



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης για το βέλτιστο σχεδιασμό υβριδικού συστήματος υδροηλεκτρικής - αιολικής ενέργειας

Διερεύνηση με βάση το υδροσύστημα Αλιάκμονα

Διπλωματική εργασία

Παναγιώτης Δήμας

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτρης Κουτσογιάννης

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

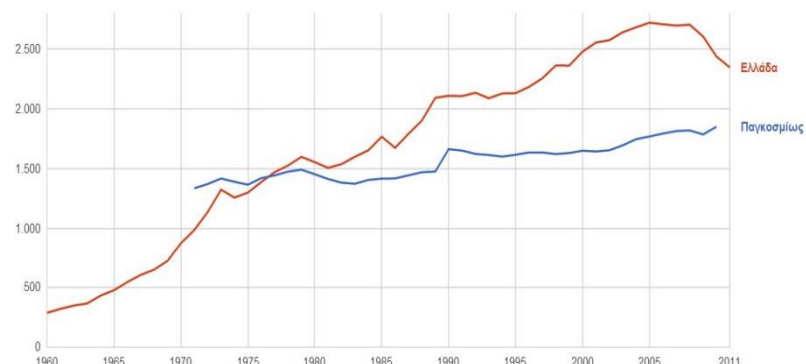
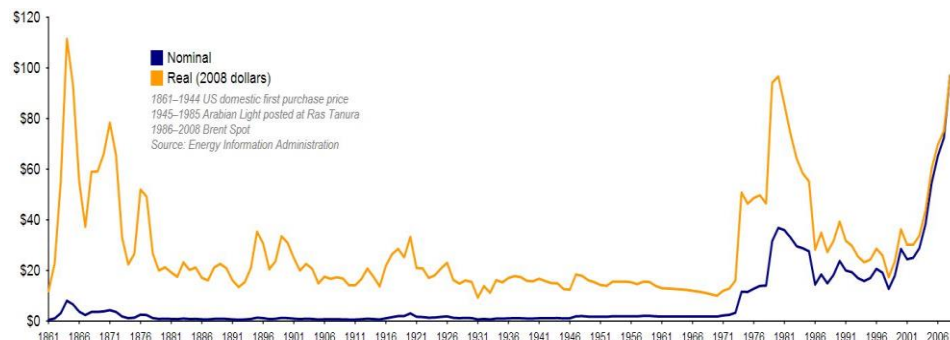
Διάρθρωση της παρουσίασης

- ❑ Εισαγωγή
 - Προβληματικές και σκέψεις
 - Στόχος της εργασίας
- ❑ Το πρόβλημα της συνδυασμένης διαχείρισης ΥΗΕ-ΑΠΕ
- ❑ Το υδροσύστημα Αλιάκμονα και το Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας
- ❑ Προσομοίωση υδροσυστήματος Αλιάκμονα: Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ και η κατάστρωση των σεναρίων
- ❑ Προσομοίωση της αιολικής παραγωγής: Μεθοδολογία & στοιχεία καινοτομίας
- ❑ Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος
 - Αρχική θεώρηση: μεθοδολογία ανάλυσης και ενδιάμεσα αποτελέσματα
 - Τελική θεώρηση: διατύπωση πλαισίου και τελικά αποτελέσματα
- ❑ Συμπεράσματα & προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Εισαγωγή

□ Σκέψεις και προβληματικές

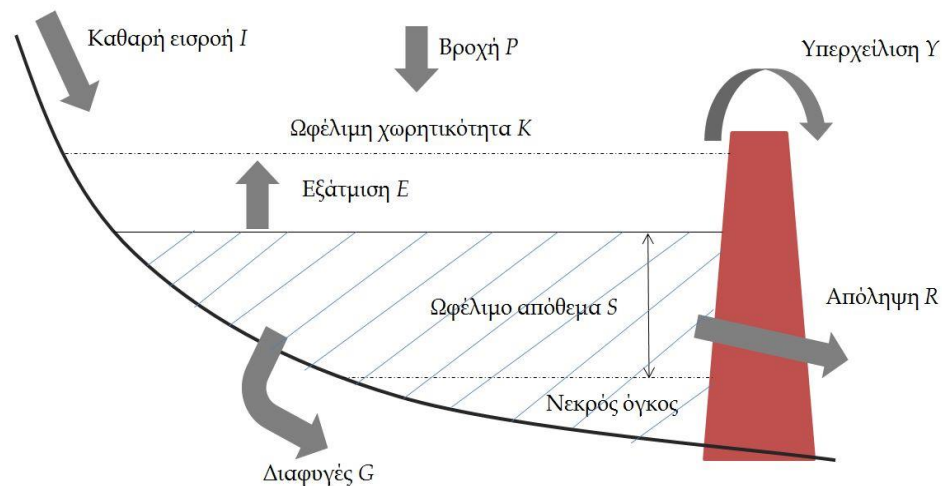
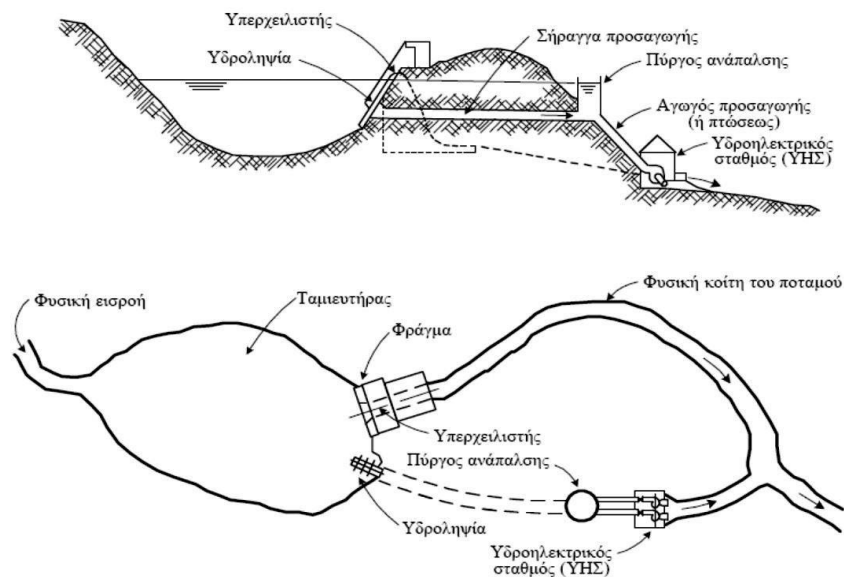
Με την ανάδυση της κρίσης εγείρονται ερωτήματα γύρω από το μοντέλο παραγωγής ενέργειας και ενδεχόμενη κατασπατάληση των πεπερασμένων φυσικών πόρων αν συνεχίσουμε στην ίδια κατεύθυνση. Αναδεικνύεται εντονότερα και μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973 η ανάγκη να περάσουμε σε ένα μετα-εξορυκτικό μοντέλο με αυξημένο το ρόλο των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο.



- Στα πλαίσια του πρωτοκόλλου του Κιότο και του σχεδίου «20-20-20» της Ε.Ε. έχουμε θέσει ως στόχο τη διείσδυση των ΑΠΕ σε ποσοστό 20% επί της κατανάλωσης ενέργειας μέχρι το 2020.
- Παρά την αύξηση στις τιμές του πετρελαίου παρατηρούμε μια παράλληλη αύξηση και στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη νέων μορφών παραγωγής ενέργειας στην κατεύθυνση της βιωσιμότητας με την παράλληλη μείωση της κατανάλωσης.
- Στον ελληνικό χώρο παρατηρούμε μείωση στην κατανάλωση, η οποία όμως οφείλεται στην κρίση και όχι σε ένα στρατηγικό πλάνο κοινωνικο-οικολογικού μετασχηματισμού.

Εισαγωγή

- ❑ Σκέψεις και προβληματικές (συνέχεια)
- Αναγκαιότητα ανάπτυξης εργαλείων για τη συνδυασμένη διαχείριση ΥΗΕ και ΑΠΕ.
- Ανάγκη αναθεώρησης του πλαισίου που εντάσσει τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα στις μη ανανεώσιμες πηγές.
- Ανάδειξη του βιώσιμου χαρακτήρα της υδροηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αιεφόρου διαχείρισης των υδάτων στον υδρολογικό κύκλο. Κομβικός ο ρόλος των ταμιευτήρων που λειτουργούν ως έργα αναρρύθμισης της ροής.

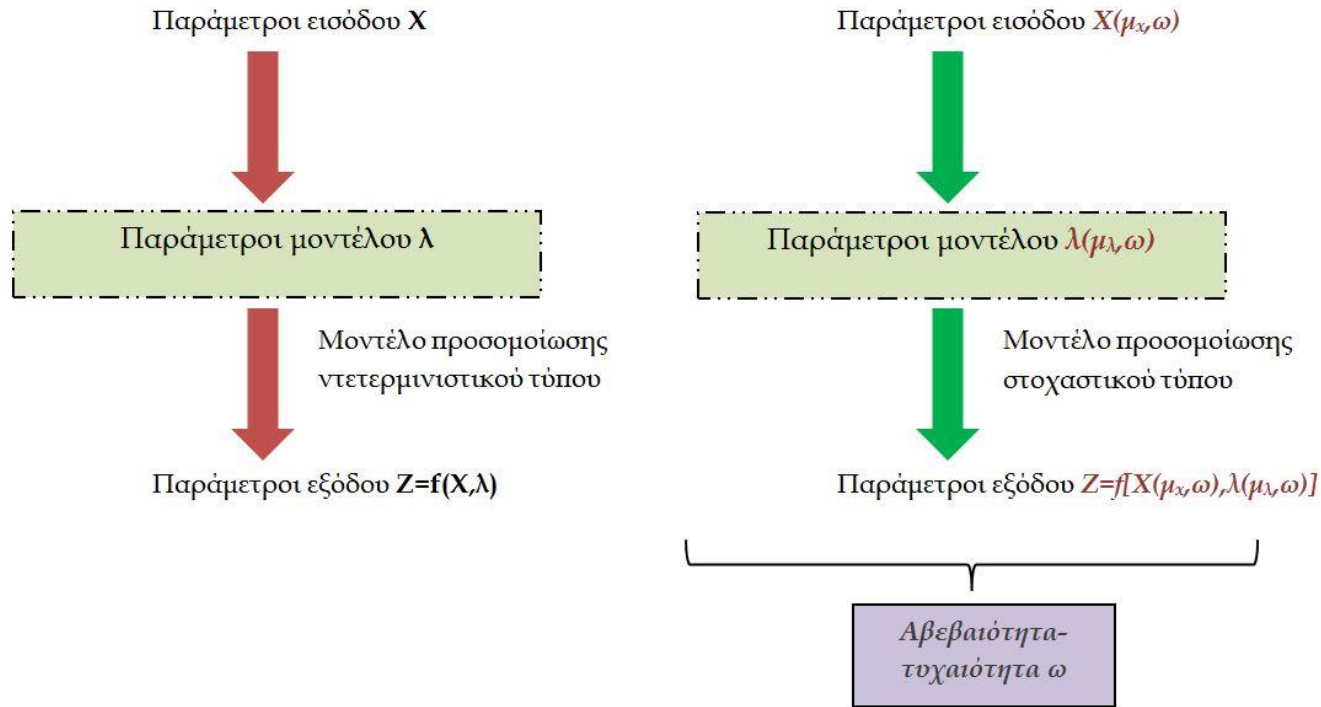


Στόχος της εργασίας

- ❑ Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάδειξη των προκλήσεων που προκύπτουν κατά τη συνδυασμένη διαχείριση υδροηλεκτρικής-αιολικής ενέργειας.
- ❑ Η αναμέτρηση με αυτές τις προβληματικές επιχειρείται με την προσπάθεια ανάπτυξης ενός μεθοδολογικού πλαισίου που περιλαμβάνει τρεις διακριτούς άξονες:
 - Την προσομοίωση του υδροσυστήματος μέσω της διερεύνησης των ήδη υπάρχουσών δυνατοτήτων του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.
 - Την προσομοίωση της αιολικής παραγωγής προτείνοντας κατάλληλο στοχαστικό μοντέλο.
 - Την ανάπτυξη πλαισίου για το σχεδιασμό του συνδυασμένου υβριδικού συστήματος μέσω κατάλληλης παραμετροποίησης και φειδωλής εισαγωγής μεγεθών σχεδιασμού.
- ❑ Το πλαίσιο αυτό διερευνάται με βάση το υδροσύστημα Αλιάκμονα στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας. Η σημασία του είναι μεγάλη, μιας και αποτελεί το μεγαλύτερο υδροσύστημα στην Ελλάδα.

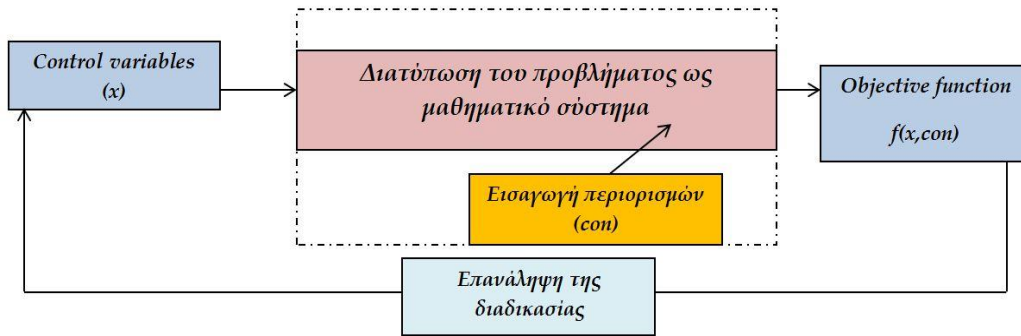


Η έννοια του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης



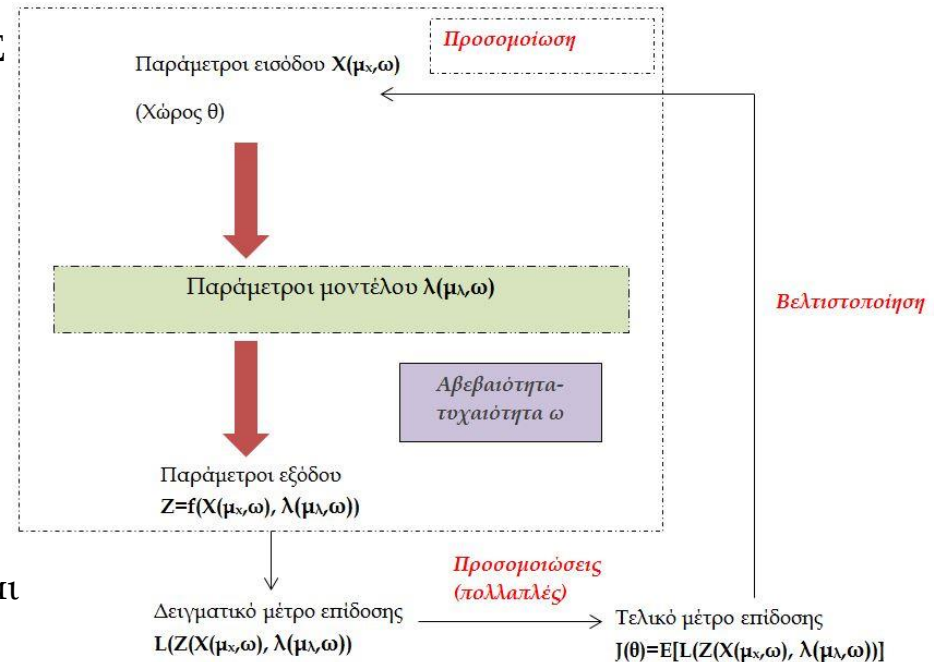
- Σύγκριση ντετερμινιστικού-στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης:
 - Στα ντετερμινιστικά μοντέλα οι παράμετροι και οι εισοδοι (inputs) του μοντέλου είναι συγκεκριμένες, αυστηρά ορισμένες τιμές.
 - Στα στοχαστικά μοντέλα οι παράμετροι εισόδου είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κάποια στατιστική κατανομή. Επομένως και οι παράμετροι εξόδου είναι τυχαίες με ανάλογη συμπεριφορά, ως συναρτήσεις των αντίστοιχων μεταβλητών εισόδου.

Η έννοια της βελτιστοποίησης και η σύζευξή της με την προσομοίωση



Βελτιστοποίηση: διαδικασία συστηματικής αναζήτησης της μέγιστης ή, ανάλογα με τη διατύπωση του προβλήματος, ελάχιστης τιμής μιας στοχαστικής συνάρτησης (objective function) ως προς τις μεταβλητές ελέγχου της (control variables).

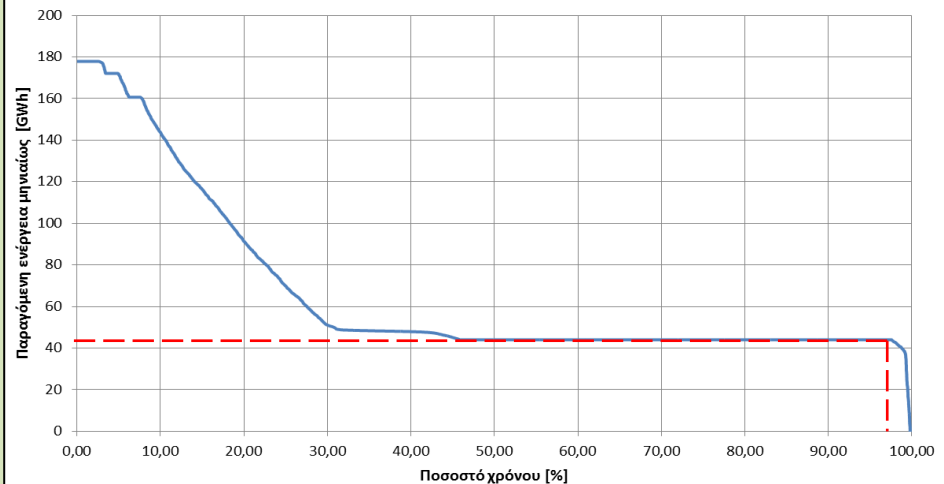
Σύζευξη προσομοίωσης-βελτιστοποίησης: Η μεθοδολογία του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ βασίζεται στη διαδικασία της στοχαστικής βελτιστοποίησης (stochastic optimization). Επιτυγχάνει δηλαδή τη σύζευξη της προσομοίωσης με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βοηθούν στην αποτίμηση της στοχαστικής συνάρτησης, ενώ μερικές εκ των παραμέτρων της προσομοίωσης αξιοποιούνται από το σύστημα ως μεταβλητές ελέγχου της βελτιστοποίησης (Τσουκαλάς, 2012).



Η έννοια της αξιοπιστίας: πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ενέργεια

- ❑ **Αξιοπιστία:** Η πιθανότητα επίτευξης μιας συγκεκριμένης επίδοσης για καθορισμένο χρονικό διάστημα και καθορισμένες συνθήκες (Chow et al., 1988). Συμπληρωματική της έννοιας της αξιοπιστίας είναι η πιθανότητα αστοχίας που ορίζεται ως: $\alpha = P(X < x^*)$. όπου X τυχαία μεταβλητή που εκφράζει ένα ποσοτικό μέτρο επίδοσης του συστήματος (π.χ. απόληψη, παραγωγή ενέργειας) και x^* η επιθυμητή τιμή (τιμή-στόχος) της εν λόγω επίδοσης.
- ❑ Εδώ η αξιοπιστία αφορά τη δυνατότητα κάλυψης ενός στόχου παραγωγής ενέργειας και όχι την ασφαλή απόληψη (safe yield). Η έννοια της αξιοπιστίας διευρύνεται για να συμπεριλάβει την αξιόπιστη επίδοση του συστήματος: είναι η τιμή στόχος x^* που το σύστημα δύναται να αποδώσει για ένα συγκεκριμένο επίπεδο (π.χ. 99%, 97%, 95%): $\alpha^* = P(X \geq x^*)$.

Πρωτεύουσα ενέργεια (firm energy) λέγεται η εξασφαλισμένη υδροηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί με τις δυσμενέστερες υδρολογικές συνθήκες για την κάλυψη των αναγκών της κατανάλωσης. Κάθε παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια επιπλέον της πρωτεύουσας καλείται **δευτερεύουσα**.



Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής

□ Η βασική σχέση της υδροηλεκτρικής παραγωγής είναι $E_t = \psi \cdot V_t \cdot H_t$

- E_t : Η παραγόμενη ενέργεια στο χρονικό βήμα t .
- V_t : Ο διερχόμενος από το στρόβιλο όγκος νερού στο χρονικό βήμα t .
- H_t : Το ολικό ύψος πτώσης στο βήμα t .
- ψ : Η ειδική ενέργεια, δηλαδή η παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα ύψους πτώσης και διερχόμενου όγκου.

Maximize : $z = d$

st :

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - Y_t - Q_t, t = 1, 2, \dots, n$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq K$$

$$0 \leq R_t \leq R_{\max}$$

$$f(R_t, S_t, S_{t+1}) \geq d$$

$$S_t, Y_t \geq 0$$

$$d \geq 0$$

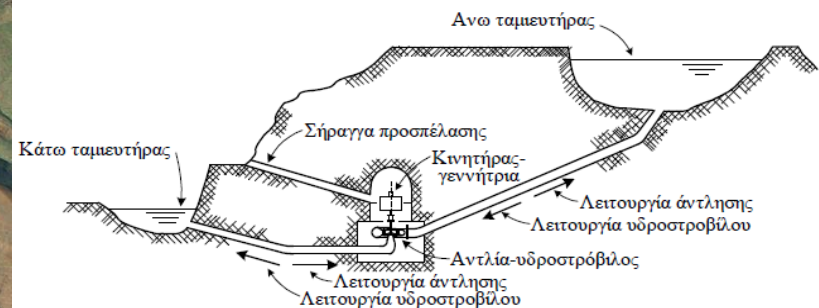
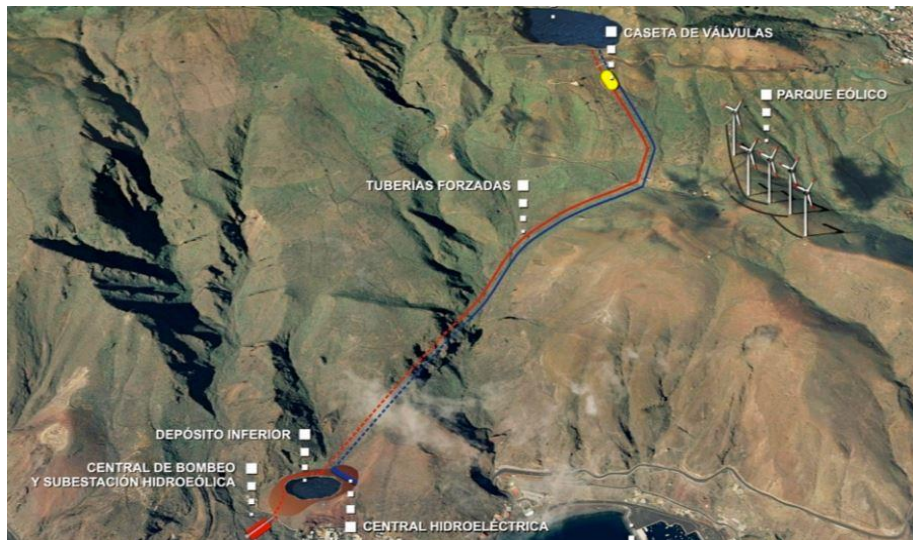
□ Η συνάρτηση f που τίθεται στην διπλανή έκφραση είναι η σχέση παραγωγής ενέργειας σε κάθε χρονικό βήμα t . Είναι δηλαδή η παραπάνω σχέση της υδροηλεκτρικής παραγωγής σε διακριτοποιημένη μορφή, με τη διακύμανση του αποθέματος να θεωρείται αμελητέα.

$$E = \rho \cdot g \cdot \int_{t_1}^{t_2} n(Q) \cdot Q(t) \cdot H(t) dt \approx \psi \cdot H \cdot \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt = \psi \cdot H \cdot V$$

□ Με την παραπάνω ακολουθία απλοποιήσεων δεν νοείται πλέον εξάρτηση της ενέργειας από τη στάθμη (επομένως και το απόθεμα) του επόμενου χρονικού βήματος, επομένως: $E = f(R_t, S_t)$. 9

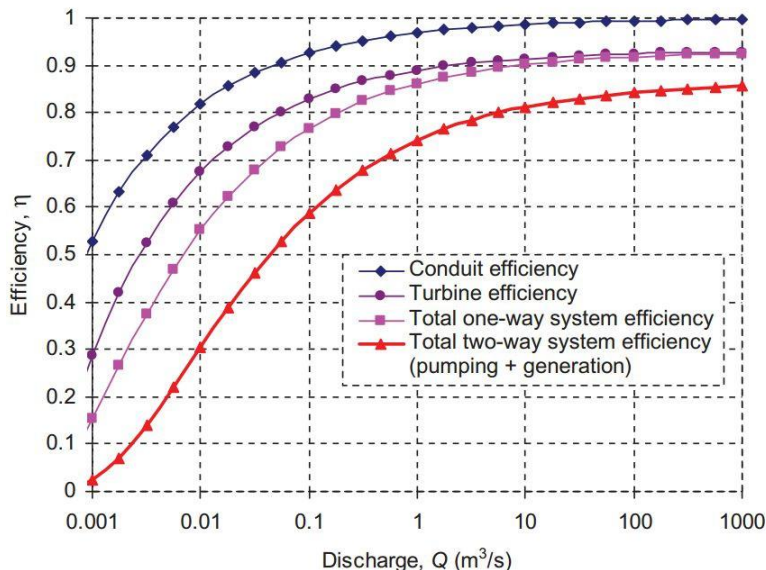
Η τεχνολογία άντλησης/ταμίευσης

- ❑ Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τους σταθμούς παραγωγής (θερμικούς, ηλεκτρικούς κλπ.) προσαρμόζεται σύμφωνα με τη προβλέπιμη χρονική διακύμανση του φορτίου.
- ❑ Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης όμως οι μεγάλοι θερμικοί σταθμοί λόγω της τεχνικής τους φύσης δεν έχουν τη δυνατότητα μείωσης της παραγωγής κάτω από ένα τεχνικό ελάχιστο όριο. Η αδυναμία αυτή των θερμικών σταθμών δημιουργεί περίσσεια ισχύος.
- ❑ Η αστάθεια αυτή επιδεινώνεται από την αυξημένη συμμετοχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο. Ο άνεμος και ο ήλιος είναι μεγέθη στοχαστικά συνεπώς η παραγωγή ενέργειας από αυτά είναι χρονικά μεταβαλλόμενη και ανακόλουθη της καμπύλης ζήτησης φορτίου ενός δικτύου.
- ❑ Η ανισορροπία αυτή σταθμίζεται με την αποθήκευση μέρους της ενέργειας ,κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης και η επαναπρόδοση της στο δίκτυο σε σύντομο χρόνο τις περιόδους αιχμής (Παπαντώνης, 2009).

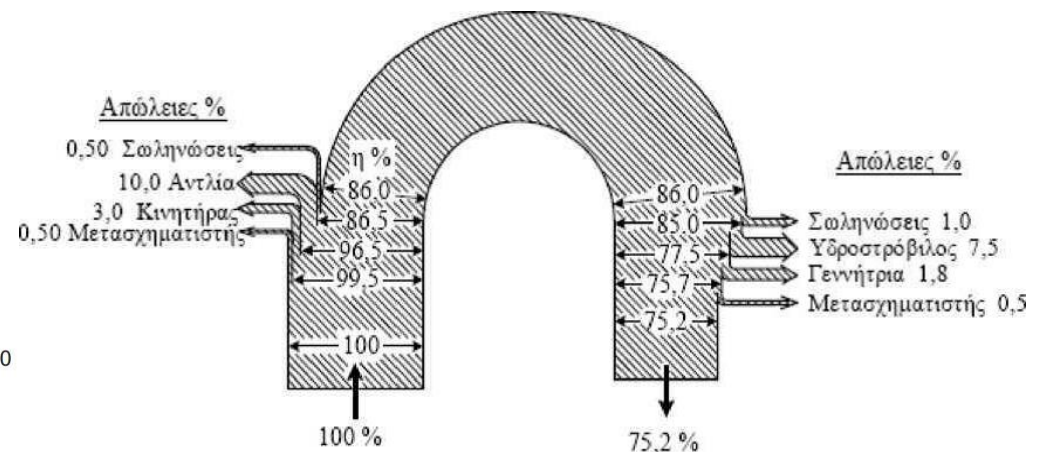


Σύγκριση ΥΗΕ σε σχέση με τις άλλες ΑΠΕ: το ζήτημα της κλίμακας

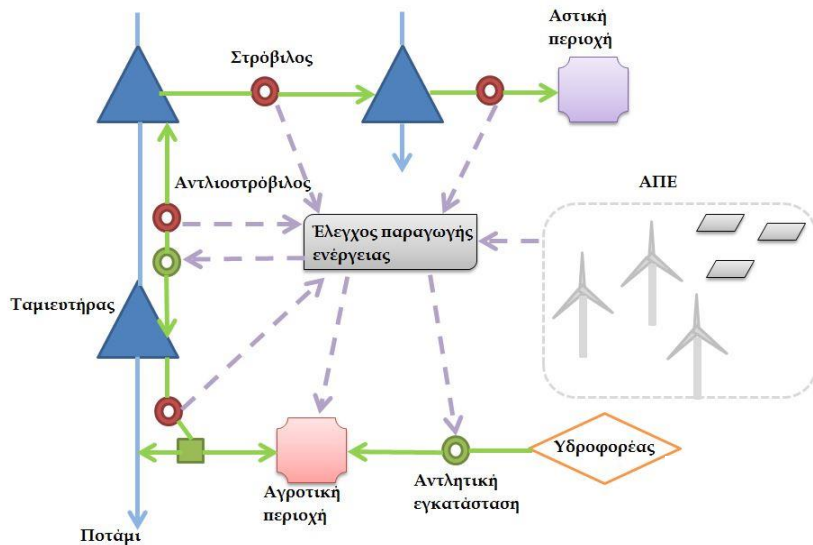
- ❑ Πλεονέκτημα μεγάλων ΥΗΕ έναντι των υπόλοιπων ΑΠΕ.
 - Ως μορφή ενέργειας είναι πλήρως ελέγξιμη αν τη συγκρίνουμε με τις (υψηλής αβεβαιότητας) μορφές της αιολικής και της ηλιακής.
 - Το διακριτό στοιχείο διαφοροποίησης και δυνατότητας ελέγχου είναι η αποθήκευση σε επαρκούς μεγέθους ταμιευτήρες.
 - Η αποδοτικότητά τους αγγίζει το 95%, τη στιγμή που άλλες μορφές μετά βίας πλησιάζουν στο μισό αυτής της τιμής.



Αύξηση της αποδοτικότητας αναστρέψιμου ΥΗΕ με αύξηση της παροχής σχεδιασμού (Πηγή: Koutsoyiannis, 2011) & απώλειες ενός κύκλου (Ρεντζής, 2013).

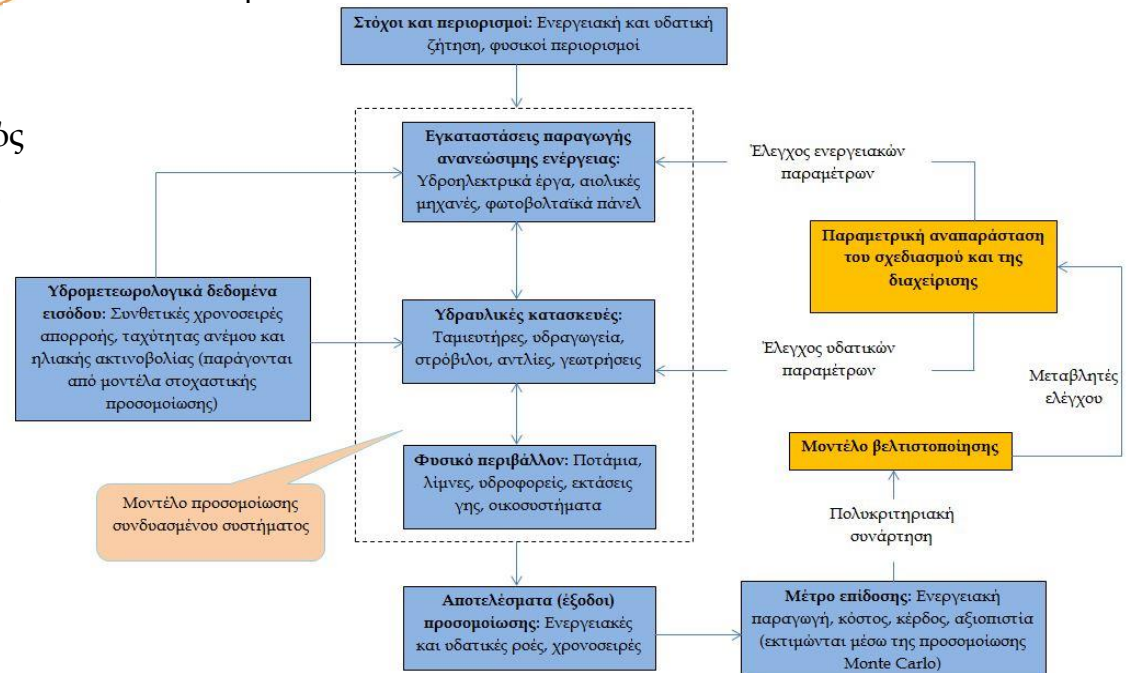


Συνδιαχείριση και σχεδιασμός συνδυασμένων συστημάτων ΥΗΕ-ΑΠΕ



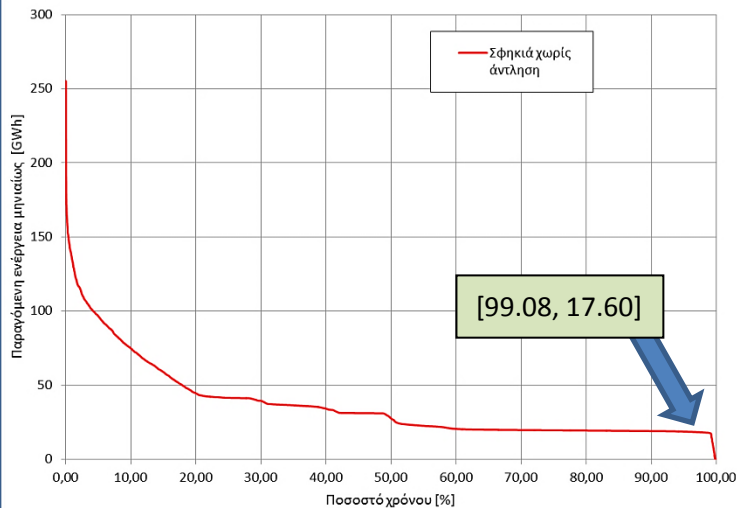
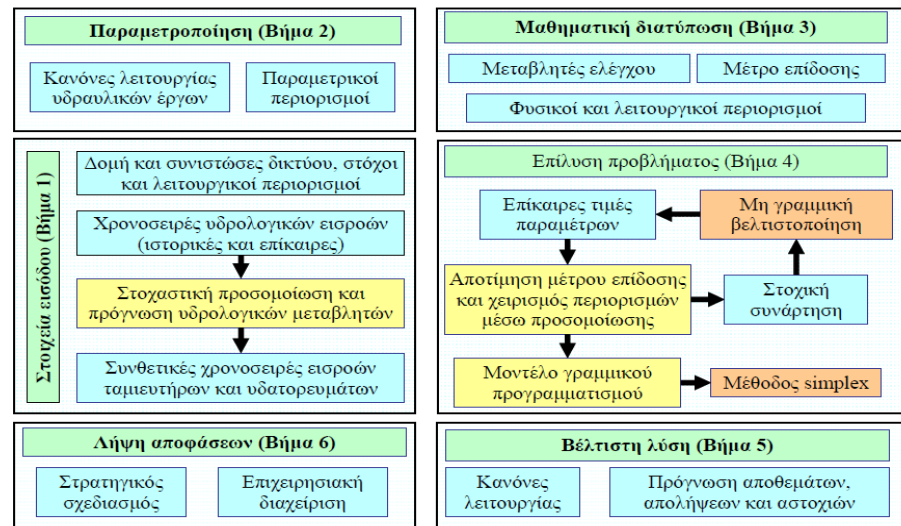
- Το σημείο κλειδί είναι ο μετασχηματισμός των φυσικών πηγών ενέργειας, που από τη φύση τους παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις λόγω της εγγενούς στοχαστικότητας των υδρομετεωρολογικών διεργασιών, σε ρυθμισμένες εκροές παραγόμενης ενέργειας που θα ικανοποιούν τις αναμενόμενες ζητήσεις σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες.

- Γενίκευση του τριπτούχου παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση.
- Κοινά σημεία: Μεγάλο πλήθος μεταβλητών απόφασης, έντονη μη γραμμικότητα στη δυναμική του συστήματος, αβεβαιότητα ζητήσεων και εισροών, ανταγωνιστικοί στόχοι.
- Κοινή ανάγκη στοχαστικής αναπαράστασης των εισόδων του μοντέλου, ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας μέσω μεθόδου Monte Carlo.



Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ και η υδροηλεκτρική παραγωγή

- ❑ Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο-υπολογιστικό σύστημα που υποβοηθά τη διαχείριση υδροσυστημάτων πολύπλοκης τοπολογίας και πολλαπλών (διαφορετικών μεταξύ τους) στόχων.
- ❑ Εστιάζεται στη διαχείριση υδροσυστημάτων μεγάλης κλίμακας, που περιλαμβάνουν μεγάλα υδραυλικά έργα συλλογής, αξιοποίησης και μεταφοράς νερού (ταμιευτήρες, υδροηλεκτρικοί σταθμοί, γεωτρήσεις, υδραγωγεία, αντλιοστάσια), τα οποία μπορούν να εκτείνονται σε περισσότερες από μία λεκάνες απορροής.
- ❑ Οι βασικοί στόχοι του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ είναι:
 - Ευελιξία ως προς την σχηματοποίηση.
 - Ρεαλιστική αναπαράσταση λειτουργιών υδροσυστήματος.
 - Πρακτικότητα κανόνων διαχείρισης.
 - Ποσοτικοποίηση αβεβαιότητας και ρίσκου.



Η ενεργειακή παραγωγή στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ οπτικοποιείται μέσω καμπυλών διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας: Μέσω στοχαστικής προσομοίωσης μήκους 1000 χρόνων παράγουμε τη χρονοσειρά της ενεργειακής παραγωγής για κάθε έργο και για το σύστημα. Η ύπαρξη “plateau” στην καμπύλη διάρκειας υπονοεί ομαλή παραγωγή και επιτρέπει τον υπολογισμό της πρωτεύουσας ενέργειας

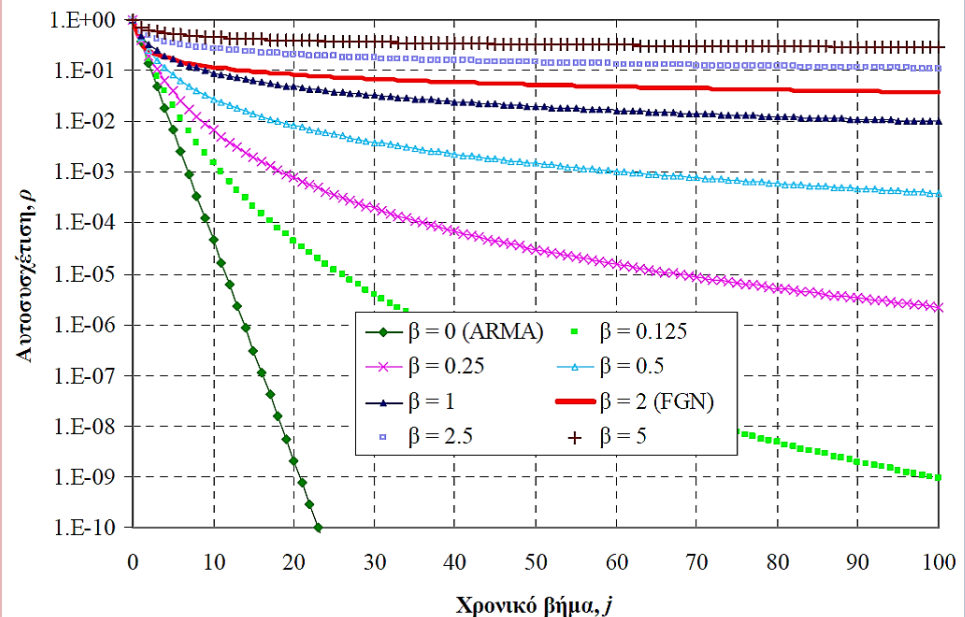
Το λογισμικό ΚΑΣΤΑΛΙΑ: Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών με διατήρηση της εμμονής

- ❑ Η Κασταλία πραγματοποιεί στοχαστική ανάλυση πολλαπλών δειγμάτων μεταβλητών (στην παρούσα έκδοση είναι δυνατή η ανάλυση μέχρι 10 μεταβλητών), οι οποίες αναφέρονται σε διαφορετικές διεργασίες στην ίδια θέση ή σε διαφορετικές θέσεις (π.χ. βροχή-απορροή).
- ❑ Πρόκειται δηλαδή για ένα πολυμεταβλητό στοχαστικό μοντέλο, που αρχικά αναπτύχθηκε για τη μελέτη μηνιαίων υδρολογικών μεταβλητών (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάνης, 2004, Ευστρατιάδης κ.ά., 2005) ενώ πλέον υποστηρίζει και ημερήσιο χρονικό βήμα (Διαλυνάς, 2011).

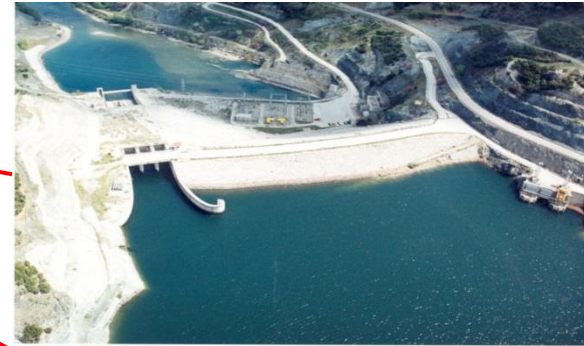
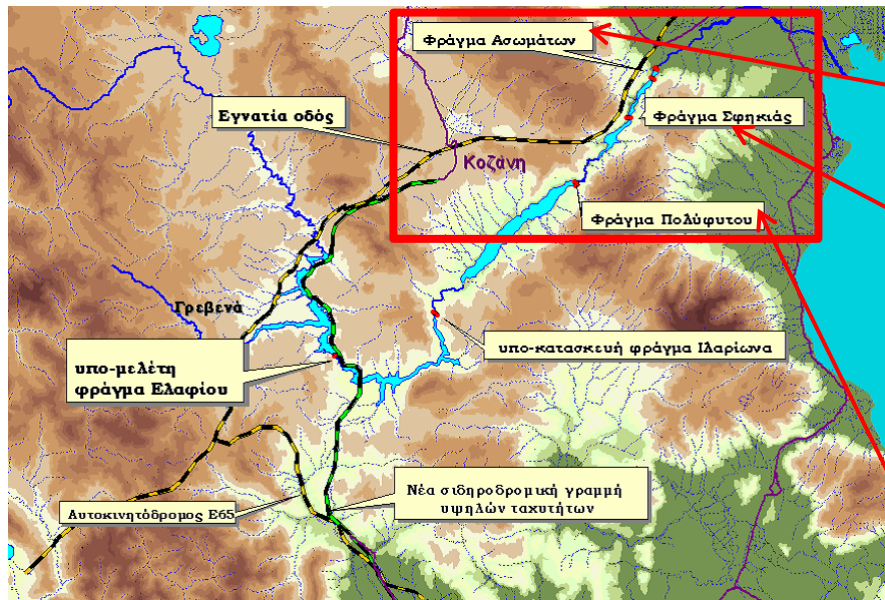
Για την αναπαραγωγή της εμμονής επιλέγεται το μοντέλο SMA. Για μεγάλα χρονικά βήματα, οι θεωρητικές συναρτήσεις αυτοσυνδιασποράς τόσο των ARMA όσο και των FGN ανελίξεων μπορούν να θεωρηθούν ως ειδικές περιπτώσεις της λεγόμενης γενικευμένης συνάρτησης αυτοσυνδιασποράς (Koutsoyiannis, 2013):

$$\gamma_j = \gamma_0 [1 + \kappa \cdot \beta \cdot j]^{-1/\beta}$$

Η παράμετρος κ περιγράφει το σχήμα της συνάρτησης αυτοσυνδιασποράς, ενώ η παράμετρος β σχετίζεται άμεσα με την εμμονή της στοχαστικής ανελίξης.



Το υδροσύστημα Αλιάκμονα/ Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας



Στρόβιλοι	Πολύφυτο	Σφηκιά	Ασώματα
Inlet level (m)	146,5	62	42
Outlet level (m)	0	0	0
Constant DC (m ³ /s)	320	630	320
Psi (GWh/hm ⁴)	0,2133	0,224	0,2268
Installed capacity (MW)	360	315	110
Number of units	3	3	2

- ❑ Τρεις ταμιευτήρες σε σειρά (Πολύφυτο, Σφηκιά, Ασώματα) με **συνολική εγκατεστημένη ισχύ 785 MW**.
- ❑ Σύστημα **άντλησης-ταμίευσης** ανάμεσα στο **Πολύφυτο και τη Σφηκιά** (ισχύς αντλιών Σφηκιάς 324 MW).
- ❑ Κάλυψη πολλών **διαφορετικών και αντικρουόμενων** στόχων: Ύδρευση Θεσσαλονίκης, Άρδευση Υδατικού Διαμερίσματος, Ψύξη Ατμοηλεκτρικού Σταθμού Πτολεμαΐδας, Υδροηλεκτρική Παραγωγή, Περιβαλλοντική Ροή.

Το υδροσύστημα Αλιάκμονα / Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας

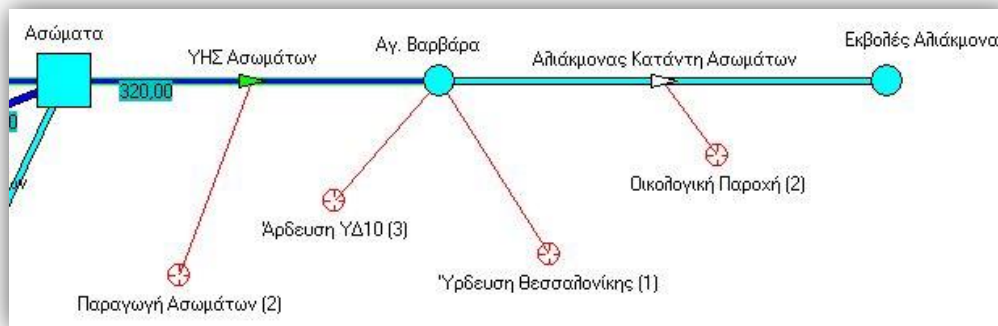
α/α	Λεκάνη Απορροής	Έκταση [km ²]
1	Ανάτη Ιλαρίωνα	4986,00
2	Μεταξύ Ιλαρίωνα και Πολυφύτου	814,00
3	Μεταξύ Πολυφύτου και Σφηκιάς	172,10
4	Μεταξύ Σφηκιάς και Ασωμάτων	67,98
5	Μεταξύ Ασωμάτων και Αγ. Βαρβάρας	18,69

❑ Ζητήσεις και περιορισμοί:

- Ύδρευση Θεσσαλονίκης: 5,28 hm³/μήνα
- Αρδευτικές ζητήσεις Υδατικού Διαμερίσματος: 381,4 hm³/μήνα
- Ζήτηση για την ψύξη του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας: 5,42 hm³/μήνα
- Διατήρηση περιβαλλοντικής ροής κατάντη του ταμιευτήρα Ασωμάτων: 4,5 m³/sec

	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Σύνολο
Ποσοστό ζήτησης [%]	5	11	23,6	30,2	26,4	3,8	100
Ζήτηση [hm ³]	19,07	41,954	90,0104	115,1828	100,6896	14,4932	381,4

Μηνιαία κατανομή αρδευτικής ζήτησης.



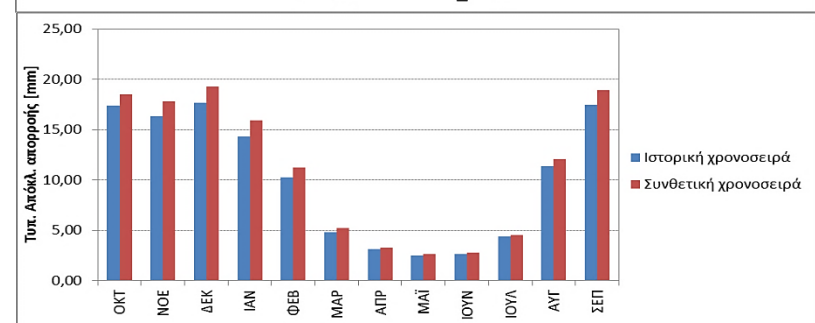
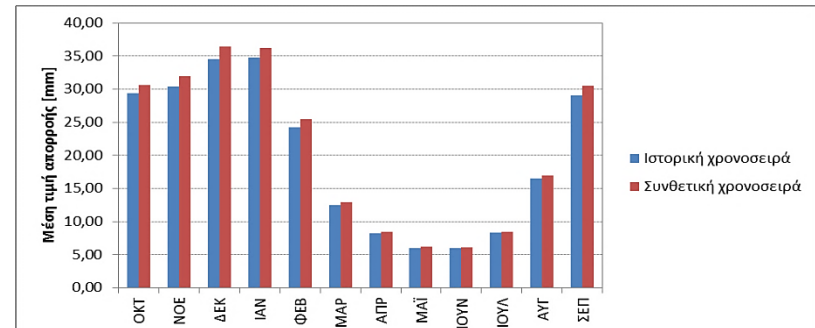
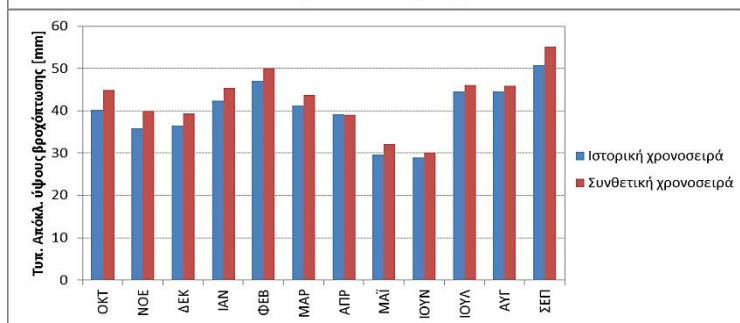
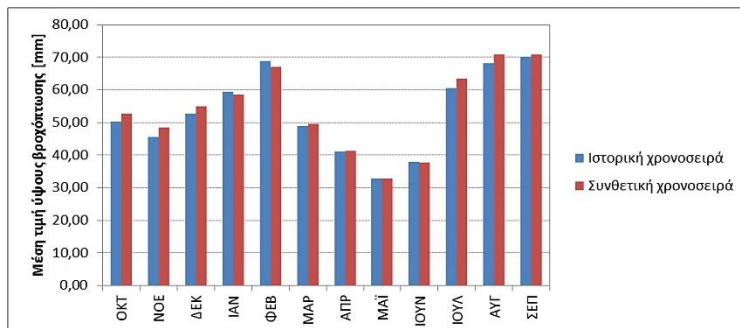
❑ Πολιτική ιεράρχησης στόχων κατά τη μοντελοποίηση:

- Σειρά προτεραιότητας (1) έχουν οι υδρευτικές ζητήσεις και οι ανάγκες ψύξης των ΑΗΣ.
- Σειρά προτεραιότητας (2) έχουν οι ενεργειακές παραγωγές των στροβίλων (δηλαδή των ΥΗΣ) και η διατήρηση της περιβαλλοντικής ροής.
- Σειρά προτεραιότητας (3) έχει η άρδευση και οι αρδευτικές ανάγκες εν γένει.

Προσομοίωση υδροσυστήματος Αλιάκμονα: Συνθετικές χρονοσειρές ως εισοδοί του μοντέλου

- ❑ Στόχος η αναπαραγωγή του ελάχιστου συνόλου των ουσιωδών στατιστικών παραμέτρων:
 - **Παράμετροι περιθώριων συναρτήσεων κατανομής:** Μέση τιμή, διασπορά, συντελεστής ασυμμετρίας.
 - **Παράμετροι από κοινού συναρτήσεων κατανομής:** Συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης και συντελεστές ετεροσυσχέτισης μηδενικής τάξης.

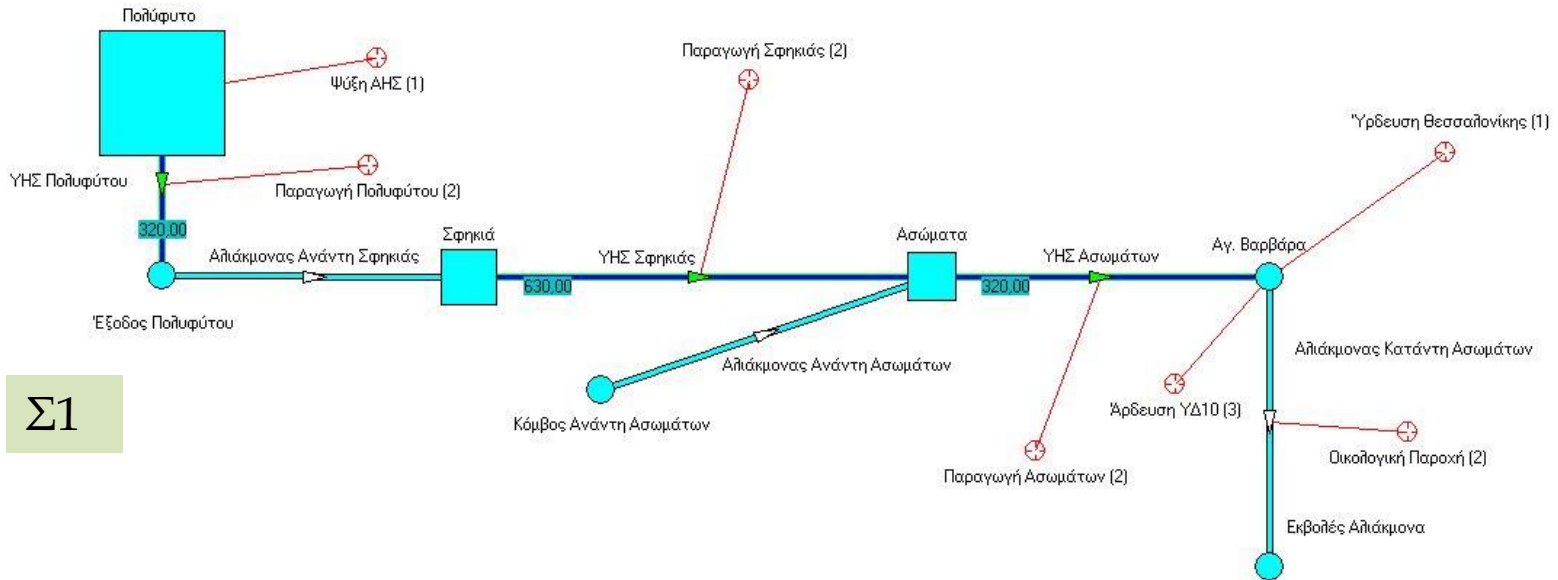
Εδώ εισαγάγαμε ταυτόχρονα στην Κασταλία τις χρονοσειρές βροχής και απορροής βασιζόμενοι στα ιστορικά δεδομένα του Πολυφύτου ώστε να αναπαράγουμε την ισχυρή ετεροσυσχέτισή τους. Παράγονται χρονοσειρές στατιστικά ισοδύναμες με τις ιστορικές, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η **χωρική (ετεροσυσχέτιση) και χρονική εξάρτηση (βραχυπρόθεσμη εμμονή)**, καθώς και η **στοχαστική δομή** των ιστορικών χρονοσειρών.



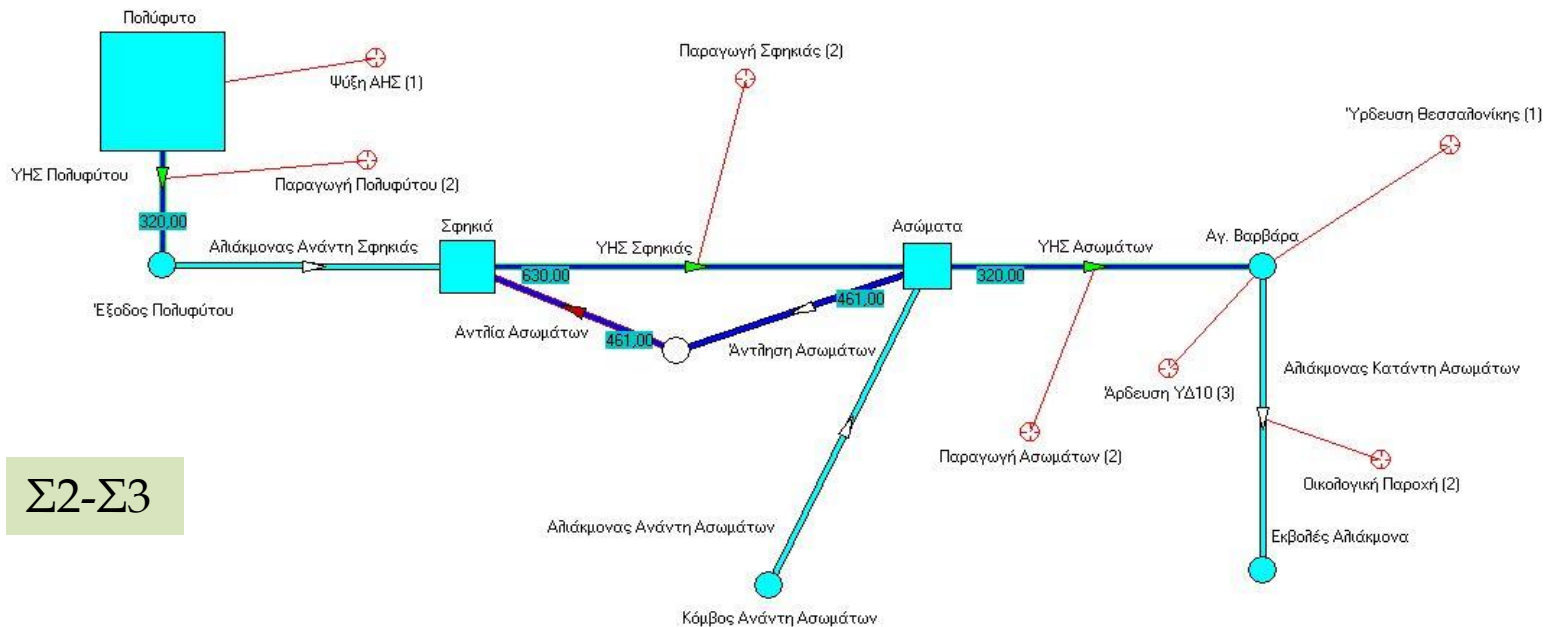
Προσομοίωση υδροσυστήματος Αλιάκμονα: Συναρτήσεις ενέργειας & Σενάρια Μελέτης

- Αν $E_i(t)$ είναι η ενέργεια που παράγεται από κάθε στρόβιλο, τότε η στοχαστική συνάρτηση θα είναι της μορφής $J(\theta) = \hat{a}(E_1(t), E_2(t), \dots, E_n(t))$ όπου a δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας. Χρησιμοποιήθηκαν δύο συναρτήσεις (Μπουζιώτας, 2012):
 - **Total Generated Firm Power:** Η συνολική πρωτεύουσα ενέργεια που μπορεί να αποδώσει το σύστημα. Εφαρμόζεται επί της συνολικής μηνιαίας χρονοσειράς. $J(\theta) = \hat{a}\left(\sum_{i=1}^n E_i(t)\right)$
 - **Sum of Generated Firm Power:** Το άθροισμα της πρωτεύουσας ενέργειας κάθε έργου. Εφαρμόζεται επί των επιμέρους μηνιαίων χρονοσειρών και μετά γίνεται άθροιση. $J(\theta) = \sum_{i=1}^n \hat{a}(E_i(t))$
- **Σενάρια Μελέτης:**
 - **Σενάριο Σ1:** Μοντελοποίηση του υδροσυστήματος του Αλιάκμονα χωρίς αντλητική διάταξη.
 - **Σενάριο Σ2:** Μοντελοποίηση του υδροσυστήματος Αλιάκμονα με την παρουσία αντλητικής διάταξης, αλλά απουσία στόχου (target) άντλησης. Διερεύνηση της *Sum of Generated Firm Power*.
 - **Σενάριο Σ3:** Μοντελοποίηση του υδροσυστήματος Αλιάκμονα με την παρουσία αντλητικής διάταξης, αλλά απουσία στόχου (target) άντλησης. Διερεύνηση της *Total Generated Firm Power*.
 - **Σενάριο Σ4:** Μοντελοποίηση του υδροσυστήματος Αλιάκμονα με την παρουσία αντλητικής διάταξης και ταυτόχρονη εισαγωγή στόχου άντλησης. Διερεύνηση της δυνατότητας εισαγωγής στόχου κατά την προσομοίωση και η επιρροή στην παραγόμενη ενέργεια.

Προσομοίωση υδροσυστήματος Αλιάκμονα: Σ1 & Σ2-Σ3

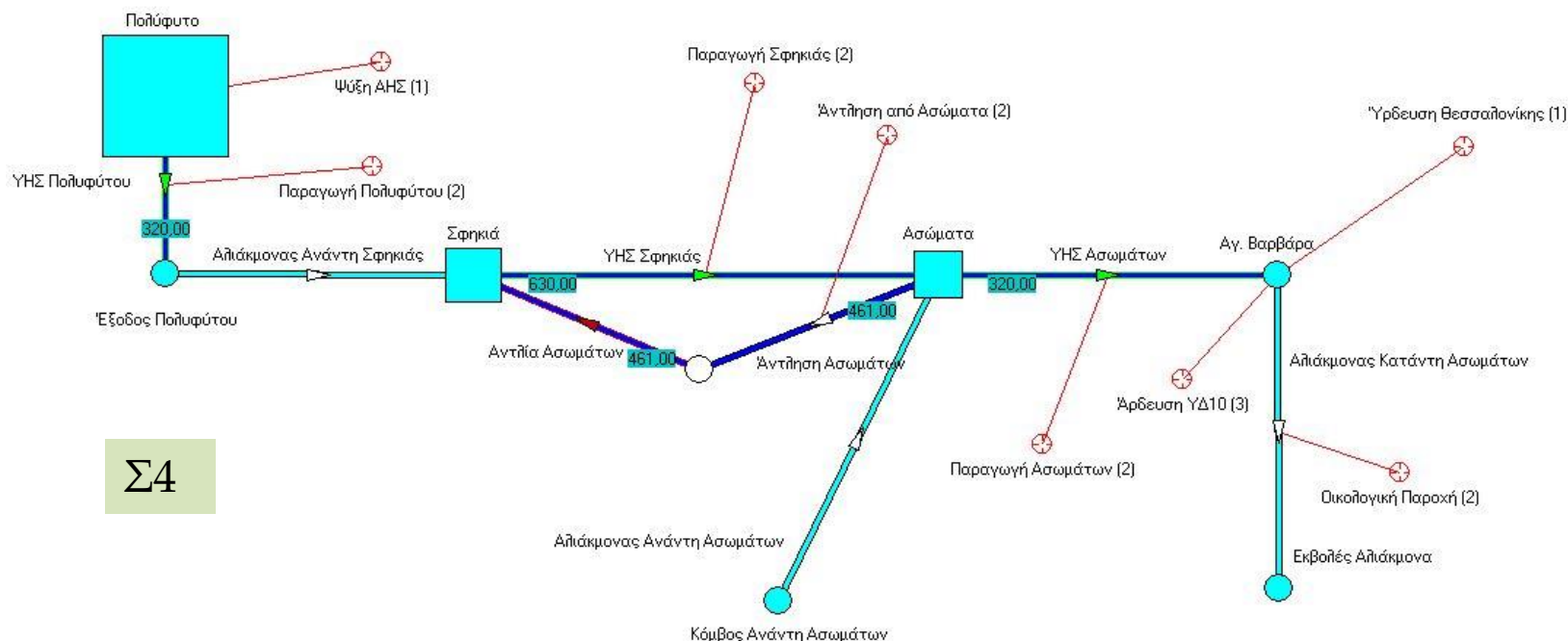


Σ1



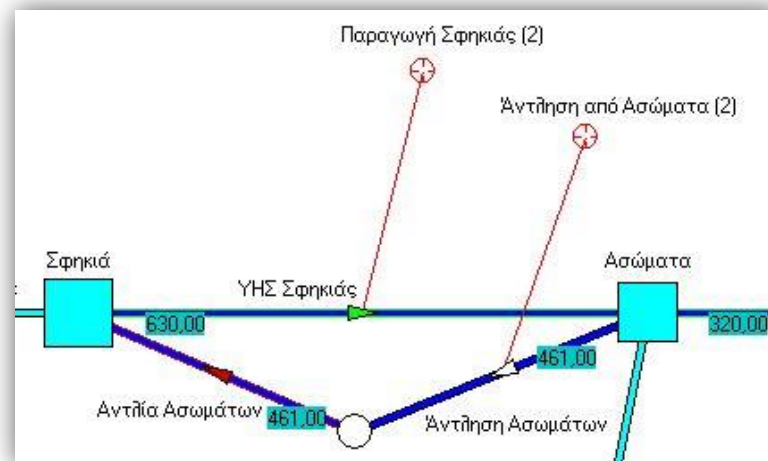
Σ2-Σ3

Προσομοίωση υδροσυστήματος Αλιάκμονα: Σ4

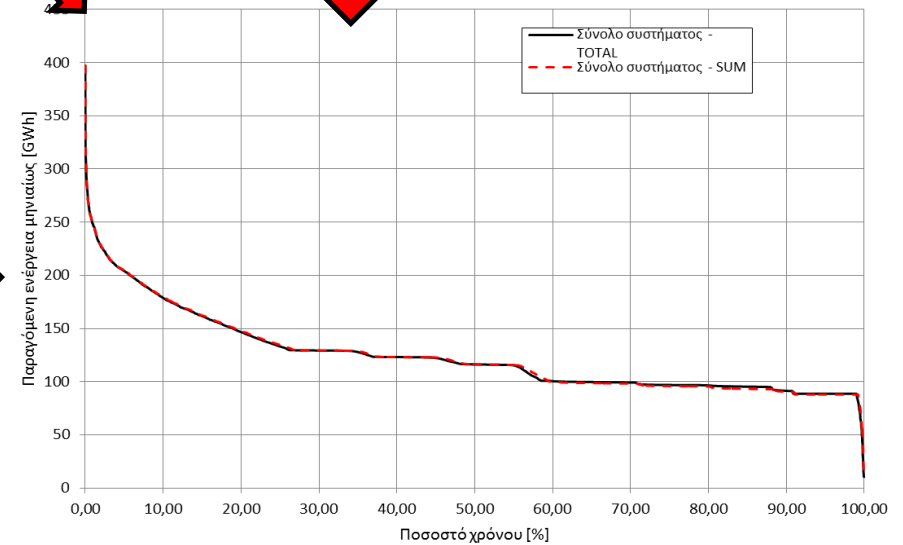
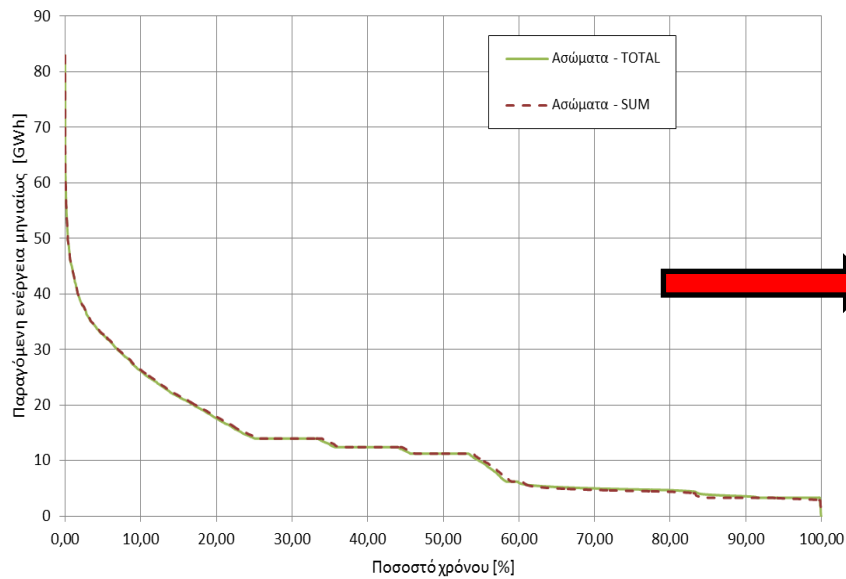
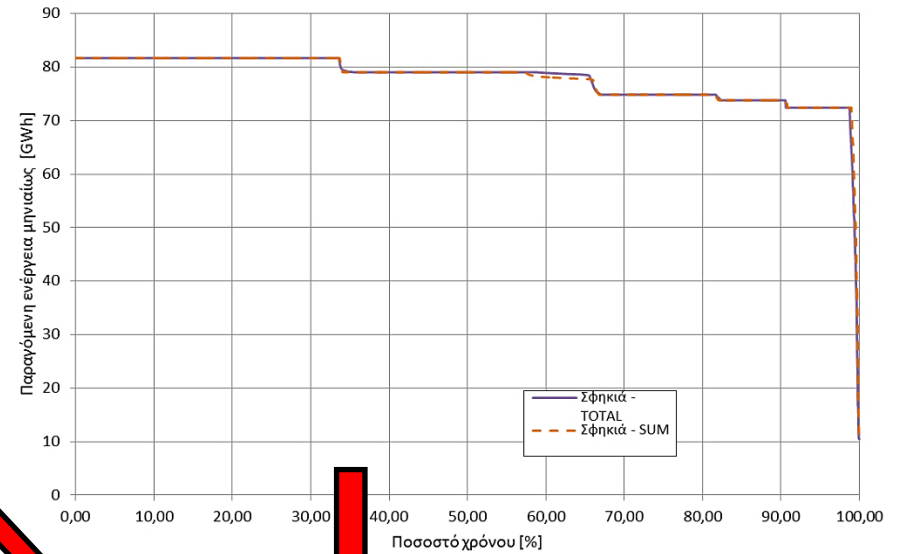
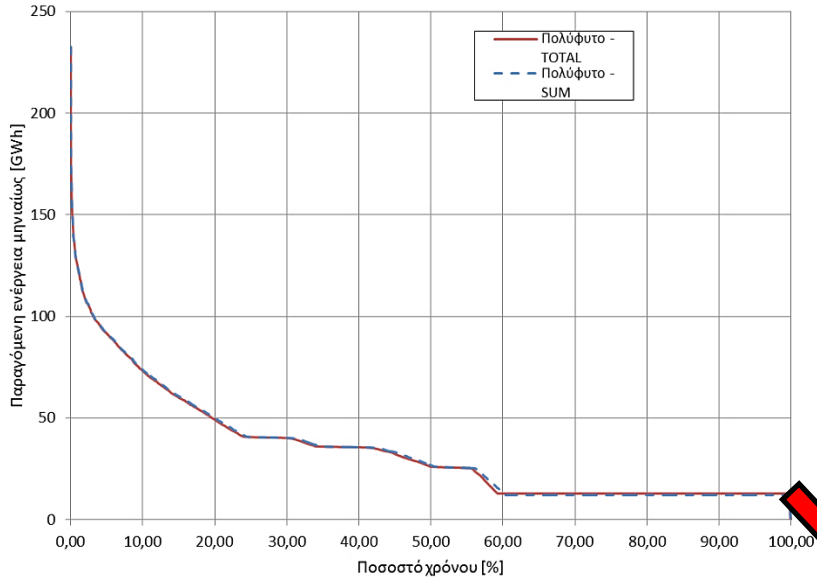


Σ4

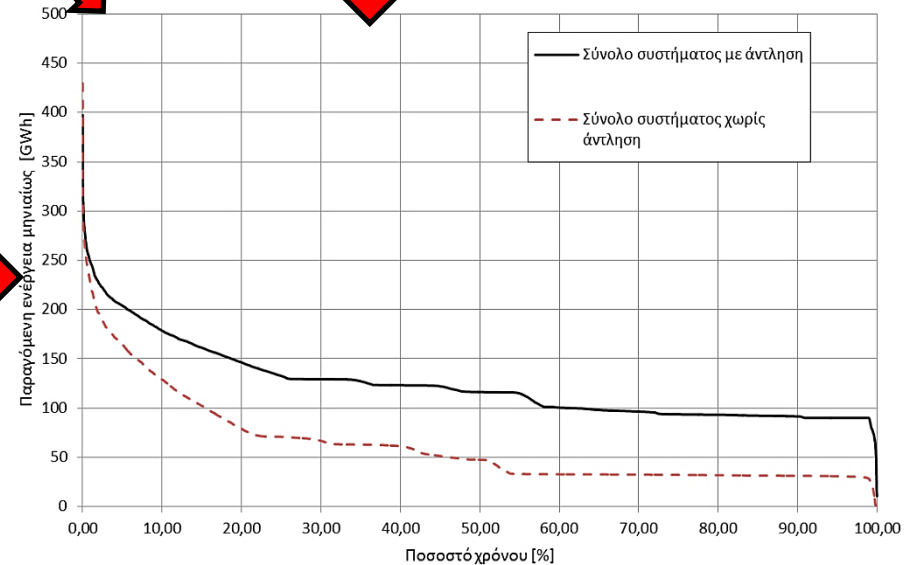
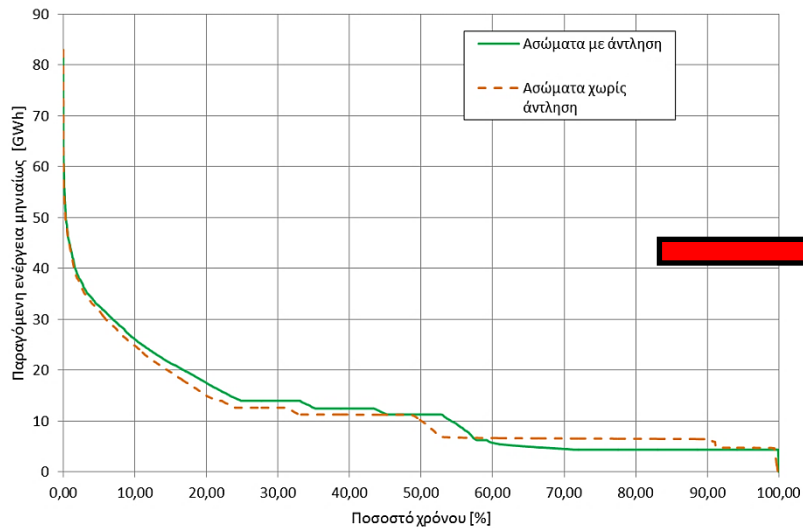
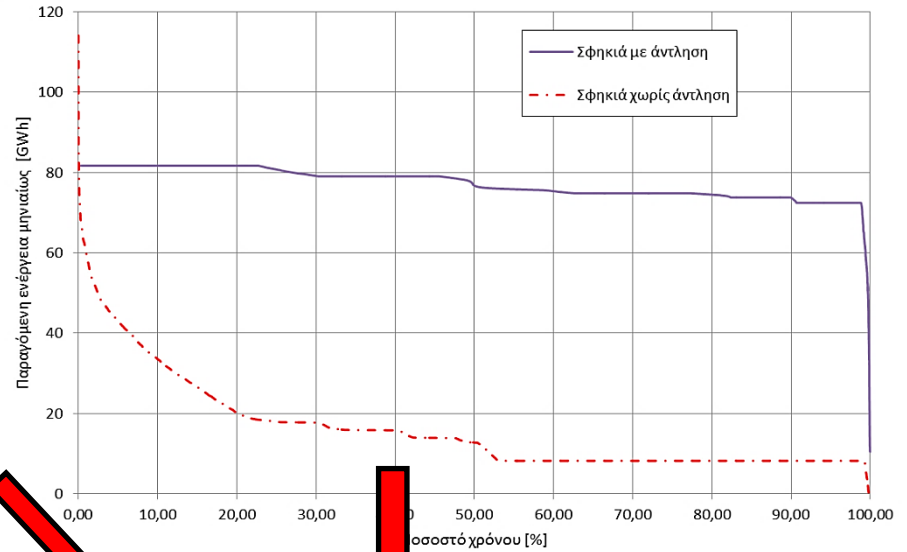
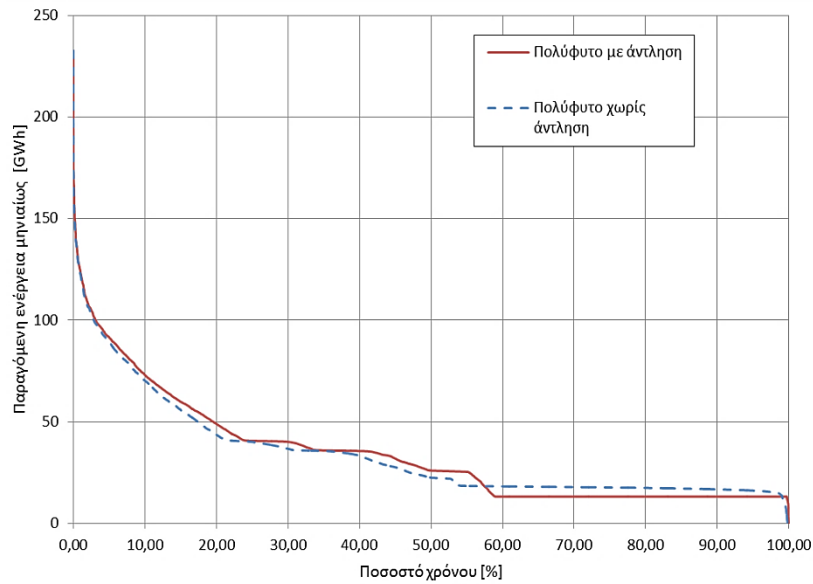
Στην περίπτωση της σχηματοποίησης του συστήματος άντλησης-ταμίευσης στον Υδρονομέα χρησιμοποιείται ένα ενδιάμεσος κόμβος και ένα υδραγωγείο με παροχετευτικότητα ίση με αυτή της αντλίας μιας και δεν υπάρχει δυνατότητα προσθήκης στόχου στη διάταξη αντλίας.



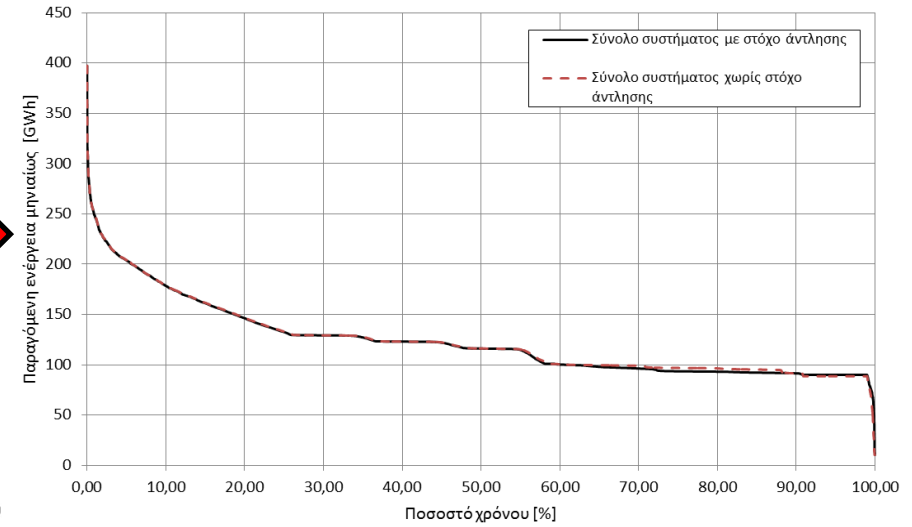
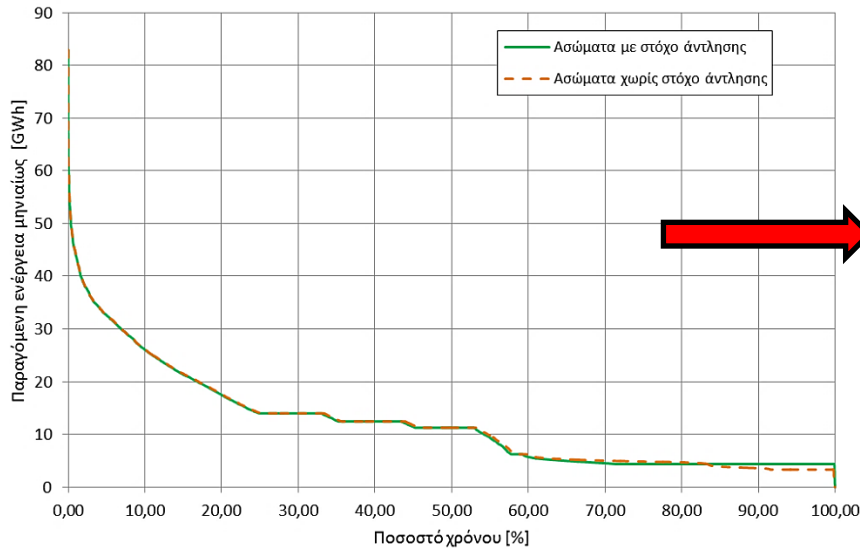
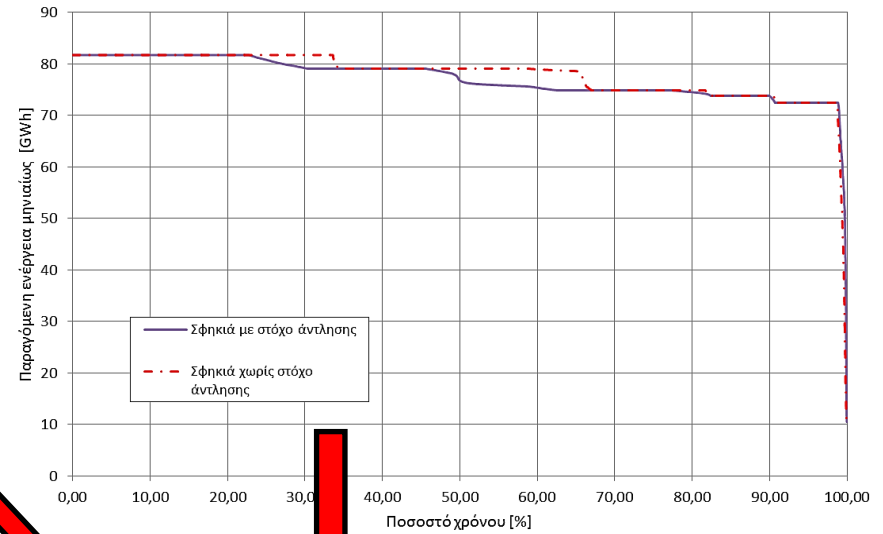
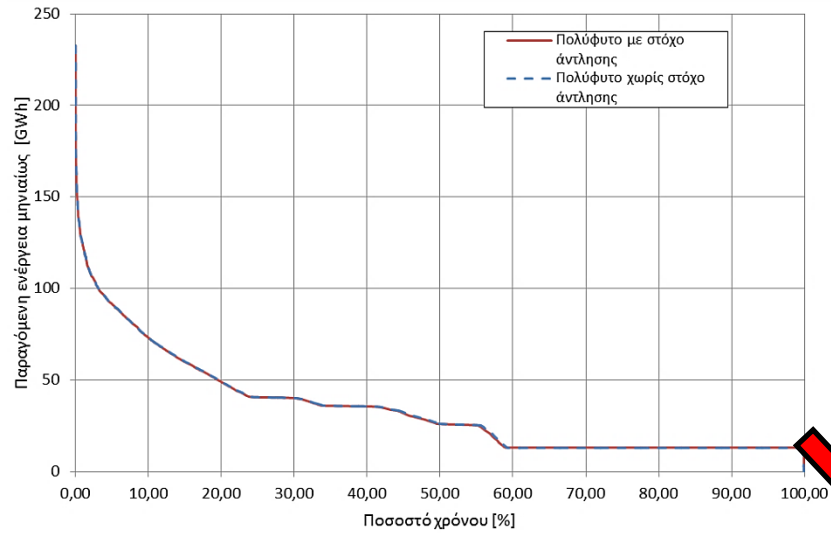
Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης : Σύγκριση Σ2-Σ3



Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης : Σύγκριση Σ1-Σ4



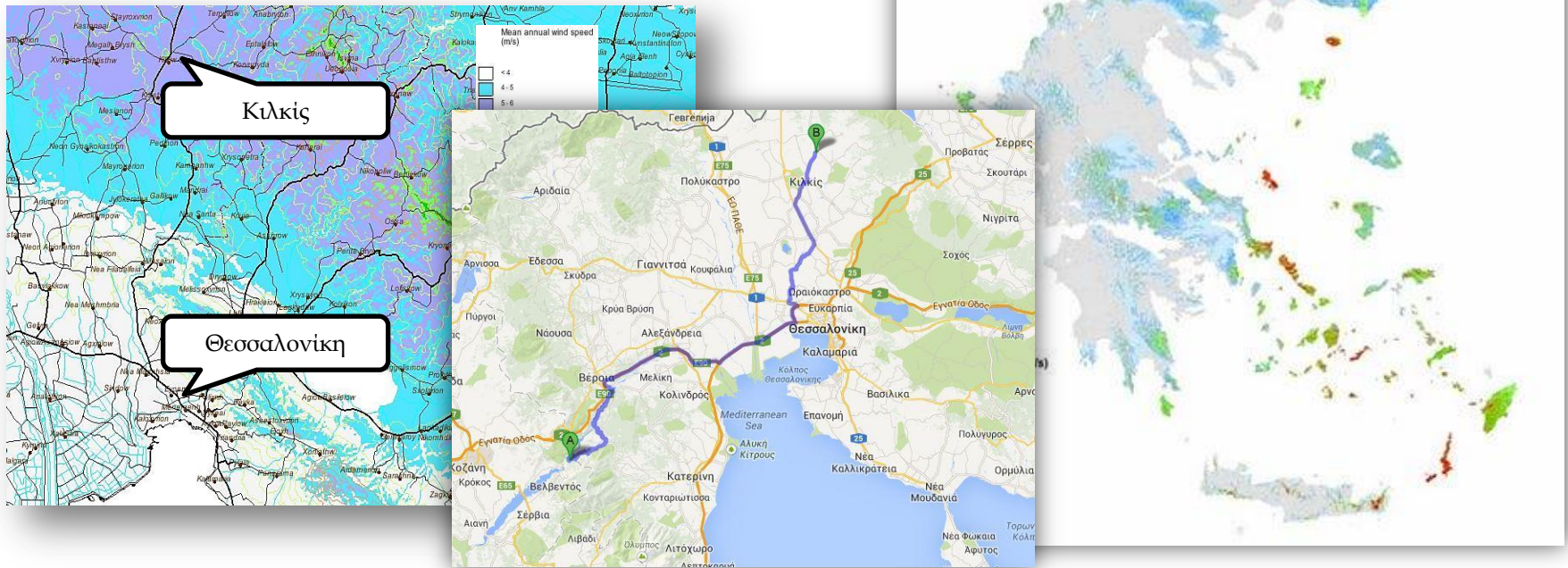
Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης : Σύγκριση Σ3-Σ4



Συμπεράσματα αποτελεσμάτων προσομοίωσης υδροσυστήματος

- ❑ Παρά τις μικρές διαφορές των δύο καμπυλών διαρκείας, παρατηρούμε πως η συνάρτηση **Total Generated Firm Power** οδηγεί σε **υψηλότερες τιμές ενεργειακής παραγωγής** του συστήματος για μεγάλα ποσοστά του χρόνου, οι οποίες έχουν και πρακτική χρησιμότητα εφόσον δίνουν μεγαλύτερη πρωτεύουσα ενέργεια.
- ❑ Η συνάρτηση Sum of Generated Firm Power δίνει μεγαλύτερη τιμή πρωτεύουσας ενέργειας από την Total Generated Firm Power μόνο για τον ΥΗΣ Σφηκιάς ενώ στα υπόλοιπα έργα (αλλά και στο σύνολο) η εικόνα είναι αντιδιαμετρική ,με την Total Generated Firm Power να δίνει μεγαλύτερες τιμές.
- ❑ Μια πολιτική **συνολικής διαχείρισης του υδροσυστήματος έχει πλεονεκτική θέση** έναντι της κατακερματισμένης.
- ❑ Η τεχνολογία άντλησης/ ταμίευσης προκαλεί σημαντική **αύξηση στην πρωτεύουσα ενέργεια και στην αξιοπιστία** με την οποία αυτή παράγεται.
- ❑ Για να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ απαιτείται η **εισαγωγή στόχου άντλησης**.
- ❑ Στα πλαίσια της **συγκεκριμένης εργασίας** όπου ενδιαφέρει ο σχεδιασμός του συστήματος ως σύνολο αξιοποιήθηκε η συνάρτηση **Total Generated Firm Power**.

Προσομοίωση αιολικής παραγωγής: Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου

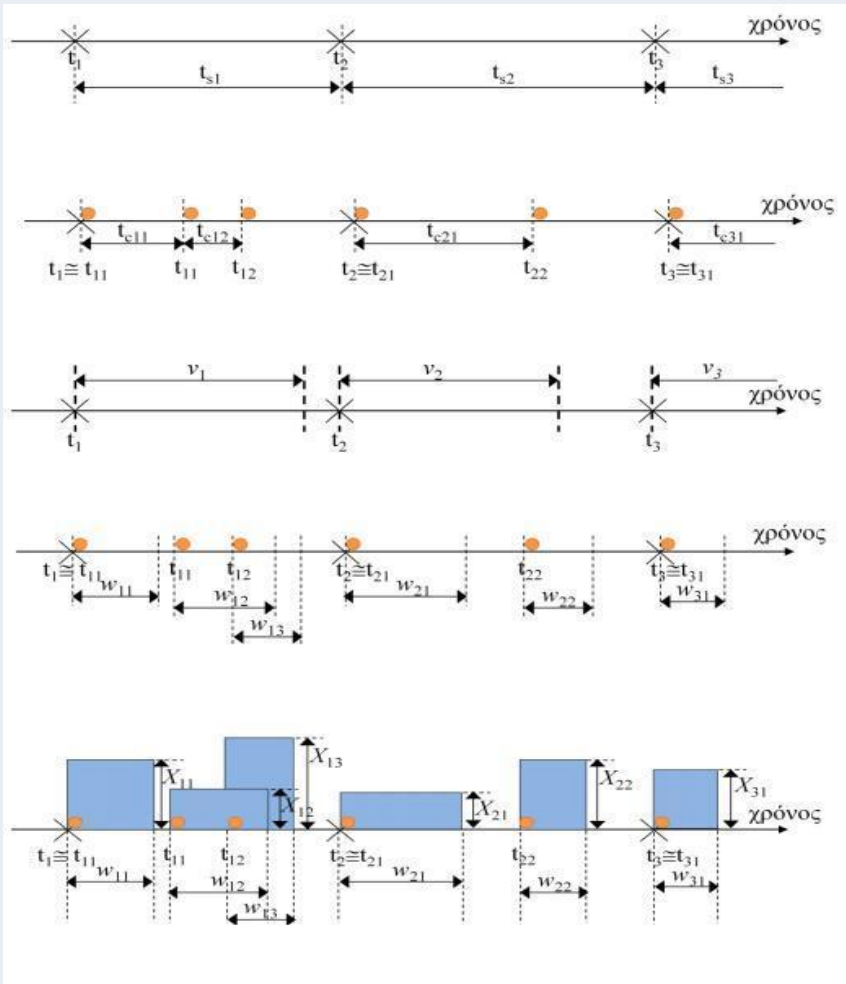


- ❑ Ιστορικά δεδομένα ταχυτήτων ανέμου από την περιοχή του Κιλκίς (καθώς η μέση ταχύτητα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 5,5-6 m/s).
- ❑ Υπολογισμός συνόλου παραγόμενης ενέργειας για τη χρονοσειρά δεκαλέπτου, αλλά και την ωριαία.
- ❑ Η διαφορά των δύο αθροισμάτων είναι αναντίστοιχη του υπολογιστικού φόρτου που απαιτείται για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών στην κλίμακα του δεκαλέπτου. Παράχθηκαν στην κλίμακα της ώρας.

Sum (10 minutes) [kWh]	34528516,431
Sum (Hour) [kWh]	29186649,753

Αθροίσματα ενέργειας δεκαλέπτου και ώρας.

Προσομοίωση αιολικής παραγωγής: Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου



Χρονικά σημεία έναρξης καταγίδων.

Χρονικά σημεία έναρξης παλμών.

Επιτρεπτά διαστήματα έναρξης παλμών.

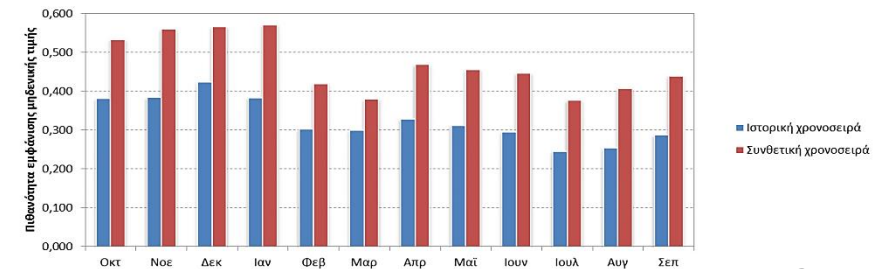
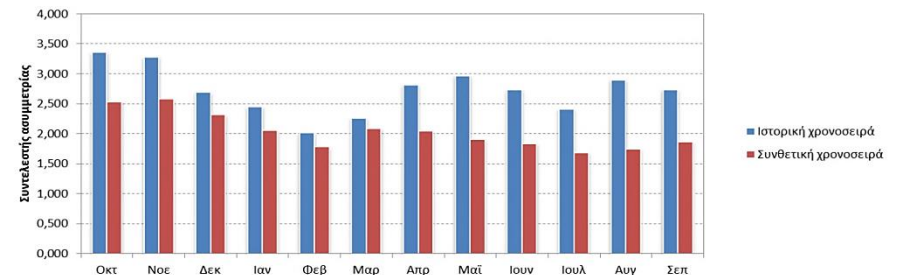
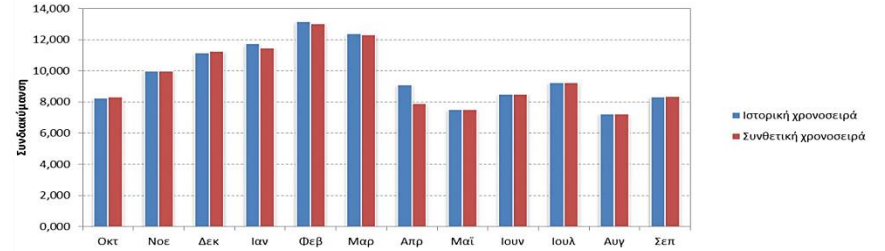
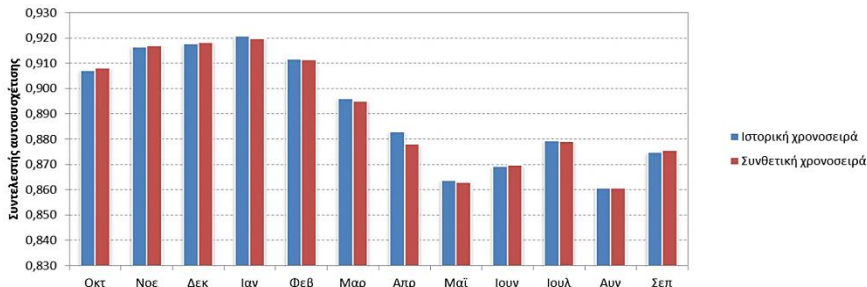
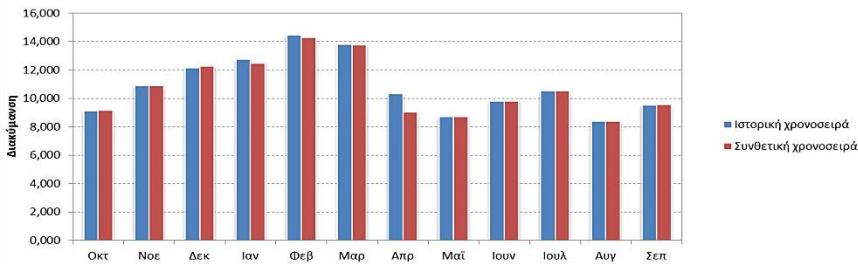
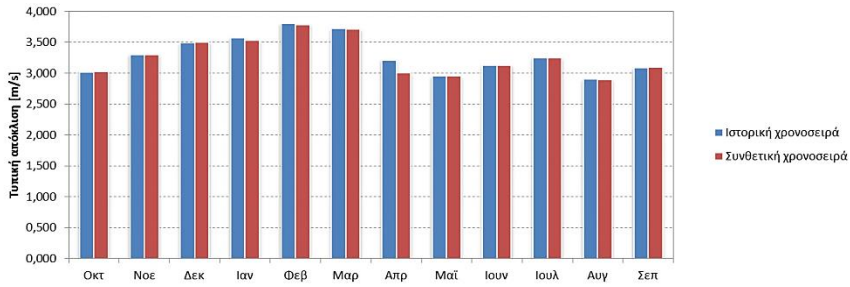
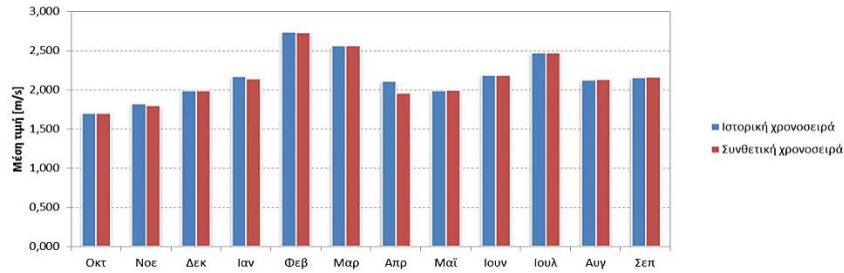
Διάρκειες παλμών.

Ύψος παλμών.

- Ζητούμενα του στοχαστικού μοντέλου:
 - Αναπαραγωγή της διαλείπουσας φύσης του ανέμου.
 - Έντονη δομική εξάρτηση των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών στις μικρές χρονικές κλίμακες (ωριαία εν προκειμένω).
- Χρήση του μοντέλου Bartlett - Lewis (Κοοσιέρης, 2011).
 - Τροποποίηση της έννοιας της πιθανότητας εμφάνισης μηδενικής τιμής (probability dry).
 - Θεωρώντας ότι η ανεμογεννήτρια παράγει για $u > 2\text{m/s}$, έχουμε $u^* = \max(u - 2, 0)$
 - Έχουμε την πιθανότητα εμφάνισης μη αξιοποιήσιμης ταχύτητας ανέμου (την οποία ονομάζουμε πάλι probability dry χωρίς βλάβη της γενικότητας).

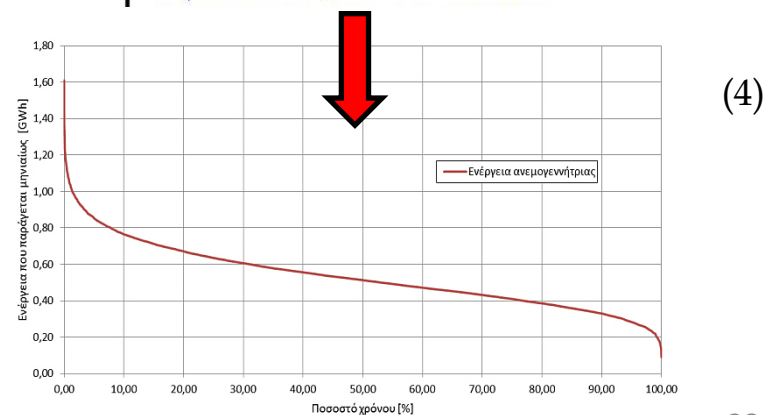
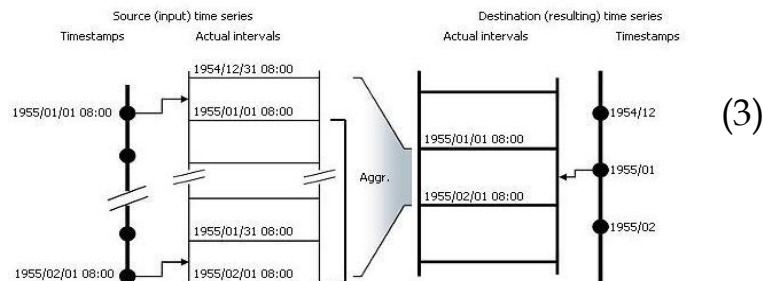
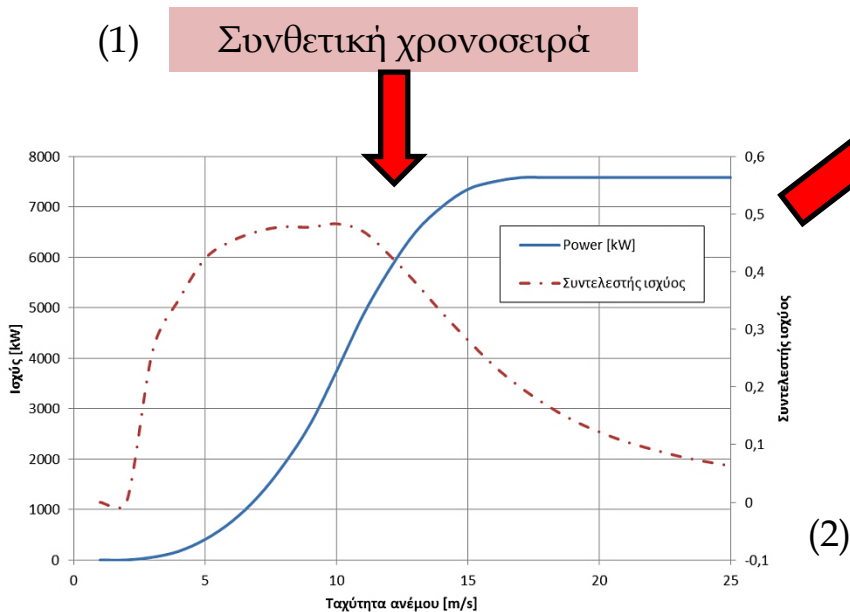
Προσομοίωση αιολικής παραγωγής: Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου

□ Αναπαραγωγή των ακόλουθων στατιστικών χαρακτηριστικών: Μέση τιμή, Τυπική απόκλιση, Διακύμανση, Συντελεστής αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης, Συνδιακύμανση, Συντελεστής ασυμμετρίας, Πιθανότητα εμφάνισης μηδενικής τιμής (probability dry).

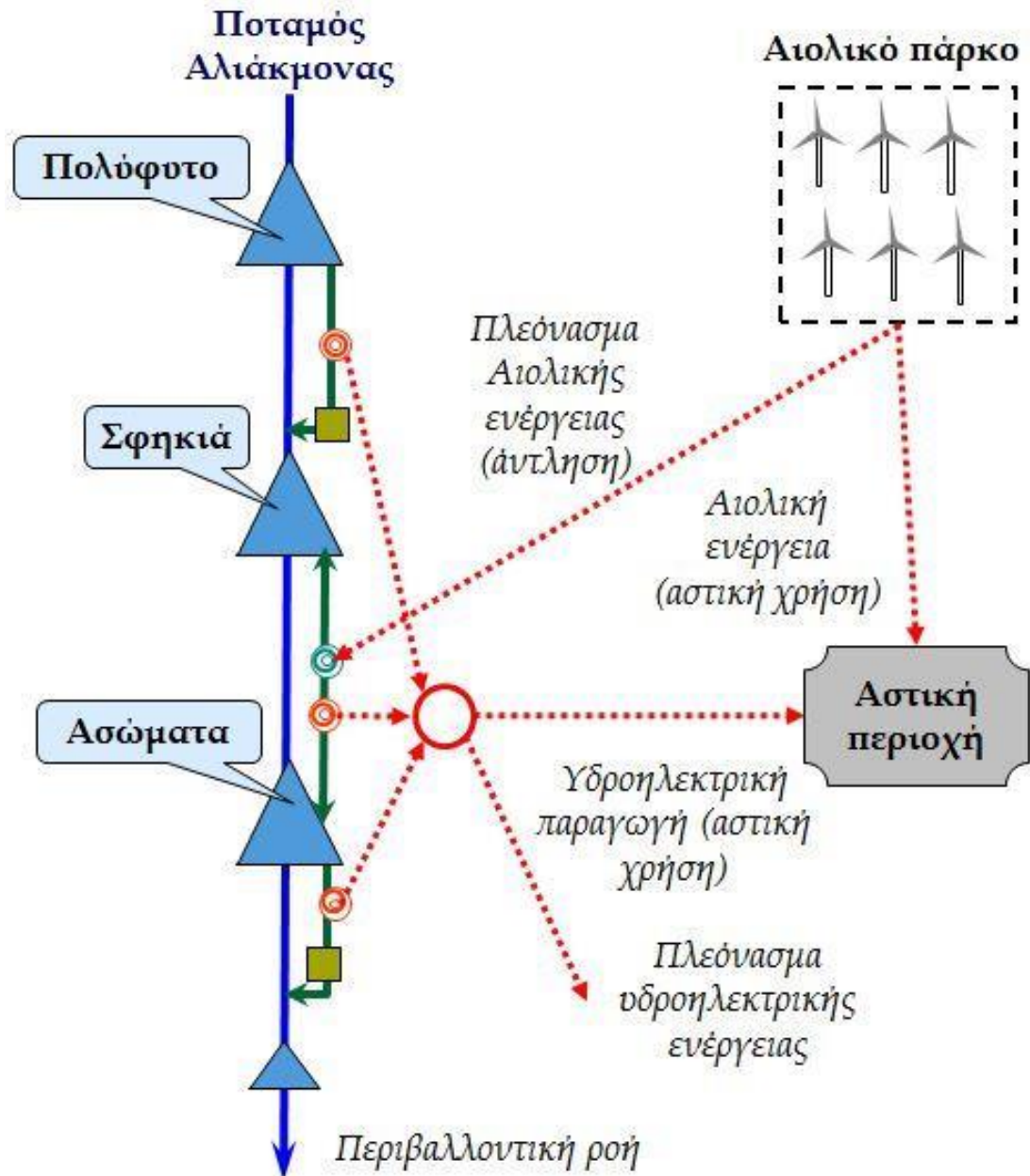


Προσομοίωση αιολικής παραγωγής: Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας και συνάθροιση στη μηνιαία κλίμακα

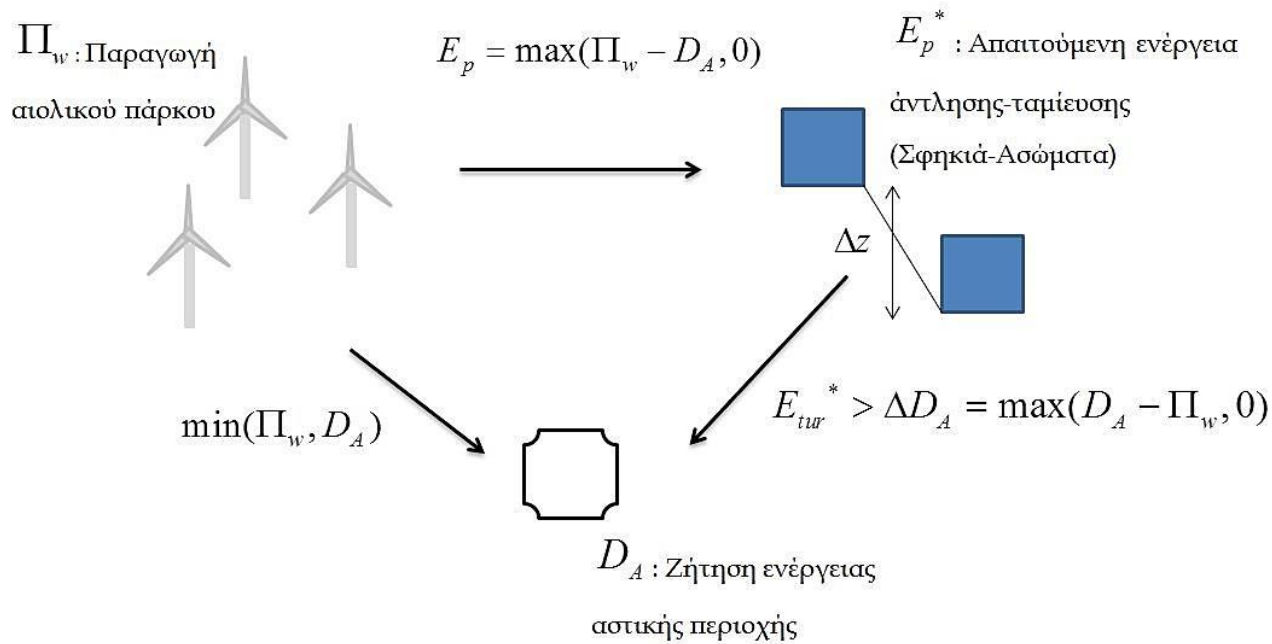
- ❑ Το μοντέλο αναπαράγει με ακρίβεια όλα τα στατιστικά χαρακτηριστικά εκτός συντελεστή ασυμμετρίας και πιθανότητα εμφάνισης μηδενικής τιμής.
- **Ασυμμετρία:** Η ιστορική χρονοσειρά εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές σε κάθε μήνα εξαιτίας της εγγενούς μεταβλητότητας και διακυμαινόμενης συμπεριφοράς των ταχυτήτων ανέμου στην πραγματικότητα σε σχέση με το μοντέλο.
- **Πιθανότητα εμφάνισης μηδενικής τιμής:** Για τους ίδιους λόγους με την ασυμμετρία, η συνθετική χρονοσειρά εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές.



Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος



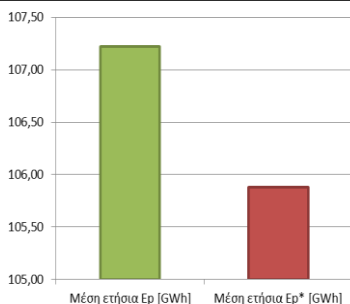
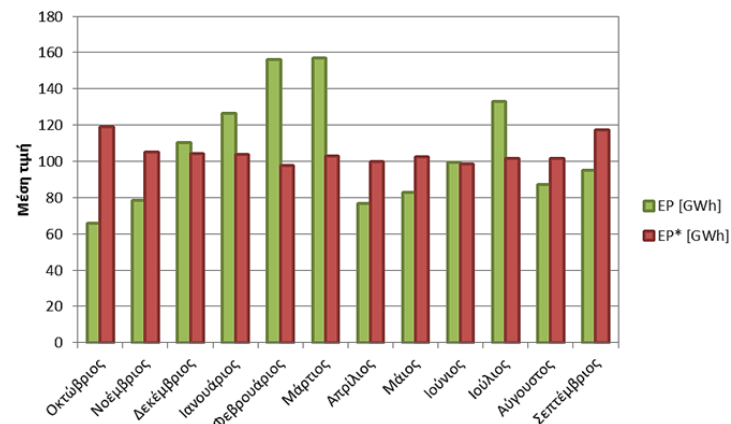
Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος: Αρχική θεώρηση



- ❑ Ζήτηση αστικής περιοχής $D_A = 150GWh$.
- ❑ Η μεθοδολογία σχεδιασμού έγκειται στην στατιστική σύγκριση των χρονοσειρών E_p και E_p^* ώστε να επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος άντλησης-ταμίευσης με ταυτόχρονη κάλυψη των ενδεχόμενων ελλειμμάτων (ΔD_A) από την υδροηλεκτρική παραγωγή του υδροσυστήματος Αλιάκμονα.
- ❑ Ως παράμετροι σχεδιασμού τίθενται:
 - Το ποσοστό διάρκειας άντλησης ψ_2 επί του συνολικού χρόνου της ημέρας.
 - Ο αριθμός των απαιτούμενων ανεμογεννητριών κάθε σεναρίου.

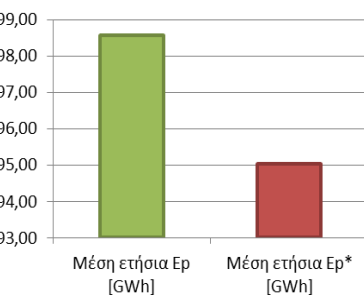
Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος: Αποτελέσματα αρχικής θεώρησης

Σενάριο	Ώρες άντλησης/ Ψ_2	Ώρες παραγωγής/ Ψ_1
A1	8,00h/0,33	16,00h/0,67
A2	12,00h/0,50	12,00h/0,50
A3	14,40h/0,60	9,60h/0,40
A4	16,00h/0,67	8,00h/0,33



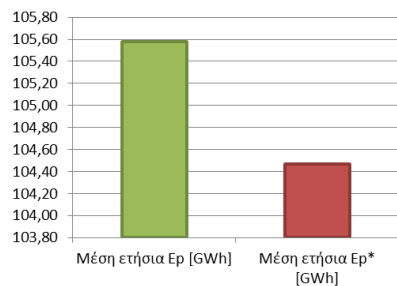
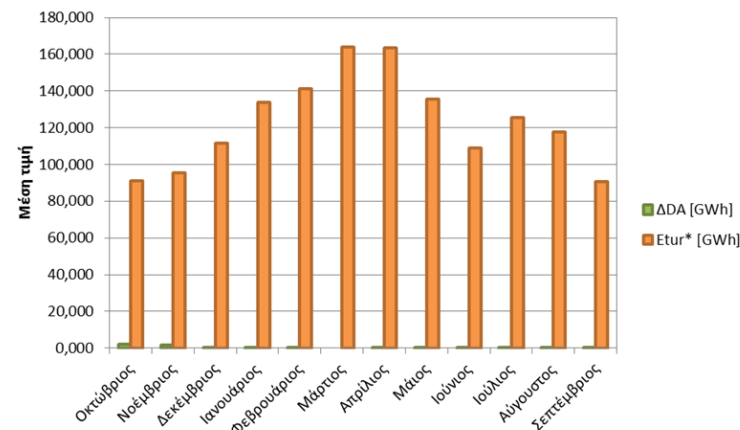
(A1)

Μέση ετήσια E_p [GWh]	107,22
Μέση ετήσια E_p^* [GWh]	105,88
Αρ. ανεμογεννητριών	890



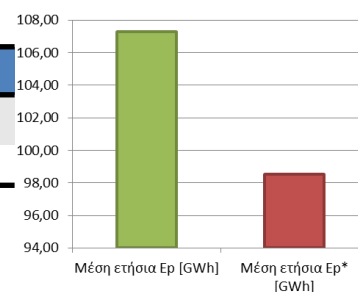
(A2)

Μέση ετήσια E_p [GWh]	98,58
Μέση ετήσια E_p^* [GWh]	95,03
Αρ. ανεμογεννητριών	650



(A3)

Μέση ετήσια E_p [GWh]	105,58
Μέση ετήσια E_p^* [GWh]	104,47
Αρ. ανεμογεννητριών	610



(A4)

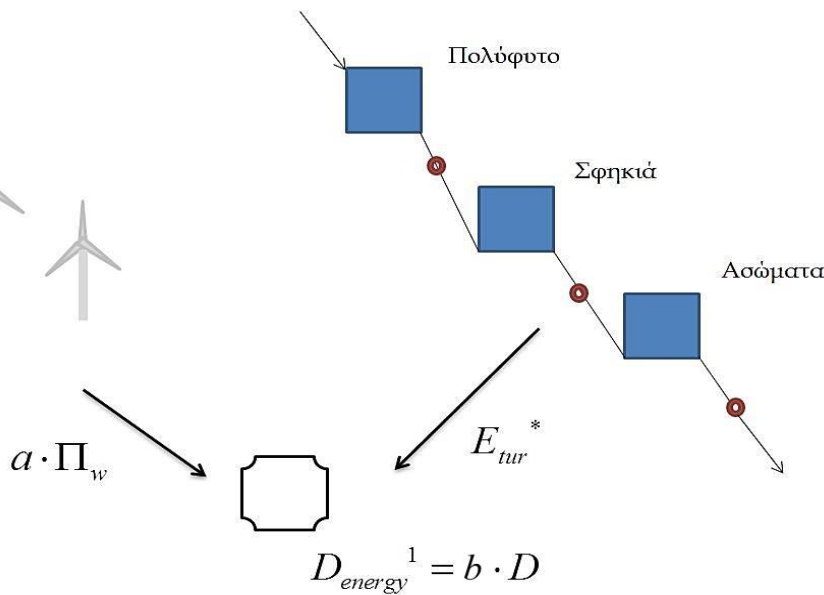
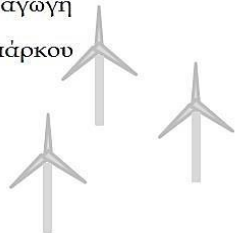
Μέση ετήσια E_p [GWh]	107,28
Μέση ετήσια E_p^* [GWh]	98,54
Αρ. ανεμογεννητριών	580

Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος: Τελική θεώρηση

- ❑ Στην αρχική θεώρηση:
 - Σε μέση ετήσια βάση, το περιθώριο λειτουργίας των αντλιών καλύπτεται. Στη μηνιαία κλίμακα, έχουμε **διαφορές στις μέσες τιμές** που οφείλονται στο γεγονός ότι **δεν έχουμε ορίσει μεταβλητούς στόχους**.
 - Το **Υ/Η σύστημα**, λόγω της κλίμακάς του, **παράγει σταθερή πρακτικά ενέργεια**. Συνεπώς, είναι **ευέλικτο** ώστε να **προσαρμόζει την παραγωγή/άντληση σε μικρότερες χρονικές κλίμακες**.
- ❑ Στο αναβαθμισμένο πλαίσιο σχεδιασμού **θεωρούμε δύο περιόδους λειτουργίας** (ώρες λειτουργίας στροβίλων και ώρες λειτουργίας αντλίας). Οι **παράμετροι σχεδιασμού** είναι:
 - Το ποσοστό λειτουργίας των στροβίλων, α
 - Το ποσοστό της ζήτησης των ωρών της ημέρας, b , ως ποσοστό της μέσης ημερήσιας ζήτησης.
 - Τη μέση ημερήσια ζήτηση, D
 - Τον αριθμό των ανεμογεννητριών, n
- ❑ Επιλέγουμε την κατάσταση τεσσάρων σεναρίων. Για κάθε σενάριο **παρουσιάζονται τα εξής αποτελέσματα**:
 - Η μέση μηνιαία E_{total} για την πρώτη περίοδο λειτουργίας.
 - Η μέση μηνιαία D_{energy}^1 για την πρώτη περίοδο λειτουργίας.
 - Η μέση μηνιαία E_{total} για την δεύτερη περίοδο λειτουργίας.
 - Η μέση μηνιαία D_{energy}^2 για την δεύτερη περίοδο λειτουργίας.
 - Οι πιθανότητες αστοχίας του συνδυασμένου συστήματος P_1 , P_2 .
 - Το μέσο έλλειμμα κάθε περιόδου $AvDef_1$ και $AvDef_2$.

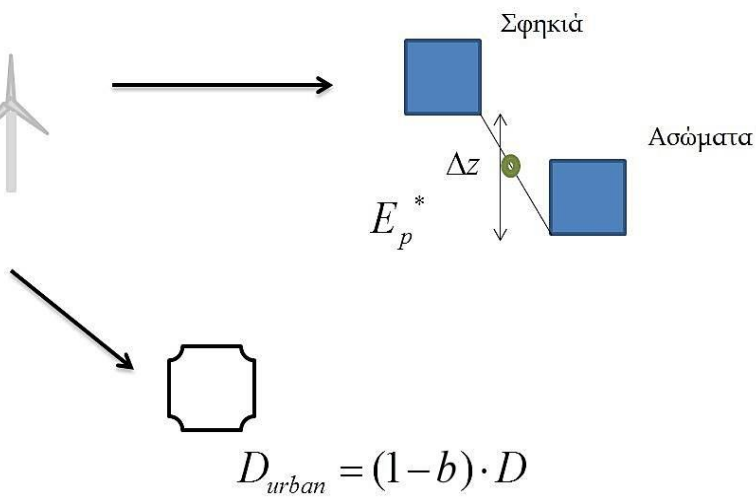
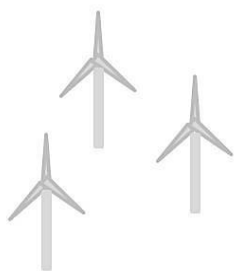
Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος: Τελική θεώρηση

Π_w : Παραγωγή αιολικού πάρκου



Σχηματοποίηση πρώτης περιόδου

$$E_{total} = (1 - a) \cdot \Pi_w$$



Σχηματοποίηση δεύτερης περιόδου

Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος: Αποτελέσματα τελικής θεώρησης

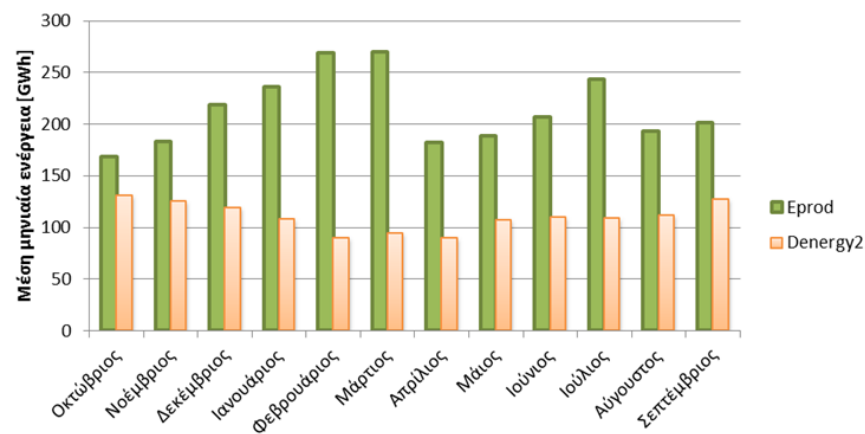
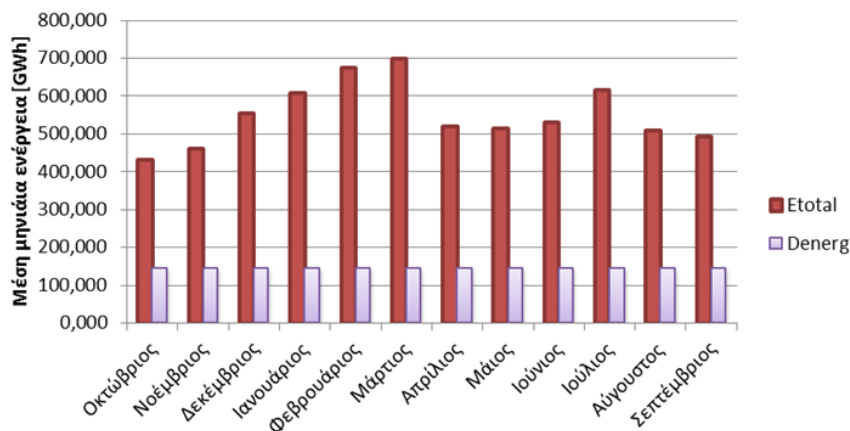
Υ1

Σενάριο	Παράμετρος α	Παράμετρος β	Αρ. ανεμογεννητριών n
Υ1	0,67	0,97	1200
Υ2	0,50	0,87	800
Υ3	0,40	0,87	750
Υ4	0,33	0,81	720

a	0,67	
b	0,97	
D [GWh]	145,5	150
Ζήτηση	1η περίοδος	Ημερήσια

Αρ. Α/Γ	1200
AvDef1	0,00
AvDef2	-1,45
Sum	1,45

p1	0,00%
p2	6,48%
Sum	6,48%



Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος: Αποτελέσματα τελικής θεώρησης

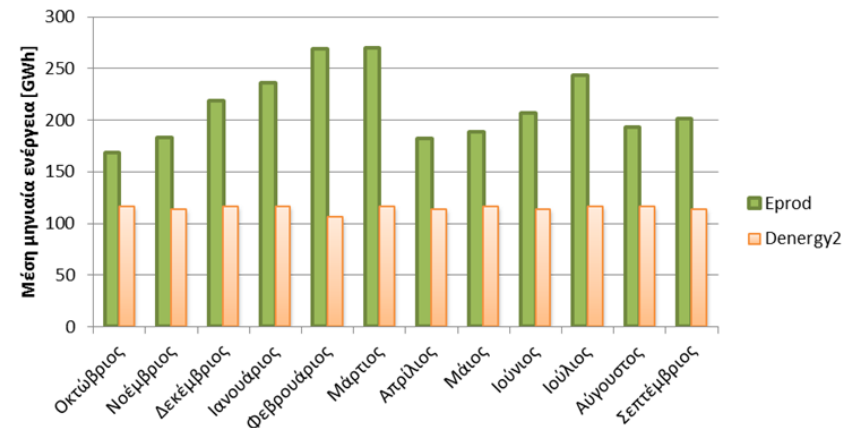
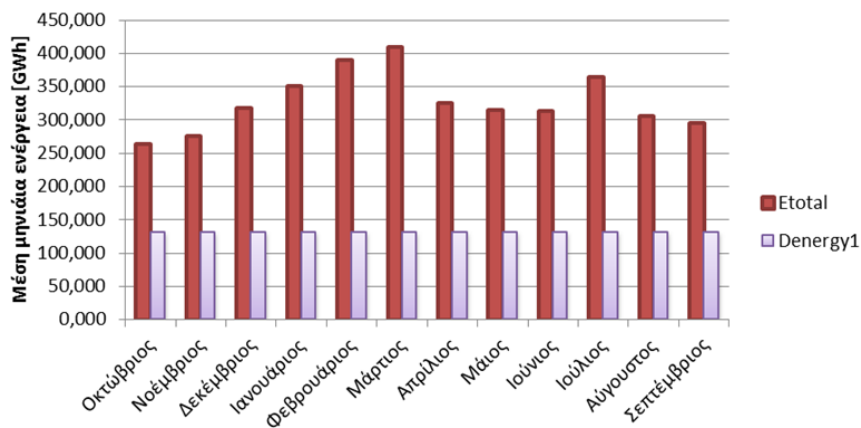
Υ2

Σενάριο	Παράμετρος α	Παράμετρος b	Αρ. ανεμογεννητριών n
Υ1	0,67	0,97	1200
Υ2	0,50	0,87	800
Υ3	0,40	0,87	750
Υ4	0,33	0,81	720

a	0,50	
b	0,87	
D [GWh]	130,3918761	150
Ζήτηση	1η περίοδος	Ημερήσια

Αρ. Α/Γ	800
AvDef1	0,00
AvDef2	-0,95
Sum	0,95

p1	0,00%
p2	5,44%
Sum	5,44%



Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος: Αποτελέσματα τελικής θεώρησης

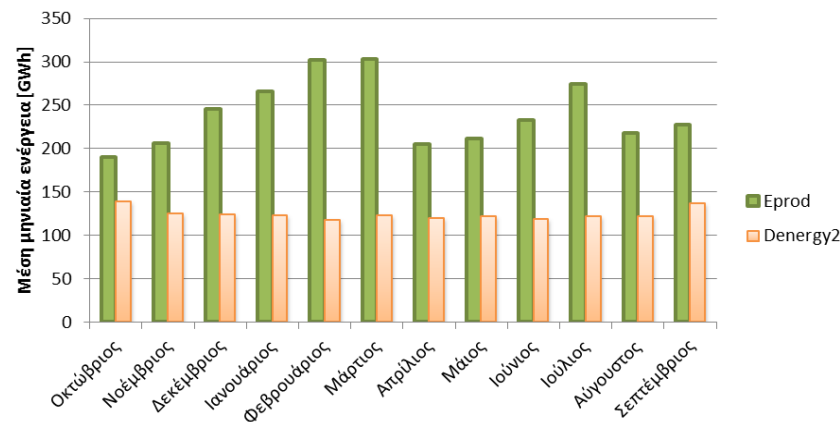
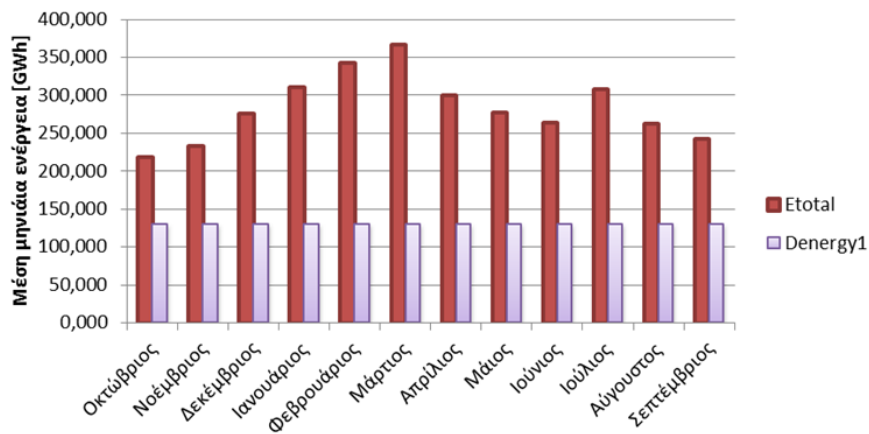
Υ3

Σενάριο	Παράμετρος α	Παράμετρος b	Αρ. ανεμογεννητριών n
Υ1	0,67	0,97	1200
Υ2	0,50	0,87	800
Υ3	0,40	0,87	750
Υ4	0,33	0,81	720

a	0,40	
b	0,87	
D [GWh]	130,0203809	150
Ζήτηση	1η περίοδος	Ημερήσια

Αρ. Α/Γ	750
AvDef1	0,00
AvDef2	-1,05
Sum	1,05

p1	0,05%
p2	4,96%
Sum	5,01%



Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος: Αποτελέσματα τελικής θεώρησης

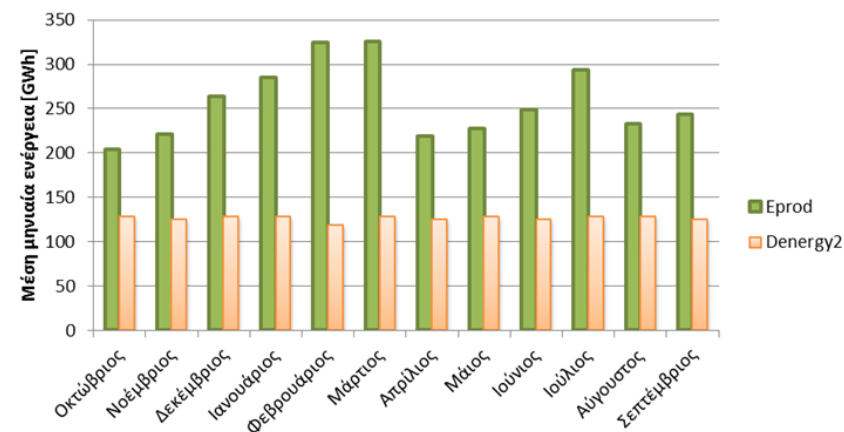
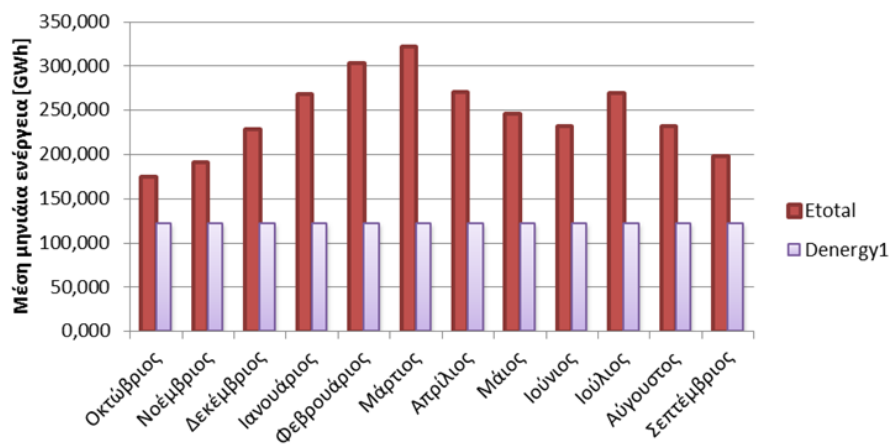
Υ4

Σενάριο	Παράμετρος α	Παράμετρος β	Αρ. ανεμογεννητριών n
Υ1	0,67	0,97	1200
Υ2	0,50	0,87	800
Υ3	0,40	0,87	750
Υ4	0,33	0,81	720

a	0,33	
b	0,81	
D [GWh]	122,1050484	150
Ζήτηση	1η περίοδος	Ημερήσια

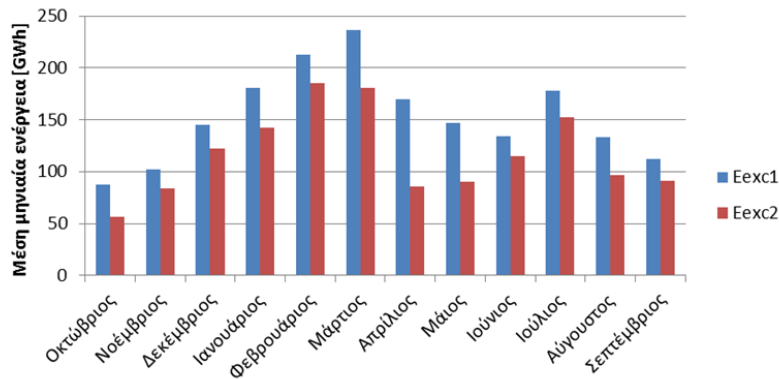
Αρ. Α/Γ	720
AvDef1	-0,03
AvDef2	-0,63
Sum	0,66

p1	0,45%
p2	3,39%
Sum	3,84%

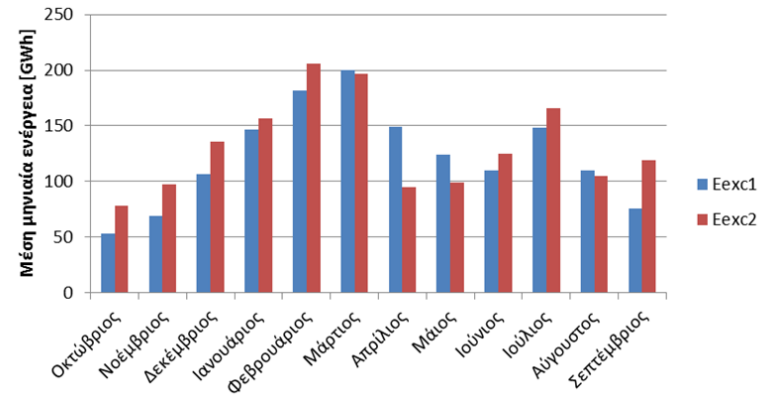


Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος: Σχολιασμός

- ❑ Με την μείωση του ποσοστού λειτουργίας των στροβίλων μπορεί ταυτόχρονα να αυξάνεται η ζήτηση της 2ης περιόδου λειτουργίας με ταυτόχρονη μείωση του απαιτούμενου αριθμού των ανεμογεννητριών.
- ❑ Η αύξηση του αριθμού των ανεμογεννητριών σε σχέση με την πρώτη θεώρηση σχεδιασμού είναι **εύλογη** μιας και διατηρείται σταθερή η ζήτηση της αστικής περιοχής.
- ❑ Αξιοποιείται με **αποδοτικότερο τρόπο** η ενέργεια που παράγεται από τους στροβίλους του υδροσυστήματος.
- ❑ Έχουμε **περίσσεια ενέργειας πολύ μικρότερη** και με καλύτερη μηνιαία κατανομή συγκριτικά με την αρχική μεθοδολογία σχεδιασμού.



Y3



Y4

Συμπεράσματα

- ❑ Η συνάρτηση -συνιστώσα του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ- **Total Generated Firm Power** οδηγεί σε **υψηλότερες τιμές ενεργειακής παραγωγής του συστήματος για μεγάλα ποσοστά του χρόνου**, οι οποίες έχουν και πρακτική χρησιμότητα εφόσον δίνουν μεγαλύτερη πρωτεύουσα ενέργεια.
- ❑ Η **μοντελοποίηση της άντλησης/ταμίευσης** μέσω προσθήκης στόχου άντλησης στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ υποστηρίζει την **τεκμηρίωση της αξιοπιστίας της τεχνολογίας αυτής για την αποθήκευση ενέργειας και τη διεύθυνση των ΑΠΕ** σε μεγάλη κλίμακα.
- ❑ Το μοντέλο **Bartlett-Lewis** (λογισμικό HYETOS-R) δίνει τη δυνατότητα αναπαραγωγής **όλων των στατιστικών χαρακτηριστικών της ιστορικής χρονοσειράς ταχυτήτων ανέμου με ακρίβεια**. Μόνη εξαίρεση ο συντελεστής ασυμμετρίας και η πιθανότητα εμφάνισης μηδενικής τιμής.
- ❑ Το τελικό μεθοδολογικό πλαίσιο σχεδιασμού (δύο περίοδοι λειτουργίας) εξυπηρετεί με καλύτερο τρόπο την αξιοποίηση με **αποδοτικότερο τρόπο της ενέργειας που παράγεται από τους στροβίλους του υδροσυστήματος**.

Προτάσεις περαιτέρω μελέτης

- ❑ Επέκταση του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ που θα περιλαμβάνει τη **δυνατότητα υποστήριξης αποφάσεων και προσομοίωσης υβριδικών συστημάτων** (π.χ. σύστημα αιολικής-υδροηλεκτρικής-ηλιακής ενέργειας).
- ❑ Ανάπτυξη μοντέλων στοχαστικής προσομοίωσης ανέμου στις **λεπτές χρονικές κλίμακες** που θα αναπαράγουν **πιστότερα τη διαλείπουσα συμπεριφορά και την ασυμμετρία**.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- Dimas, P., Bouziotas, D., Efstratiadis, A., & Koutsoyiannis, D. (2013). *A stochastic simulation framework for planning and management of combined hydropower and wind energy systems*. 5th EGU Leonardo Conference – Hydrofractals 2013 – STAHY '13, Kos Island, Greece, European Geosciences Union, International Association of Hydrological Sciences, International Union of Geodesy and Geophysics.
- Efstratiadis, A. (2012). *The necessity for large-scale hybrid renewable energy systems*. EGU Leonardo Topical Conference Series on the Hydrological Cycle 2012 “HYDROLOGY AND SOCIETY”, 14–16 November 2012, Torino, Italy.
- Koutsoyiannis, D. (2011). *Scale of water resources development and sustainability: small is beautiful, large is great*. Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques, 56(4) 2011, Special issue: Water Crisis: From Conflict to Cooperation.
- Mandelbrot, B. (1965). *Une classe de processus stochastiques homothétiques a soi: application à la loi climatologique de H. E. Hurst*. Paris: C. R. Acad. Sci.
- Ευστρατιάδης, Α., & Κουτσογιάννης, Δ. (2004). *Κασταλία (έκδοση 2.0) - Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών*. Αθήνα: Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, 103 σελίδες.
- Κοσσιέρης, Π. (2011). *Ανάπτυξη υπολογιστικού συστήματος για τον μονοδιάστατο στοχαστικό επιμερισμό ημερήσιων βροχοπτώσεων σε ωριαίες*. Διπλωματική εργασία, Αθήνα: ΕΜΠ.
- Τσουκαλάς, Ι. (2012). *Βελτιστοποίηση υδροσυστήματος με την χρήση εξελικτικών αλγορίθμων: Η περίπτωση του Νέστου*. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Αθήνα ΕΜΠ.

Ευχαριστώ για την προσοχή σας