



## Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Διεπιστημονικό - Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
“Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων”

# Θεωρητική και εμπειρική σύγκριση στοχαστικών μεθόδων και μεθόδων μηχανικής μάθησης στην πρόβλεψη υδρολογικών διεργασιών

Γεωργία Παπαχαραλάμπους  
Πολιτικός Μηχανικός

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής

# Μηχανική μάθηση για προβλέψεις στην υδρολογία

- Η πρόβλεψη της εξέλιξης υδρολογικών διεργασιών είναι χρήσιμη.
- Το πρακτικό και ερευνητικό ενδιαφέρον για τις μεθόδους σημειακής εκτίμησης εξακολουθεί να είναι μεγάλο (Krzysztofowicz 2001).
- Οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται ευρέως για προβλέψεις στον χώρο της υδρολογίας ως εναλλακτική των κλασικών στοχαστικών μεθόδων.
- Δημοφιλείς μέθοδοι μηχανικής μάθησης είναι τα:
  - ✓ **Νευρωνικά Δίκτυα - Neural Networks (NN)**  
Μεγάλος αριθμός πρακτικών εφαρμογών, βλ. Maier and Dandy (2000) και αναφορές εντός
  - ✓ **Support Vector Machines (SVM)**  
Μεγάλος αριθμός πρακτικών εφαρμογών, βλ. Raghavendra and Deka (2014) και αναφορές εντός

## Σύγκριση μεθόδων πρόβλεψης στη βιβλιογραφία

- Η έρευνα εστιάζει συχνά στην σύγκριση μεθόδων μηχανικής μάθησης με κλασικές στοχαστικές μεθόδους. Όσον αφορά τον χώρο της υδρολογίας:  
Μεγάλος αριθμός σχετικών εργασιών, π.χ. Jain et al. (1999), Kisi (2004), Khan and Coulibaly (2006), Lin et al. (2006), Han et al. (2007), Yu and Liong (2007), Koutsoyiannis et al. (2008), Wang et al. (2009), Belayneh et al. (2014)
- Οι διενεργούμενες συγκρίσεις στην βιβλιογραφία αφορούν **συνήθως μελέτες περίπτωσης**.
- Η εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της σύγκρισης σε ικανό αριθμό διαφορετικών περιπτώσεων - χρονοσειρών.
- Εργασίες που επιχειρούν σε ορισμένο βαθμό γενίκευση είναι αυτές των:
  - ✓ Ahmed et al. (2010): Σύγκριση 8 μεθόδων πρόβλεψης σε 1 045 ιστορικές χρονοσειρές από διάφορα επιστημονικά πεδία
  - ✓ Thissen et al. (2003): Σύγκριση 3 μεθόδων πρόβλεψης σε δύο συνθετικές χρονοσειρές μεγάλου μήκους και σε μία ιστορική χρονοσειρά από τον χώρο της χημειομετρίας

## Διενεργούμενη σύγκριση και σημεία πρωτοτυπίας

- Αντικείμενο της εργασίας είναι η σύγκριση κλασικών στοχαστικών μεθόδων και μεθόδων μηχανικής μάθησης στην πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς υδρολογικών διεργασιών.
- Η διενεργούμενη σύγκριση αφορά μακροπρόθεσμες προβλέψεις στην χρονική κλίμακα των παρατηρήσεων.
- Πραγματοποιείται σε:
  - ✓ θεωρητικό επίπεδο → εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων  
**βασική συνεισφορά της εργασίας**
  - ✓ εμπειρικό επίπεδο → ενίσχυση γενικών συμπερασμάτων  
ανάδειξη επιμέρους σημείων
- Η **πρωτοτυπία** της διενεργούμενης σύγκρισης έγκειται στην χρήση:
  - ✓ **συνθετικών χρονοσειρών**, που συνιστούν ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών περιπτώσεων
  - ✓ αρκετών μεθόδων πρόβλεψης (στοχαστικών και μηχανικής μάθησης)
  - ✓ αρκετών μέτρων ποιότητας των προβλέψεων ως μαθηματικών εργαλείων ποσοτικοποίησης της επίδοσης των μεθόδων

## Ερωτήματα σχετικά με την σύγκριση μεθόδων πρόβλεψης

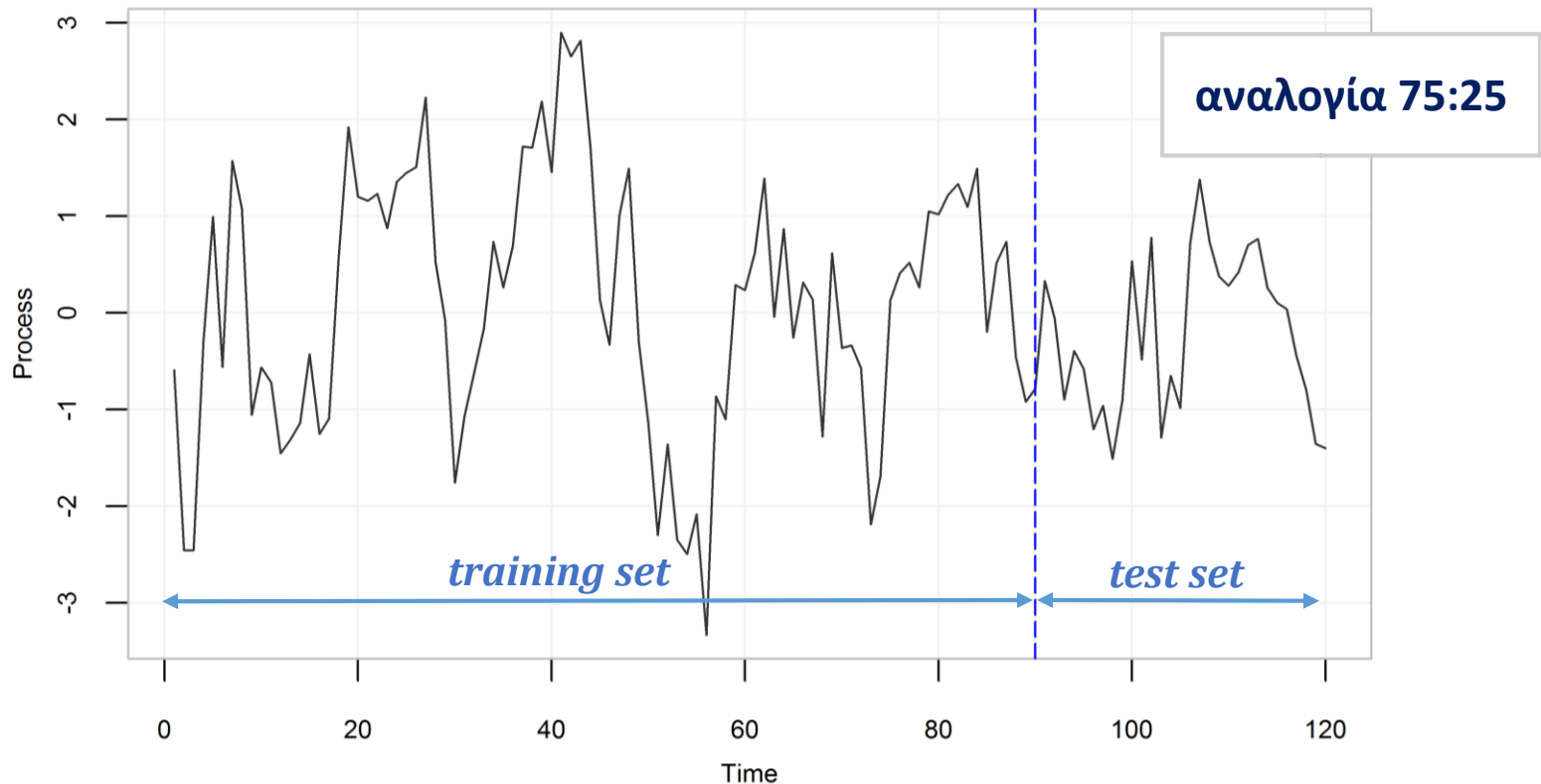
- Διαφέρει η επίδοση μεθόδων μηχανικής μάθησης σε σχέση με εκείνη κλασικών στοχαστικών μεθόδων; Αν ναι, είναι καλύτερη ή χειρότερη;
- Πόσο καλή σε σχέση με το σύνολο μπορεί να είναι η επίδοση μιας μεθόδου ως προς όλα τα εκάστοτε υπολογιζόμενα μέτρα;
- Υπάρχουν μέθοδοι, οι οποίες συγκρινόμενες με άλλες θα έχουν εμφανώς καλύτερη ή χειρότερη επίδοση από αυτές;
- Εξεζητημένες μέθοδοι δίνουν καλύτερες προβλέψεις από απλούστερες μεθόδους;
- Είναι εφικτή κάποια ομαδοποίηση μεθόδων που συναξιολογούνται με βάση την επίδοση τους;
- Είναι δυνατή η διατύπωση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων για μεθόδους πρόβλεψης με βάση συγκρίσεις όπως η διενεργούμενη;
- Πόσο μπορεί να διαφέρει η επίδοση μιας μεθόδου πρόβλεψης συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατά την εφαρμογή της σε δύο διαφορετικές χρονοσειρές;

## Μεθοδολογία σύγκρισης μεθόδων πρόβλεψης

- Πραγματοποιήθηκαν **20 πειράματα προσομοίωσης** μεγάλης κλίμακας.
- Συμπληρωματικά έγιναν **8 μελέτες περίπτωσης**.
- Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά **28 μέθοδοι πρόβλεψης**.
- Η ποιότητα των προβλέψεων ποσοτικοποιήθηκε χρήσει **22 μέτρων**.

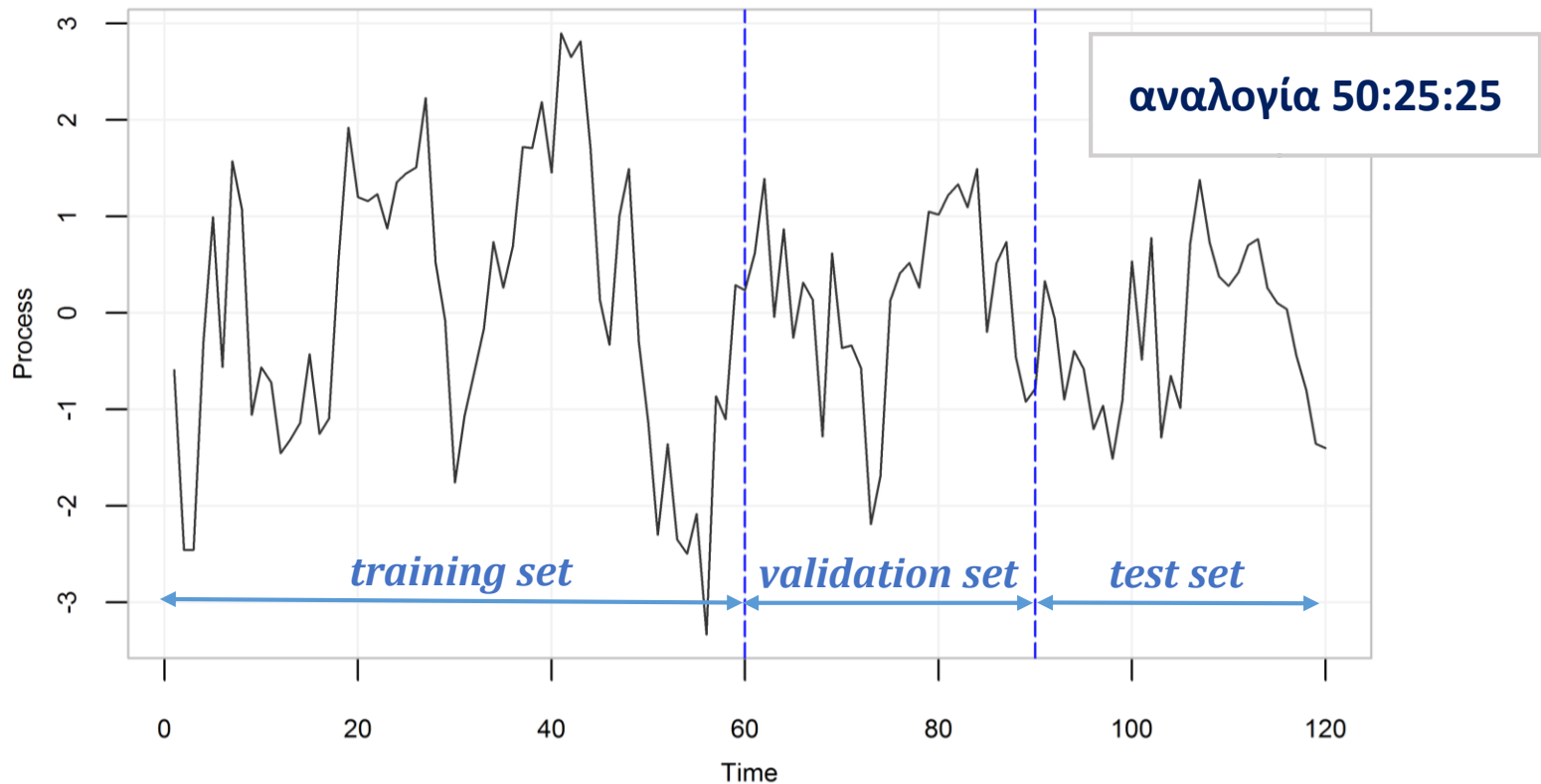
<u>Δεδομένα</u>	<u>Μέθοδοι πρόβλεψης</u>	<u>Μέτρα</u>
✓ 20 x <b>2 000 συνθετικές χρονοσειρές</b> 120 παρατηρήσεων από προσομοίωση στοχαστικών ανελίξεων ARMA, ARIMA, ARFIMA, SARIMA	✓ 19 κλασικές στοχαστικές μέθοδοι από τις εξής οικογένειες μεθόδων: Naive, ARMA, ARIMA, ARFIMA, SARIMA, Exponential Smoothing	22 μέτρα που παρέχουν (συν)αξιολόγηση με βάση τα εξής κριτήρια:
✓ 8 ιστορικές χρονοσειρές	✓ 9 μέθοδοι μηχανικής μάθησης: 3 μέθοδοι NN, 6 μέθοδοι SVM	✓ ακρίβεια ✓ αμεροληψία ✓ αμεροληψία ως προς την διακύμανση ✓ συσχέτιση

# Εφαρμογή στοχαστικών μεθόδων



- Οι συνθετικές χρονοσειρές χωρίζονται σε **δύο τμήματα** 90 και 30 παρατηρήσεων για εφαρμογή των στοχαστικών μεθόδων.
- Το πρώτο χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση των μοντέλων και το δεύτερο ως χρονοσειρά - στόχος, δηλαδή ως αναφορά για την σύγκριση των προβλέψεων μεταξύ τους.

# Εφαρμογή μεθόδων μηχανικής μάθησης



- Οι συνθετικές χρονοσειρές χωρίζονται σε **τρία τμήματα** 60, 30 και 30 παρατηρήσεων για εφαρμογή των μεθόδων μηχανικής μάθησης.
- Το πρώτο και το δεύτερο χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση των μοντέλων, ενώ το τρίτο χρησιμοποιείται ως χρονοσειρά - στόχος, δηλαδή ως αναφορά για την σύγκριση των προβλέψεων μεταξύ τους.



## Κώδικας στο R

- Ο βασικός **κώδικας** είναι **3 500 γραμμών**.
- Χρησιμοποιήθηκαν 5 παραλλαγές.
- Συνδυάστηκαν συναρτήσεις κυρίως από τα παρακάτω πακέτα.

✓ **stats** (R Core Team 2016)

✓ **CombMSC** (Smith 2012)

✓ **EnvStats** (Millard 2013)

✓ **forecast** (Hyndman 2016, Hyndman and Khandakar 2008)

✓ **fracdiff** (Maechler 2012)

✓ **ggExtra** (Attali 2016)

✓ **ggplot2** (Wickham 2009)

✓ **HKprocess** (Tyralis 2016)

✓ **hydroGOF** (Zambrano-Bigiarini 2014)

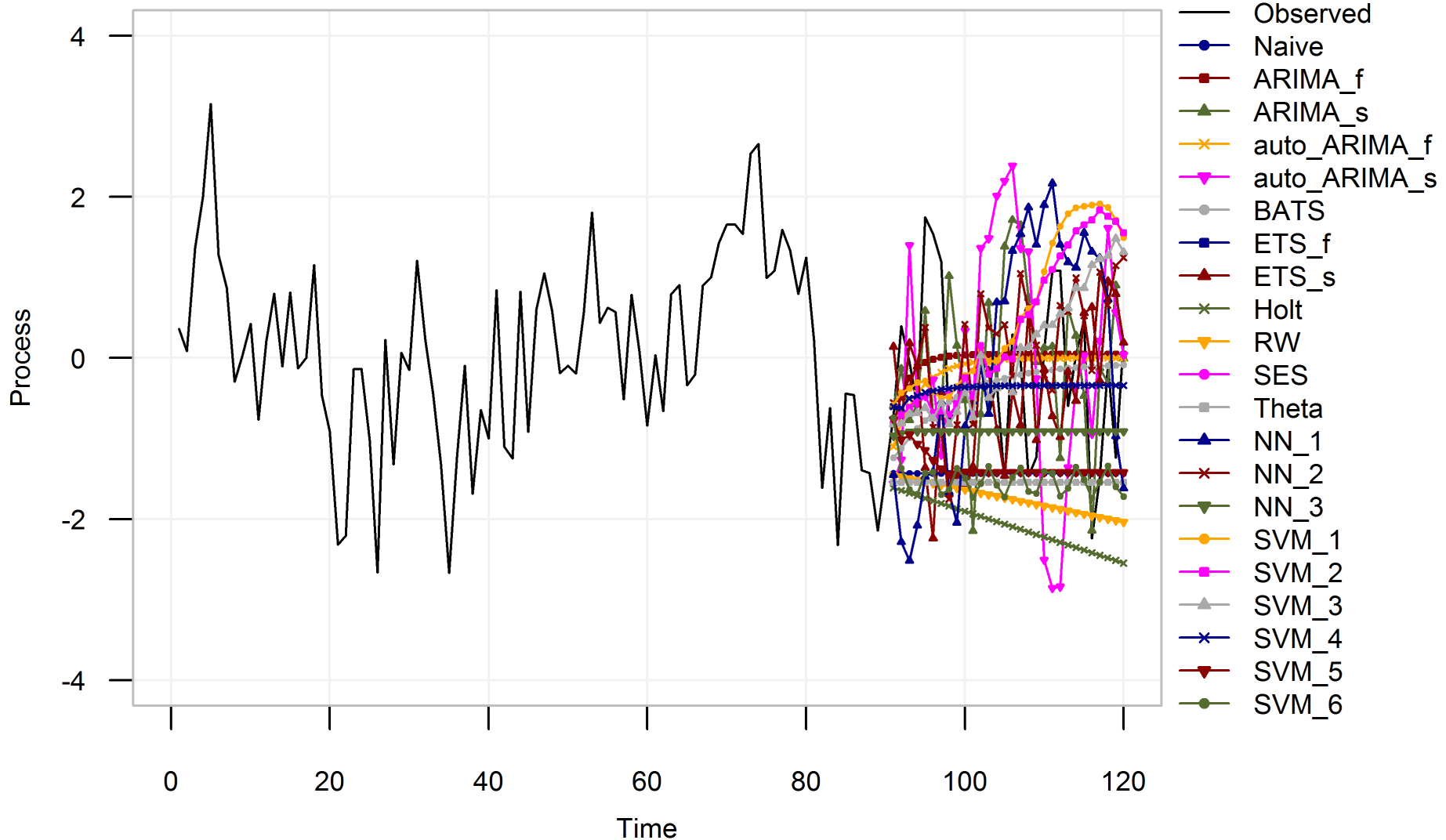
✓ **rminer** (Cortez 2010, 2015)

βασικό πακέτο  
του R

λοιπά πακέτα  
του R

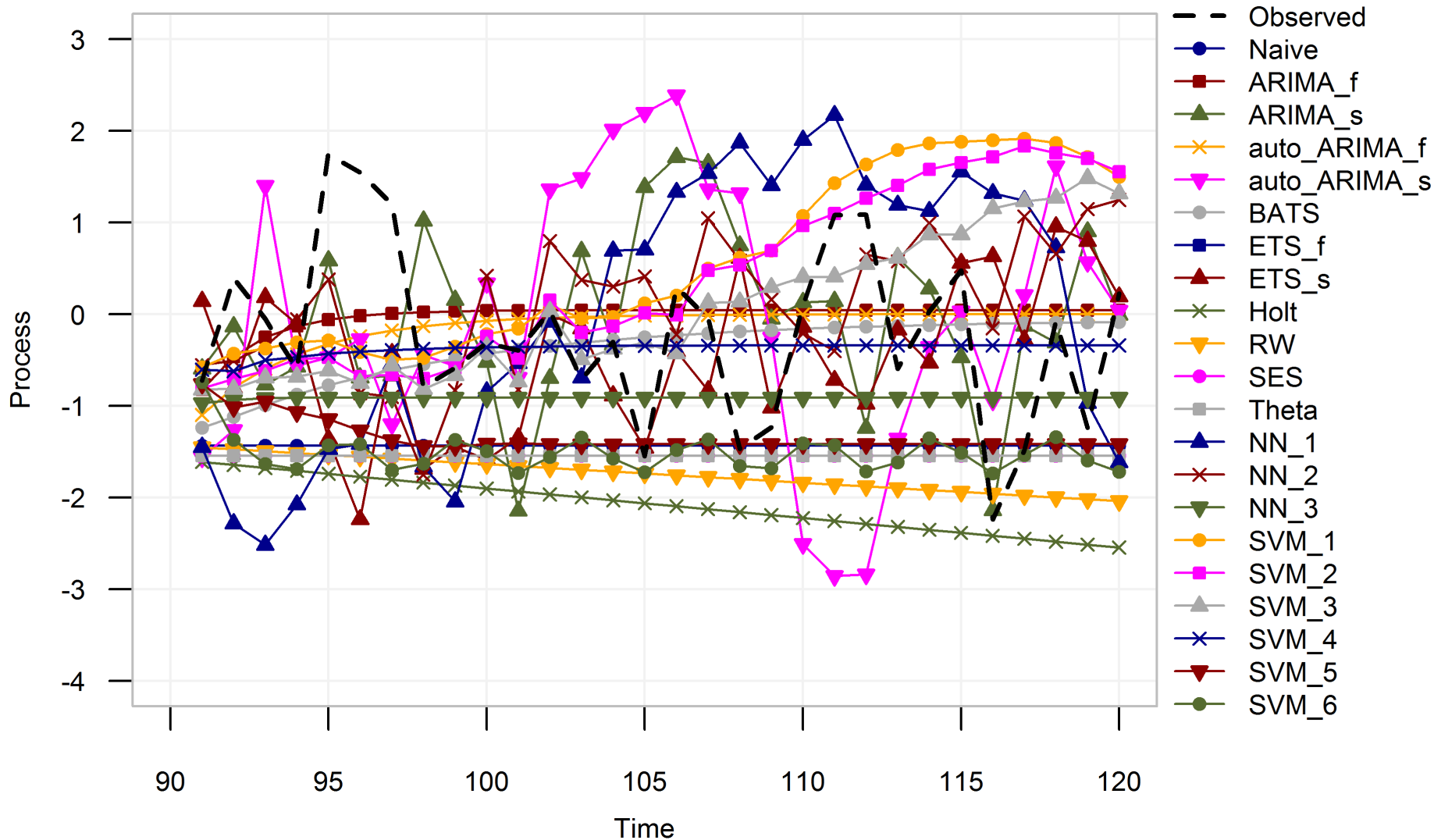
# Παράδειγμα προβλέψεων σε συνθετικές χρονοσειρές

Προσομοιωμένη στοχαστική ανέλιξη AR(1) με  $\varphi_1 = 0.7$



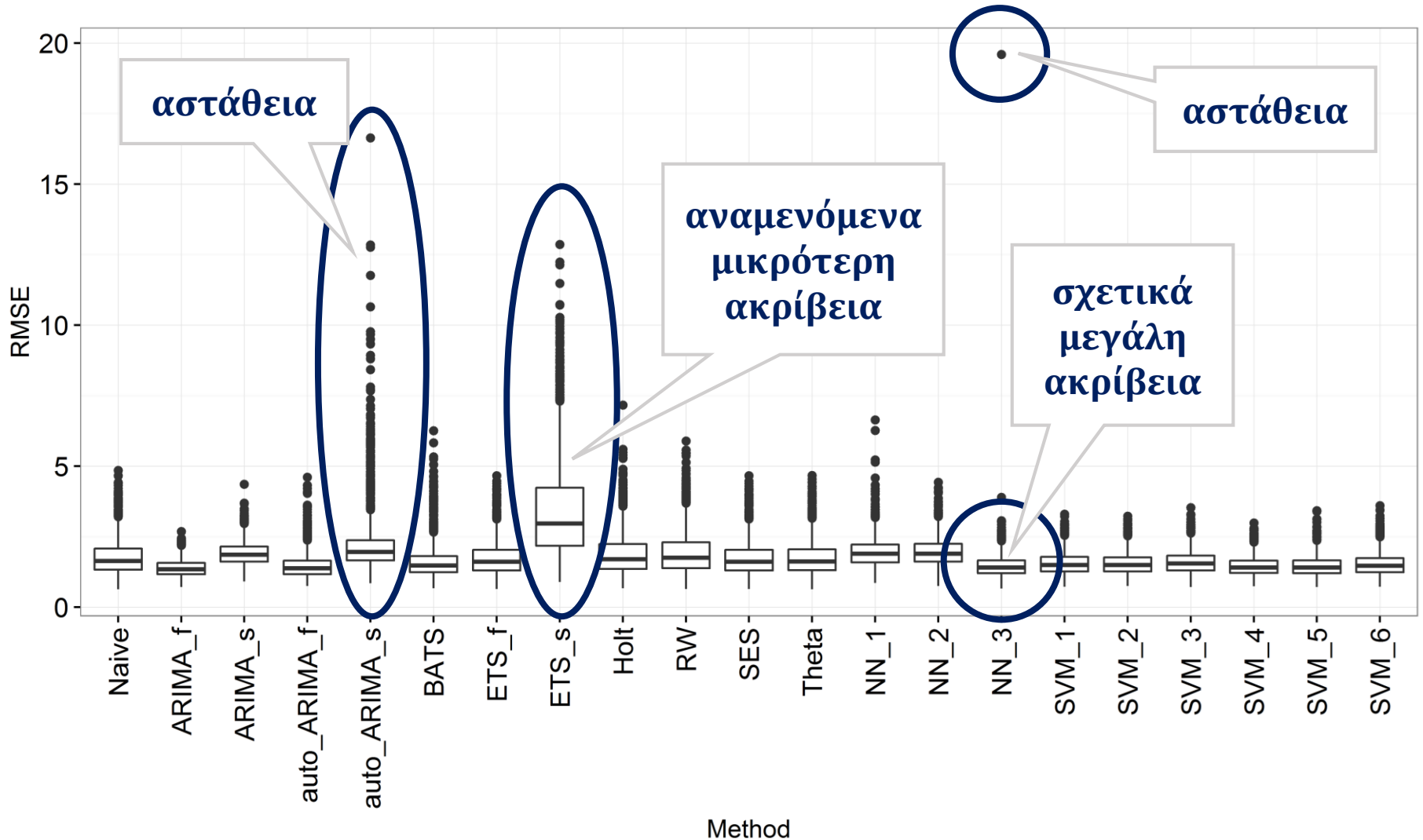
# Παράδειγμα προβλέψεων σε συνθετικές χρονοσειρές

Προσομοιωμένη στοχαστική ανέλιξη AR(1) με  $\varphi_1 = 0.7$



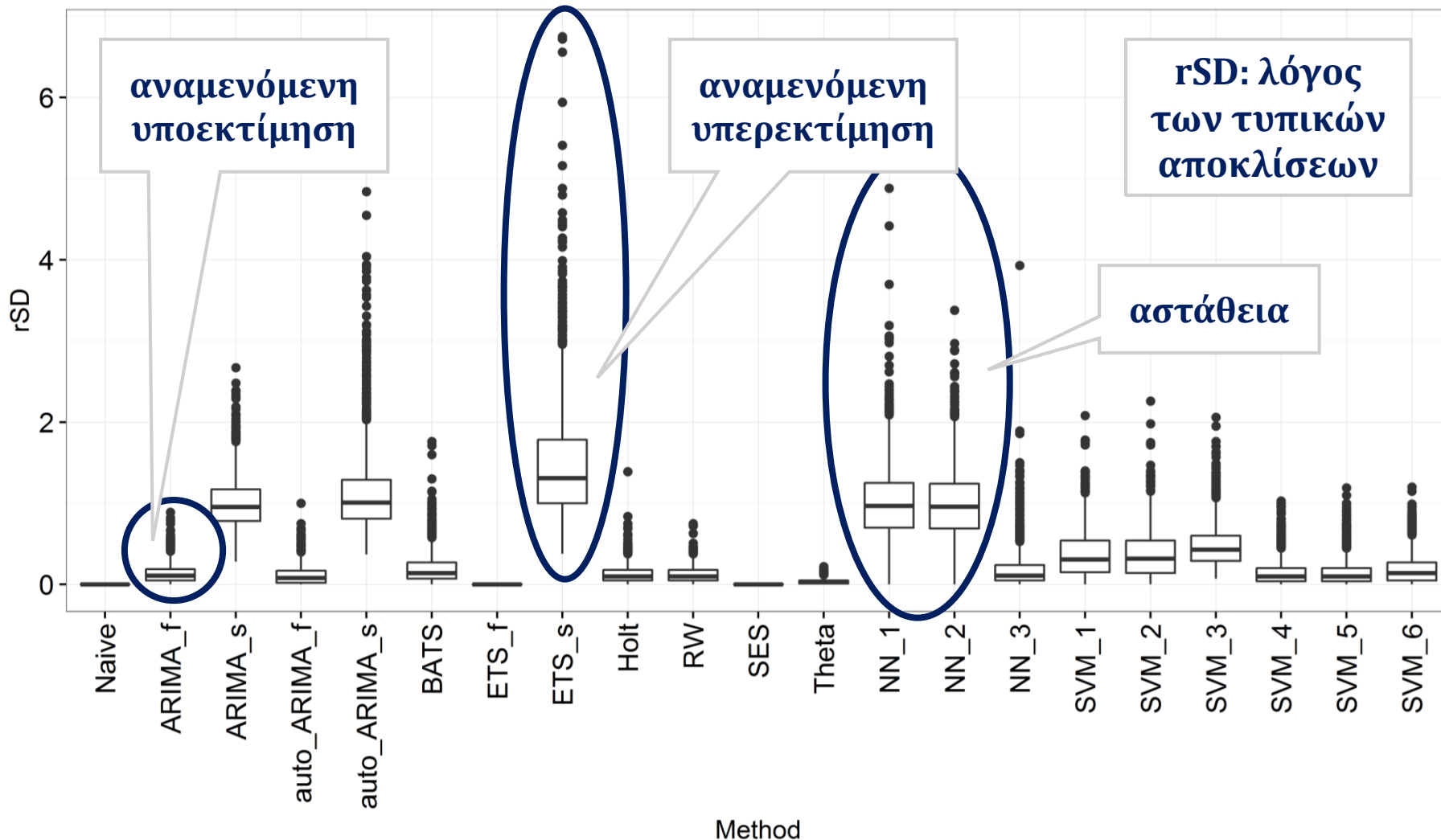
# RMSE των προβλέψεων

2 000 συνθετικές χρονοσειρές από προσομοίωση της AR(1) με  $\varphi_1 = 0.7$



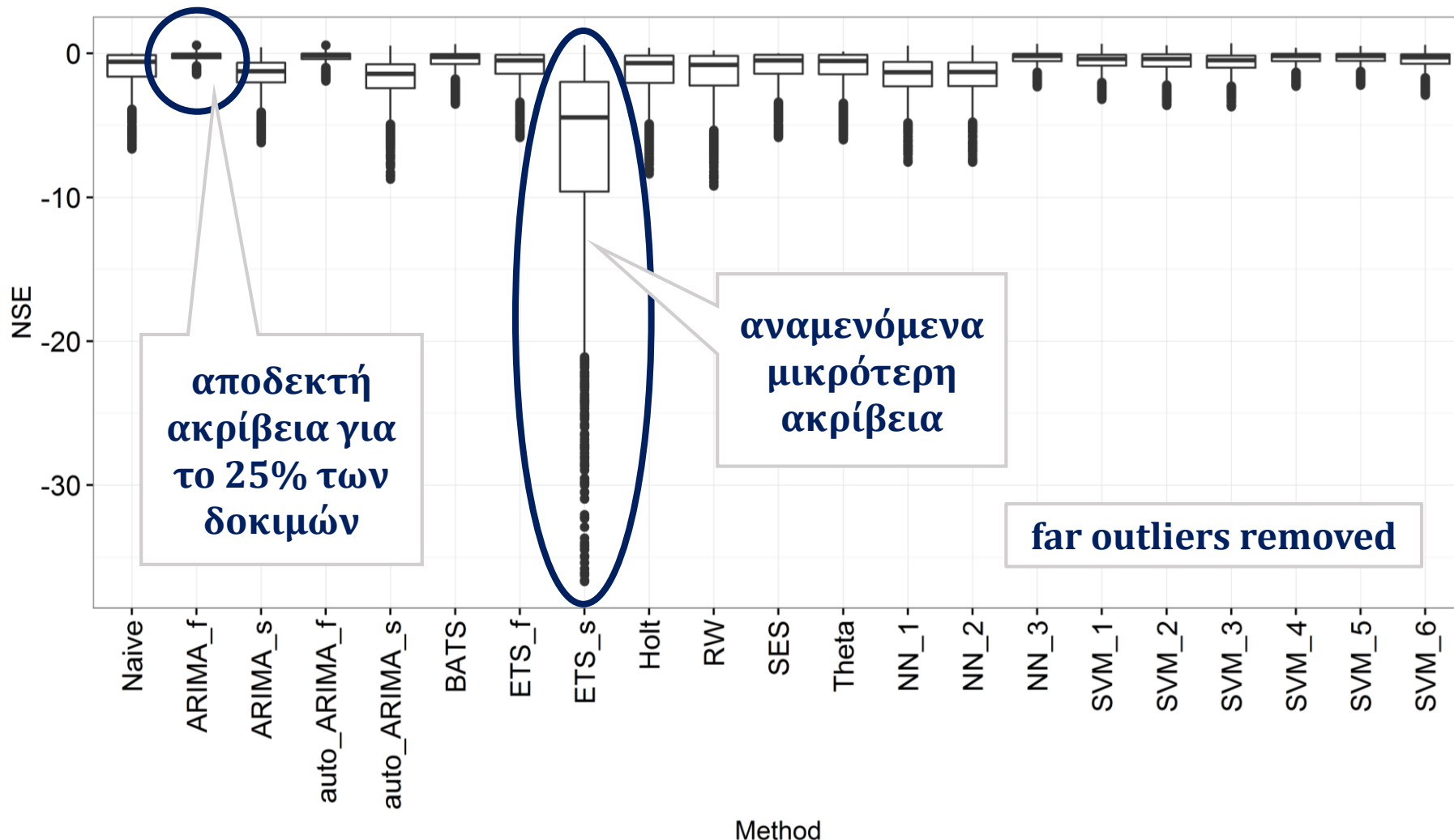
# rSD μεταξύ προβλέψεων και παρατηρήσεων

2 000 συνθετικές χρονοσειρές από προσομοίωση της AR(1) με  $\varphi_1 = 0.7$



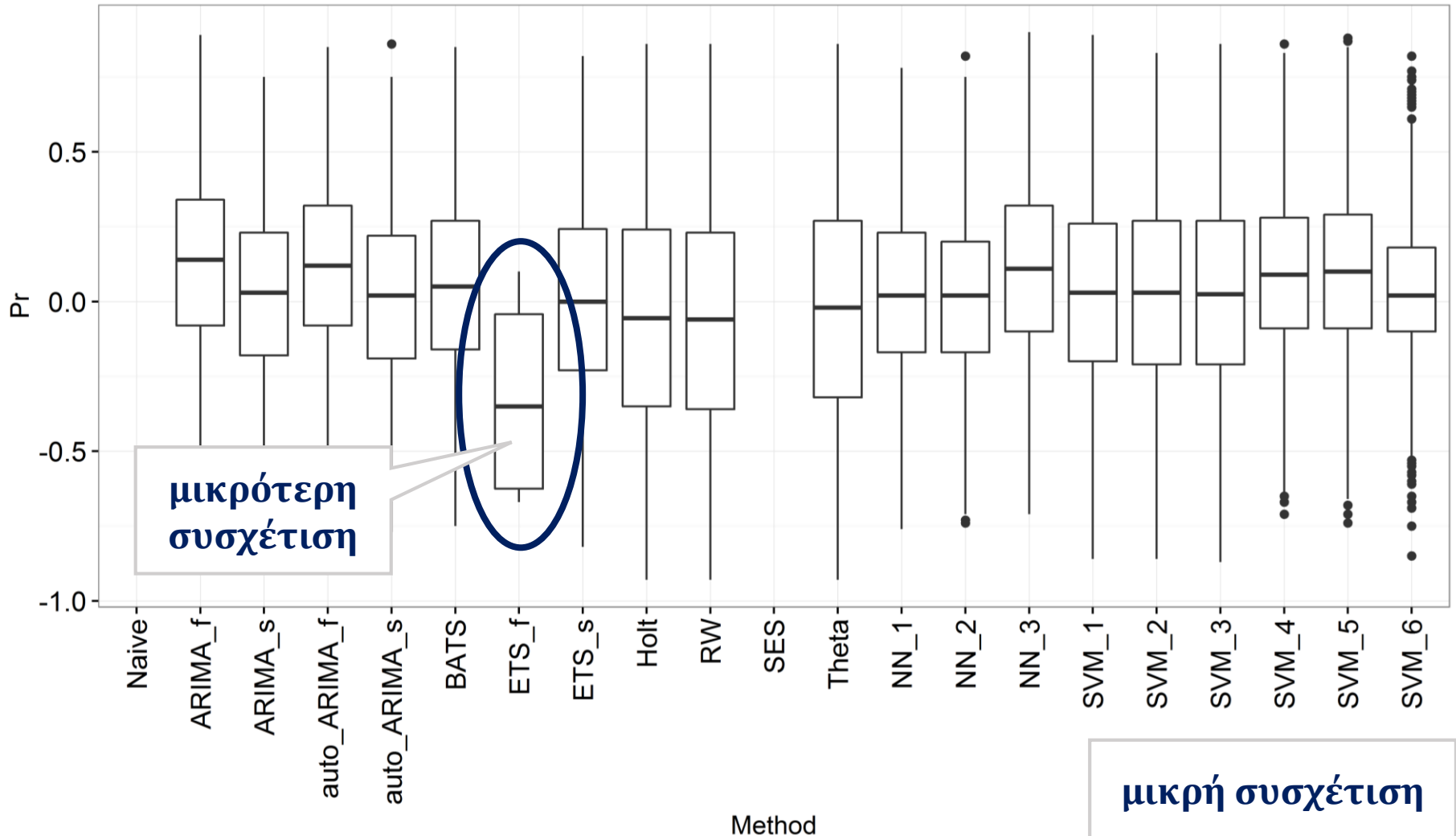
# Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) των προβλέψεων

2 000 συνθετικές χρονοσειρές από προσομοίωση της AR(1) με  $\varphi_1 = 0.7$

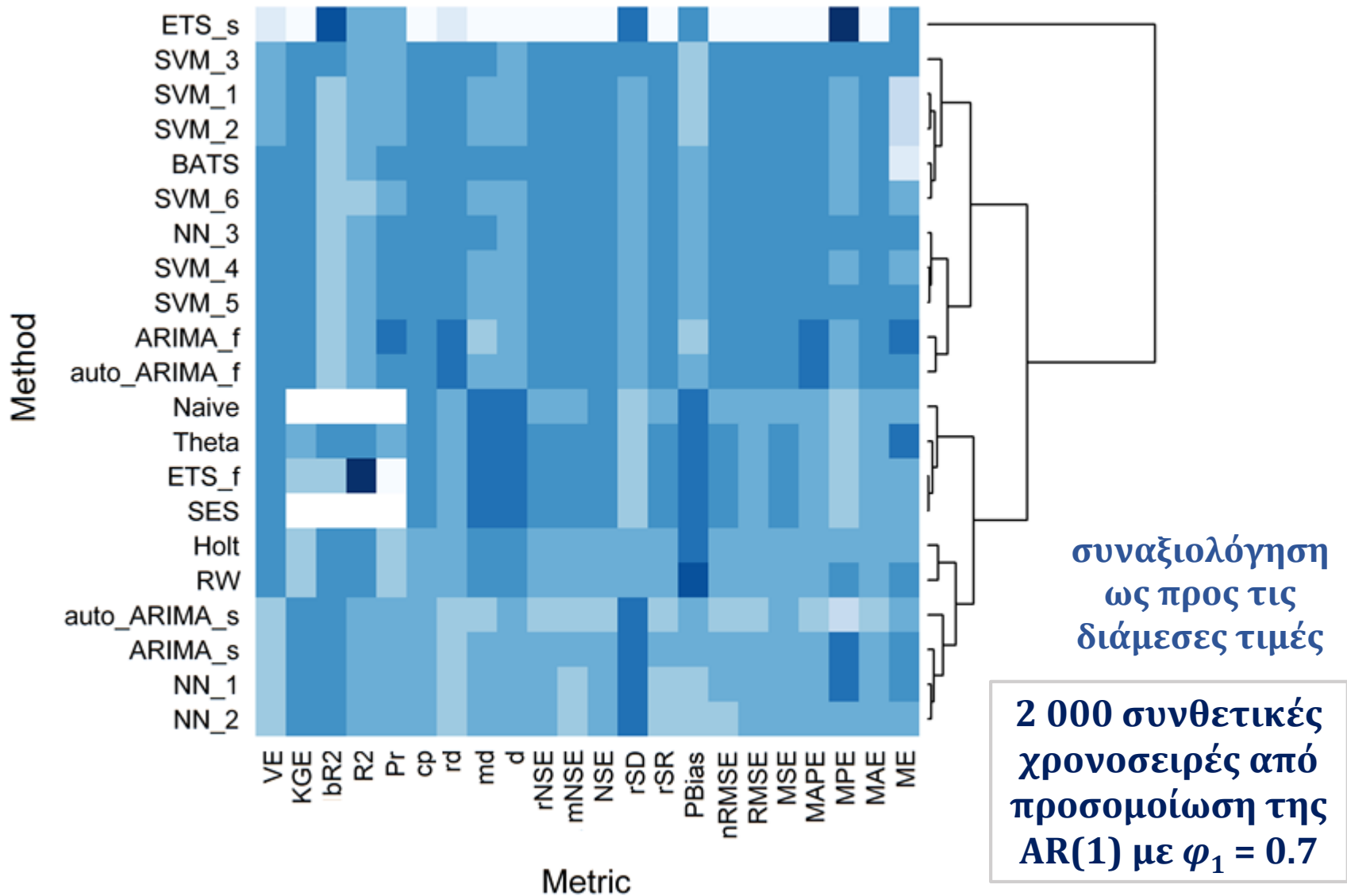


# Συντελεστής συσχέτισης (Pearson's $r$ , Pr)

2 000 συνθετικές χρονοσειρές από προσομοίωση της AR(1) με  $\varphi_1 = 0.7$

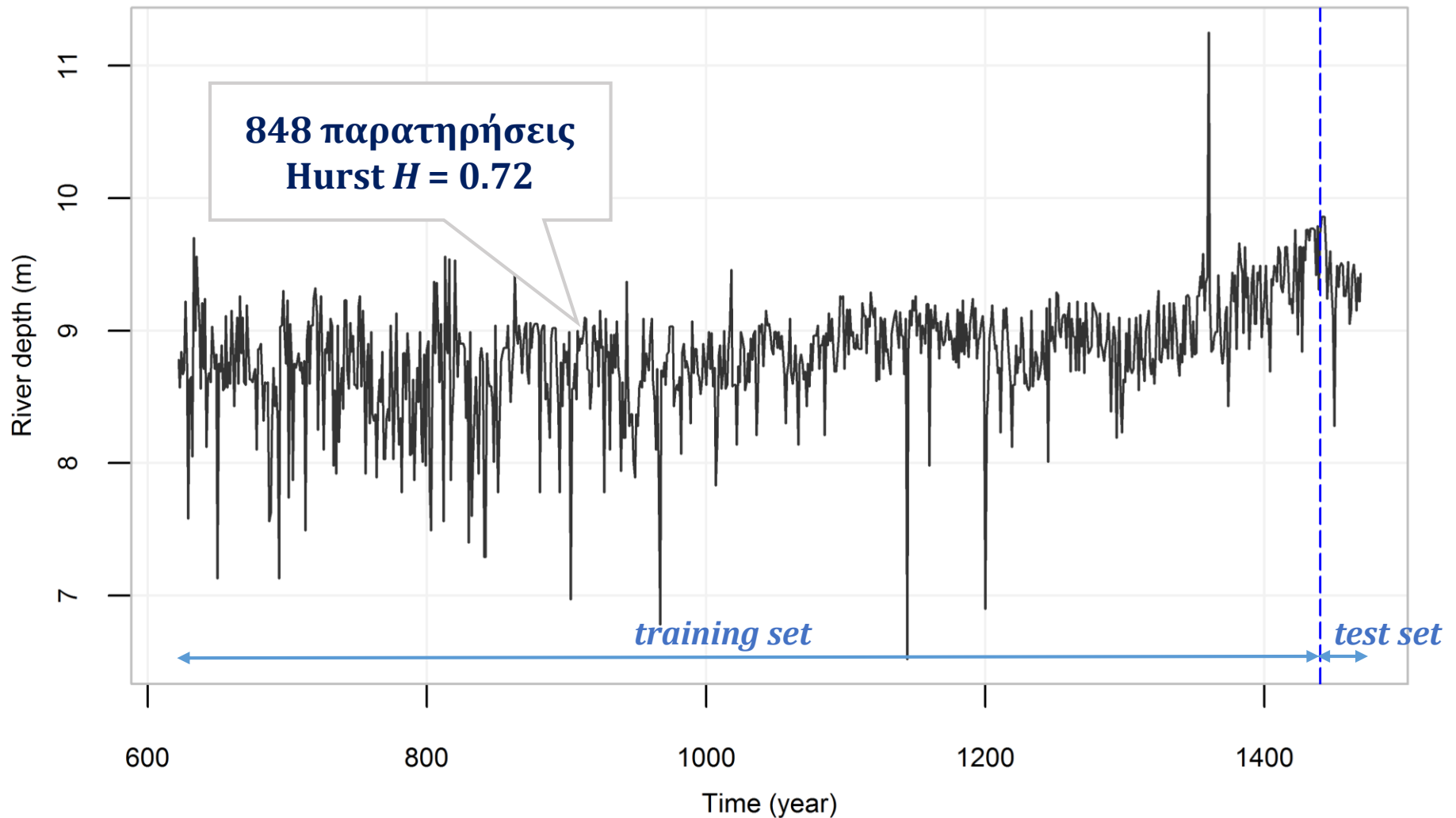


# Heatmap συναξιολόγησης μεθόδων με βάση τα μέτρα





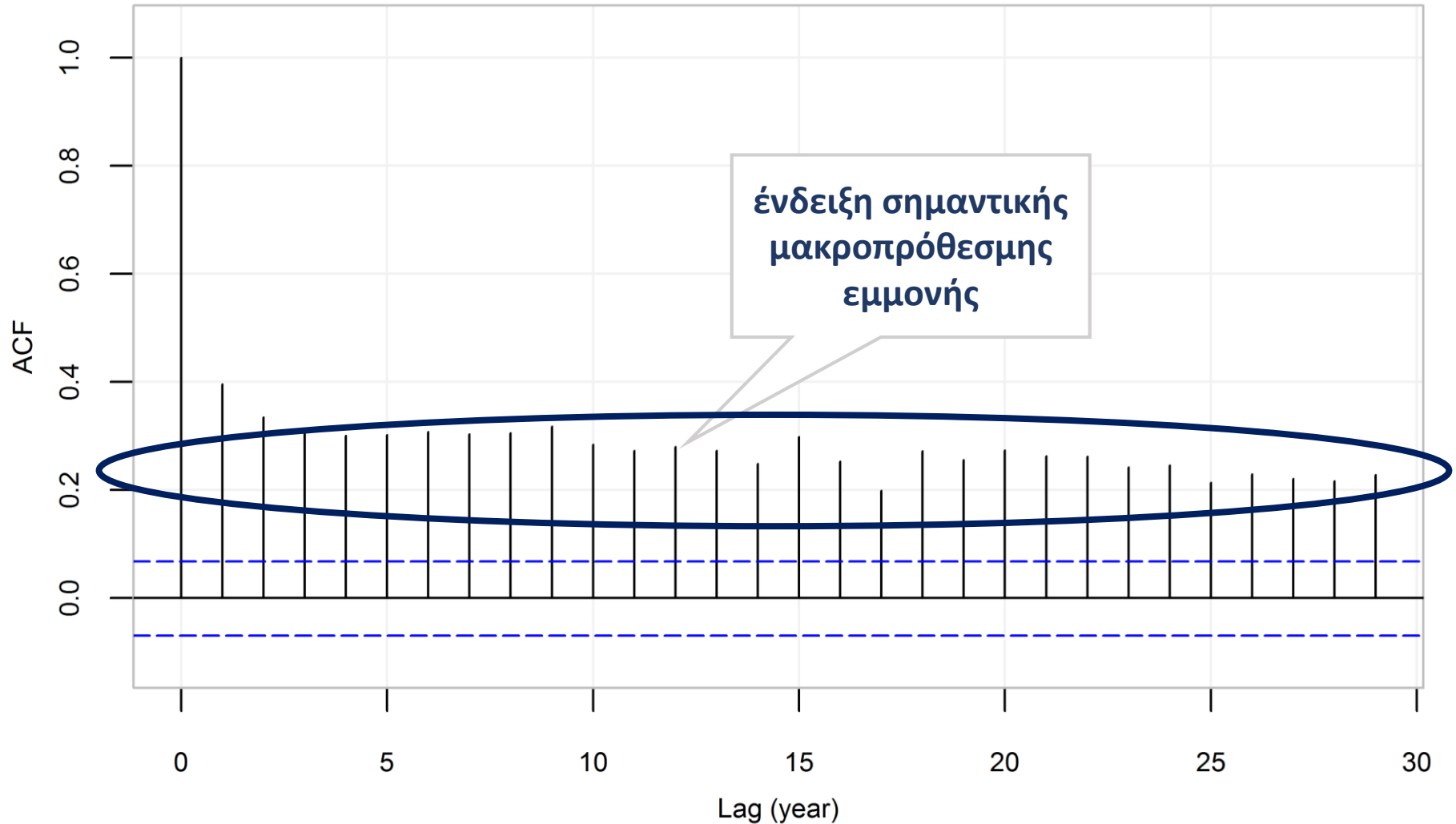
# Ιστορική χρονοσειρά μέγιστου ετήσιου βάθους του Νείλου



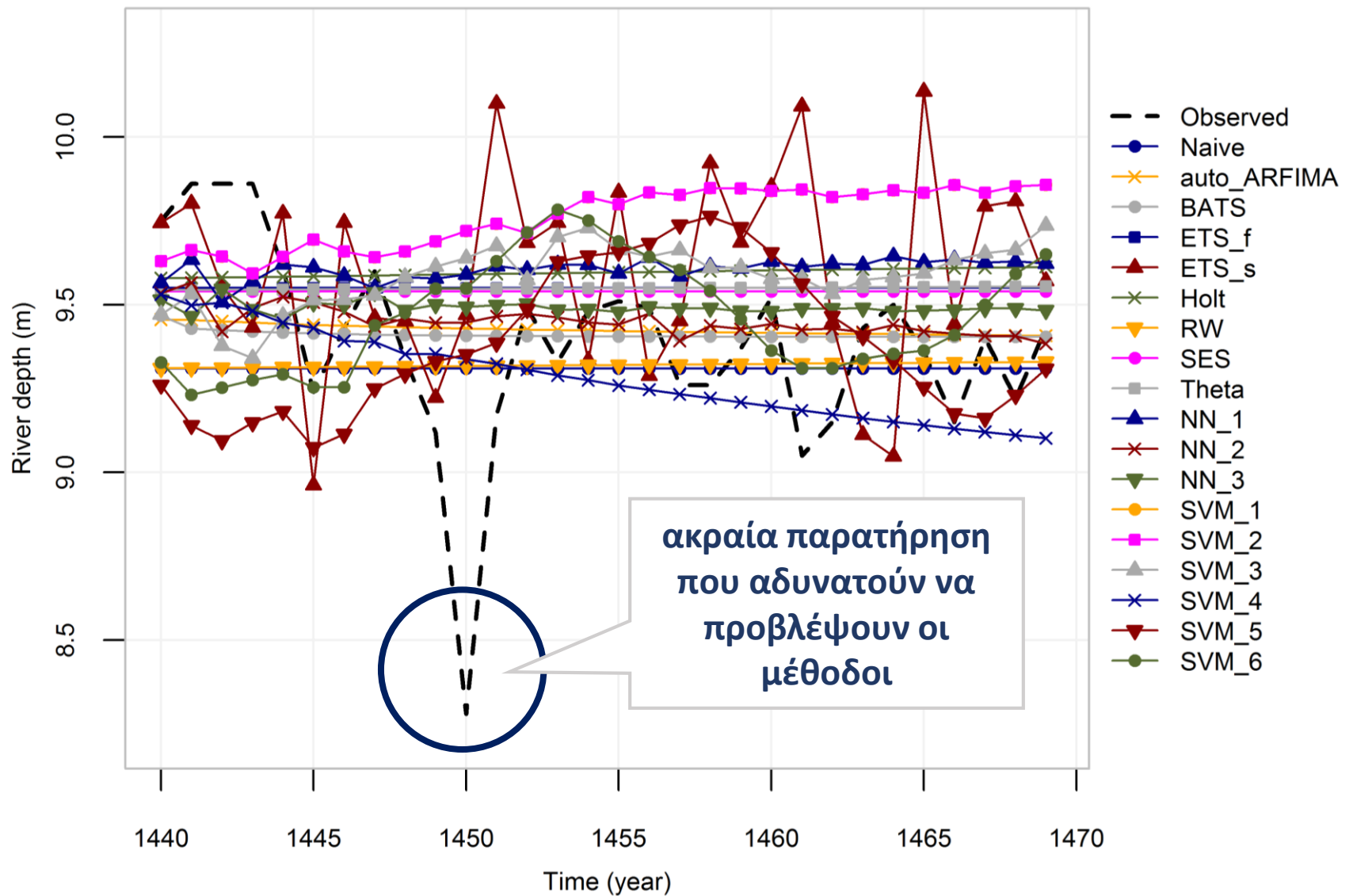
Δεδομένα: Koutsoyiannis (2013)

# Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (ACF)

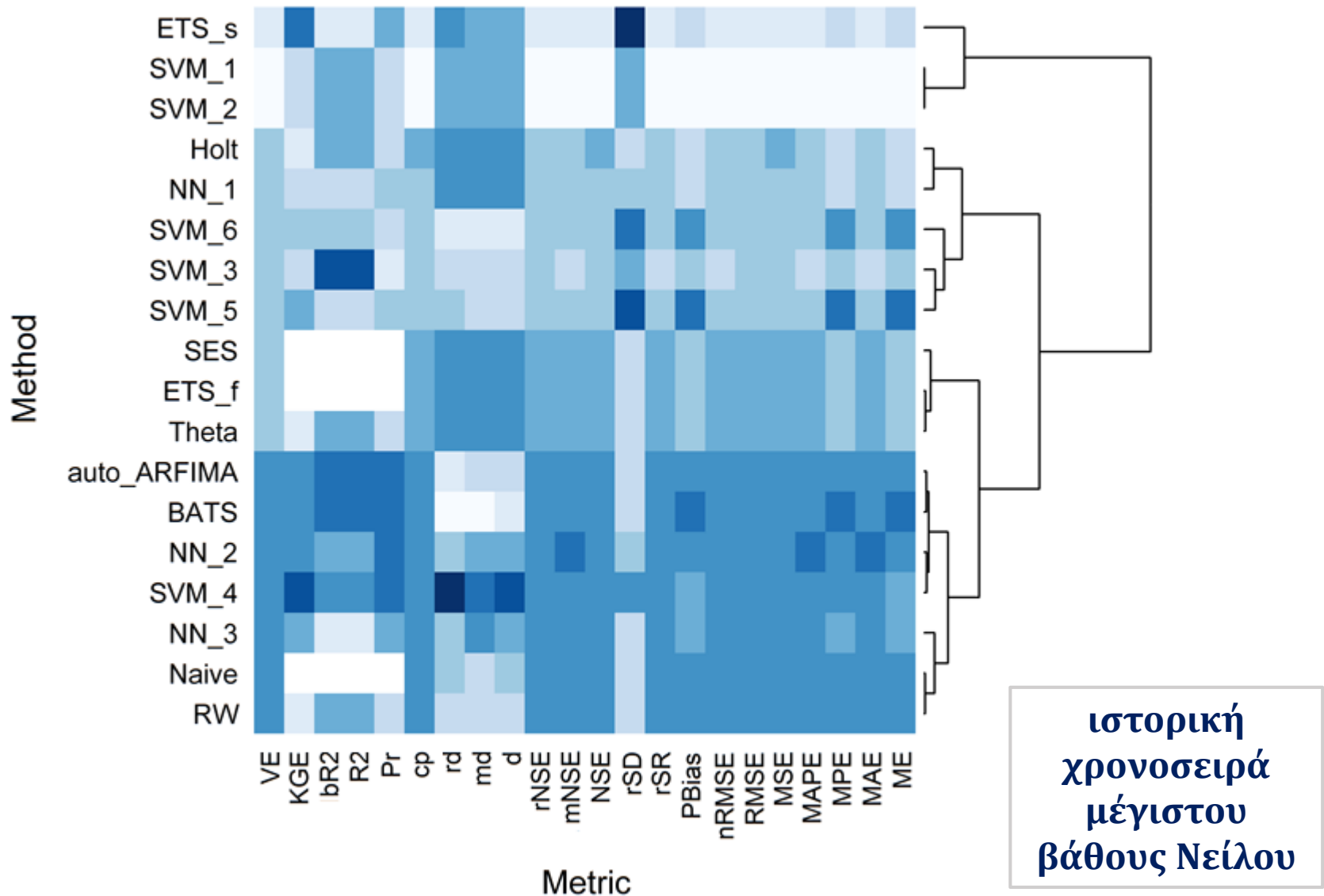
Ιστορική χρονοσειρά μέγιστου ετήσιου βάθους του Νείλου



# Προβλέψεις μέγιστου ετήσιου βάθους Νείλου



# Heatmap συναξιολόγησης μεθόδων με βάση τα μέτρα



## Συνεισφορά της εργασίας

- Γενικώς δεν υπάρχουν μέθοδοι καλύτερες ή χειρότερες ταυτόχρονα ως προς το σύνολο των μέτρων, με αποτέλεσμα η συνολική εικόνα να είναι μάλλον ομοιόμορφη.
- Υπάρχουν μέθοδοι που είναι σταθερά καλύτερες ή χειρότερες από άλλες ως προς συγκεκριμένα μέτρα.
- Μέθοδοι περισσότερο εξεζητημένες δεν δίνουν κατ' ανάγκην καλύτερες προβλέψεις από απλούστερες μεθόδους.
- Παρότι μία γενική κατάταξη των μεθόδων δεν είναι εφικτή, εφικτή είναι μια καταρχήν κατηγοριοποίηση τους με βάση την παρόμοια επίδοση στα διάφορα μέτρα. Η εν λόγω κατηγοριοποίηση μπορεί να εξαρτάται και από την στοχαστική ανέλιξη.
- Οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης φαίνεται να μην διαφέρουν από τις κλασικές στοχαστικές μεθόδους ως προς τα όσα διατυπώνονται παραπάνω.
- Οι διάφορες μέθοδοι SVM διαφέρουν μεταξύ τους λιγότερο από ό,τι κλασικές στοχαστικές μέθοδοι ή μέθοδοι NN που βασίζονται στον ίδιο αλγόριθμο.

## Συνεισφορά της εργασίας

- Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης προσφέρουν εν δυνάμει καλή επίδοση ως προς την ακρίβεια.
- Η επίδοση μιας μεθόδου πρόβλεψης ενδεχομένως να διαφέρει σε μεγάλο βαθμό κατά την εφαρμογή σε δύο διαφορετικές χρονοσειρές. Οι συγκεκριμένες διαφορές εξαρτώνται τόσο από την μέθοδο όσο και από τη στοχαστική ανέλιξη.
- Τα ανωτέρω γενικά συμπεράσματα αναδεικνύουν την σημασία της θεωρητικής σύγκρισης που διενεργεί η παρούσα εργασία.
- Η μικρής κλίμακας εμπειρική σύγκριση τονίζει επιμέρους σημεία του θέματος, ενώ ενισχύει ακόμη τα συμπεράσματα της θεωρητικής σύγκρισης που προηγείται.
- Κάποιος που χρησιμοποιεί συγχρόνως τα αποτελέσματα και των δύο περιπτώσεων σύγκρισης έχει μια περισσότερο ολοκληρωμένη εικόνα.
- Σημαντικό σημείο στην παρούσα εργασία αποδεικνύεται ακόμη η χρήση αρκετών μεθόδων και μέτρων. Λιγότερες μέθοδοι και λιγότερα μέτρα θα οδηγούσαν σε πολύ διαφορετική συνολική εικόνα.

## Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Προτείνεται η διενέργεια προσομοιώσεων με σκοπό την σύγκριση κλασικών στοχαστικών μεθόδων και μεθόδων μηχανικής μάθησης για την περίπτωση της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης, η οποία είναι επίσης χρήσιμη.
- Προτείνεται η υιοθέτηση της μεθοδολογίας της παρούσας εργασίας για την αξιολόγηση της επίδοσης μεθόδων για τις οποίες υπάρχει θεωρητικό ή/και πρακτικό ενδιαφέρον.
- Η κατανόηση των θεωρητικών ιδιοτήτων των διαφόρων μεθόδων απαιτεί συστηματική και εστιασμένη σε καθεμία από αυτές έρευνα.
- Τα μέτρα που χρησιμοποιούνται στην συναξιολόγηση θα πρέπει να γίνουν σε μεγαλύτερο βαθμό κατανοητά, γεγονός που σημαίνει ότι η έρευνα θα πρέπει να εστιάσει και σε αυτά.
- Όσον αφορά τις μεθόδους μηχανικής μάθησης, προτείνεται η διενέργεια προσομοιώσεων με σκοπό τη διερεύνηση τόσο των διαφόρων τρόπων επιλογής των χρονικών υστερήσεων για την κατασκευή του πίνακα των διανυσμάτων που χρησιμοποιούνται στην παλινδρόμηση όσο και των διαφόρων τρόπων επιλογής των υπερπαραμέτρων.

## Αναφορές

- Ahmed NK, Atiya AF, GayarAn NE, El-Shishiny H (2010) An empirical comparison of machine learning models for time series forecasting. *Econometric Reviews* 29(5-6):594-621. doi:10.1080/07474938.2010.481556
- Attali D (2016) ggExtra: Add Marginal Histograms to 'ggplot2', and More 'ggplot2' Enhancements. R package version 0.5
- Belayneh A, Adamowski J, Khalil B, Ozga-Zielinski B (2014) Long-term SPI drought forecasting in the Awash River Basin in Ethiopia using wavelet neural network and wavelet support vector regression models. *Journal of Hydrology* 508:418-429. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.10.052
- Cortez P (2010) Data Mining with Neural Networks and Support Vector Machines Using the R/rminer Tool. In: Perner P (eds) *Advances in Data Mining. Applications and Theoretical Aspects*. Springer Berlin Heidelberg, pp 572-583. doi:10.1007/978-3-642-14400-4\_44
- Cortez P (2015) rminer: Data Mining Classification and Regression Methods. R package version 1.4.1
- Han D, Chan L, Zhu N (2007) Flood forecasting using support vector machines. *Journal of Hydroinformatics* 9(4):267-276. doi:10.2166/hydro.2007.027
- Hyndman RJ (2016) forecast: Forecasting functions for time series and linear models. R package version 7.1
- Hyndman RJ, Khandakar Y (2008) Automatic time series forecasting: the forecast package for R. *Journal of Statistical Software* 27(3):1-22. doi:10.18637/jss.v027.i03



## Αναφορές

- Jain SK, Das A, Srivastava DK (1999) Application of ANN for reservoir inflow prediction and operation. *Journal of Water Resources* 125(5):263-271. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:5(263)
- Khan MS, Coulibaly P (2006) Application of support vector machine in lake water level prediction. *Journal of Hydrologic Engineering* 11(3):199-205. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:3(199)
- Kisi O (2004) River flow modeling using artificial neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering* 9(1):60-63. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9:1(60)
- Koutsoyiannis D (2013) Hydrology and change. *Hydrological Sciences Journal* 58(6):1177-1197. doi:10.1080/02626667.2013.804626
- Koutsoyiannis D, Yao H, Georgakakos A (2008) Medium-range flow prediction for the Nile: a comparison of stochastic and deterministic methods. *Hydrological Sciences Journal* 53(1). doi:10.1623/hysj.53.1.142
- Krzysztofowicz R (2001) The case for probabilistic forecasting in hydrology. *Journal of Hydrology* 249(1-4):2-9. doi:10.1016/S0022-1694(01)00420-6
- Lin JY, Cheng CT, Chau KW (2006) Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Sciences Journal* 51(4):599-612. doi:10.1623/hysj.51.4.599
- Maechler M (2012) fracdiff: Fractionally differenced ARIMA aka ARFIMA(p,d,q) models. R package version 1.4-2
- Maier HR, Dandy GC (2000) Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications. *Environmental modelling & software* 15(1):101-124. doi:10.1016/S1364-8152(99)00007-9

## Αναφορές

- Millard SP (2013) EnvStats: An R Package for Environmental Statistics. In: Høst G (eds) Encyclopedia of Environmetrics. doi:10.1002/9780470057339.vae043.pub2
- R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available online at: <https://www.R-project.org/>
- Raghavendra NS, Deka PC (2014) Support vector machine applications in the field of hydrology: a review. Applied soft computing 19:372-386. doi:10.1016/j.asoc.2014.02.002
- Smith AK (2012) CombMSC: Combined Model Selection Criteria. R package version 1.4.2
- Thissen U, Van Brakel R, De Weijer AP, Melssena WJ, Buydens LMC (2003) Using support vector machines for time series prediction. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 69(1-2):35-49. doi:10.1016/S0169-7439(03)00111-4
- Tyralis H (2016) HKprocess: Hurst-Kolmogorov Process. R package version 0.0-2
- Wang WC, Chau KW, Cheng CT, Qiu L (2009) A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. Journal of Hydrology 374(3-4):294-306. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.06.019
- Wickham H (2009) ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York
- Yu X, Liong SY (2007) Forecasting of hydrologic time series with ridge regression in feature space. Journal of Hydrology 332(3-4):290-302. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.003
- Zambrano-Bigiarini M (2014) hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series. R package version 0.3-8