

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

Χρήστος Ιωάννου  
*Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ*

Γιώργος Τσεκούρας  
*Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ*

Ανδρέας Ευστρατιάδης  
*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc*

Δημήτρης Κουτσογιάννης  
*Καθηγητής ΕΜΠ, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ*

*Λέξεις κλειδιά:* υδρομετεωρολογικές διεργασίες, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, άντληση-ταμίευση, μακροπρόθεσμη εμμονή, πολυμεταβλητή στοχαστική προσομοίωση, βελτιστοποίηση, αξιοπιστία

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Τα μειονεκτήματα των συμβατικών πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων τους, υπογραμμίζουν την αναγκαιότητα ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο. Ωστόσο, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν στενή εξάρτηση από υδρομετεωρολογικές μεταβλητές, όπως η ταχύτητα ανέμου, η διάρκεια ηλιοφάνειας και η ηλιακή ακτινοβολία, οι οποίες χαρακτηρίζονται από χρονική μεταβλητότητα και αβεβαιότητα. Στις μελέτες σχεδιασμού και διαχείρισης υβριδικών συστημάτων ενέργειας είναι αναγκαία η διερεύνηση των στοχαστικών ιδιοτήτων αυτών των φυσικών διεργασιών, συμπεριλαμβανομένης της πιθανής ύπαρξης μακροχρόνιας εμμονής. Για τον σκοπό αυτό, αναλύουμε χρονοσειρές μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου και ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας από Ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων και εκτιμούμε αντιπροσωπευτικές τιμές του συντελεστή Hurst και για τις δύο μεταβλητές. Στη συνέχεια, παράγουμε συνθετικές χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας σε ετήσια, μηνιαία και ημερήσια κλίμακα, με εφαρμογή του υπολογιστικού συστήματος Κασταλία, που υλοποιεί ένα μοντέλο πολυμεταβλητής στοχαστικής προσομοίωσης. Χρησιμοποιώντας τις συνθετικές χρονοσειρές ως δεδομένα εισόδου, πραγματοποιούμε στοχαστική προσομοίωση ενός υποθετικού αυτόνομου υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας, του οποίου βελτιστοποιούμε την απόδοση, με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Σε επίπεδο σχεδιασμού του συστήματος βελτιστοποιούμε τα βασικά μεγέθη ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση ενέργειας με υψηλή αξιοπιστία, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το κόστος. Αν και η κλίμακα προσομοίωσης είναι η ημερήσια, μια απλή μέθοδος επιτρέπει την χρήση της κατανομής παραγόμενης ενέργειας σε κλίμακα μικρότερη της ημερήσιας. Στα πλαίσια των αναλύσεων, διερευνώνται διάφορα σενάρια, που αναφέρονται σε κρίσιμες παραμέτρους του στοχαστικού μοντέλου, όπως ο συντελεστής Hurst, καθώς και σε παραμέτρους σχεδιασμού, όπως η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πάνελ.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μη βιωσιμότητα καθώς και οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συμβατικών μορφών ενέργειας, κυρίως των ορυκτών καυσίμων, καθιστούν επιτακτική την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό ισοζύγιο. Ωστόσο, οι ΑΠΕ είναι έντονα εξαρτώμενες από τις χρονικά μεταβαλλόμενες και απρόβλεπτες υδρομετεωρολογικές διεργασίες που σχετίζονται με τους μηχανισμούς παραγωγής της ενέργειας. Συνεπώς, απαραίτητη προϋπόθεση

για ένα μελλοντικό σκηνικό στο οποίο θα κυριαρχούν οι ΑΠΕ είναι ο σχηματισμός υβριδικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας, που θα επιτρέπουν την αποθήκευση ενέργειας [1]. Σε κάθε περίπτωση, ο σχεδιασμός και η διαχείριση των συστημάτων που περιλαμβάνουν ΑΠΕ πρέπει να αντιμετωπίζεται υπό το πρίσμα της αβεβαιότητας, μέσω στοχαστικών προσεγγίσεων [2].

Σε αυτή την κατεύθυνση, διερευνάται ο σχεδιασμός ενός υποθετικού υβριδικού συστήματος στην Ελλάδα, που περιλαμβάνει ανεμογεννήτριες, ηλιακά πάνελ και ένα σχήμα άντλησης-ταμίευσης. Αρχικά εξετάζονται οι στοχαστικές ιδιότητες των δύο σχετιζόμενων φυσικών διεργασιών, ήτοι της ταχύτητας ανέμου και της διάρκειας ηλιοφάνειας, στην ημερήσια κλίμακα σχεδιασμού. Η ανάλυση επεκτείνεται σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες, ετήσια και υπερετήσια, για τις οποίες διερευνάται η μακροπρόθεσμη εμμονή (long-term persistence) και αναζητούνται αντιπροσωπευτικές τιμές του συντελεστή Hurst. Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται συνθετικά δεδομένα μετεωρολογικών μεταβλητών και ζήτησης ενέργειας. Οι μετεωρολογικές χρονοσειρές παράγονται μέσω του λογισμικού Κασταλία, που υλοποιεί πολυμεταβλητή στοχαστική προσομοίωση τριών επιπέδων (ημερήσια, μηνιαία και ετήσια). Με τα παραπάνω δεδομένα εισόδου εκτιμώνται, μέσω βελτιστοποίησης, οι κύριες παράμετροι σχεδιασμού του υβριδικού συστήματος, με κριτήρια κόστους και αξιοπιστίας.

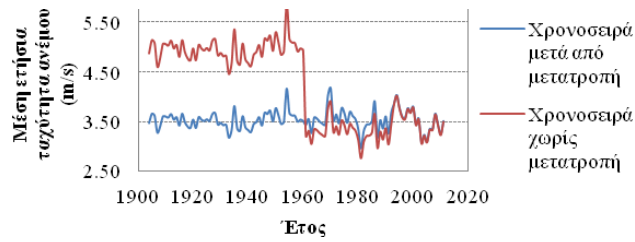
## 2 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι χρονοσειρές μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου και ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας που χρησιμοποιήθηκαν στις αρχικές αναλύσεις συλλέχθηκαν από βάσεις μετεωρολογικών δεδομένων, που παρέχουν ελεύθερα δεδομένα στο Διαδίκτυο. Τα κριτήρια επιλογής των σταθμών ήταν:

- Ελάχιστο αποδεκτό μήκος ημερήσιων καταγραφών 70 ετών, ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί ο συντελεστής Hurst με ακρίβεια.
- Ύπαρξη μεταδεδωμένων για τις καταγραφές της ταχύτητας ανέμου σχετικά με το υψόμετρο μέτρησης από την επιφάνεια του εδάφους.
- Μέγιστος αριθμός τριών ομογενοποιημένων χρονικών περιόδων καταγραφών, σε κάθε μία από τις οποίες το υψόμετρο μέτρησης από την επιφάνεια του εδάφους είναι σταθερό (σταθμοί με συχνές αλλαγές δεν θεωρούνται αξιόπιστοι).

Γενικά, καταγραφές μεγάλου μήκους είναι σπάνιες παγκοσμίως, καθώς τα περισσότερα από τα ελεύθερα διαθέσιμα δεδομένα αναφέρονται σε χρονική περίοδο μικρότερη των 50 ετών. Ειδικότερα, υπάρχει σχεδόν πλήρης έλλειψη μεγάλων δειγμάτων ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, αυτή η μεταβλητή μπορεί να εκτιμηθεί έμμεσα από την διάρκεια ηλιοφάνειας. Μετά από εκτεταμένη έρευνα, τα ημερήσια δείγματα ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας που πληρούν τα παραπάνω κριτήρια ελήφθησαν από τις Ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων, KNMI Climate Explorer, European Climate Assessment & Data (ECA&D) και Deutscher Wetterdienst, καθώς και από την ιστοσελίδα της Ιρλανδικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Τελικά, συλλέχθηκαν 20 χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου και 21 χρονοσειρές διάρκειας ηλιοφάνειας.

Για χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου που διαχρονικά η μέτρησή τους έγινε με διαφορετικά όργανα τοποθετημένα σε διαφορετικά ύψη, απαιτείται αναγωγή σε ένα κοινό υψόμετρο αναφοράς, καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους. Για τον λόγο αυτό οι χρονοσειρές προσαρμόστηκαν ώστε να αναφέρονται στο πιο πρόσφατο υψόμετρο μέτρησης. Συγκεκριμένα, οι τιμές της κάθε ομογενοποιημένης περιόδου πολλαπλασιάστηκαν με τον λόγο της μέσης ετήσιας τιμής της τελευταίας περιόδου προς την μέση ετήσια τιμή της κάθε περιόδου. Πιθανή παράλειψη αυτής της μετατροπής θα οδηγούσε σε λανθασμένες στατιστικές εκτιμήσεις, και συγκεκριμένα σε υπερεκτίμηση του συντελεστή Hurst,  $H$ . (βλ. ενότητα 3.2). Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, η πρωτογενής χρονοσειρά στο σταθμό De Bilt στην Ολλανδία παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή και συνεπώς μη ρεαλιστική τιμή του εν λόγω συντελεστή ( $H = 0.94$ ), που οφείλεται σε αλλαγές του υψομέτρου μέτρησης του ανέμου. Αντίθετα, η ανηγμένη χρονοσειρά παρουσιάζει εύλογη τιμή, ήτοι  $H = 0.70$ .

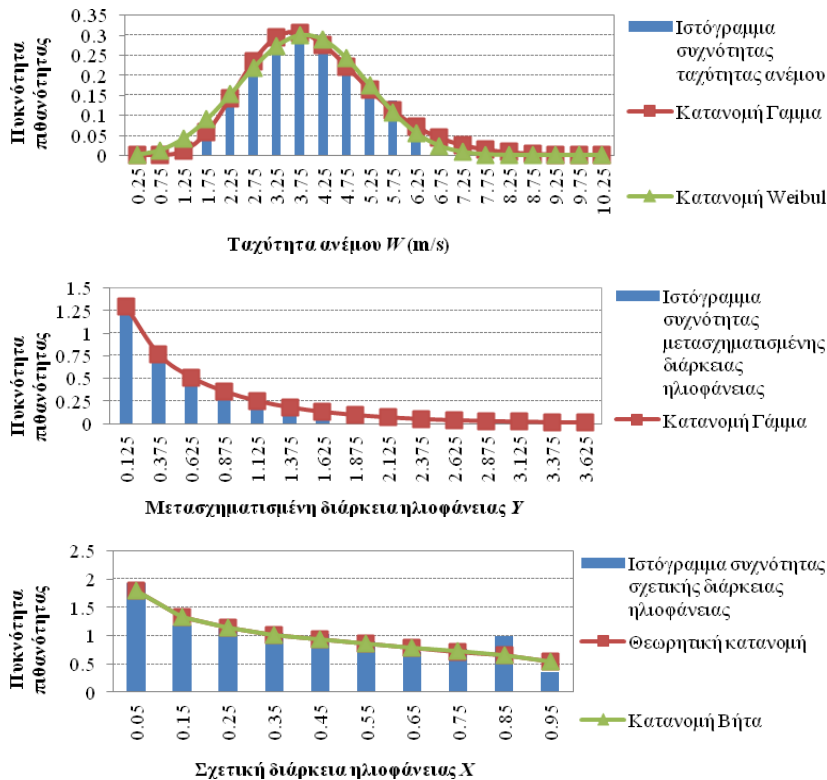


Σχήμα 1: Μέση ετήσια χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου στο σταθμό De Bilt πριν και μετά την αναγωγή. Αναγνωρίζονται τρεις διαφορετικές περιόδους, με τα αντίστοιχα υψόμετρα μέτρησης: 1904-1960 (+37 m), 1961-1992 (+10 m), και 1993-2011 (+20m).

### 3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ

#### 3.1 Προσαρμογή συναρτήσεων κατανομής

Στην ημερήσια κλίμακα, τόσο η μέση ταχύτητα ανέμου,  $W$ , όσο και η διάρκεια ηλιοφάνειας,  $S$ , παρουσιάζουν υψηλή ασυμμετρία, οπότε για τη στατιστική τους απεικόνιση χρησιμοποιούνται μη κανονικές κατανομές. Σε αντίθεση με την ταχύτητα ανέμου, που είναι μη αρνητική μεταβλητή όχι άνω φραγμένη, το πεδίο ορισμού της διάρκειας ηλιοφάνειας είναι άνω και κάτω φραγμένο, με ορισμένη πιθανότητα στην τιμή  $S = 0$ , ενώ το άνω όριο της μεταβάλλεται χωρικά και χρονικά. Για αυτό τον λόγο, επιλέγεται η χρήση της μεταβλητής της σχετικής διάρκειας ηλιοφάνειας,  $X$ , δηλαδή του λόγου της πραγματικής διάρκειας ηλιοφάνειας,  $S$ , προς την αστρονομική διάρκεια ημέρας,  $N$ , με πεδίο ορισμού το  $[0, 1]$ .



Σχήμα 2: Ιστογράμματα συχνότητας και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ημερήσιων χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου (πάνω), του λογαριθμικού μετασχηματισμού των ημερήσιων χρονοσειρών διάρκειας ηλιοφάνειας (μέση) και της σχετικής διάρκειας ηλιοφάνειας (κάτω) στο σταθμό Eelde τον Ιούλιο.

Στο πλαίσιο της εργασίας επαληθεύτηκαν τα συμπεράσματα συναφών βιβλιογραφικών ερευνών [3, 4, 5, 6, 7] ως προς την καταλληλότητα των κατανομών Γάμα και Weibull για την περιγραφή της ημερήσιας ταχύτητας ανέμου. Η επαλήθευση έγινε κυρίως μέσω γραφικών απεικονίσεων, όπως αυτών του Σχήματος 2, απ' όπου προκύπτει ότι οι εν λόγω κατανομές προσαρμόζονται πολύ καλά στα ιστορικά δεδομένα, τα οποία χαρακτηρίζονται από θετική ασυμμετρία.

Για τη στατιστική περιγραφή της σχετικής διάρκειας ηλιοφάνειας,  $X$ , εφαρμόστηκε η κατανομή Γάμα στη λογαριθμικά μετασχηματισμένη μεταβλητή  $Y = -\ln(1 - X)$ . Επισημαίνεται ότι η κατανομή Γάμα χρησιμοποιείται σε αρκετά μοντέλα προσομοίωσης, περιλαμβανομένου του συστήματος Κασταλία που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Η τροποποιημένη μεταβλητή  $Y$  ορίζεται στο διάστημα  $[0, +\infty)$ , ώστε η τιμή  $X = 0$  να αντιστοιχεί στην  $Y = 0$ . Υποθέτοντας ότι η μεταβλητή  $Y$  ακολουθεί κατανομή Γάμα, με παραμέτρους σχήματος και κλίμακας  $\kappa$  και  $\lambda$ , αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής  $X$  είναι [8]:

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

όπου  $\Gamma(\cdot)$  η συνάρτηση Γάμα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, η κατανομή Γάμα προσαρμόζεται ικανοποιητικά στην εμπειρική κατανομή της μετασχηματισμένης μεταβλητής  $Y$  στο σταθμό Eelde (το ίδιο συμβαίνει και με τους άλλους σταθμούς). Επιπλέον, τόσο η θεωρητική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $f_x(x)$  όσο και η κατανομή Beta προσαρμόζονται ικανοποιητικά στα ιστορικά δεδομένα της σχετικής διάρκειας ηλιοφάνειας, που επίσης συμφωνεί με τις αναφορές της βιβλιογραφίας [9, 10, 11].

### 3.2 Διερεύνηση μακροπρόθεσμης εμμονής - Συντελεστές Hurst

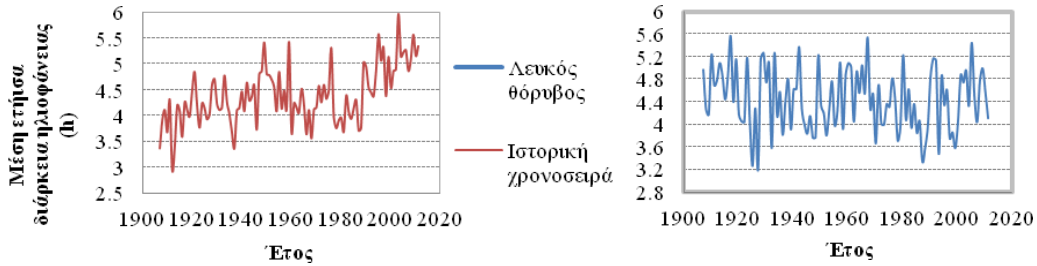
Τα υδρομετεωρολογικά και εν γένει γεωφυσικά φαινόμενα χαρακτηρίζονται από μακροπρόθεσμη εμμονή, και περιγράφονται από μια στοχαστική ανέλιξη που αναφέρεται και ως ανέλιξη Hurst-Kolmogorov [12, 13, 14]. Η μακροπρόθεσμη εμμονή εκφράζει τη συγκέντρωση παρόμοιων γεωφυσικών γεγονότων στο χρόνο, που αντανακλάται σε έντονη δομή αυτοσυσχέτισης και ευρείες διακυμάνσεις σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Εξ ορισμού, η διασπορά μίας τέτοιας μέσης συναθροισμένης στοχαστικής ανέλιξης  $\gamma_0(k)$  είναι συνάρτηση δύναμης της κλίμακας συνάθροισης  $k$ , στην οποία ο εκθέτης είναι συνάρτηση του συντελεστή Hurst,  $H$ :

$$\gamma_0(k) = k^{2H-2} \gamma_0 \quad (2)$$

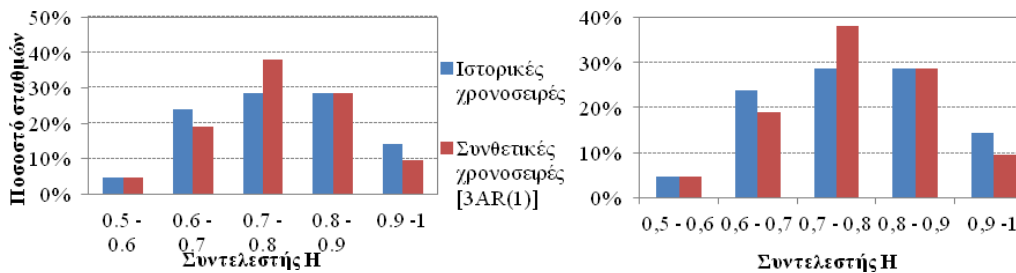
όπου  $\gamma_0$  είναι η διασπορά σε κλίμακα 1. Η τιμή του συντελεστή  $H$  κυμαίνεται από 0 έως 1. Οι τιμές στο διάστημα  $(0, 0.5)$  δείχνουν αντι-εμμονή, η οποία δηλώνει ότι μια αύξηση στην τιμή της μεταβλητής ακολουθείται από μείωση. Τέτοια συμπεριφορά δεν απαντά συχνά στη φύση. Η τιμή 0.5 αντιστοιχεί σε τελείως τυχαία ανέλιξη, γνωστή ως λευκό θόρυβο. Κάθε άλλη τιμή στο διάστημα  $(0.5, 1)$  υποδηλώνει εμμονή, η οποία συνεπάγεται θετική αυτοσυσχέτιση. Η συμπεριφορά αυτή συνεπάγεται τυχαίες διακυμάνσεις σε πολλές χρονικές κλίμακες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, στο οποίο απεικονίζεται μια χρονοσειρά διάρκειας ηλιοφάνειας που χαρακτηρίζεται από υψηλή τιμή του συντελεστή  $H = 0.9$ , και συγκρίνεται με μια χρονοσειρά λευκού θορύβου με ίδια μέση τιμή και τυπική απόκλιση.

Για τη διερεύνηση της μακροπρόθεσμης εμμονής, τα ημερήσια δεδομένα συναθροίστηκαν στην ετήσια κλίμακα, καθώς για την εκτίμηση του συντελεστή  $H$  απαιτείται εξάλειψη της εποχικότητας, ώστε αυτός να μην επηρεάζεται από περιοδικές διακυμάνσεις. Ο συντελεστής  $H$  εκτιμήθηκε μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων των τυπικών αποκλίσεων (μέθοδος LSSD), η οποία στηρίζεται στην δυναμική σχέση της μέσης συναθροισμένης τυπικής απόκλισης με την κλίμακα συνάθροισης  $k$ , που δίνεται στην εξίσωση (2) [12, 15, 16]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, και για τις δύο μεταβλητές οι περισσότερες τιμές κυμαίνονται από 0.60 ως 0.90, ενώ περίπου το 15% ξεπερνάει το 0.90, φανερώνοντας μια έντονη δυναμική Hurst-Kolmogorov. Είναι αξιοσημείωτο ότι δεν υπάρχει καμία τιμή  $H < 0.50$ , συνεπώς καμία διεργασία δεν χαρακτηρίζεται από αντι-εμμονή.

Προκειμένου να εντοπιστεί μια αντιπροσωπευτική τιμή του  $H$  για τις δύο διεργασίες, εφαρμόστηκε η μέθοδος Monte Carlo για παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών με την τεχνική των τυχαίων διακυμάνσεων πολλαπλής κλίμακας (multiple time-scale fluctuation) [10]. Σε όλους τους σταθμούς, παρήχθησαν τυχαία δείγματα θεωρώντας ενιαία τιμή του  $H$  και ίδιο μήκος, μέση τιμή και τυπική απόκλιση με τις παρατηρημένες καταγραφές. Εξετάστηκαν διαφορετικές τιμές του  $H$ , μέχρι το ιστόγραμμα συχνότητας των συνθετικών τιμών του συντελεστή να συγκλίνει όσο το δυνατό περισσότερο στο ιστόγραμμα των ιστορικών τιμών. Από την παραπάνω διερεύνηση προέκυψε ότι η πλέον αντιπροσωπευτική τιμή και για τις δύο διεργασίες είναι η  $H = 0.84$ .



Σχήμα 3: Μέσες ετήσιες τιμές της χρονοσειράς διάρκειας ηλιοφάνειας στο σταθμό Vlissingen (πάνω) και μιας χρονοσειράς λευκού θορύβου με ίδια διάρκεια, μέση τιμή και τυπική απόκλιση (κάτω).



Σχήμα 4: Ιστογράμματα συχνότητας συντελεστών Hurst των ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών, με  $H = 0.84$ , για την ταχύτητα ανέμου (αριστερά) και τη διάρκεια ηλιοφάνειας (δεξιά).

#### 4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

##### 3.3 Το υπολογιστικό σύστημα Κασταλία

Η Κασταλία είναι ένα λογισμικό ελεύθερης πρόσβασης για την πολυμεταβλητή στοχαστική προσομοίωση υδρομετεωρολογικών διεργασιών. Προκειμένου να ελεγχθεί ως προς την ικανότητα αναπαραγωγής των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των δύο εξεταζόμενων μεταβλητών, ήτοι της μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου και της σχετικής ηλιοφάνειας, έγινε έλεγχος του μοντέλου σε οκτώ Ευρωπαϊκούς σταθμούς που υπήρχαν ταυτόχρονες παρατηρήσεις των δύο μεταβλητών. Στη συνέχεια, το υπολογιστικό σύστημα χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών εισόδου του υποθετικού υβριδικού συστήματος.

Η Κασταλία υλοποιεί ένα μοντέλο πολυμεταβλητής στοχαστικής προσομοίωσης σε ημερήσια, μηνιαία και ετήσια κλίμακα χρησιμοποιώντας την κατανομή Γάμα τριών παραμέτρων. Στις τρεις αυτές χρονικές κλίμακες, αναπαράγονται οι παράμετροι τόσο των περιθώριων συναρτήσεων κατανομής των ιστορικών δειγμάτων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία) όσο και των από κοινού συναρτήσεων κατανομής (αυτοσυσχετίσεις και ετεροσυσχετίσεις). Ακόμη, αναπαράγονται η μακροπρόθεσμη εμμονή, στην ετήσια και υπερετήσια κλίμακα, η περιοδικότητα, στη μηνιαία κλίμακα, και η διαλείπουσα συμπεριφορά, στην ημερήσια κλίμακα.

Αφού υπολογιστούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων στις τρεις χρονικές κλίμακες, παράγονται οι συνθετικές χρονοσειρές χρονοσειρών ως εξής:

Πρώτα γίνεται η γέννηση των ετήσιων συνθετικών χρονοσειρών, στις οποίες η μακροπρόθεσμη εμμονή αναπαράγεται μέσω ενός σχήματος συμμετρικού κινούμενου μέσου όρου (SMA). Το εν λόγω σχήμα υλοποιεί μια γενικευμένη συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς, στην οποία ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει τις παραμέτρους ώστε να αναπαράγεται κάθε μορφή εμμονής ( $H > 0.50$ ). Στην ακραία περίπτωση μπορεί να θέσει  $H = 0.50$ , αναπαράγοντας έτσι ανεξίτητες τύπου ARMA [17].

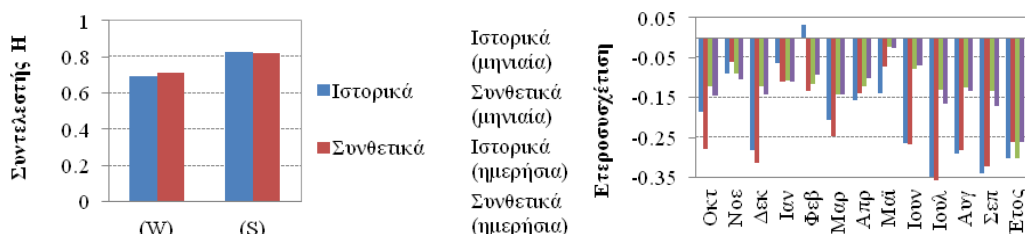
Στη μηνιαία και ημερήσια κλίμακα, αρχικά παράγεται μια σειρά βοηθητικών τιμών, μέσω ενός πολυμεταβλητού σχήματος PAR(1), και στη συνέχεια εφαρμόζεται μια διαδικασία επιμερισμού των μεταβλητών αδρότερης κλίμακας σε αυτές της λεπτομερέστερης, η οποία διασφαλίζει στατιστική συνέπεια μεταξύ των τριών χρονικών κλιμάκων [18]. Με τον τρόπο αυτό, οι μηνιαίες χρονοσειρές προσαρμόζονται στις ήδη γνωστές ετήσιες, και ακολούθως οι ημερήσιες χρονοσειρές προσαρμόζονται στην επιμερισμένες μηνιαίες [19].

Στην ημερήσια κλίμακα αρκετές υδρομετεωρολογικές διεργασίες, ανάμεσα στις οποίες η διάρκεια ηλιοφάνειας, έχουν διαλείπουσα συμπεριφορά, καθώς μπορούν να λάβουν μηδενικές τιμές με ορισμένη πιθανότητα. Με αυτήν την συμπεριφορά είναι στενά συνδεδεμένες στατιστικές ιδιαιτερότητες των ημερήσιων διεργασιών όπως οι υψηλές τιμές των συντελεστών μεταβλητότητας και ασυμμετρίας. Συνεπώς, για να αναπαραχθεί η διαλείπουσα συμπεριφορά είναι απαραίτητο να διατηρηθεί η πιθανότητα εμφάνισης μηδενικών τιμών των ιστορικών δειγμάτων. Οι χειρισμοί του προβλήματος γίνεται μέσω των ακόλουθων παραμέτρων, που ορίζονται από τον χρήστη [20, 21]:

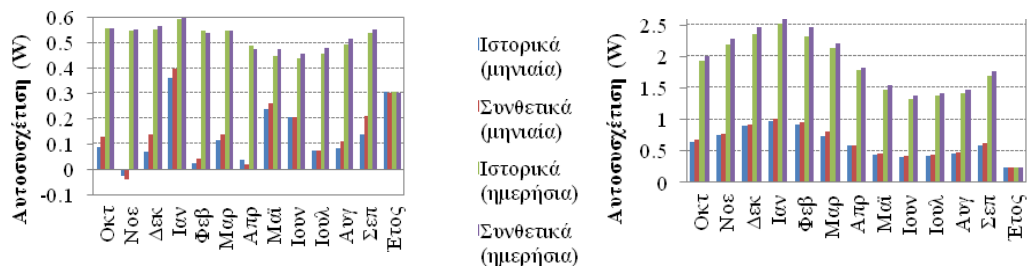
- Δύο παράμετροι ενός μοντέλου αλυσίδας Μαρκόφ, που εκφράζουν την πιθανότητα μηδενικής τιμής στο τρέχον χρονικό βήμα αν υπάρχει μηδενική ή μη μηδενική τιμή στο προηγούμενο βήμα.
- Μια παράμετρος που εκφράζει την πιθανότητα οι τιμές όλων των μεταβλητών στις διάφορες θέσεις να είναι μηδενικές στο τρέχον χρονικό βήμα, αν τουλάχιστον μία από αυτές είναι μηδενική.
- Δύο παράμετροι ενός εμπειρικού κανόνα στρογγυλοποίησης, με βάση τον οποίο ένα ποσοστό των παραγόμενων τιμών που βρίσκονται κάτω από κάποιο όριο μετατρέπονται σε μηδενικές.

### 3.4 Πολυμεταβλητή στοχαστική προσομοίωση ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας

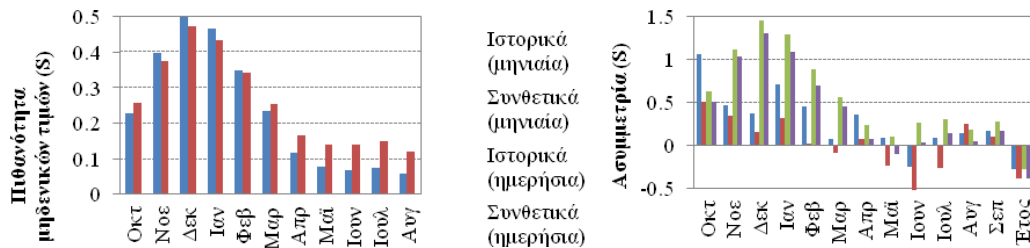
Για την αξιολόγηση της Κασταλίας έγινε αναπαραγωγή χρονοσειρών 1000 ετών σε οχτώ σταθμούς στους οποίους διατίθενται ταυτόχρονα δείγματα ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας. Για την τελευταία, έγινε χρήση του προτεινόμενου λογαριθμικού μετασχηματισμού. Μετά την γέννηση των συνθετικών χρονοσειρών, τα τελικά συνθετικά δεδομένα της διάρκειας ηλιοφάνειας λήφθηκαν μετά από τον αντίστροφο μετασχηματισμό της τροποποιημένης μεταβλητής  $Y$ .



Σχήμα 5: Σύγκριση συντελεστή Hurst (αριστερά) και ετήσιας, μηνιαίας και ημερήσιας ετεροσυσχέτισης των δύο μεταβλητών (δεξιά), μεταξύ των ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών στο σταθμό Eelde.



Σχήμα 6: Σύγκριση ετήσιων, μηνιαίων και ημερήσιων συντελεστών αυτοσυσχέτισης (αριστερά) και τυπικής απόκλισης (δεξιά) ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου στο σταθμό Eelde.



Σχήμα 7: Σύγκριση ημερήσιας πιθανότητας μηδενικών τιμών (αριστερά) και ετήσιων, μηνιαίων και ημερήσιων συντελεστών ασυμμετρίας (δεξιά) ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών διάρκειας ηλιοφάνειας στο σταθμό Eelde.

Στα Σχήματα 5 έως 7 συγκρίνονται ορισμένα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών και συνθετικών δειγμάτων των δύο μεταβλητών στο σταθμό Eelde. Γενικά, τα χαρακτηριστικά αυτά διατηρούνται με ικανοποιητική ακρίβεια σε όλες τις χρονικές κλίμακες, εκτός από την μηνιαία ασυμμετρία της διάρκειας ηλιοφάνειας. Ωστόσο, η απόκλιση αυτή δεν κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η προσομοίωση αφορά τελικώς στην ημερήσια κλίμακα.

## 5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

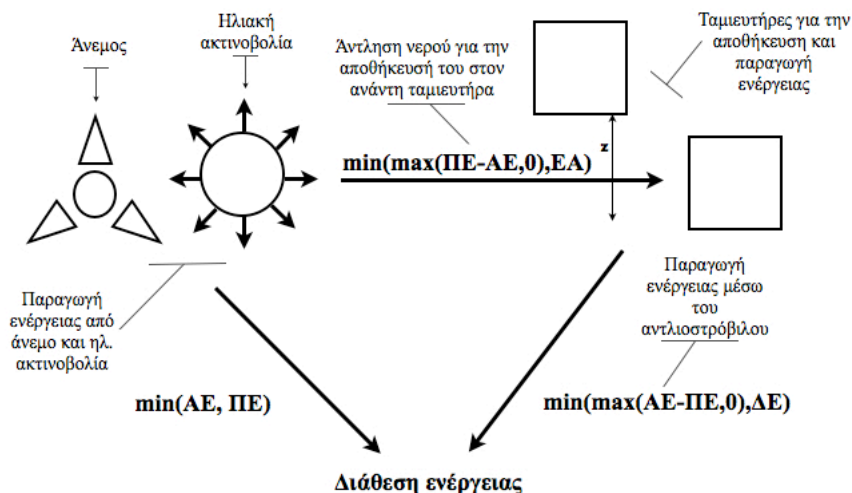
### 3.5 Συνιστώσες συστήματος και χαρακτηριστικά μεγέθη

Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται οι συνιστώσες και διεργασίες του υποθετικού υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας που αποτελείται από ανεμογεννήτριες, ηλιακά πάνελ και ένα σχήμα άντλησης-ταμίευσης. Συγκεκριμένα, θεωρούνται ανεμογεννήτριες τύπου E-126 της Enercon, ισχύος 7.5 MW και φωτοβολταϊκά πάνελ μοναδιαίας ισχύος 240 W, υπό ακτινοβολία  $1000 \text{ W/m}^2$ . Όσον αφορά το σχήμα άντλησης-ταμίευσης, υποθέτουμε δύο ταμιευτήρες ίσου μεγέθους, χωρίς εισροές και διαφυγές νερού. Τα αναλυτικά τεχνικά χαρακτηριστικά των έργων και τα οικονομικά τους μεγέθη δίνονται στην αναφορά [22].

Μεταβλητές εισόδου είναι η ταχύτητα ανέμου, η διάρκεια ηλιοφάνειας και η ζήτηση ενέργειας. Η ημερήσια λειτουργία του συστήματος έχει ως εξής: Για κάθε ημέρα εκτιμάται η παραγόμενη ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες και τα ηλιακά πάνελ. Αν η ενέργεια αυτή είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ζήτηση, η περίσσειά της αποθηκεύεται με τη μορφή Υ/Η ενέργειας. Αντίθετα, αν η παραγόμενη ενέργεια δεν επαρκεί, το έλλειμμα που προκύπτει καλύπτεται με την παραγωγή Υ/Η ενέργειας από τον άνω ταμιευτήρα. Στην περίπτωση που η αποθηκευμένη ενέργεια στον άνω ταμιευτήρα υπολείπεται της απαιτούμενης, το σύστημα αποτυγχάνει να καλύψει την ζήτηση.

Οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι ο αριθμός των ηλιακών πάνελ και ανεμογεννητριών και η κοινή χωρητικότητα των ταμιευτήρων. Τα κριτήρια επίδοσης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος, το οποίο πρέπει να λειτουργεί με πολύ υψηλή αξιοπιστία. Για την επίτευξη υψηλής αξιοπιστίας στην κάλυψη της ζήτησης ενέργειας, γίνεται αποδεκτή πολύ μικρή πιθανότητα

αστοχίας, συγκεκριμένα μία ημέρα ανά πέντε χρόνια, κατά μέσο όρο (ως πιθανότητα αστοχίας ορίζεται η συχνότητα μη εξυπηρέτησης της ζήτησης ενέργειας). Για την εκτίμηση της εν λόγω πιθανότητας με ικανοποιητική ακρίβεια, λαμβάνεται μήκος προσομοίωσης ίσο με 500 χρόνια (περίπου 182 500 ημέρες).



Σχήμα 8: Απεικόνιση λειτουργίας υβριδικού συστήματος (AE: ζήτηση ενέργειας, ΠΕ: παραγόμενη ενέργεια από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά, EA: ενέργεια που απαιτείται ώστε να αντληθεί η διαθέσιμη ποσότητα νερού του κατάντη ταμιευτήρα, ΔΕ: διαθέσιμη Υ/Η ενέργεια ανάντη ταμιευτήρα).

### 3.6 Παραγωγή συνθετικών δεδομένων μετεωρολογικών διεργασιών

Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου είναι συνθετικές χρονοσειρές ημερήσιας ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας, μήκους 500 χρόνων, που παράχθηκαν με το λογισμικό Κασταλία. Για την εκτίμηση των στατιστικών χαρακτηριστικών τους ελήφθησαν τα αντίστοιχα ιστορικά δείγματα από τον σταθμό του Αγ. Κοσμά στην Νότια Αττική, από τον Φεβρουάριο του 2005 έως τον Ιούνιο του 2012. Ο σταθμός αυτός λειτουργεί υπό την εποπτεία του Υδρολογικού Παρατηρητηρίου Αθηνών του ΕΜΠ (Hydrological Observatory of Athens, [www.hoa.gr](http://www.hoa.gr)).

Για την προσαρμογή της θεωρητικής συνάρτησης αυτοσυσχέτισης των ετήσιων μεταβλητών εφαρμόστηκε η αντιπροσωπευτική τιμή του συντελεστή Hurst που εκτιμήθηκε στις αναλύσεις της ενότητας 3.2, ήτοι  $H = 0.84$ . Η τιμή αυτή διατηρήθηκε με εξαιρετική ακρίβεια στις συνθετικές χρονοσειρές, για τις οποίες προέκυψαν  $H = 0.85$  και  $H = 0.83$ , για την ταχύτητα ανέμου και την διάρκεια ηλιοφάνειας, αντίστοιχα.

Για την αξιολόγηση της επίδρασης της μακροπρόθεσμης εμμονής στα μεγέθη σχεδιασμού του συστήματος διαμορφώθηκε ένα ακόμη σενάριο συνθετικών χρονοσειρών των δύο μετεωρολογικών μεταβλητών, με σημαντικά μικρότερες τιμές του συντελεστή Hurst, συγκεκριμένα  $H = 0.64$  για την ταχύτητα ανέμου και  $H = 0.61$  για την διάρκεια ηλιοφάνειας.

### 3.7 Παραγωγή συνθετικών δεδομένων ζήτησης ενέργειας

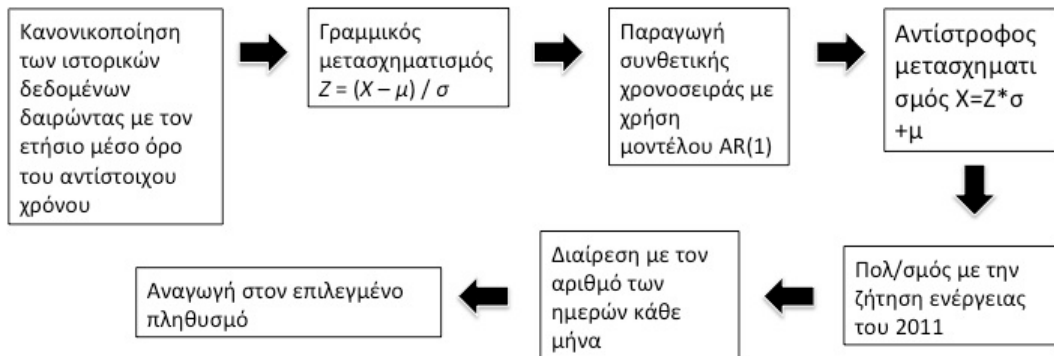
Για την προσομοίωση της ενεργειακής κατανάλωσης θεωρήθηκε μια περιοχή 100 000 κατοίκων, για την οποία παρήχθησαν συνθετικές τιμές ημερήσιας ζήτησης ενέργειας, μήκους 500 ετών. Για την εκτίμηση των στατιστικών χαρακτηριστικών της ζήτησης ενέργειας ανακτήθηκαν μηνιαία δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας από το 2004 ως το 2011, από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ).

Η διαδικασία παραγωγής της συνθετικής χρονοσειράς ζήτησης ενέργειας περιγράφεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 9. Αρχικά, έγινε απομάκρυνση των υπερετήσιων τάσεων και της



εποχικότητας. Για τον σκοπό αυτό, τα ιστορικά δεδομένα κανονικοποιήθηκαν, πρώτα διαιρώντας με τον αντίστοιχο ετήσιο μέσο όρο και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τον γραμμικό μετασχηματισμό  $Z = (X - \mu) / \sigma$ , όπου  $\mu$  και  $\sigma$  είναι η μέση τιμή και τυπική απόκλιση, αντίστοιχα, των μηνιαίων χρονοσειρών ζήτησης ενέργειας.

Για την παραγωγή των κανονικοποιημένων συνθετικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο AR(1). Στα συνθετικά δεδομένα εφαρμόστηκε ο αντίστροφος γραμμικός μετασχηματισμός ώστε να προκύψουν οι μηνιαίες τιμές ζήτησης ενέργειας, θεωρώντας την ετήσια κατανάλωση του έτους 2011. Τα ημερήσια δεδομένα υπολογίστηκαν διαιρώντας με τον αριθμό των ημερών του κάθε μήνα. Η παραπάνω υπόθεση, αν και μη ρεαλιστική, κρίθηκε πως είναι επαρκής για τον σκοπό της έρευνας, καθώς μάλιστα δεν ήταν δυνατή η ανάκτηση αξιόπιστων πρωτογενών δεδομένων ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας. Τα τελικά δείγματα προσαρμόστηκαν στο επιλεγμένο μέγεθος πληθυσμού (100 000 άτομα).

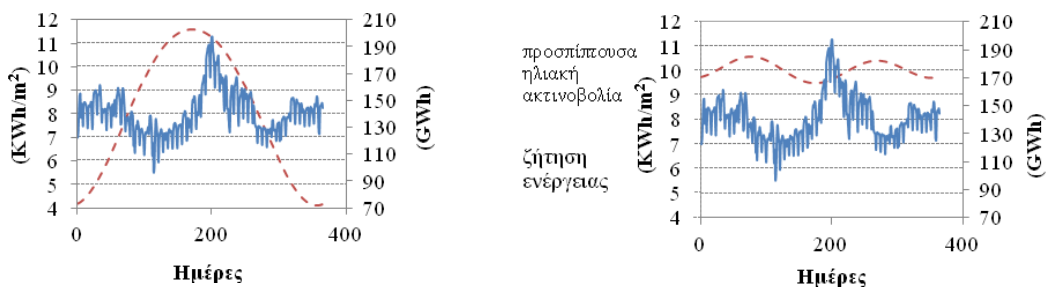


Σχήμα 9: Διάγραμμα ροής παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών ζήτησης ενέργειας.

### 3.8 Προσομοίωση παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας

Στο μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος, η παραγωγή ενέργειας από τις τρεις πηγές (ηλιακά πάνελ, ανεμογεννήτριες, αντλιοστρόβιλος) υπολογίζονται ως εξής:

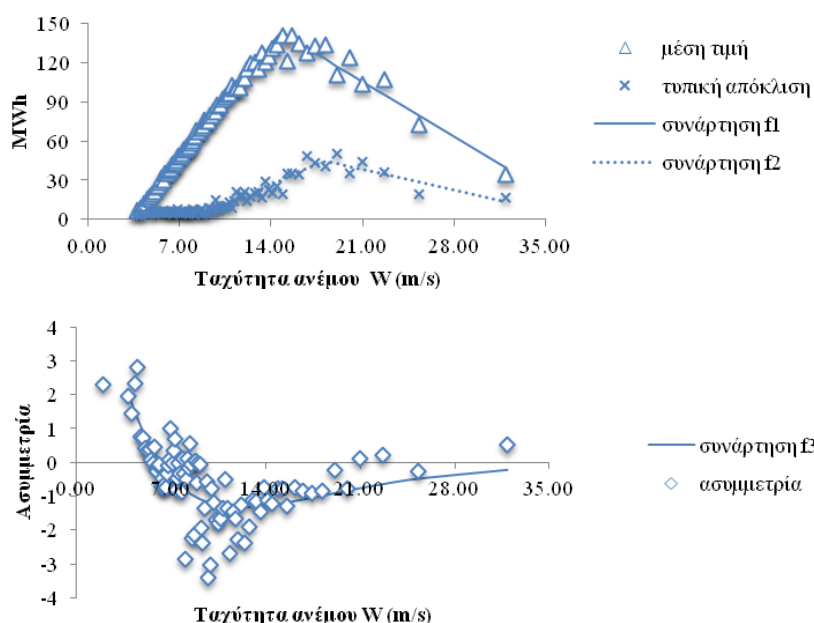
Η παραγωγή ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την γωνία του πάνελ και την ηλιακή ακτινοβολία. Η τελευταία είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους και της διάρκειας ηλιοφάνειας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10, για διαφορετικές γωνίες των ηλιακών πάνελ διαφοροποιείται η χρονική κατανομή της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας, που με τη σειρά της επηρεάζει το μέγεθος των ταμιευτήρων. Για αυτό τον λόγο μελετήθηκαν διάφορες γωνίες κλίσης πάνελ.



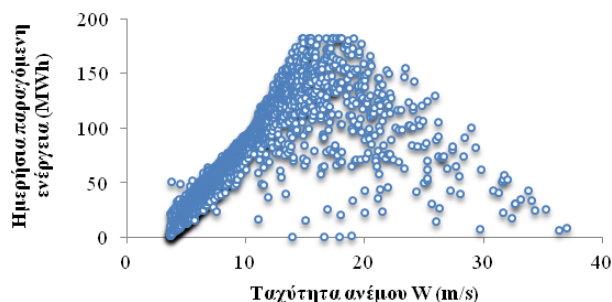
Σχήμα 10: Ζήτηση ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας και ηλιακή ακτινοβολία για γωνίες κλίσης  $0^\circ$  (αριστερά) και  $38^\circ$  (δεξιά).

Η παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι συνάρτηση της καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας και της ταχύτητας ανέμου. Ωστόσο, όταν εφαρμόζονται ημερήσιες τιμές ταχύτητας ανέμου αμελείται η ωριαία μεταβλητότητά τους, το οποίο οδηγεί σε σημαντική διαφοροποίηση της εκτίμησης της παραγόμενης ενέργειας. Για αυτό τον λόγο υιοθετήθηκε μια στοχαστική προσέγγιση, στην οποία

αναπαράχθηκαν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ωριαίας ενέργειας, με βάση τα δεδομένα ωριαίας ταχύτητας ανέμου. Για την κατάστρωση της μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον σταθμό Αγ. Κοσμά. Συγκεκριμένα, η ημερήσια ενέργεια που υπολογίστηκε από συνάθροιση των ωριαίων τιμών, κατηγοριοποιήθηκε σε 87 κλάσεις ημερήσιας ταχύτητας ανέμου  $W$ , και για κάθε κλάση υπολογίστηκαν η μέση τιμή  $\mu$ , η τυπική απόκλιση  $\sigma$  και ο συντελεστής ασυμμετρίας  $\xi$ . Στη συνέχεια, για κάθε στατιστικό μέγεθος προσαρμόστηκε μια εμπειρική συνάρτηση στο αντίστοιχο δείγμα των 87 τιμών, ήτοι  $\mu = f_1(W)$ ,  $\sigma = f_2(W)$  και  $\xi = f_3(W)$ , που απεικονίζονται στο Σχήμα 11. Ακολούθως, για τα συνθετικά ημερήσια δεδομένα ταχύτητας ανέμου, εκτιμήθηκε η ημερήσια παραγωγή ενέργειας, με εφαρμογή της κατανομής Γάμα τριών παραμέτρων, με τιμές παραμέτρων που εξαρτώνται από την ημερήσια ταχύτητα ανέμου  $W$ . Στο Σχήμα 12 απεικονίζεται η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια υπολογισμένη με αυτή την μέθοδο, με τα δεδομένα του σταθμού Αγ. Κοσμάς. Οι τιμές είναι παρόμοια διεσπαρμένες με αυτές που υπολογίστηκαν κατευθείαν από ωριαία δεδομένα. Ακόμη, η συνολική παραγόμενη ενέργεια είναι σχεδόν ίδια για τις δύο μεθόδους.



Σχήμα 11: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση (πάνω) και ασυμμετρία (κάτω) κάθε κλάσης, και οι αντίστοιχες προσαρμοσμένες συναρτήσεις.



Σχήμα 12: Κατανομή ημερήσιας παραγωγής αιολικής ενέργειας συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου.

Τέλος, η παραγωγή και κατανάλωση (λόγω άντλησης) υδροηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά των ταμιευτήρων, την διερχόμενη παροχή και τον βαθμό απόδοσης του αντλιοστρόβιλου. Στις προσομοιώσεις, θεωρείται κοινός βαθμός απόδοσης, ήτοι  $\eta = 0.85$ .

### 3.9 Βελτιστοποίηση μεγεθών σχεδιασμού συστήματος

Για κάθε σενάριο εμμονής, που αντιστοιχεί σε υψηλή και χαμηλή τιμή του συντελεστή Hurst των μετεωρολογικών χρονοσειρών, 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 όφελος από την παραγωγή ενέργειας θεωρήθηκε σταθερό και έτσι δεν υπεισήλθε στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Στο κόστος περιλαμβάνονται η αρχική επένδυση και τα ετήσια κόστη συντήρησης των έργων, που εξαρτώνται 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. Η οικονομική ζωή των ταμιευτήρων θεωρήθηκε 50 έτη, ενώ για τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό (ανεμογεννήτριες, ηλιακά πάνελ, αντλιοστρόβιλος) θεωρήθηκε χρόνος ζωής 25 έτη. Η βελτιστοποίηση έγινε με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων.

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 1, για τα δύο σενάρια του συντελεστή Hurst. Και στα δύο σενάρια, δεν προκύπτει χρήση ηλιακών πάνελ ( $n_s = 0$ ), καθώς αυτά είναι πολύ λιγότερο αποδοτικά σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες, για τις οποίες λαμβάνεται  $n_w = 23$ , και στα δύο σενάρια. Όσον αφορά στο μέγεθος του συστήματος άντλησης-ταμίευσης, σε όρους χωρητικότητας των δύο ταμιευτήρων, αυτό επηρεάζεται σημαντικά από την μακροπρόθεσμη εμμονή των μετεωρολογικών διεργασιών. Πάντως, η διαφορά στο συνολικό κόστος είναι σχετικά μικρή.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα μοντέλου βελτιστοποίησης για τα δύο σύνολα συνθετικών δεδομένων.

	$H = 0.83-0.85$	$H = 0.61-0.64$
Πλήθος ανεμογεννητριών, $n_w$	23	23
Πλήθος ηλιακών πάνελ, $n_s$	0	0
Χωρητικότητα ταμιευτήρων, $k$ ( $\text{hm}^3$ )	250	195
Ετήσιο κόστος (Μ€)	33.6	32.8

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αναπαράσταση της στοχαστικής δομής της ταχύτητας ανέμου και της διάρκειας ηλιοφάνειας, που αποτελούν τις μεταβλητές εισόδου για την παραγωγή αιολικής και ηλιακής ενέργειας, είναι ένα κρίσιμο πεδίο έρευνας, λαμβάνοντας υπόψη τον ολοένα αυξανόμενο ρόλο των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο. Στα πλαίσια της εργασίας, εξετάστηκε ιδιαίτερα η ύπαρξη μακροπρόθεσμης εμμονής των εν λόγω μετεωρολογικών διεργασιών, για την οποία δεν υπήρχε κάποια συστηματική διερεύνηση μέχρι σήμερα. Από την ανάλυση δειγμάτων μεγάλου μήκους στην Ευρώπη προέκυψε ότι και οι δύο διεργασίες χαρακτηρίζονται από μακροχρόνια εμμονή, και μάλιστα προτάθηκε μια αντιπροσωπευτική τιμή του συντελεστή Hurst,  $H = 0.84$ , κοινή και για τις δύο. Ακόμη, επιβεβαιώθηκε η καταλληλότητα των κατανομών Γάμα και Weibull για την αναπαράσταση της ταχύτητας ανέμου. Αντίστοιχα, η θεωρητική κατανομή που προέκυψε από λογαριθμικό μετασχηματισμό της κατανομής Γάμα αλλά και η κατανομή Βήτα προσαρμόζονται ικανοποιητικά στα δείγματα διάρκειας ηλιοφάνειας. Βεβαίως, προκειμένου να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα, είναι αναγκαία η επέκταση της έρευνας σε μεγαλύτερο αριθμό μετεωρολογικών χρονοσειρών παγκοσμίως, με ικανοποιητικά μεγάλο μήκος.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η παραγωγή συσχετισμένων συνθετικών χρονοσειρών μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου και ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας, μέσω του υπολογιστικού συστήματος Κασταλία. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, γιατί αποτελεί προϋπόθεση για τον ορθολογικό σχεδιασμό υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, με μικτή χρήση αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι το λογισμικό Κασταλία είναι κατάλληλο για την πολυμεταβλητή στοχαστική προσομοίωση των δύο διεργασιών. Ειδικότερα, αναπαράγει με υψηλή ακρίβεια τα περιθώρια και από κοινού στατιστικά χαρακτηριστικά τους στις τρεις χρονικές

κλίμακες ενδιαφέροντος, ετήσια, μηνιαία, ημερήσια, καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε κλίμακας, ήτοι την μακροπρόθεσμη εμμονή, τη περιοδικότητα και τη διαλείπουσα συμπεριφορά, αντιστοίχως.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω μεθοδολογία στοχαστικής προσομοίωσης, εξετάστηκε ένα υβριδικό σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας, που «μετασηματίζει» τις δύο χρονικά κυμαινόμενες και μη προβλέψιμες εισροές ενέργειας (αιολική, ηλιακή), σε ελεγχόμενες εκροές ενέργειας, που ικανοποιούν την αντίστοιχη ζήτηση, με πολύ υψηλή αξιοπιστία. Η αναρρύθμιση και αποθήκευση της ενέργειας επιτυγχάνεται με την παράλληλη λειτουργία ενός σχήματος άντλησης-ταμίευσης. Βασικό συμπέρασμα είναι ότι κατά τον σχεδιασμό τέτοιων υβριδικών συστημάτων δεν πρέπει να αμελείται η ύπαρξη της μακροπρόθεσμης εμμονής, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη εκτίμηση των μεταβλητών σχεδιασμού. Για παράδειγμα, στο σύστημα που εξετάστηκε προέκυψε σημαντικά μικρότερος όγκος ταμιευτήρων για το σενάριο συνθετικών μετεωρολογικών χρονοσειρών με μειωμένες τιμές του συντελεστή Hurst. Περαιτέρω έρευνα απαιτείται ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση και άλλων σχεδιαστικών μεγεθών, όπως ο τύπος της ανεμογεννήτριας και των ηλιακών πάνελ, και της εφαρμογής λεπτότερης χρονικής κλίμακας προσομοίωσης (ωριαία αντί ημερήσιας).

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Koutsoyiannis, D., and A. Efstratiadis (2012) The necessity for large-scale hybrid renewable energy systems. EGU Leonardo Topical Conference Series on the Hydrological Cycle "Hydrology and Society". Torino.
2. Koutsoyiannis, D., C. Makropoulos, A. Langousis, S. Baki, A. Efstratiadis, A. Christofides, G. Karavokiros, and N. Mamassis (2009) Climate, hydrology, energy, water: recognizing uncertainty and seeking sustainability. *Hydrol. Earth Sys. Sci.* 13: 247–257.
3. Carta, J. A., P. Ramirez, and S. Velasquez (2009) A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the Canary Islands. *Renew Sust. Energ. Rev.* 13(5): 933–955.
4. Darbandi, A., M. T. Aalami M. T., and Asadi H. (2012) Comparison of four distributions for frequency analysis of wind speed. *Env. Nat. Resour. Res.* 2(1).
5. Garcia, A., J. L. Torres, E. Prieto, and A. de Francisco (1998) Fitting wind speed distributions: a case study. *Solar Energy* 62(2): 139–144.
6. Yilmaz, V., and H. E. Çelik (2008). A statistical approach to estimate the wind speed distribution: the case of Gelibolu region. *Doğuş Üniversitesi Dergisi* 9(1): 122–132.
7. Zhou J., E. Erdem, G. Li, and J. Shi (2010) Comprehensive evaluation of wind speed distribution models: A case study for North Dakota sites. *Energy Convers. Manag.* 51: 1449–1458.
8. Τσεκούρας, Γ., Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση υδρομετεωρολογικών διεργασιών σχετικών με την αιολική και ηλιακή ενέργεια, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2012.
9. Bashahu, M., and J. C. Nsabimana (2005) Statistical analysis of sunshine duration measurements in Burundi using beta distributions. *World Conference on Physics and Sustainable Development*, Durban, South Africa.
10. Chia, E., and M. F. Hutchinson (1991) The Beta distribution as a probability model for daily cloud duration. *Agr. Forest Meteorol.* 56: 195–208.
11. Sulaiman, Y. M., O. W. M. Hlaing., M. A. Wahab, and A. Zakaria (1999) Application of beta distribution model to Malaysian sunshine data. *Renew. Energy* 18(4): 573–579.
12. Koutsoyiannis D. (2003) Climate change, the Hurst phenomenon and hydrological statistics. *Hydrol. Sci. J.* 48(1): 3–24.
13. Koutsoyiannis, D. (2010) A random walk on water. *Hydrol. Earth Sys. Sci.* 14: 585–601.
14. Koutsoyiannis, D. (2011) Hurst-Kolmogorov dynamics and uncertainty. *J. Amer. Water Resour. Assoc.* 47(3): 481–495.
15. Tyralis, H., and D. Koutsoyiannis (2011) Simultaneous estimation of the parameters of the Hurst-Kolmogorov stochastic process. *Stoch. Env. Res. Risk. As.* 25(1): 21–33.
16. Sheng, H., Y. Q. Chen, and T.S. Qiu (2012) Tracking performance and robustness analysis of Hurst estimators for multifractional processes. *Iet Signal Process.* 6(3): 213–226.

17. Koutsoyiannis, D. (2000) A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series. *Water Resour. Res.* 36(6): 1519–1533.
18. Koutsoyiannis, D. (1999) Optimal decomposition of covariance matrices for multivariate stochastic models in hydrology. *Wat. Resour. Res.* 35(4): 1219–1229.
19. Koutsoyiannis, D. (2001) Coupling stochastic models of different time scales. *Water Resour. Res.* 37(2): 379–392.
20. Dialynas, Y., S. Kozanis, and D. Koutsoyiannis (2011) 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, EGU 2011-290, European Geosciences Union.
21. Koutsoyiannis, D., C. Onof, and H. S. Wheater (2003) Multivariate rainfall disaggregation at a fine time scale. *Water Resour. Res.* 39(7): 1173.
22. Ιωάννου, Χ., Στοχαστική προσομοίωση και βελτιστοποίηση υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2012.

## Stochastic analysis and simulation of hydrometeorological processes for optimizing hybrid renewable energy systems

Christos Ioannou  
*Civil Engineer NTUA*

Georgios Tsekouras  
*Civil Engineer NTUA*

Andreas Efstratiadis  
*Civil Engineer, MSc., Dr. Engineer NTUA*

Demetris Koutsoyiannis  
*Professor, Civil Engineer, Dr. Engineer NTUA*

*Key Words:* hydrometeorological processes, renewable energy sources, pumped-storage, long-term persistence, multivariate stochastic simulation, optimization, reliability

**SUMMARY:** The drawbacks of conventional energy sources including their negative environmental impacts emphasize the need to integrate renewable energy sources into the energy balance. However, the renewable sources strongly depend on time varying and uncertain hydrometeorological processes, including wind speed, sunshine duration and solar radiation. To study the design and management of hybrid energy systems we investigate the stochastic properties of these natural processes, including possible long-term persistence. We use wind speed and sunshine duration time series retrieved from a European database of daily records and we estimate representative values of the Hurst coefficient for both variables. We conduct simultaneous generation of synthetic time series of wind speed and sunshine duration, on yearly, monthly and daily scale. To this we use the Castalia software system which performs multivariate stochastic simulation. Using these time series as input, we perform stochastic simulation of an autonomous hypothetical hybrid renewable energy system and optimize its performance using genetic algorithms. For the system design we optimize the sizing of the system in order to satisfy the energy demand with high reliability also minimizing the cost. While the simulation scale is the daily, a simple method allows utilizing the sub-daily distribution of the produced wind power. Various scenarios are assumed in order to examine the influence of input parameters, such as the Hurst coefficient, and design parameters such as the photovoltaic panel angle.