

# Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση υδρομετεωρολογικών διεργασιών για τη βελτιστοποίηση ενός υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας

Χρήστος Ιωάννου, Γιώργος Τσεκούρας, Ανδρέας Ευστρατιάδης  
και Δημήτρης Κουτσογιάννης

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

# 1. Εισαγωγή και σκοποί

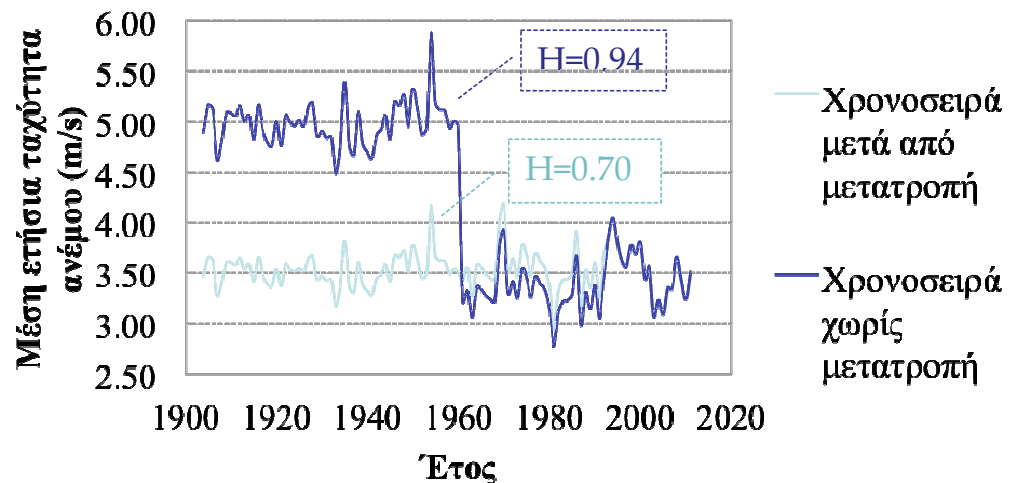
- Τα μειονεκτήματα των συμβατικών πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων τους, τονίζουν την ανάγκη ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό ισοζύγιο.
- Δεδομένου ότι οι ΑΠΕ εξαρτώνται έντονα από χρονικά μεταβαλλόμενες και μη προβλέψιμες υδρομετεωρολογικές διεργασίες, είναι απαραίτητο να καθιερωθεί ένα συνεπές πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης το οποίο να αντιμετωπίζει αυτή την αβεβαιότητα (Koutsoyiannis *et al.*, 2009).
- Ωστόσο ένα μελλοντικό σκηνικό στο οποίο θα κυριαρχούν οι ΑΠΕ θα είναι εφικτό μόνο αν τα προαναφερθέντα συνδυάζονται με τεχνολογίες για την αποθήκευση ενέργειας, διαμορφώνοντας έτσι υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΥΣΑΠΕ) (Koutsoyiannis and Efstratiadis, 2012).
- Σε αυτό το πνεύμα, διερευνούμε το σχεδιασμό ενός υποθετικού ΥΣΑΠΕ, το οποίο περιλαμβάνει ανεμογεννήτριες, ηλιακά πάνελ και δύο διασυνδεδεμένους ταμιευτήρες με σύστημα άντλησης-ταμίευσης.
- Διερευνούνται οι στοχαστικές ιδιότητες των δύο κύριων διεργασιών, δηλ. της ταχύτητας ανέμου και της διάρκειας ηλιοφάνειας, στη βάση ημερήσιων δεδομένων τα οποία λήφθηκαν από ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων.
- Έξετάζεται συγκεκριμένα η μακροπρόθεσμη εμμονή (LTP) των δύο μεταβλητών, αναζητώντας αντιπροσωπευτικές τιμές του συντελεστή Hurst (πρβλ. Koutsoyiannis, 2002, 2003).
- Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται συνθετικά μετεωρολογικά δεδομένα τα οποία παράγονται μέσω του λογισμικού Κασταλία, το οποίο επιτελεί ένα πολυμεταβλητό σχήμα στοχαστικής προσομοίωσης τριών επιπέδων (ετήσια, μηνιαία, ημερήσια). Παράγονται επίσης συνθετικά δεδομένα ημερήσιας ζήτησης ενέργειας.
- Χρησιμοποιώντας αυτές τις χρονοσειρές ως δεδομένα εισόδου υπολογίζουμε τις κύριες μεταβλητές σχεδιασμού του συστήματος, βελτιστοποιώντας την απόδοση του η οποία εκφράζεται σε όρους κόστους και αξιοπιστίας.

Η εργασία βασίζεται κυρίως στις διπλωματικές εργασίες των δύο πρώτων συγγραφέων, οι οποίες αναπτύχθηκαν στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Τσεκούρας, 2012; Ιωάννου, 2012).

## 2. Ιστορικά μετεωρολογικά δεδομένα

- Με σκοπό να διερευνηθούν οι στοχαστικές ιδιότητες των δύο υδρομετεωρολογικών μεταβλητών ενδιαφέροντος (ταχύτητας ανέμου ( $W$ ) και διάρκειας ηλιοφάνειας ( $S$ )), αναλύθηκαν ημερήσιες καταγραφές από τρεις ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων (KNMI Climate Explorer, European Climate Assessment & Data και Deutscher Wetterdienst).
- Ανακτήθηκαν 21 και 20 καταγραφές της  $W$  και  $S$ , αντίστοιχα, στη βάση τριών κριτηρίων:
  - ένα ελάχιστο μήκος καταγραφών 70 ετών (έτσι ώστε να υπολογιστεί ο συντελεστής Hurst με κάποια ακρίβεια).
  - η ύπαρξη μεταδεδομένων ταχύτητας ανέμου (υψόμετρο ανεμομέτρου πάνω από το έδαφος).
  - ένας μέγιστος αριθμός τριών αλλαγών στο υψόμετρο μέτρησης (σταθμοί με πολλές αλλαγές δεν είναι αξιόπιστοι).
- Παρόλο που δεν βρέθηκαν καταγραφές ηλιακής ακτινοβολίας επαρκούς μήκους, αυτή η μεταβλητή υπολογίστηκε έμμεσα κάνοντας χρήση της διάρκειας ηλιοφάνειας.
- Τα δεδομένα της ταχύτητας ανέμου προσαρμόστηκαν έτσι ώστε να αναφέρονται στο πιο πρόσφατο υψόμετρο παρατήρησης, μέσω του πολλαπλασιασμού των τιμών της κάθε ομογενούς περιόδου με το λόγο της μέσης τιμής της πιο πρόσφατης περιόδου προς τη μέση τιμή της περιόδου στην οποία ανήκει.

Η χρήση μη ομογενών δεδομένων  $W$  ενδέχεται να οδηγήσει σε λανθασμένες στατιστικές εκτιμήσεις. Συγκεκριμένα ο συντελεστής  $H$  μπορεί να υπερεκτιμηθεί σημαντικά. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, οι ανεπεξεργαστες χρονοσειρές στο σταθμό De Bilt, παρουσιάζουν μία μη ρεαλιστική τιμή  $H = 0.94$ , εξαιτίας δύο ξαφνικών αλλαγών που φανερώνουν αλλαγή υψομέτρου μέτρησης. Τα τροποποιημένα δεδομένα δίνουν τιμή  $H = 0.70$



### 3. Διερεύνηση των θεωρητικών κατανομών

- Στην ημερήσια κλίμακα και οι δύο μεταβλητές παρουσιάζουν έντονη ασυμμετρία, για αυτό μη κανονικές στατιστικές κατανομές θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την αναπαράστασή τους.
- Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των κατανομών Γάμα και Weibull είναι σχεδόν πανομοιότυπες και κατάλληλες για να περιγράψουν ιστορικά ημερήσια δεδομένα ταχύτητας ανέμου.
- Η σχετική διάρκεια ηλιοφάνειας είναι μία φραγμένη μεταβλητή, με μη-μηδενική πιθανότητα της τιμής  $X = 0$ . Χρησιμοποιώντας το λογαριθμικό μετασχηματισμό:

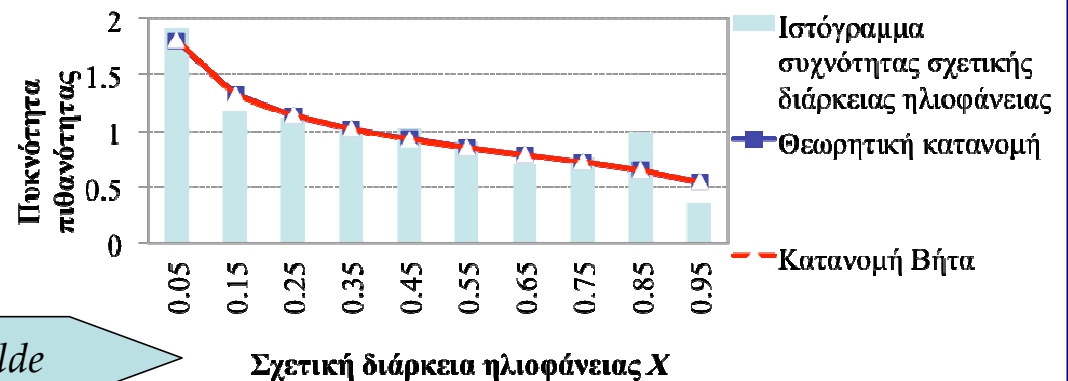
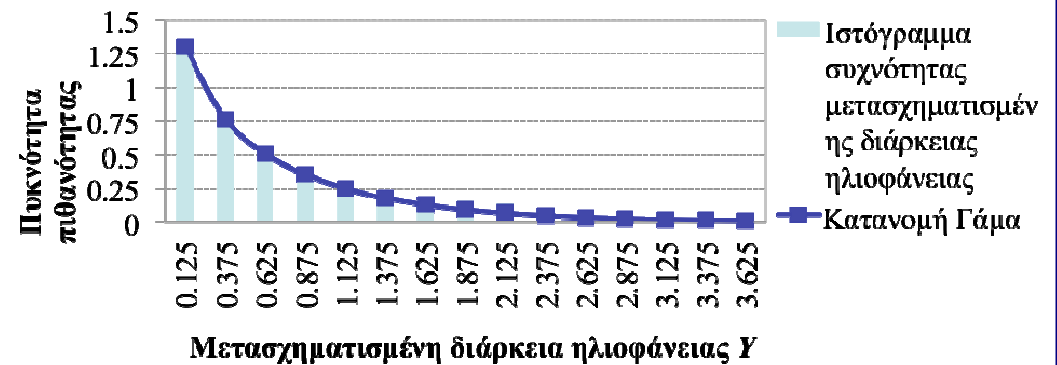
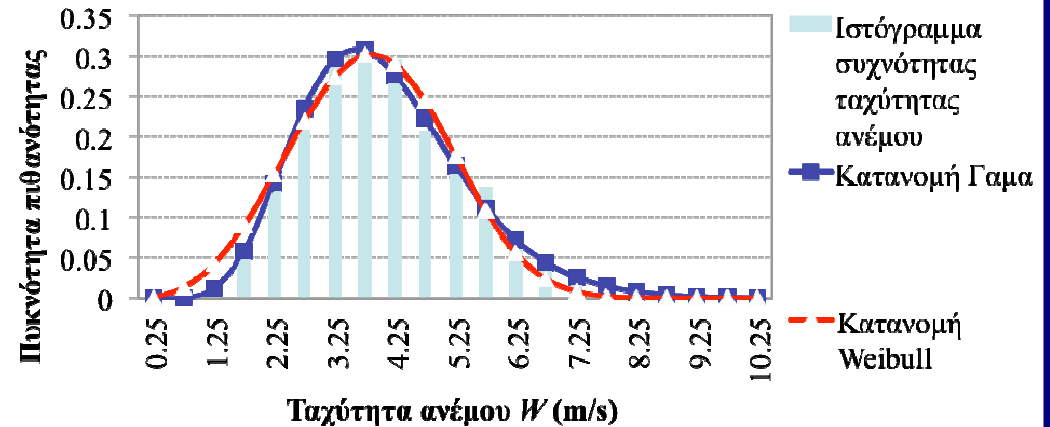
$$Y = -\ln(1 - X)$$

η μετασχηματισμένη μεταβλητή  $Y$  παίρνει τιμές στο  $[0, +\infty)$ , ενώ η τιμή  $X = 0$  αντιστοιχεί σε τιμή  $Y = 0$ .

- Δεχόμενοι ότι η  $Y$  ακολουθεί την κατανομή Γάμα, με παραμέτρους σχήματος και κλίμακας  $\kappa$  και  $\lambda$  αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της  $X$  είναι:

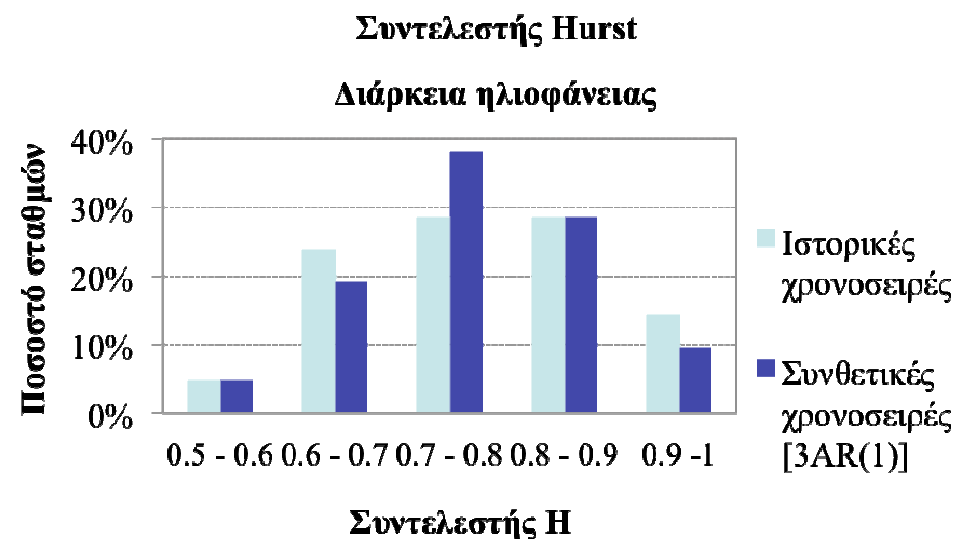
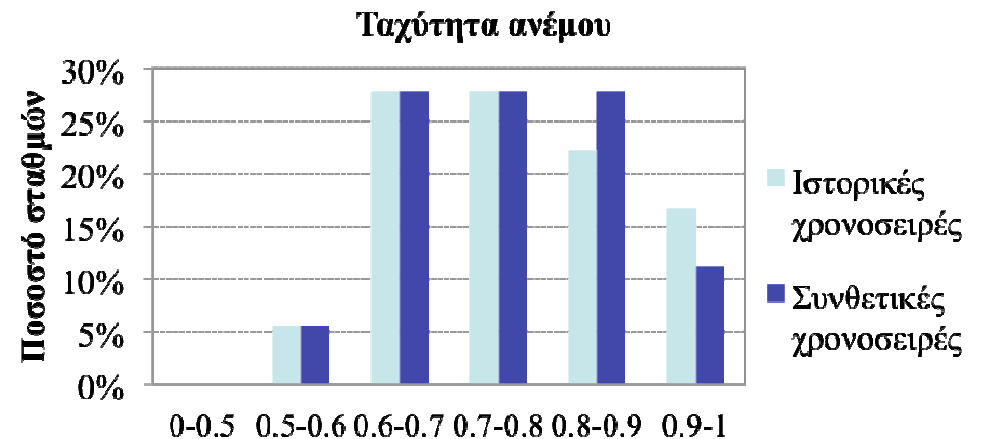
$$f_X(x) = \lambda^\kappa [-\ln(1 - x)]^{(\kappa-1)} (1 - x)^{(\lambda-1)} / \Gamma(\kappa)$$

- Όπως φαίνεται από τα ιστογράμματα, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της θεωρητικής και της κατανομής βήτα είναι σχεδόν πανομοιότυπες και προσαρμόζονται καλά στα δεδομένα σχετικής διάρκειας ηλιοφάνειας.



## 4. Μακροπρόθεση εμμονή – συντελεστής Hurst

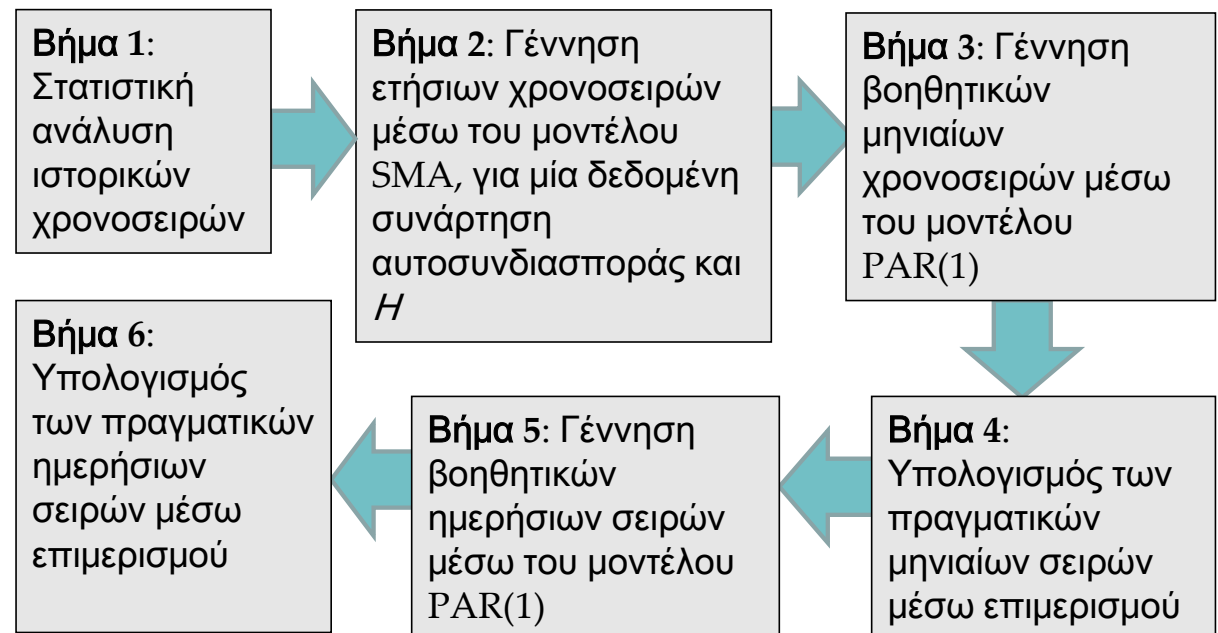
- Η ύπαρξη της μακροπρόθεσμης εμμονής διερευνάται σε ετήσια δεδομένα με τον υπολογισμό του συντελεστή Hurst ( $H$ ) μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων των τυπικών αποκλίσεων (Koutsoyiannis, 2003).
- Και για τις δύο μεταβλητές οι περισσότερες από τις τιμές του  $H$  κυμαίνονται από 0.6 έως 0.9, ενώ το 15% αυτών υπερβαίνει τη τιμή 0.9, φανερώνοντας μία έντονα αυτοόμοια συμπεριφορά. Σημειώνεται ότι σε όλες τις καταγραφές παρατηρείται  $H > 0.50$ , δηλαδή καμία χρονοσειρά δεν χαρακτηρίζεται από αντι-εμμονή.
- Προκειμένου να βρεθεί η αντιπροσωπευτική τιμή του  $H$  δημιουργήθηκαν συνθετικά δείγματα για όλους τους σταθμούς με μία μοναδική τιμή του  $H$  και ίδια μέση τιμή, τυπική απόκλιση και μήκος με τις παρατηρημένες καταγραφές χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των διακυμάνσεων πολλαπλής χρονικής κλίμακας (Koutsoyiannis, 2002).
- Εφαρμόζοντας μια προσέγγιση Monte Carlo, εξετάστηκαν διαφορετικές θεωρητικές τιμές του  $H$  μέχρι οι διαφορές των ιστογραμμάτων συχνότητας των προσομοιωμένων και των παρατηρημένων τιμών  $H$  να γίνουν όσο το δυνατό μικρότερες.
- Στη βάση αυτής της διαδικασίας δοκιμής και λάθους, βρέθηκε ότι και για τις δυο διεργασίες η πιο αντιπροσωπευτική τιμή του  $H$  είναι 0.84.



## 5. Το σύστημα λογισμικού Κασταλία

- Η Κασταλία είναι ένα λογισμικό ανοιχτής πρόσβασης το οποίο χρησιμοποιείται για τη γέννηση των συνθετικών ημερήσιων χρονοσειρών των δύο μετεωρολογικών διεργασιών, οι οποίες είναι τα δεδομένα εισόδου στο υποθετικό ΥΣΑΠΕ.
- Το πρόγραμμα πραγματοποιεί πολυμεταβλητή στοχαστική προσομοίωση σε ημερήσια, μηνιαία και ετήσια χρονική κλίμακα για τις οποίες διατηρεί τα περιθώρια (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία) και τα από κοινού στατιστικά δευτέρας τάξης (αυτο- και έτεροσυσχέτιση).
- Επιπλέον αναπαράγει την μακροπρόθεσμη εμμονή στη ετήσια και υπερετησια κλίμακα, την περιοδικότητα στη υποετήσια κλίμακα και την διαλειπυσα συμπεριφορά στη ημερήσια κλίμακα.
- Η μακροπρόθεσμη εμμονή αναπαράγεται μέσω ενός σχήματος συμμετρικού μέσου όρου (SMA) για τη γενικευμένη συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς με παραμέτρους ρυθμιζόμενες από τον χρήστη (Koutsoyiannis, 2000), η οποία επιτρέπει να αναπαρίστανται διεργασίες από τύπου ARMA ( $H = 0.50$ ) μέχρι διεργασίες που χαρακτηρίζονται από έντονη εμμονή ( $H > 0.50$ ).

- Στην μηνιαία και ημερήσια κλίμακα δημιουργούνται βοηθητικές χρονοσειρές μέσω ενός πολυμεταβλητού σχήματος περιοδικής αυτοπαλινδρόμησης PAR(1) (Koutsoyiannis, 1999).
- Για να διασφαλιστεί η στατιστική συμβατότητα μεταξύ των τριών χρονικών κλιμάκων εφαρμόζεται μια διαδικασία επιμερισμού. Αρχικά οι μηνιαίες σειρές προσαρμόζονται στις γνωστές ετήσιες, και στη συνέχεια οι ημερήσιες προσαρμόζονται στη επιμερισμένες μηνιαίες (Koutsoyiannis, 2001).



Διάγραμμα ροής της υπολογιστικής διαδικασίας της Κασταλίας

## 6. Αναπαραγωγή διαλειπουσών διεργασιών με την Κασταλία

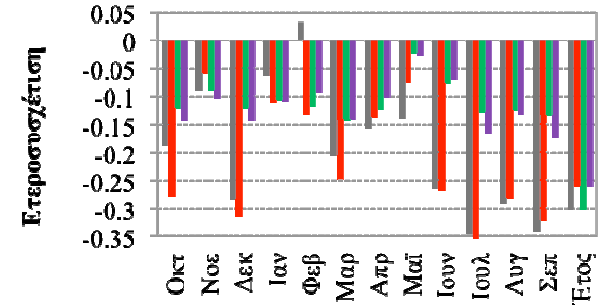
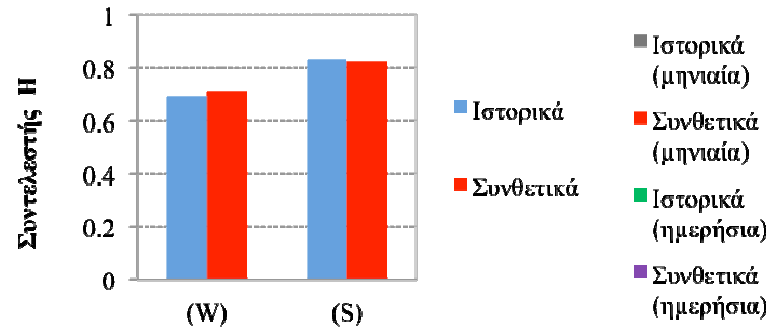
- Στην ημερήσια χρονική κλίμακα, κάποιες υδρομετεωρολογικές διεργασίες, ανάμεσα στις οποίες και η διάρκεια ηλιοφάνειας, είναι διαλείπουσες καθώς μπορούν να πάρουν μηδενική τιμή με μη μηδενική πιθανότητα.
- Οι στατιστικές ιδιαιτερότητες των ημερήσιων διεργασιών, όπως οι υψηλές τιμές των συντελεστών μεταβλητότητας και ασυμμετρίας, είναι στενά συνδεδεμένες με τη διαλείπουσα συμπεριφορά.
- Προκειμένου να αναπαραχθεί η διαλείπουσα συμπεριφορά, είναι απαραίτητο να διατηρηθεί η πιθανότητα μηδενικών τιμών των παρατηρημένων χρονοσειρών.
- Η Κασταλία χειρίζεται αυτό το πρόβλημα εισάγοντας τις παρακάτω παραμέτρους, οι οποίες μπορούν να προσδιορισθούν από το χρήστη (Dialynas *et al.*, 2011):
  - Οι παράμετροι  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  οι οποίες χρησιμοποιούνται για να προσαρμόσουν τις πιθανότητες  $k_1$  και  $k_2$  ενός μοντέλου αλυσίδας Markov. Αυτές οι πιθανότητες ορίζονται ως τα ποσοστά  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$ , αντίστοιχα, της ιστορικής πιθανότητας μηδενικών τιμών της κάθε μεταβλητής. Συγκεκριμένα, η  $k_1$  εκφράζει τη πιθανότητα να υπάρχει μηδενική τιμή στο τωρινό χρονικό βήμα αν υπάρχει μηδενική τιμή στο προηγούμενο χρονικό βήμα ενώ η  $k_2$  εκφράζει τη πιθανότητα να υπάρχει μηδενική τιμή στο τωρινό χρονικό βήμα αν υπάρχει μη μηδενική τιμή στο προηγούμενο χρονικό βήμα.
  - Η πιθανότητα  $k_3$  η οποία εκφράζει τη πιθανότητα οι τιμές όλων των μεταβλητών να είναι μηδενικές στο τωρινό χρονικό βήμα, αν τουλάχιστον μία από αυτές είναι μηδενική.
  - Οι παράμετροι  $\pi_0$  και  $l_0$  ενός εμπειρικού κανόνα στρογγυλοποίησης, σύμφωνα με το οποίο ένα ποσοστό  $\pi_0$  των παραγόμενων τιμών που βρίσκονται κάτω από ένα όριο  $l_0$  μετατρέπονται σε μηδέν.
- Οι παραπάνω διαδικασίες επιτρέπουν τη γέννηση μηδενικών τιμών και συνεισφέρουν όλες στη συχνότητα των μηδενικών τιμών στο τελικό συνθετικό δείγμα.



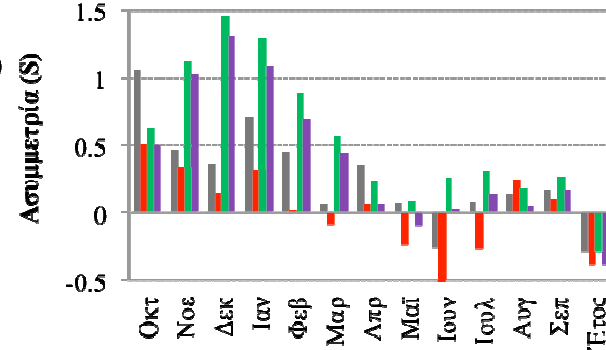
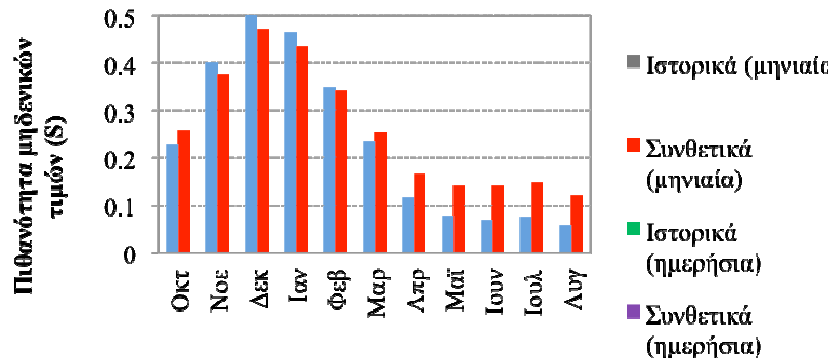
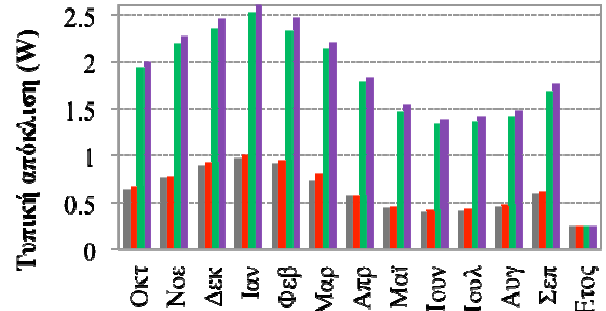
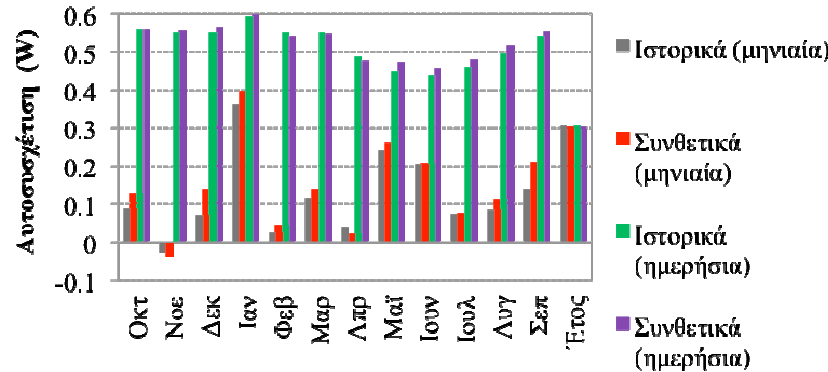
# 7. Παράδειγμα δοκιμής

- Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση της Κασταλίας, παρήχθησαν 1 000 χρόνια ημερήσιων δεδομένων σε οχτώ σταθμούς, όπου είναι διαθέσιμες καταγραφές ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας· για τη διάρκεια ηλιοφάνειας χρησιμοποιήθηκε ο προτεινόμενος λογαριθμικός μετασχηματισμός, και έτσι τα τελικά συνθετικά δεδομένα ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας προκύπτουν από τη εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού.

- Στα διαγράμματα συγκρίνονται κάποια από τα στατιστικά χαρακτηριστικά για τις δύο μεταβλητές στο σταθμό Eelde.



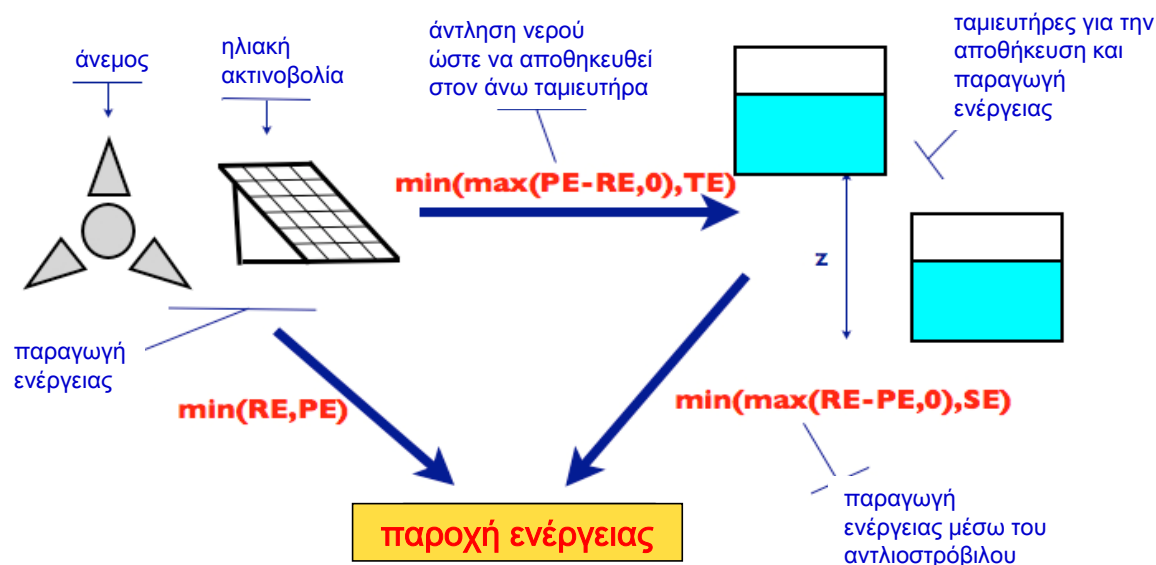
- Γενικά, οι συνθετικές χρονοσειρές διατηρούν με ικανοποιητική ακρίβεια την μακροπρόθεσμη εμμονή και τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων χρονοσειρών, εκτός από τη μηνιαία ασυμμετρία η οποία δεν είναι ιδιαίτερως σημαντική σε ημερήσιες προσομοιώσεις.





## 8. Συνιστώσες συστήματος και χαρακτηριστικά μεγέθη

- Μελετάται ένα υποθετικό, αυτόνομο υβριδικό σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας, που βρίσκεται στην Ελλάδα και περιλαμβάνει ανεμογεννήτριες, ηλιακά πάνελ και δύο διασυνδεδεμένους ταμιευτήρες με εγκατεστημένο σύστημα άντλησης-ταμίευσης.
- Οι μεταβλητές εισόδου είναι οι χρονοσειρές ταχύτητας του ανέμου, διάρκειας ηλιοφάνειας και ζήτησης ενέργειας.
- Προκειμένου να αναπαρασταθεί η ημερήσια λειτουργία του συστήματος για μακροχρόνιο ορίζοντα, πραγματοποιείται στοχαστική προσομοίωση χρησιμοποιώντας το λογισμικό Κασταλία για την δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου και διάρκεια ηλιοφάνειας.
- Ο αριθμός των ανεμογεννητριών ( $n_w$ ), ο αριθμός των ηλιακών πάνελ ( $n_s$ ) και η χωρητικότητα των δύο –ίσου μεγέθους- ταμιευτήρων ( $k$ ) θέτονται ως μεταβλητές σχεδιασμού προς βελτιστοποίηση.
- Τα κριτήρια επίδοσης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος, ικανοποιώντας ταυτόχρονα την ζήτηση ενέργειας με πολύ υψηλή αξιοπιστία.



### Σύμβολα

*PE: παραγόμενη ενέργεια*

*RE: ζήτηση ενέργειας*

*SE: διαθέσιμη ενέργεια στον άνω ταμιευτήρα*

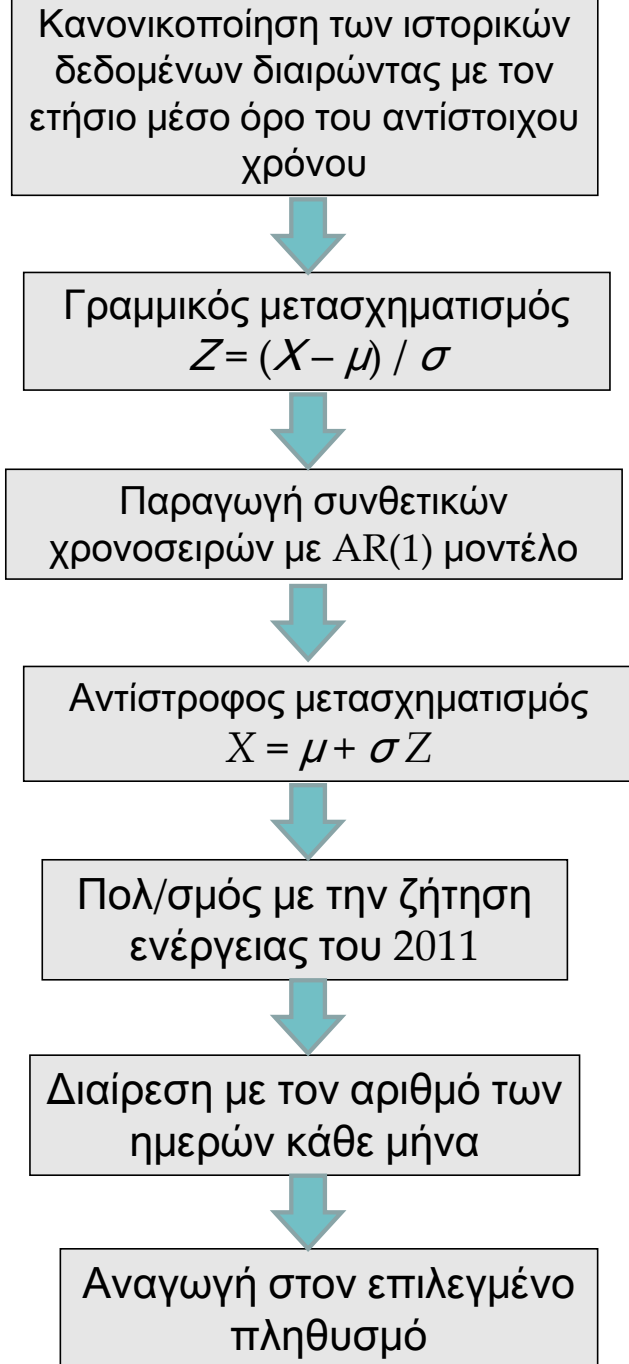
*TE: απαιτούμενη ενέργεια για την άντληση όλου του διαθέσιμου νερού του κατάντη ταμιευτήρα*

## 9. Παραγωγή συνθετικών δεδομένων μετεωρολογικών διεργασιών

- Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους του υποθετικού συστήματος, το οποίο πρέπει να λειτουργεί με πολύ υψηλή αξιοπιστία.
- Για αυτό γίνεται αποδεκτή πολύ μικρή πιθανότητα αστοχίας (δηλ. πιθανότητα μη ικανοποίησης της ζήτησης ενέργειας), που ορίζεται ως μία ημέρα ανά πέντε χρόνια σε μέσο όρο.
- Για την εκτίμηση της προαναφερθείσας πιθανότητας με ικανοποιητική ακρίβεια, τίθεται μήκος προσομοίωσης ίσο με 500 χρόνια (περίπου 182 500 ημέρες).
- Μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου είναι οι συνθετικές χρονοσειρές ημερήσιας ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας μήκους 500 χρόνων, που δημιουργήθηκαν με την Κασταλία.
- Τα ιστορικά δεδομένα ημερήσιας ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας ελήφθησαν από τον σταθμό του Αγ. Κοσμά στην Νότια Αττική (λειτουργεί υπό την εποπτεία του Υδρολογικού Παρατηρητηρίου Αθηνών του ΕΜΠ).
- Τα ιστορικά δεδομένα αναφέρονται σε χρονική περίοδο επτά χρόνων (Φεβ. 2005 με Ιούνιος 2012).
- Στην θεωρητική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης εφαρμόστηκε η αντιπροσωπευτική τιμή του συντελεστή Hurst που βρέθηκε στην προηγούμενη ανάλυση μακροχρόνιων Ευρωπαϊκών δεδομένων. ( $H=0.84$ )
- Η συγκεκριμένη τιμή του Hurst αναπαράχθηκε ικανοποιητικά στις συνθετικές χρονοσειρές (0.85 για την ταχύτητα ανέμου και 0.83 για την διάρκεια ηλιοφάνειας).
- Για την αξιολόγηση της επιρροής της μακροπρόθεσμης εμμονής πραγματοποιήθηκε και γέννηση συνθετικών χρονοσειρών με σημαντικά μειωμένες τιμές του συντελεστή Hurst (0.64 για την ταχύτητα ανέμου και 0.61 για την διάρκεια ηλιοφάνειας).

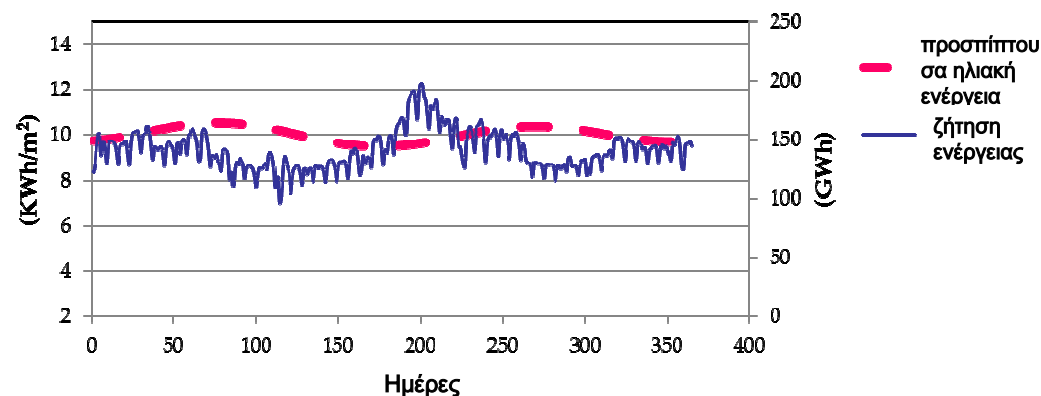
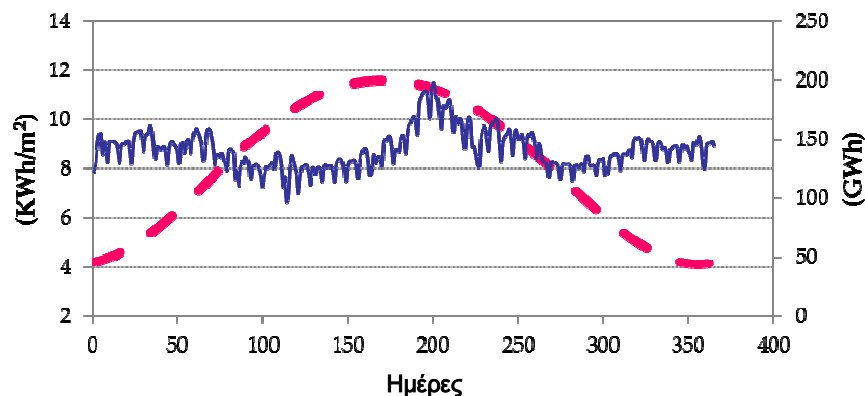
# 10. Παραγωγή συνθετικών δεδομένων ζήτησης ενέργειας

- Θεωρείται μία υποθετική περιοχή 100 000 κατοίκων, για την οποία δημιουργήθηκαν συνθετικές χρονοσειρές ζήτησης ενέργειας για την περίοδο προσομοίωσης 500 χρόνων.
- Το χρονικό βήμα της προσομοίωσης ήταν μηνιαίο, αφού τα διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα δεν ήταν αρκετά αξιόπιστα.
- Ανακτήθηκαν μηνιαία δεδομένα ζήτησης ενέργειας της Ηπειρωτικής Ελλάδας από 2004 - 2011 από τον ΑΔΜΗΕ.
- Για την απομάκρυνση υπερετήσιων τάσεων και της εποχικότητας τα δεδομένα κανονικοποιήθηκαν, αρχικά διαιρώντας με την αντίστοιχο ετήσιο μέσο όρο και μετά εφαρμόζοντας τον γραμμικό μετασχηματισμό  $Z = (X - \mu) / \sigma$ , όπου  $\mu$  και  $\sigma$  είναι η μέση τιμή και η τυπ. απόκλιση, αντίστοιχα, των τυποποιημένων δεδομένων.
- Για την δημιουργία των συνθετικών κανονικοποιημένων δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο AR(1) και ακολούθως εφαρμόστηκε ο αντίστροφος μετασχηματισμός ώστε να αποκτηθούν οι μηνιαίες τιμές της ζήτησης ενέργειας χρησιμοποιώντας την ζήτηση ενέργειας του 2011.
- Τα ημερήσια δεδομένα υπολογίστηκαν διαιρώντας με τον αριθμό των ημερών κάθε μήνα (αυτή η παραδοχή, μολονότι μη ρεαλιστική, θεωρήθηκε συνεπής)
- Τα τελικά αποτελέσματα προσαρμόσθηκαν στον επιλεγμένο πληθυσμό (100 000).



# 11. Υπολογισμός της παραγωγής/κατανάλωσης ενέργειας

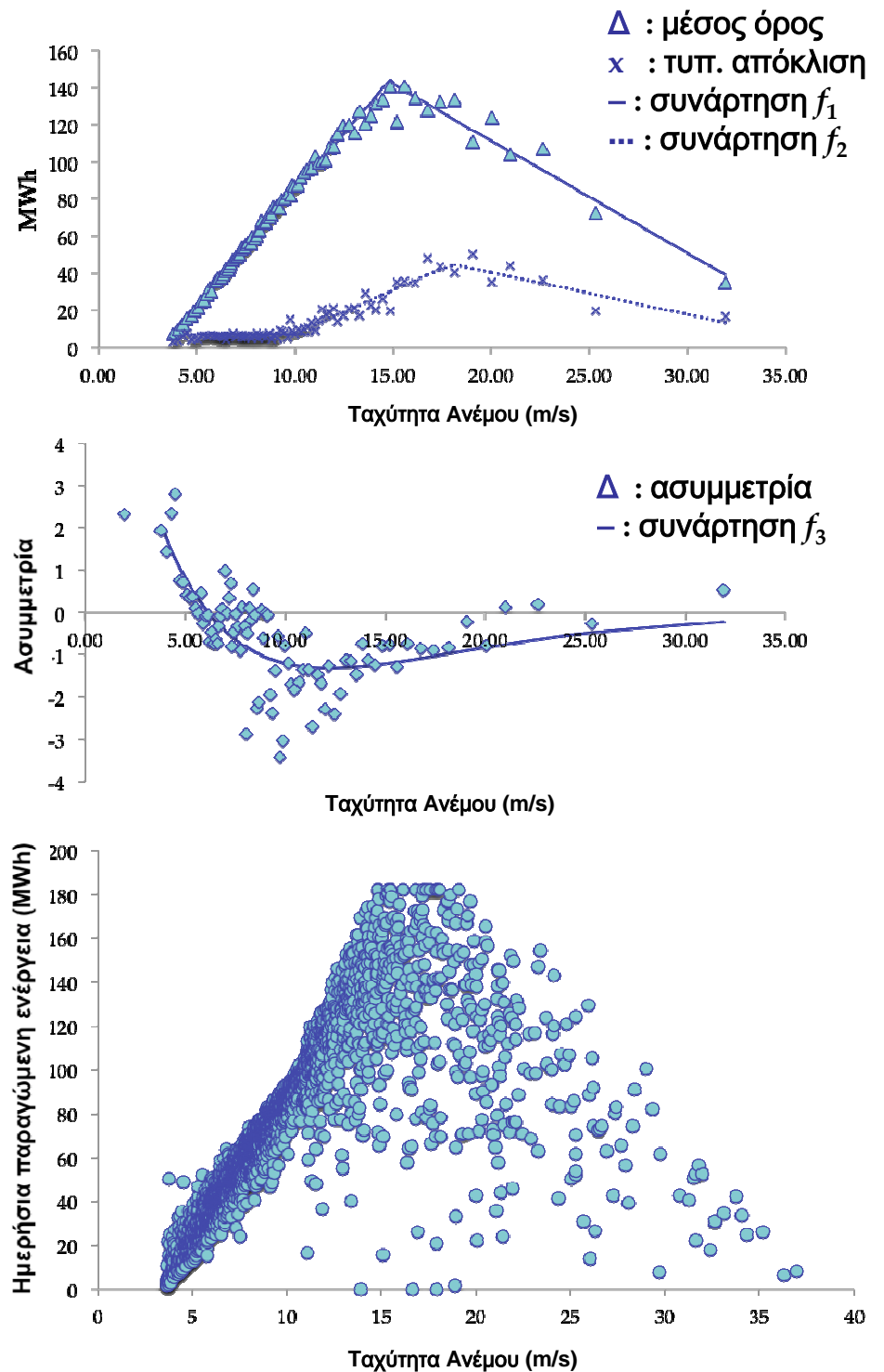
- Για το σύστημα αντλησιοταμίευσης θεωρήθηκαν δύο ίσου μεγέθους ταμιευτήρες. Το σύστημα των ταμιευτήρων θεωρήθηκε κλειστό, δηλαδή χωρίς εισροές και διαφυγές.
- Η παραγωγή και κατανάλωση (λόγω άντλησης) υδροηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά των στάθμεων, την παροχή και τον συντελεστή απόδοσης του αντλιοστρόβιλου ( $n = 0.85$ ).
- Τα άλλα δύο μέρη του συστήματος είναι ένα υποθετικό φωτοβολταϊκό πάνελ με ισχύ 240 W ανά μονάδα για ακτινοβολία  $1\ 000\ \text{W/m}^2$  και μια Α/Γ του εμπορίου (7.5 MW· E-126 της Enercon).
- Για το δεδομένο σύστημα η παραγωγή ηλιακής ενέργειας είναι συνάρτηση της γωνίας του πάνελ και της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η παραγωγή αιολικής ενέργειας συνάρτηση της καμπύλης ισχύος της Α/Γ και της ταχύτητας ανέμου.
- Η ηλιακή ακτινοβολία είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους και της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας. Διαφορετικές γωνίες ηλιακών πάνελ οδηγούν σε διαφορετικές χρονικές κατανομές της ηλιακής ενέργειας, οι οποίες επηρεάζουν το μέγεθος των ταμιευτήρων. Για αυτό εξετάζονται διάφορες κλίσεις πάνελ.



*Ζήτηση ενέργειας στην Ελλάδα vs. Προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στον Αγ. Κοσμά για γωνίες πάνελ  $0^\circ$  (αριστερά) και  $38^\circ$  (δεξιά)*

## 12. Επίδραση της ωριαίας κατανομής της αιολικής ενέργειας

- Με την χρήση δεδομένων ημερήσιας ταχύτητας ανέμου αμελούνται οι ωριαίες διακυμάνσεις της ταχύτητας ανέμου, που έχουν ως αποτέλεσμα σημαντική μεταβλητότητα της παραγόμενης ενέργειας.
- Για τον λόγο αυτό, ακολουθήθηκε μια στοχαστική προσέγγιση στην οποία αναπαρήχθησαν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ωριαίας ενέργειας, με βάση την ωριαία ταχύτητα ανέμου στον σταθμό του Αγ. Κοσμά.
- Η ημερήσια ενέργεια, υπολογισμένη από τα ωριαία δεδομένα, κατηγοριοποιήθηκε σε 87 κλάσεις ημερήσιας ταχύτητας ανέμου  $W$  και για κάθε κλάση υπολογίστηκε ο μέσος όρος  $\mu$ , η τυπ. απόκλιση  $\sigma$  και ο συντ. ασυμμετρίας  $\xi$ .
- Σε κάθε στατιστικό χαρακτηριστικό προσαρμόσθηκε μια εμπειρική συνάρτηση στο αντίστοιχο δείγμα 87 τιμών, έτσι ώστε  $\mu = f_1(W)$ ,  $\sigma = f_2(W)$  και  $\xi = f_3(W)$ .
- Για τα συνθετικά ημερήσια δεδομένα ταχύτητας ανέμου, εκτιμήθηκε η ημερήσια παραγωγή ενέργειας, μέσω της κατανομής Γάμα τριών παραμέτρων, με τυχαία πιθανότητα και τιμές παραμέτρων που εξαρτώνται από την  $W$ .



# 13. Μοντέλο βελτιστοποίησης και αποτελέσματα

- Για τα συνθετικά δεδομένα με υψηλές και χαμηλές τιμές  $H$  διατυπώθηκε ένα πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης, με ζητούμενο την ελαχιστοποίηση του ετήσιου κόστους για την επιτρεπόμενη πιθανότητα αστοχίας (δηλαδή 100 ημέρες στα 500 έτη προσομοίωσης).
- Το κόστος εξαρτάται από το πλήθος των ανεμογεννητριών  $n_w$ , το πλήθος των ηλιακών πάνελ  $n_s$  και την χωρητικότητα των ταμιευτήρων  $k$ , που είναι οι μεταβλητές σχεδιασμού του συστήματος.
- Το κόστος περιλαμβάνει το αρχικό κόστος επένδυσης και συντήρησης του μηχανολογικού εξοπλισμού (Α/Γ, πάνελ, αντλία). Η οικονομική ζωή των ταμιευτήρων θεωρήθηκε 50 έτη, ενώ για τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό θεωρήθηκε χρόνος ζωής 25 έτη.
- Η βελτιστοποίηση έγινε με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων.
- Και στα δύο σενάρια, ο αριθμός ανεμογεννητριών λαμβάνεται  $n_w = 23$  ενώ δεν προκύπτει χρήση ηλιακών πάνελ ( $n_s = 0$ ), καθώς η αποδοτικότητα τους είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες.
- Το μέγεθος του συστήματος άντλησης-ταμίευσης, εκφρασμένο σε όρους χωρητικότητας των ταμιευτήρων, επηρεάζεται σημαντικά από την μακροπρόθεσμη εμμονή των μετεωρολογικών διεργασιών. Ωστόσο η διαφορά στο συνολικό κόστος είναι σχετικά μικρή.

	Τιμές Hurst 0.83-0.85	Τιμές Hurst 0.61-0.64
Αριθμός Α/Γ, $n_w$	23	23
Αριθμός ηλιακών πάνελ, $n_s$	0	0
Χωρητικότητα ταμιευτήρων, $k$ (hm <sup>3</sup> )	250	195
Ετήσιο κόστος (εκατομμύρια €)	33.6	32.8



## 14. Σύνοψη και συμπεράσματα

- Επιβεβαιώνεται η καταλληλότητα των κατανομών Γάμα και Weibull για την αναπαράσταση της ταχύτητας ανέμου. Τόσο η προτεινόμενη συνάρτηση κατανομής όσο και η κατανομή Βήτα προσαρμόζονται ικανοποιητικά στα ιστορικά δείγματα διάρκειας ηλιοφάνειας.
- Και οι δύο διεργασίες χαρακτηρίζονται απο μακροπρόθεσμη εμμονή. Μια μοναδική τιμή Hurst βρέθηκε να είναι αντιπροσωπευτική και για τις δύο μεταβλητές.
- Λόγω του σχετικά μικρού αριθμού διαθέσιμων δειγμάτων με επαρκές μήκος καταγραφών, προτείνεται περαιτέρω έρευνα της στοχαστικής δομής και των δύο διεργασιών.
- Το υπολογιστικό σύστημα Κασταλία πραγματοποιεί πολυμεταβλητή στοχαστική προσομοίωση και των δύο διεργασιών σε ετήσια, μηνιαία και ημερήσια κλίμακα ικανοποιητικά, διατηρώντας τόσο τα περιθώρια και τα από κοινού στατιστικά δευτέρας τάξης όσο και την μακροπρόθεσμη εμμονή.
- Το προτεινόμενο υβριδικό σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας «μετασχηματίζει» τις δύο χρονικά κυμαινόμενες και μη προβλέψιμες εισροές ενέργειας, σε ελεγχόμενες εκροές οι οποίες ικανοποιούν την ζήτηση.
- Η ύπαρξη μακροπρόθεσμης εμμονής δεν πρέπει να αμελείται στον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη εκτίμηση των μεταβλητών σχεδιασμού.
- Απαιτείται περαιτέρω έρευνα έτσι ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση της εφαρμογής λεπτότερης χρονικής κλίμακας προσομοίωσης καθώς και σχεδιαστικών μεγεθών, όπως ο τύπος της ανεμογεννήτριας και των ηλιακών πάνελ.



# Αναφορές

- Dialynas, Y., S. Kozanis, and D. Koutsoyiannis, A computer system for the stochastic disaggregation of monthly into daily hydrological time series as part of a three-level multivariate scheme, *EGU General Assembly 2011, Geophysical Research Abstracts, Vol. 13*, Vienna, EGU2011-290, European Geosciences Union, 2011..
- Koutsoyiannis, D., and A. Efstratiadis, The necessity for large-scale hybrid renewable energy systems, *Hydrology and Society, EGU Leonardo Topical Conference Series on the Hydrological Cycle 2012*, Torino, 2012.
- Koutsoyiannis, D., A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series, *Wat. Resour. Res.*, 36(6), 1519–1533, 2000.
- Koutsoyiannis D, Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics, *Hydrol. Sci. J.*, 48(1), 3-24, 2003.
- Koutsoyiannis, D., C. Makropoulos, A. Langousis, S. Baki, A. Efstratiadis, A. Christofides, G. Karavokiros, and N. Mamassis, Climate, hydrology, energy, water: recognizing uncertainty and seeking sustainability, *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 13, 247–257, 2009.
- Koutsoyiannis, D., Coupling stochastic models of different time scales, *Wat. Resour. Res.*, 37(2), 379–392, 2001.
- Koutsoyiannis, D., Optimal decomposition of covariance matrices for multivariate stochastic models in hydrology, *Wat. Resour. Res.*, 35(4), 1219–1229, 1999.
- Koutsoyiannis D., The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy, *Hydrol. Sci. J.*, 47(4), 573-595, 2002.
- Ιωάννου, Χ., Στοχαστική προσομοίωση και βελτιστοποίηση υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2012
- Τσεκούρας, Γ., Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση υδρομετεωρολογικών διεργασιών σχετικών με την αιολική και ηλιακή ενέργεια, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2012.

## Βάσεις δεδομένων

- Deutscher Wetterdienst (<http://www.dwd.de>)
- European Climate Assessment & Dataset (<http://eca.knmi.nl/>)
- Hydrological Observatory of Athens (<http://hoa.ntua.gr/>)
- Independent Power Transmission Operator of Greece (<http://www.admie.gr/nc/en/home/>)
- KNMI Climate Explorer (<http://climexp.knmi.nl/>)