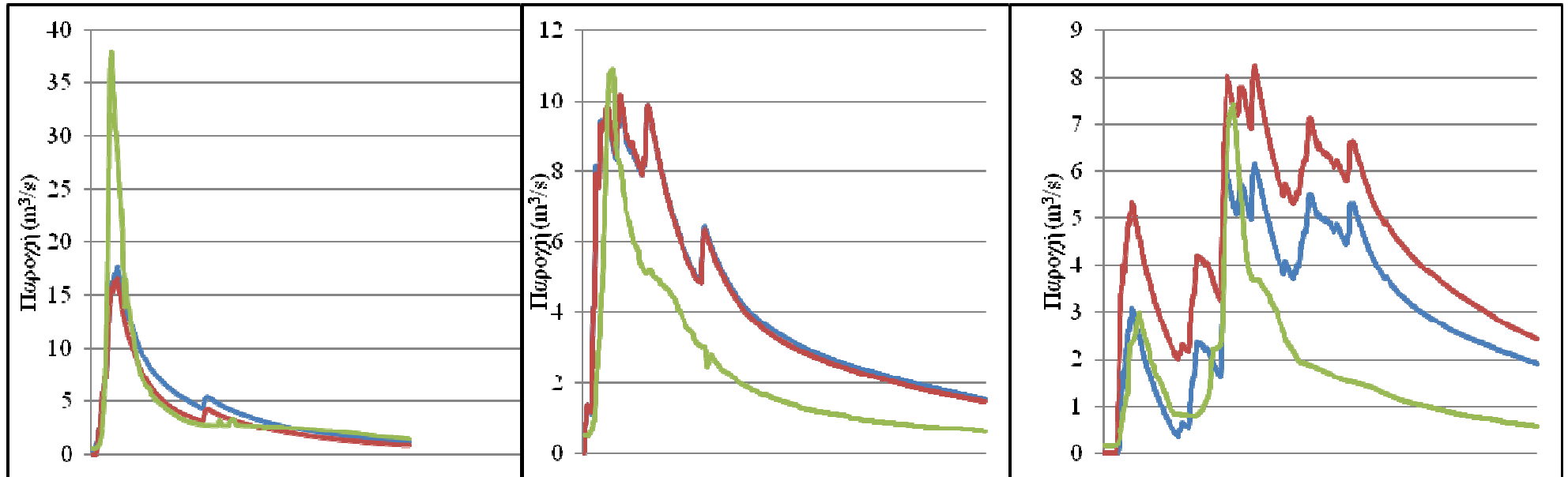
Υποεκτίμηση παροχής (Ξερός, Φεβρουάριος 1992).

Υπερεκτίμηση παροχής (Περιστερώννας, Δεκέμβριος 1988)



# Προσομοίωση MC με σταθερές αρχικές συνθήκες

Προσομοίωση για τρία περιστατικά στον Ξερό ποταμό: (πράσινη: παρατηρημένο, μπλε & κόκκινη: μέση απορροή με σταθερές\* & τυχαίες αντίστοιχα αρχικές συνθήκες). Η εφαρμογή σταθερών αρχικών συνθηκών δεν βελτιώνει ουσιαστικά τα αποτελέσματα.

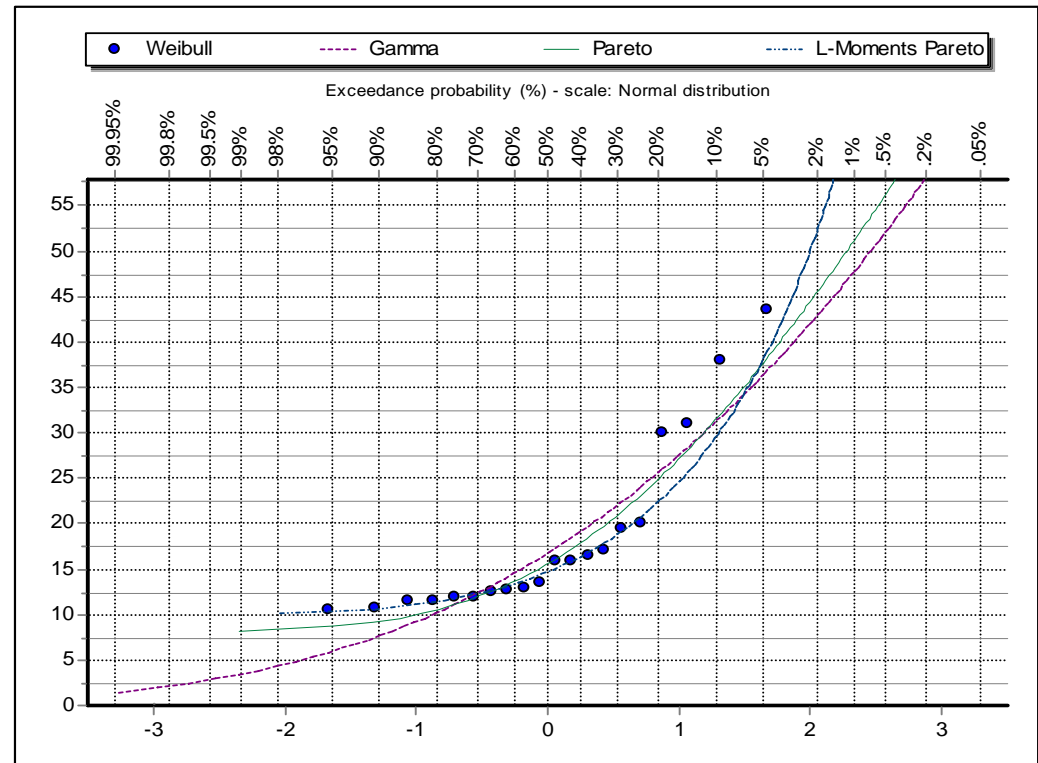


\* Στα πιο πάνω περιστατικά ως αρχικές συνθήκες ελήφθησαν οι μέσες τιμές όλων των επεισοδίων. Με εφαρμογή του καλύτερου συνδυασμού για κάθε περιστατικό τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια.

# Σχεδιασμός με προσομοίωση MC

- Παραγωγή 24ωρων βροχοπτώσεων (μέθοδος εναλλασσόμενων blocks & εντάσεις σύμφωνα με όμβριες καμπύλες Κύπρου)

- Στατιστική ανάλυση μέγιστων παρατηρημένων παροχών με εφαρμογή κατανομής Pareto προσαρμοσμένης με τη μέθοδο των L-ροπών

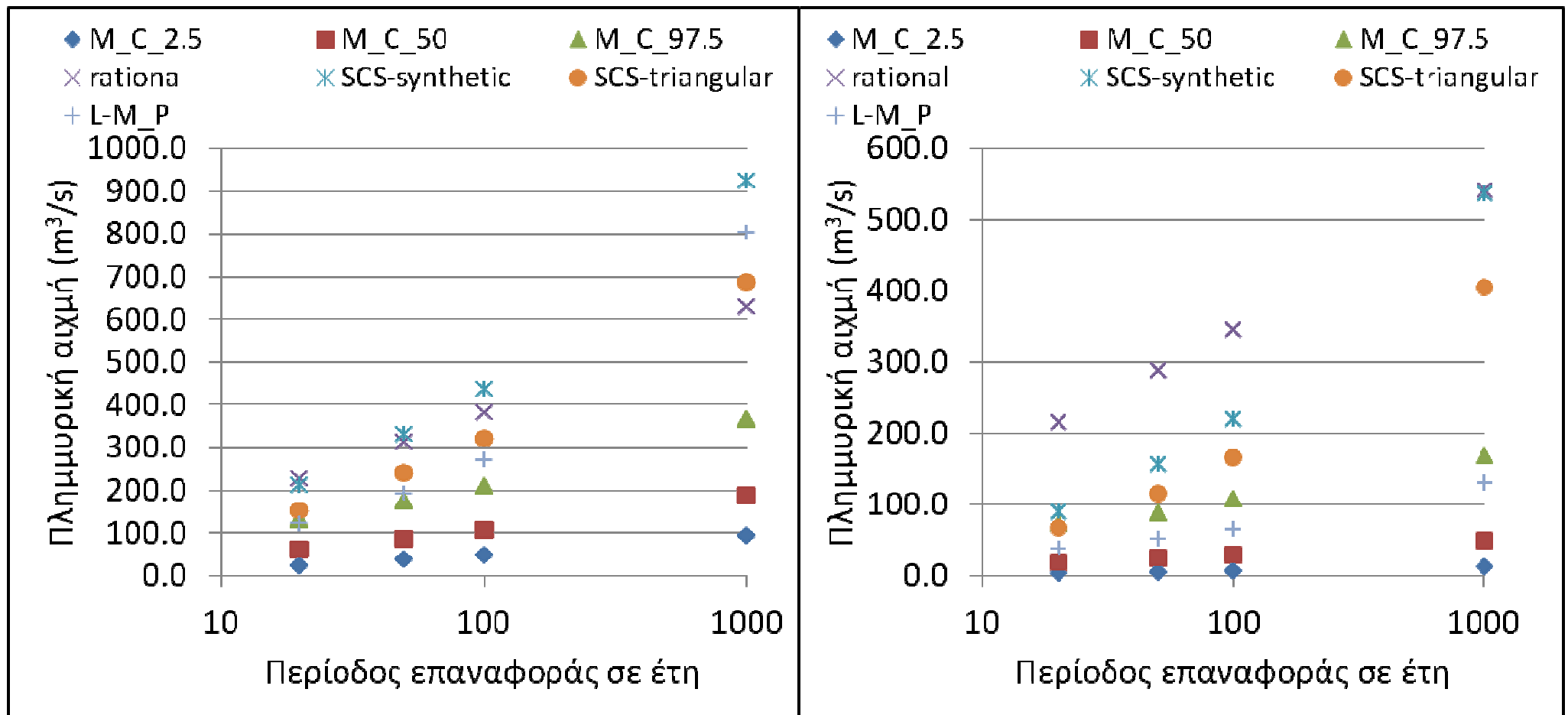


Οι κατανομές Gamma και Pareto και η κατανομή Pareto προσαρμοσμένη με τη μέθοδο των L-ροπών για τις μέγιστες παροχές στον Ξερό ποταμό.

# Σύγκριση πλημμυρικών αιχμών

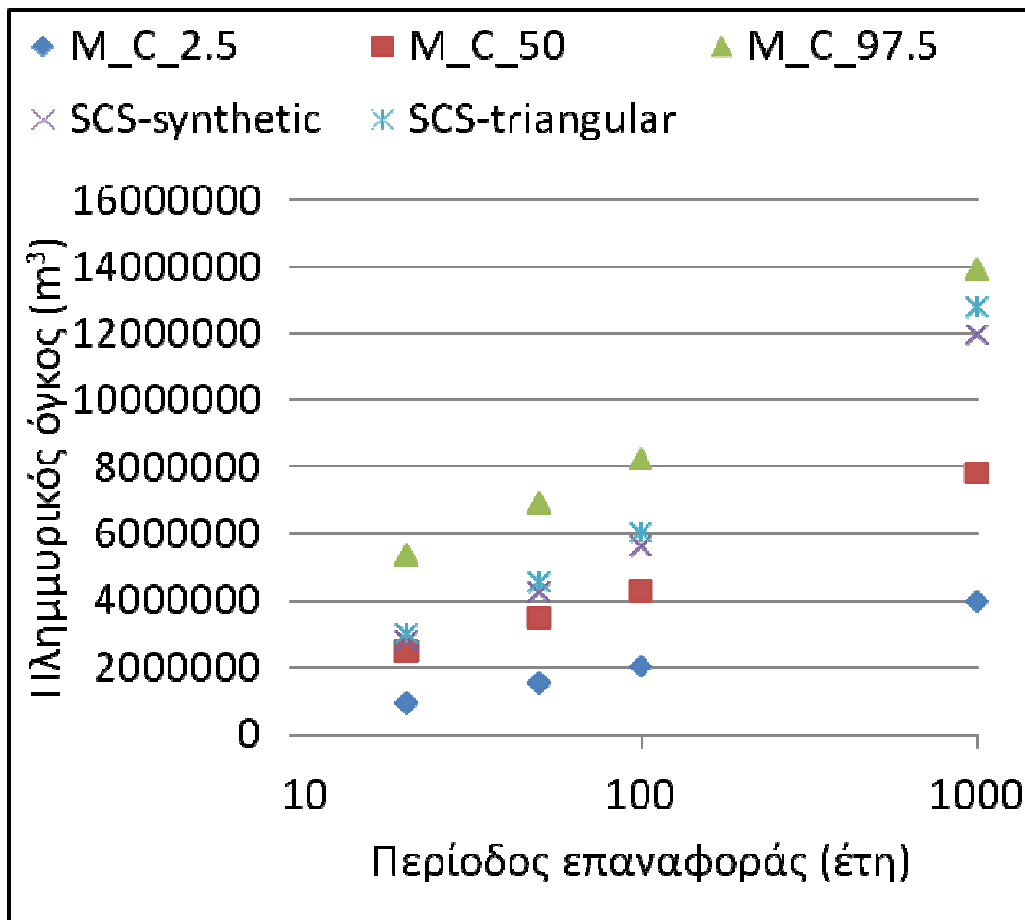
Περιστερώνας ποταμός

Ξερός ποταμός

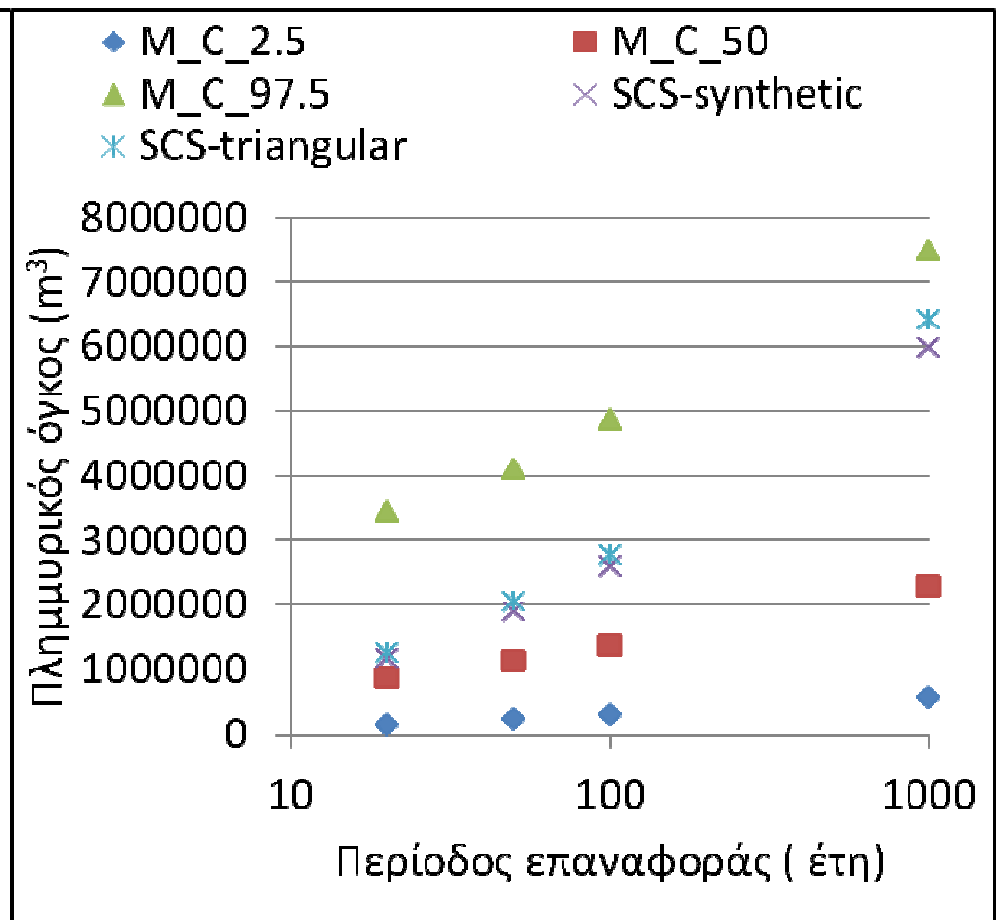


# Σύγκριση πλημμυρικών όγκων

Περιστερώνας ποταμός

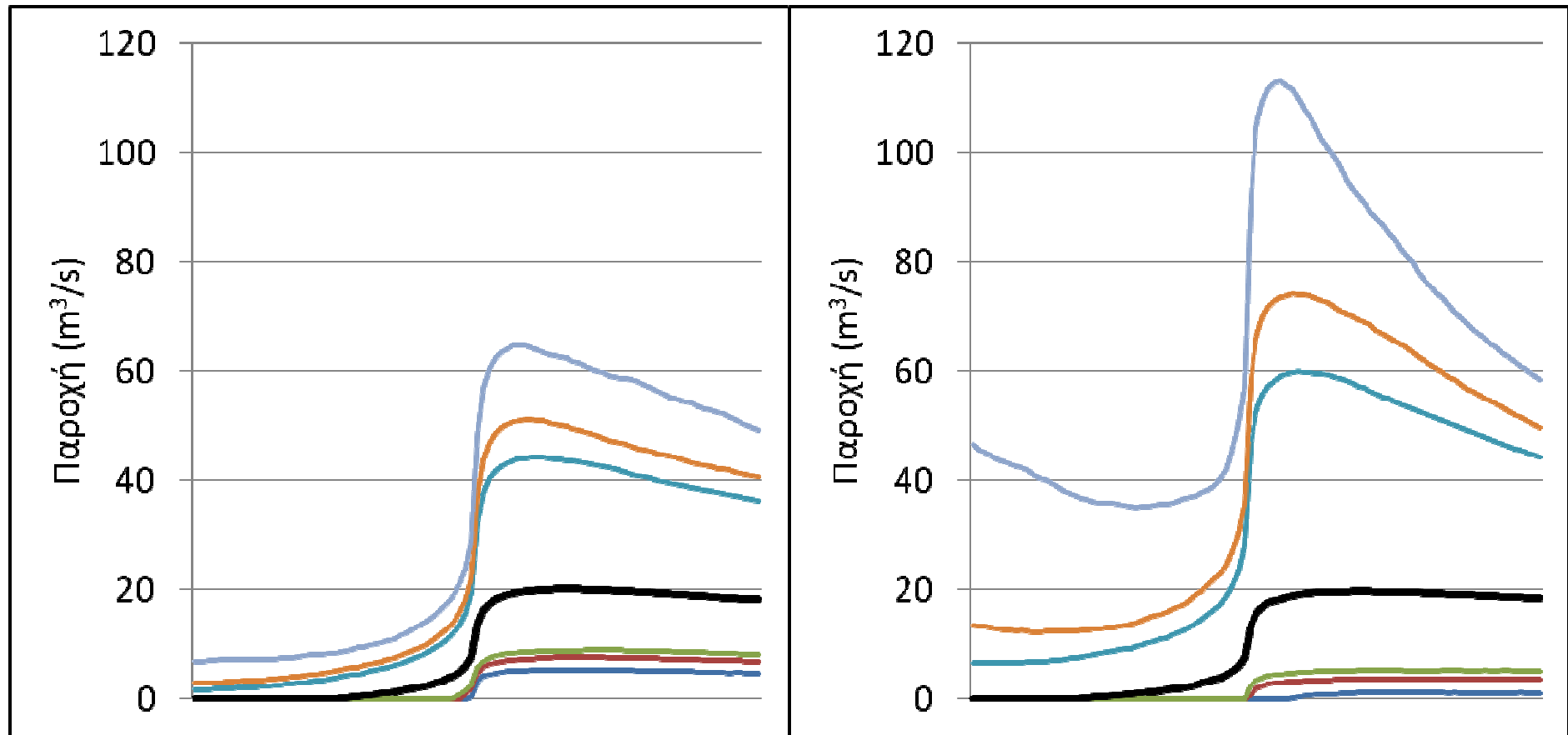


Ξερός ποταμός



# Προσομοίωση MC σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις

- Προσομοίωση σε κάθε λεκάνη με μεταφορά παραμέτρων από την άλλη λεκάνη & διατήρηση μόνο σωστού μέσου όρου: ικανοποιητική προσέγγιση του 50% ποσοστημορίου.



Προσομοίωση με (αριστερά) & χωρίς (δεξιά) μεταφορά παραμέτρων, Ξερός ποταμός T=20 έτη

# Συμπεράσματα

- Η μέθοδος SCS-CN με μοναδιαίο υδρογράφημα είναι ακατάλληλη για μικρές, μεσογειακές λεκάνες όπου η ροή διά μέσου του εδάφους είναι σημαντική
- Εννοιολογικά μοντέλα υδραυλικών αναλόγων: πιο ευέλικτα για σύνθετες περιπτώσεις
- Παράμετροι μοντέλου & αρχικές συνθήκες: σημαντική μεταβλητότητα σε διαφορετικά περιστατικά & διαδοχικές βελτιστοποιήσεις
- Προσομοίωση MC: ισχυρό εργαλείο για διαχείριση αβεβαιότητας (χειρισμός παραμέτρων ως τυχαίες μεταβλητές)
- Εφικτή η εφαρμογή προσομοίωσης MC σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις όταν υπάρχουν στοιχεία γειτονικής λεκάνης



# Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Διερεύνηση του ρόλου των χρησιμοποιούμενων περιστατικών στη στατιστική επεξεργασία
- Προσομοίωση περιστατικών που δεν χρησιμοποιήθηκαν στη στατιστική επεξεργασία των παραμέτρων του μοντέλου
- Μείωση των παραμέτρων του μοντέλου δύο δεξαμενών
- Εφαρμογή προσομοίωσης MC με άλλα υδρολογικά μοντέλα
- Εισαγωγή της αβεβαιότητας της βροχής στο σχεδιασμό με προσομοίωση MC
- Εύρεση αξιόπιστης μεθοδολογίας επιλογής του κατάλληλου ποσοστημορίου για την εξαγωγή μεγεθών σχεδιασμού συναρτήσει της αβεβαιότητας

Ευχαριστώ πολύ!