

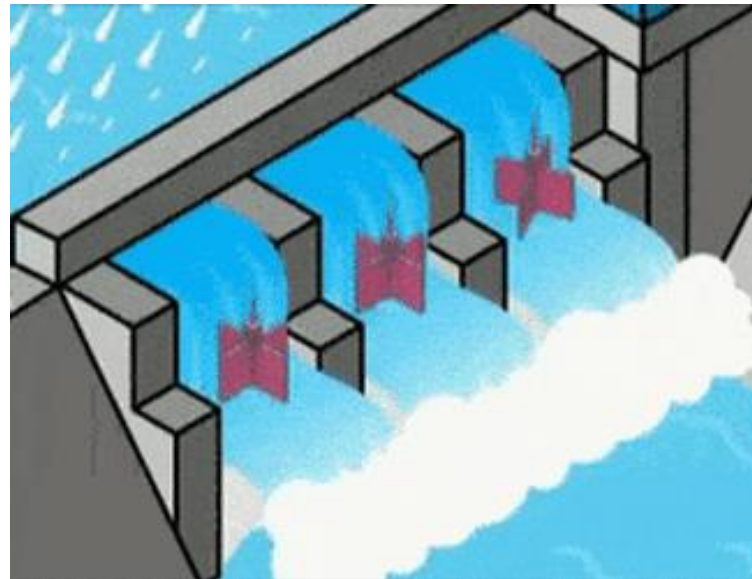


**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΠΜΣ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Προσαρμογή μεθοδολογικού πλαισίου  
παραμετροποίηση - προσομοίωση - βελτιστοποίηση σε  
συστήματα υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων:  
Υπολογιστικές προκλήσεις, νέοι κανόνες λειτουργίας και  
υλοποίηση στο λογισμικό Υδρονομέας 2020

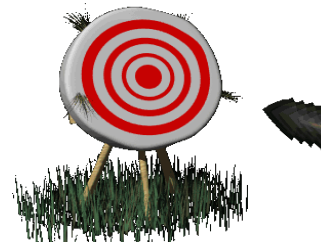
*Σταυρούλα Μανούρη*



Αθήνα, Ιούλιος 2020

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης,  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

# Στόχος εργασίας



Διαχείριση υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων για κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης του συστήματος

Πρόβλημα παραμετροποίησης – προσομοίωσης – βελτιστοποίησης

Χρονικό βήμα προσομοίωσης

Περιορισμοί συστήματος

Χρήση κατάλληλων κανόνων λειτουργίας

Ανάπτυξη *μοντέλου διγράφου* για προσομοίωση ροών ενέργειας συστημάτων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων κάθε τοπολογίας, με ενσωμάτωση **καινοτόμου κανόνα λειτουργίας**, στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση των παραγόμενων ποσοτήτων ενέργειας.

Ένταξη στον Υδρονομέα 2020

# Ιδιαιτερότητες υδροηλεκτρικής ενέργειας – Αδυναμίες λογισμικού Υδρονομέας

Ιδιαιτερότητες παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με καταναλωτικές χρήσεις νερού

Η υδροηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί από πολλές πηγές και να μεταφερθεί παντού.

Σε αντίθεση με το νερό, στην ενέργεια υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής πέραν της ζήτησης (δευτερεύουσα) για αποφυγή υπερχειλίσεων.

Στην περίπτωση ταμιευτήρων σε σειρά υπάρχει η δυνατότητα από μια δεδομένη ποσότητα νερού να παραχθεί πολλές φορές ενέργεια.

Ο βέλτιστος τρόπος διαχείρισης συστημάτων ΥΗΕ απαιτεί μια πιο σύνθετη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη όλες τις παραπάνω ιδιαιτερότητες.

Αδυναμίες μεθοδολογικού πλαισίου λογισμικού Υδρονομέας

Εστιασμένο στις καταναλωτικές ζητήσεις και σε κανόνες λειτουργίας που εκφράζουν αποθέματα-στόχους συναρτήσει της συνολικής ζήτησης

Παραμετροποίηση στόχων παραγωγής ενέργειας με χρήση σταθερών ποσοστών παραγωγής από κάθε ταμιευτήρα για την κάλυψη της συνολικής ζήτησης του συστήματος

Μη δυνατότητα αναπροσαρμογής των επιμέρους στόχων ενέργειας, σε περίπτωση αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης ή παραγωγής δευτερεύουσας ενέργειας σε κάποιο επιμέρους έργο

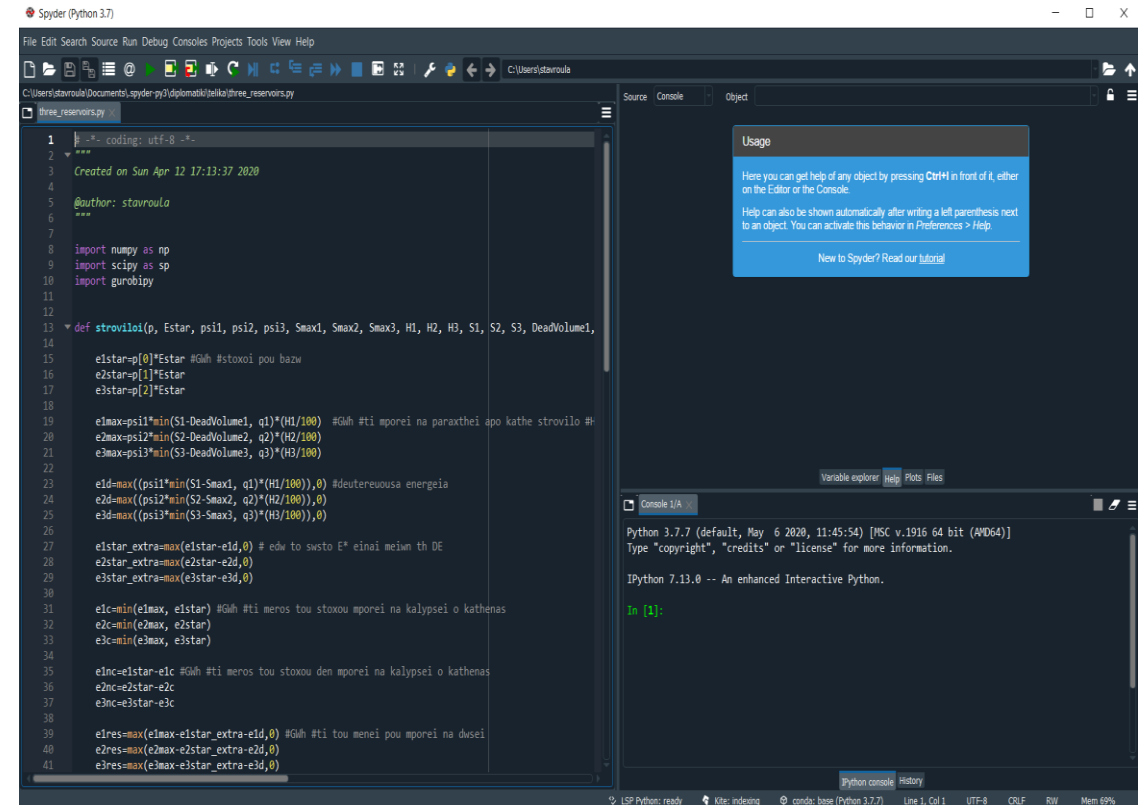


Δημιουργία μοντέλου διγράφου

# Μοντέλο διγράφου



- Προσομοίωση υδατικού ισοζυγίου ταμειυτήρα
- Πρόβλημα μεταφόρτωσης - Θεωρία γράφων
- Κωδικοποίηση μοντέλου διγράφου σε περιβάλλον Python (ενσωμάτωση νέου κανόνα λειτουργίας)
- Δοκιμή μοντέλου σε διαφορετικές περιπτώσεις υποθετικών συστημάτων δύο και τριών παράλληλων ταμειυτήρων για έλεγχο
- Εφαρμογή μοντέλου σε πραγματικά συστήματα



Εικόνα 1: Περιβάλλον ανάπτυξης μοντέλου διγράφου σε γλώσσα Python

# Περιγραφή μοντέλου διγράφου

- Κόμβοι:**
1. Ταμιευτήρας 1, **T1**
  2. Ταμιευτήρας 2, **T2**
  3. Κόμβος ολικής ζήτησης, **Z**
  4. Σωρευτικός κόμβος, **X**

**Κλάδοι:** 1<sup>η</sup> κατηγορία: επιπλέον ποσότητα ενέργειας, πέραν της δευτερεύουσας, που πρέπει να παραχθεί από κάθε έναν ταμιευτήρα, προκειμένου να καλύψει τον στόχο ζήτησής του

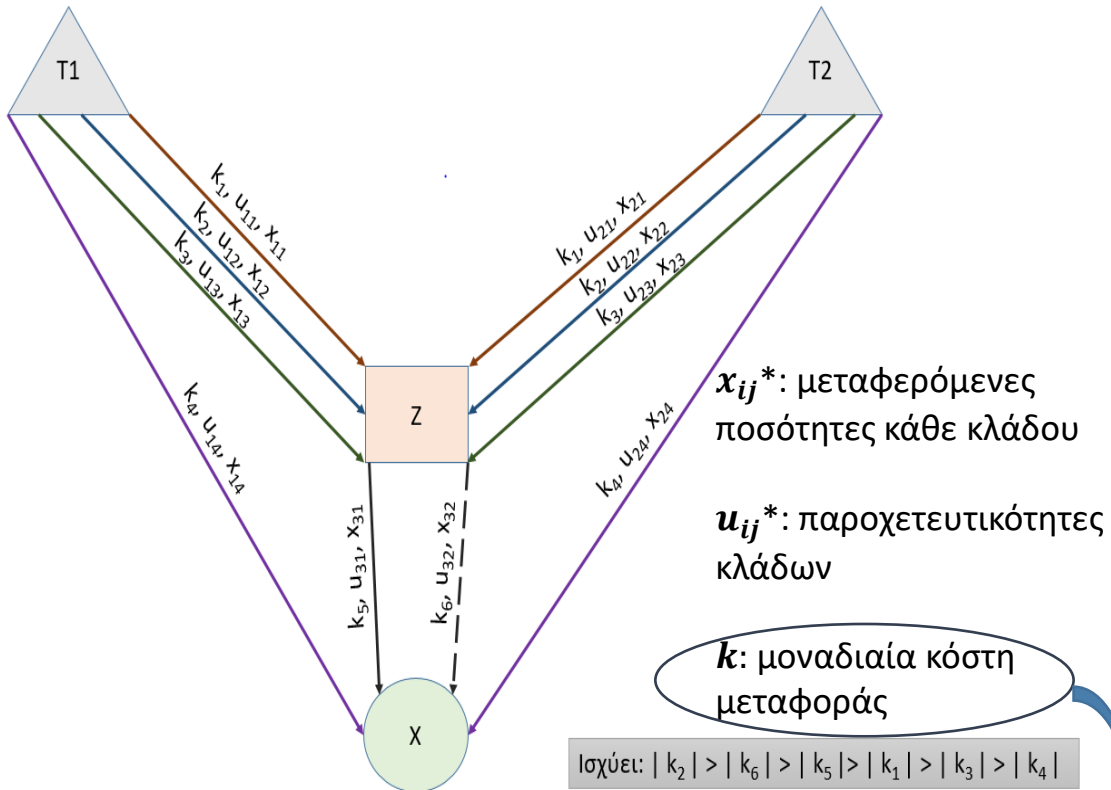
2<sup>η</sup> κατηγορία: ποσότητα δευτερεύουσας ενέργειας που μπορεί να παραχθεί στον ταμιευτήρα, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερχειλίσιή του

3<sup>η</sup> κατηγορία: περισσευούμενη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάλυψη των ελλειμμάτων του συστήματος

4<sup>η</sup> κατηγορία: αποθήκευση του πλεονάζοντος υδροδυναμικού κάθε ταμιευτήρα, δηλαδή προσφορά ενέργειας που δεν αξιοποιείται από το σύστημα

**Z → X**: Ο ένας κλάδος (*μαύρη συνεχής γραμμή*) μεταφέρει τις ροές μέχρι τη ποσότητα ενέργειας που είναι ίση με τη συνολική ζήτηση του συστήματος, ενώ ο άλλος κλάδος (*μαύρη διακεκομμένη γραμμή*) μεταφέρει την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται πέραν του ολικού στόχου του συστήματος.

**\*(ij)**: το *i* εκφράζει τον αριθμό του κόμβου από τον οποίο ξεκινάει ο κλάδος και το *j* την κατηγορία σύνδεσης του κόμβου εκκίνησης με άλλους κόμβους του δικτύου



Εικόνα 2: Μοντέλο διγράφου σε δύο παράλληλους ταμιευτήρες

**Πρόβλημα:**  
Ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς

Θετικό: Μη επιθυμητή ή απαγορευτική μεταφορά, εκφράζει ποινή

Αρνητικό: Αναγκαία μεταφορά, επιθυμητή η πραγματοποίησή της

Μηδέν: Αδιάφορη μεταφορά

# Εφαρμογή μοντέλου σε υποθετικά συστήματα παράλληλων ταμιευτήρων

## Δεδομένα

### 2 παράλληλοι ταμιευτήρες

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά δύο παράλληλων ταμιευτήρων

Χαρακτηριστικά	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Ειδική ενέργεια στροβίλου, $\psi_i$ (GWh/hm <sup>4</sup> )	0.25	0.22
Μέγιστη χωρητικότητα, $S_{max_i}$ (hm <sup>3</sup> )	376.00	202.00
Ύψος πτώσης, $H_i$ (m)	580.00	68.00
Νεκρός όγκος, $Vd_i$ (hm <sup>3</sup> )	87.00	34.00
Παροχετευτικότητα αγωγού προσαγωγής, $q_i$ (hm <sup>3</sup> )	70.00	65.00
Συνολικός στόχος ενέργειας, $E^*$ (GWh)	22.00	

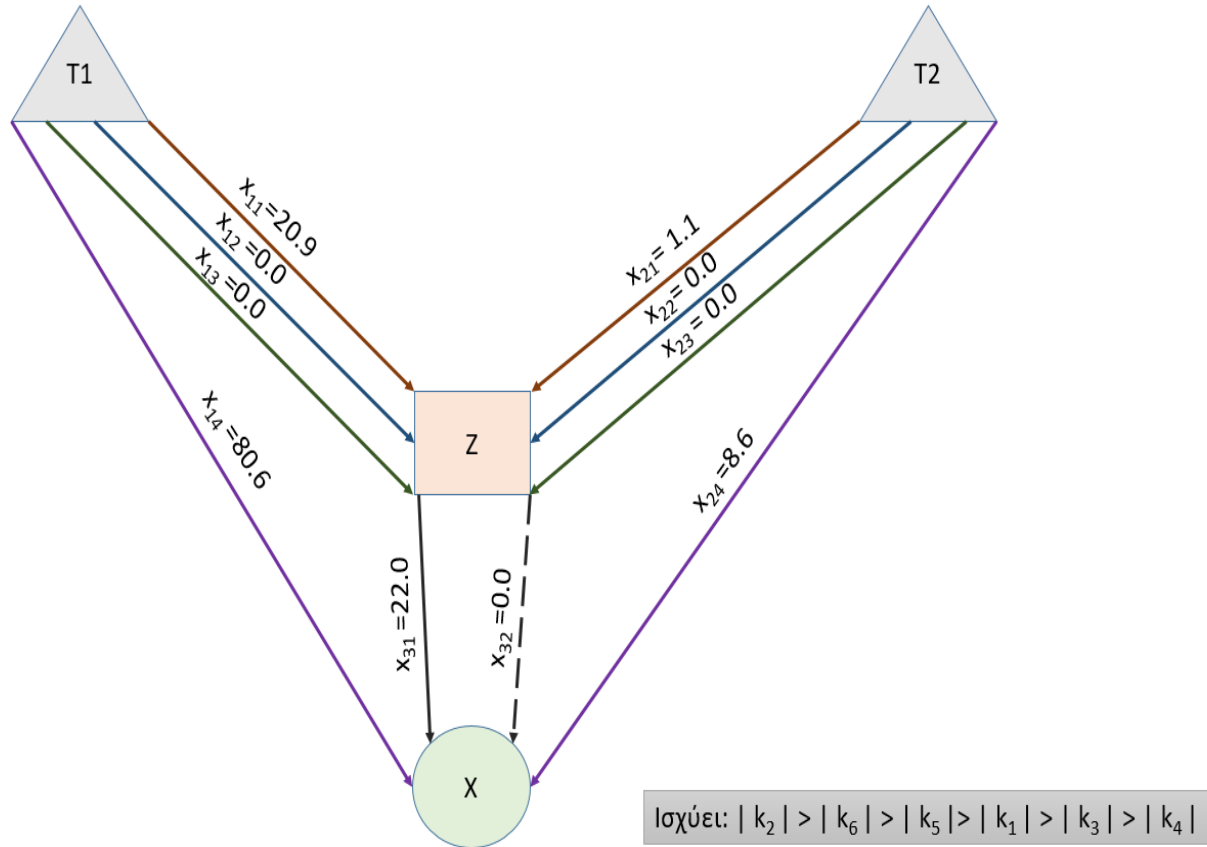
### 3 παράλληλοι ταμιευτήρες

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά τριών παράλληλων ταμιευτήρων

Χαρακτηριστικά	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2	Ταμιευτήρας 3
Ειδική ενέργεια στροβίλου, $\psi_i$ (GWh/hm <sup>4</sup> )	0.25	0.22	0.23
Μέγιστη χωρητικότητα, $S_{max_i}$ (hm <sup>3</sup> )	376.00	202.00	4492.00
Ύψος πτώσης, $H_i$ (m)	580.00	68.00	116.00
Νεκρός όγκος, $Vd_i$ (hm <sup>3</sup> )	87.00	34.00	1140.00
Παροχετευτικότητα αγωγού προσαγωγής, $q_i$ (hm <sup>3</sup> )	70.00	65.00	327.00
Συνολικός στόχος ενέργειας, $E^*$ (GWh)	22.00		

## 2 παράλληλοι ταμιευτήρες

Παράδειγμα 1: Χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και δημιουργία ελλειμμάτων



Πίνακας 3: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα

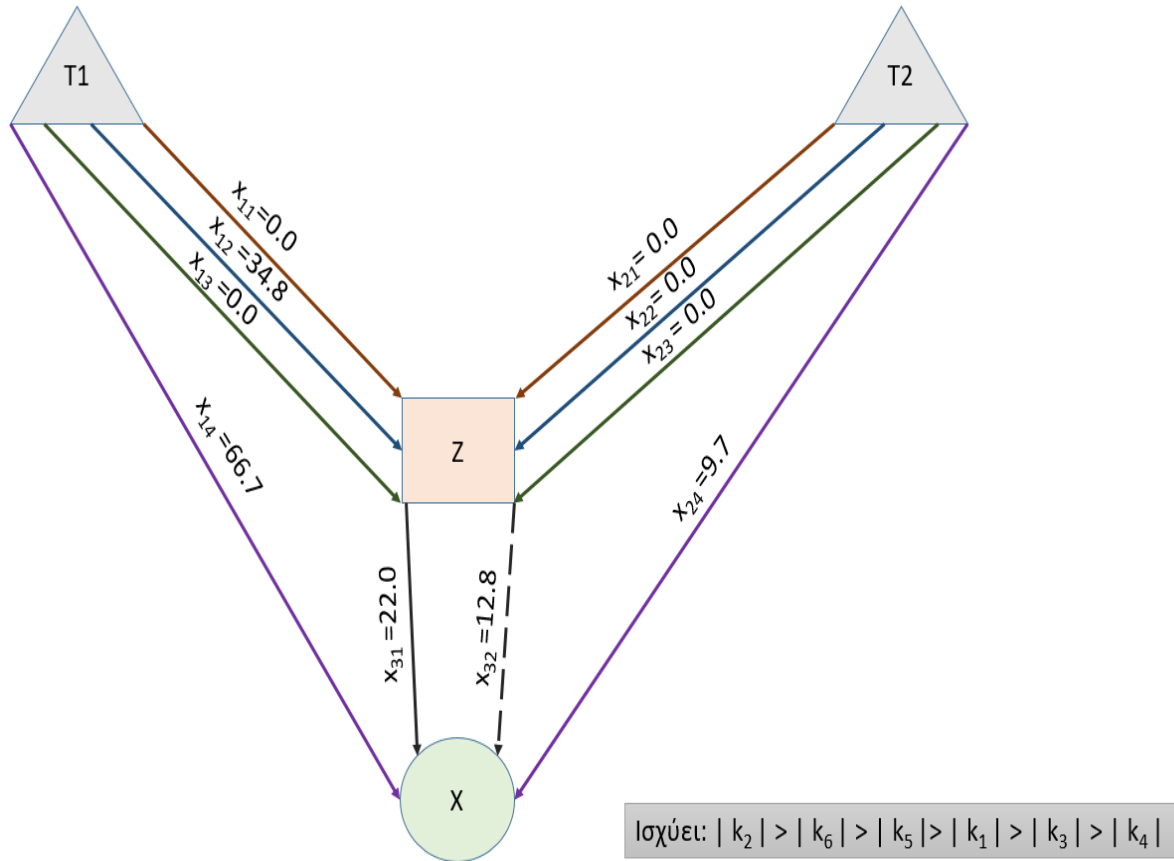
Δεδομένο	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Ποσοστό συνεισφοράς, $p_i$ (%)	95	5
Απόθεμα, $S_i$ (hm <sup>3</sup> )	232.00	118.00

Πίνακας 4: Υπολογισμοί μοντέλου

Μεταβλητή	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Στόχος ενέργειας, $e_i^*$ (GWh)	20.9	1.1
Μέγιστη δυνητική παραγωγή ενέργειας από στρόβιλο, $e_{imax}$ (GWh)	101.5	9.7
Δευτερεύουσα ενέργεια από στρόβιλο, $e_{id}$ (GWh)	0.0	0.0
Ποσότητα που χρειάζεται να παραχθεί πέραν της δευτερεύουσας για κάλυψη του στόχου του ταμιευτήρα, $e_{iextra}^*$ (GWh)	20.9	1.1
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, $e_{ic}$ (GWh)	20.9	1.1
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που δεν μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, $e_{inc}$ (GWh)	0.0	0.0

## 2 παράλληλοι ταμιευτήρες

Παράδειγμα 2: Με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας από τον T1, χωρίς δημιουργία ελλειμμάτων



Πίνακας 5: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα

Δεδομένο	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Ποσοστό συνεισφοράς, $p_i$ (%)	95	5
Απόθεμα, $S_i$ (hm <sup>3</sup> )	400.00	118.00

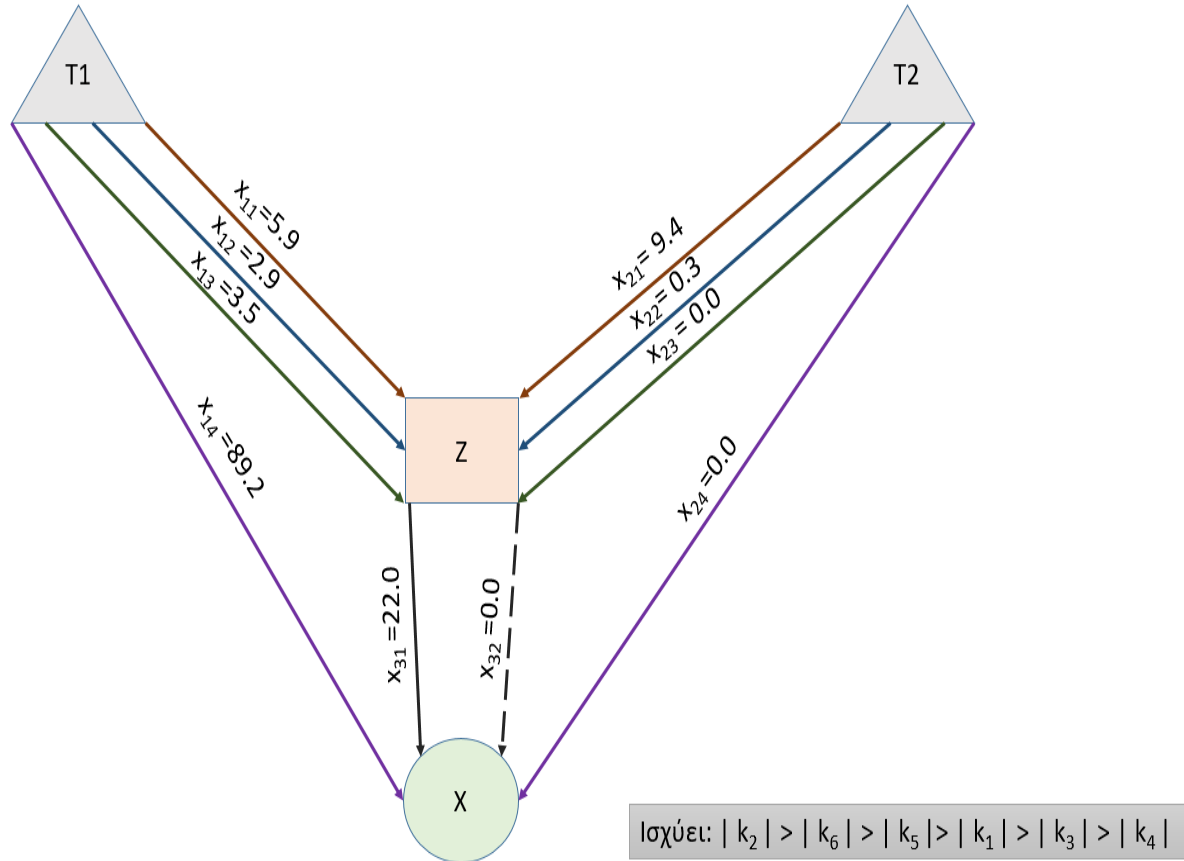
Πίνακας 6: Υπολογισμοί μοντέλου

Μεταβλητή	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Στόχος ενέργειας, $e_i^*$ (GWh)	20.9	1.1
Μέγιστη δυνητική παραγωγή ενέργειας από στρόβιλο, $e_{imax}$ (GWh)	101.5	9.7
Δευτερεύουσα ενέργεια από στρόβιλο, $e_{id}$ (GWh)	34.8	0.0
Ποσότητα που χρειάζεται να παραχθεί πέραν της δευτερεύουσας για κάλυψη του στόχου του ταμιευτήρα, $e_{iextra}^*$ (GWh)	0.0	1.1
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, $e_{ic}$ (GWh)	20.9	1.1
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που δεν μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, $e_{inc}$ (GWh)	0.0	0.0



## 2 παράλληλοι ταμιευτήρες

Παράδειγμα 3: Με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και από τους δύο και δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2



Πίνακας 7: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα

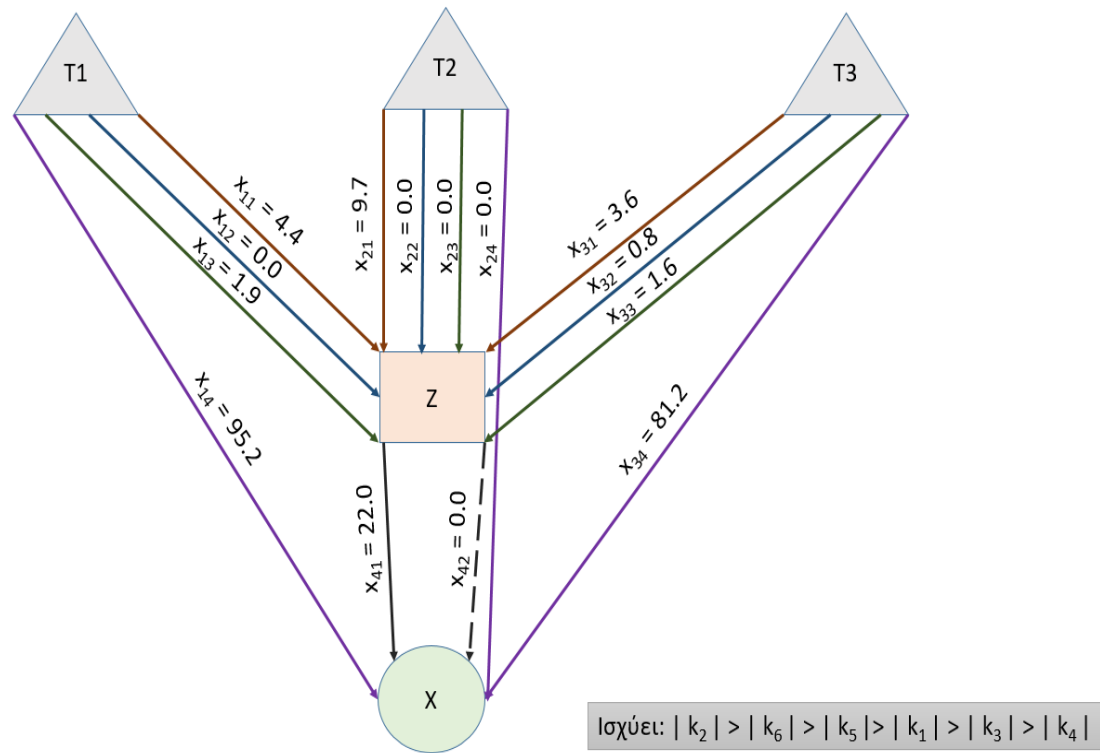
Δεδομένο	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Ποσοστό συνεισφοράς, $p_i$ (%)	40	60
Απόθεμα, $S_i$ (hm <sup>3</sup> )	378.00	204.00

Πίνακας 8: Υπολογισμοί μοντέλου

Μεταβλητή	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Στόχος ενέργειας, $e_i^*$ (GWh)	8.8	13.2
Μέγιστη δυνητική παραγωγή ενέργειας από στρόβιλο, $e_{imax}$ (GWh)	101.5	9.7
Δευτερεύουσα ενέργεια από στρόβιλο, $e_{id}$ (GWh)	2.9	0.3
Ποσότητα που χρειάζεται να παραχθεί πέραν της δευτερεύουσας για κάλυψη του στόχου του ταμιευτήρα, $e_{iextra}^*$ (GWh)	5.9	12.9
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, $e_{ic}$ (GWh)	8.8	9.7
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που δεν μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, $e_{inc}$ (GWh)	0.0	3.5

# 3 παράλληλοι ταμιευτήρες

Παράδειγμα: Με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας στον ταμιευτήρα 3 και δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2



**Παραδοχή:** Τα ελλείμματα μοιράζονται αναλογικά με τη περισσευόμενη ποσότητα  $e_{ires}$  των υπόλοιπων ταμιευτήρων του συστήματος.

Πίνακας 9: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα

Δεδομένο	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2	Ταμιευτήρας 3
Ποσοστό συνεισφοράς, $p_i$ (%)	20	60	20
Απόθεμα, $S_i$ (hm <sup>3</sup> )	372.00	118.00	4495.00

Πίνακας 10: Υπολογισμοί μοντέλου

Μεταβλητή	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2	Ταμιευτήρας 3
Στόχος ενέργειας, $e_i^*$ (GWh)	4.4	13.2	4.4
Μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας από στρόβιλο, $e_{imax}$ (GWh)	101.5	9.7	87.2
Δευτερεύουσα ενέργεια από στρόβιλο, $e_{id}$ (GWh)	0.0	0.0	0.8
Ποσότητα που χρειάζεται να παραχθεί πέραν της δευτερεύουσας για κάλυψη του στόχου του ταμιευτήρα, $e_{iextra}^*$ (GWh)	4.4	13.2	3.6
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, $e_{ic}$ (GWh)	4.4	9.7	4.4
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που δεν μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, $e_{inc}$ (GWh)	0.0	3.5	0.0
Περισσευόμενη ποσότητα, $e_{ires}$ (GWh)	97.1	0.0	82.8

# Υπολογιστικά ζητήματα μοντέλων προσομοίωσης υδατικού ισοζυγίου

Τα υπολογιστικά ζητήματα που εξετάζονται προκύπτουν λόγω της ανάγκης διακριτοποίησης μιας συνεχούς διαφορικής εξίσωσης. Αυτό γίνεται διότι:

- 1) Οι χρονοσειρές εισόδου (εισροές, ζητήσεις) είναι διαθέσιμες σε κάποια χρονική κλίμακα.
- 2) Χρειάζεται ένα σχετικά αδρομέρες βήμα στους υπολογισμούς, για εξοικονόμηση υπολογιστικού φόρτου.

## Ζητήματα:

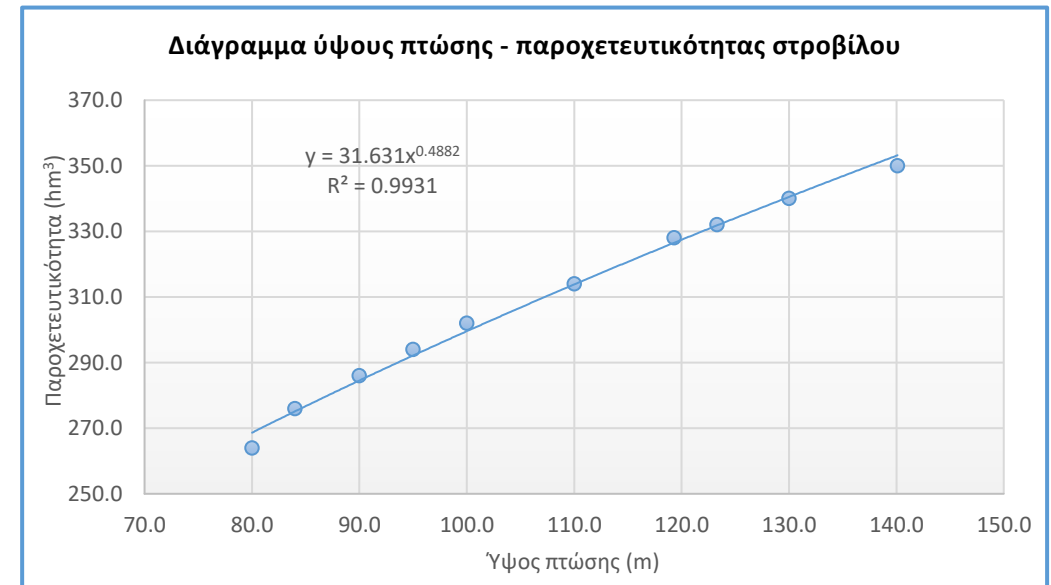
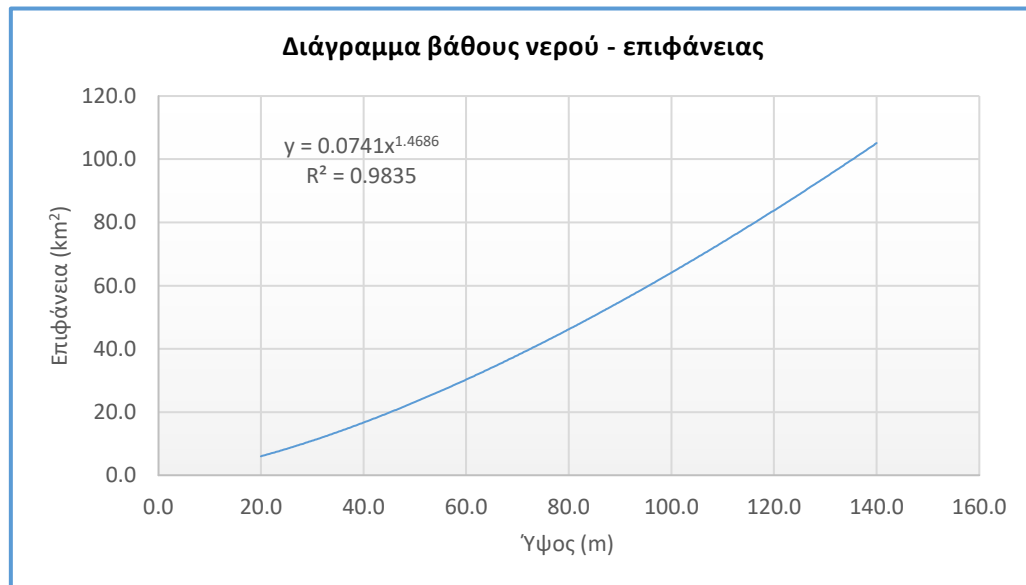
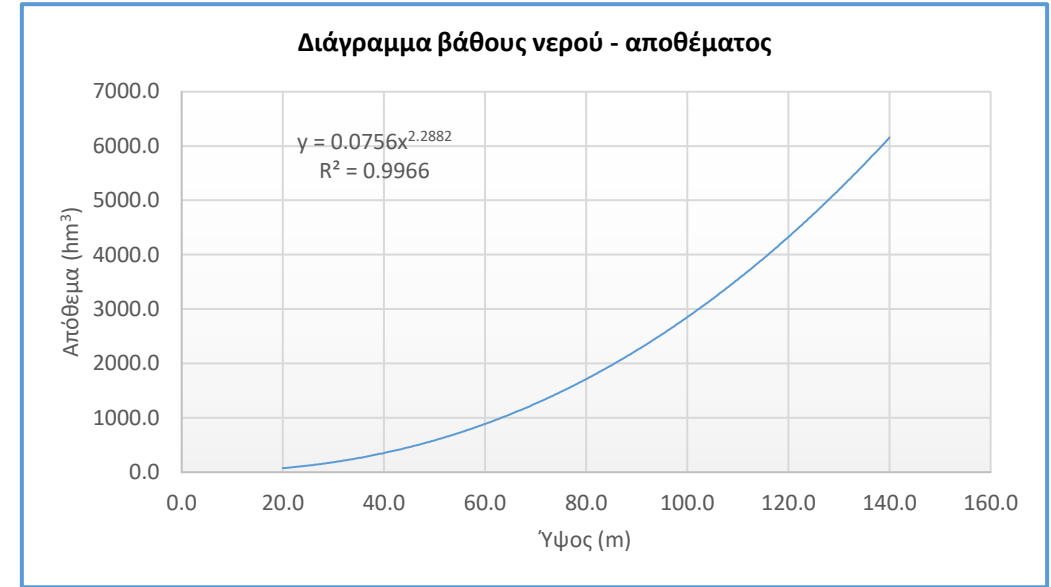
- ✓ Χρονική διακριτότητα υπολογισμών,
- ✓ Διατύπωση του σχήματος επίλυσης σε ρητή ή άρρητη μορφή, με εφαρμογή ενός επαναληπτικού κύκλου,
- ✓ Εκτίμηση υπερχειλίσεων και δυνατότητα βελτίωσης της ακρίβειας των υπολογισμών με τεχνητή αλλαγή της Ανώτατης Στάθμης Λειτουργίας (ΑΣΛ) του ταμιευτήρα, και
- ✓ Θεώρηση μεταβλητής ζήτησης ενέργειας αντί σταθερού στόχου στην προσομοίωση.

*Για τη διερεύνηση των παραπάνω ζητημάτων, προσομοιώνεται η λειτουργία του ταμιευτήρα των Κρεμαστών για μια χρονική περίοδο 42 υδρολογικών ετών (Οκτώβριος 1966 - Σεπτέμβριος 2008)*

# Δεδομένα ταμιευτήρα Κρεμαστών

Πίνακας 11: Δεδομένα ταμιευτήρα Κρεμαστών

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Λεκάνη απορροής (km <sup>2</sup> )	3570
Κατώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	227.0
Ανώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	282.0
Στάθμη πυθμένα (m)	160.0
Παράμετρος κ	0.0756
Παράμετρος λ	2.2882
Νεκρός όγκος (hm <sup>3</sup> )	1140.1
Μικτή χωρητικότητα (hm <sup>3</sup> )	4492.9
Ωφέλιμη χωρητικότητα (hm <sup>3</sup> )	3352.8
Παράμετρος ψ (GWh/hm <sup>4</sup> )	0.226
Στάθμη εξόδου αγωγού φυγής (m)	143.5

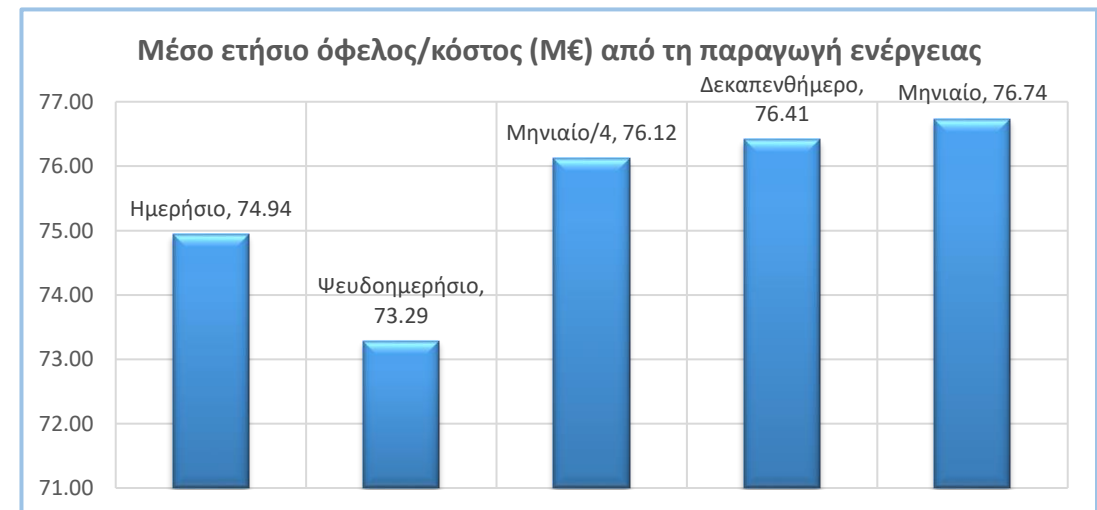
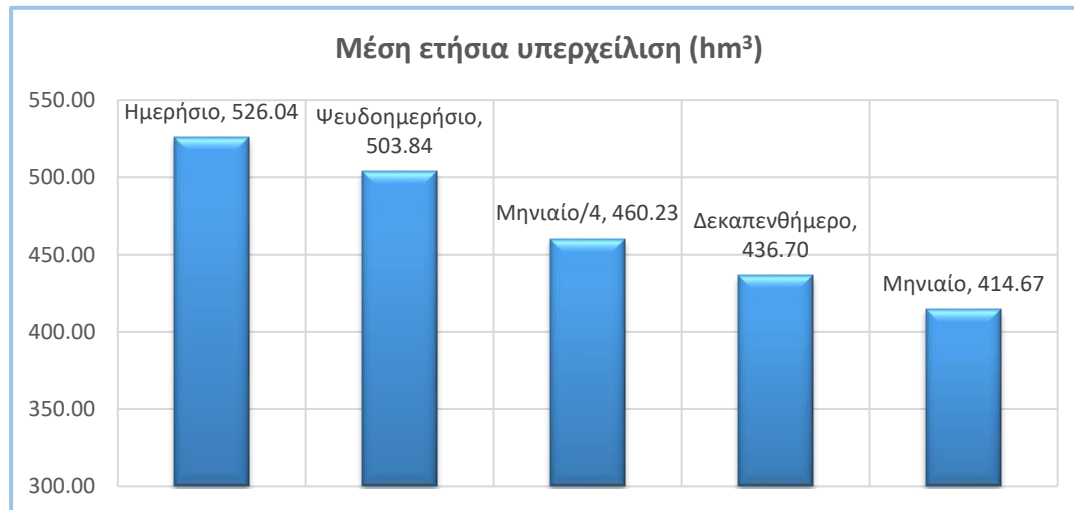


# Χρονική διακριτότητα υπολογισμών

Χρονικά βήμα προσομοίωσης που εξετάστηκαν:

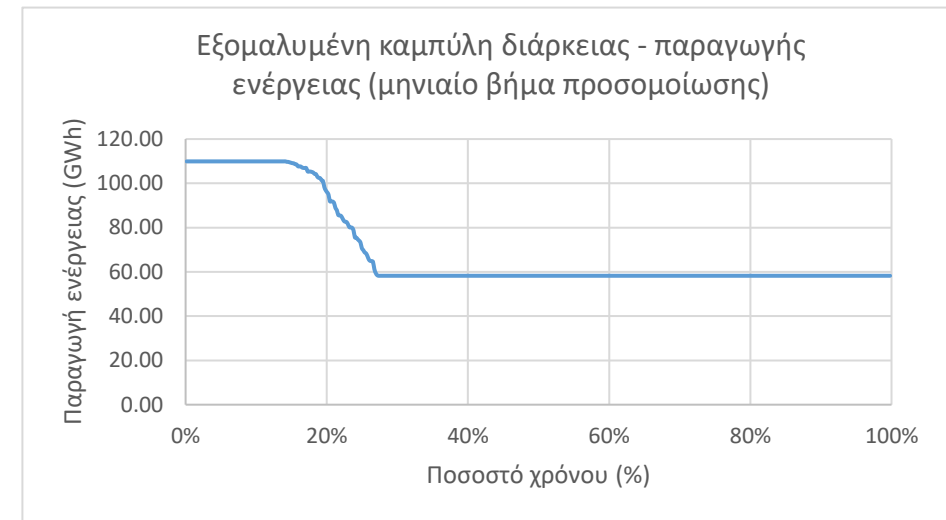
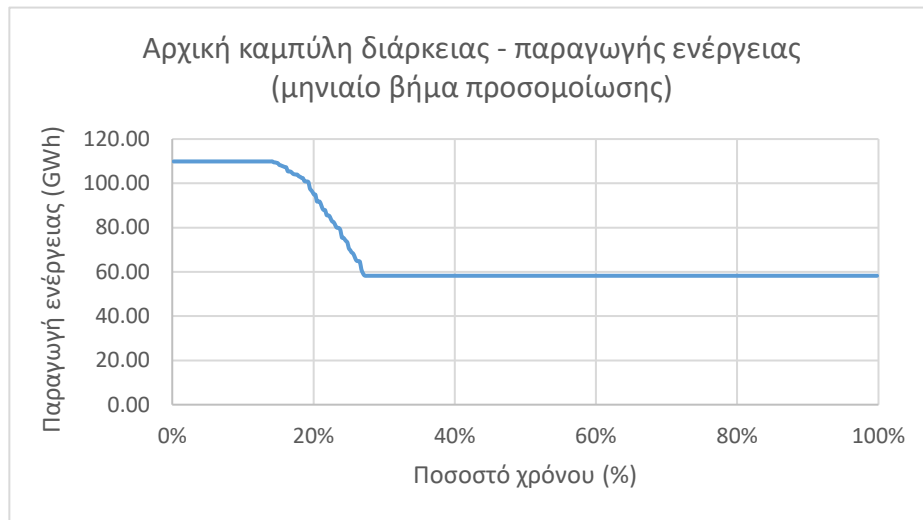
- **Πραγματικό ημερήσιο (= χρονικό βήμα δείγματος εισροών)**
- **Ψευδοημερήσιο (μήνας/30.5)**
- **¼ του μήνα (μήνας/4)**
- **Δεκαπενθήμερο (μήνας/2)**
- **Μηνιαίο**

Τύπος ενέργειας	Τιμή μονάδας (€/kWh)
Πρωτεύουσα ενέργεια (τιμή πώλησης $t_p$ )	0.1
Δευτερεύουσα ενέργεια (τιμή πώλησης $t_s$ )	0.05
Έλλειμμα ενέργειας (τιμή ρήτρας $t_p$ )	1



# Διατύπωση σχήματος επίλυσης σε ρητή ή άρρητη μορφή, με εφαρμογή ενός επαναληπτικού κύκλου

- Διακριτοποίηση συνεχούς διαφορικής εξίσωσης (υδατικό ισοζύγιο)
- Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου: για να στηθεί ως ρητό σχήμα οι διεργασίες εισροών – εκροών ορίζονται με κάποια συγκεκριμένη σειρά.
- Όλοι οι υπολογισμοί που αφορούν στα ενεργειακά μεγέθη (ύψος πτώσης, παραγωγή κ.τ.λ.) γίνονται με βάση το ύψος πτώσης που προκύπτει από τη στάθμη που έχουμε στην αρχή του χρονικού βήματος.
- Για να αποκτήσει μεγαλύτερη ευστάθεια το διατυπώνουμε σε άρρητη μορφή, εισάγοντας έναν επαναληπτικό κύκλο που εξασφαλίζει πολύ καλύτερη εκτίμηση της μέσης στάθμης.
- Όταν η στάθμη έχει έντονες διακυμάνσεις εντός του χρονικού βήματος, αυτό έχει και σημαντική επίδραση στο αποτέλεσμα.
- Με έναν μόνο κύκλο δεν προκύπτει απαγορευτικά μεγάλη επιβάρυνση του υπολογιστικού φόρτου (περίπου διπλασιάζεται).

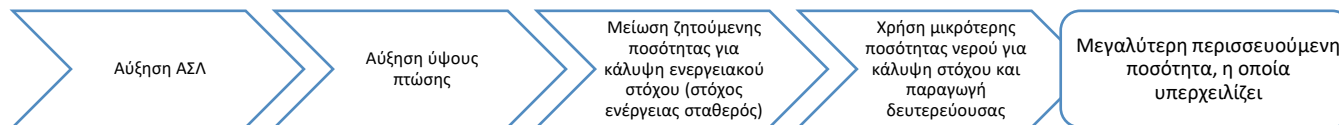


Παρατήρηση: Η διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών δεν είναι μεγάλη, οπότε δεν κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή της στο συγκεκριμένο παράδειγμα (θα μπορούσε να παραληφθεί για απλοποίηση). Επειδή όμως σε άλλες περιπτώσεις ταμειωτήρων πιθανώς να είναι αισθητή, η διαδικασία ακολουθήθηκε με τις εξομαλυμένες καμπύλες για όλα τα χρονικά βήματα.

# Εκτίμηση υπερχειλίσεων και δυνατότητα βελτίωσης της ακρίβειας των υπολογισμών με τεχνητή αλλαγή της Ανώτατης Στάθμης Λειτουργίας (ΑΣΛ)

Μέση ετήσια υπερχειλίση (hm <sup>3</sup> )					
ΑΣΛ (m)	Βήμα προσομοίωσης				
	Ημερήσιο	Ψευδοημερήσιο	1/4 μήνα	Δεκαπενθήμερο	Μηνιαίο
281.0	500.76	501.56	439.36	426.42	407.71
281.5	509.65	502.36	445.35	428.43	409.07
282.0	526.04	503.84	460.23	436.70	414.67
282.5	536.93	505.61	470.85	452.11	428.57
283.0	546.29	507.12	476.86	460.37	437.76
<b>Στόχος ενέργειας (GWh):</b>	1.9	1.8	14.5	29.1	58.2

Μέσο ετήσιο όφελος/κόστος (Μ€)					
ΑΣΛ (m)	Βήμα προσομοίωσης				
	Ημερήσιο	Ψευδοημερήσιο	1/4 μήνα	Δεκαπενθήμερο	Μηνιαίο
281.0	73.44	72.98	74.35	73.73	74.03
281.5	74.77	73.14	75.89	75.49	75.80
282.0	74.94	73.29	76.12	76.41	76.74
282.5	75.10	73.42	76.30	76.58	76.93
283.0	75.23	73.57	76.49	76.77	77.11
<b>Στόχος ενέργειας (GWh):</b>	1.9	1.8	14.5	29.1	58.2



**Παρατήρηση:** Για κάθε χρονικό βήμα, όσο αυξάνεται/μειώνεται η ΑΣΛ του ταμιευτήρα αυξάνεται/μειώνεται η μέση ετήσια υπερχειλίση και το μέσο ετήσιο όφελος/κόστος.

# Θεώρηση μεταβλητής ζήτησης ενέργειας αντί σταθερού στόχου στην προσομοίωση

Ο στόχος ενέργειας  $E^*$  θεωρείται ότι ακολουθεί κανονική κατανομή, με μέση τιμή  $\mu$  και τυπική απόκλιση  $\sigma = \mu CV$ , οπότε η παραγωγή τυχαία μεταβαλλόμενων στόχων παραγωγής ενέργειας γίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$E^* = \mu + z \sigma = \mu (1 + z CV)$$

όπου  $z$  τυχαίες τιμές που ακολουθούν την τυποποιημένη (γκουσιανή) κανονική κατανομή,  $N(0, 1)$

Μέση τιμή ημερήσιας ζήτησης (GWh)

Μέση τιμή μηνιαίας ζήτησης (GWh)

0.5

15.25

1.0

30.50

1.5

45.75

2.0

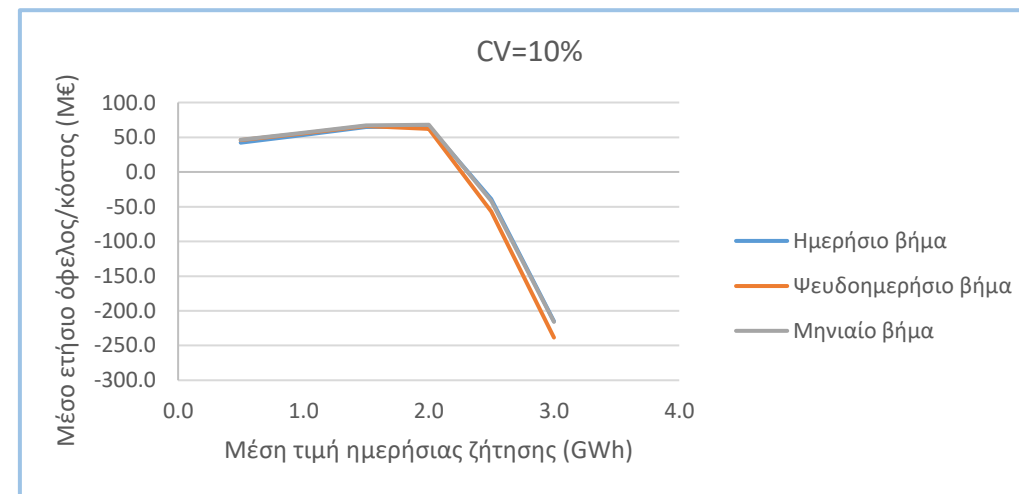
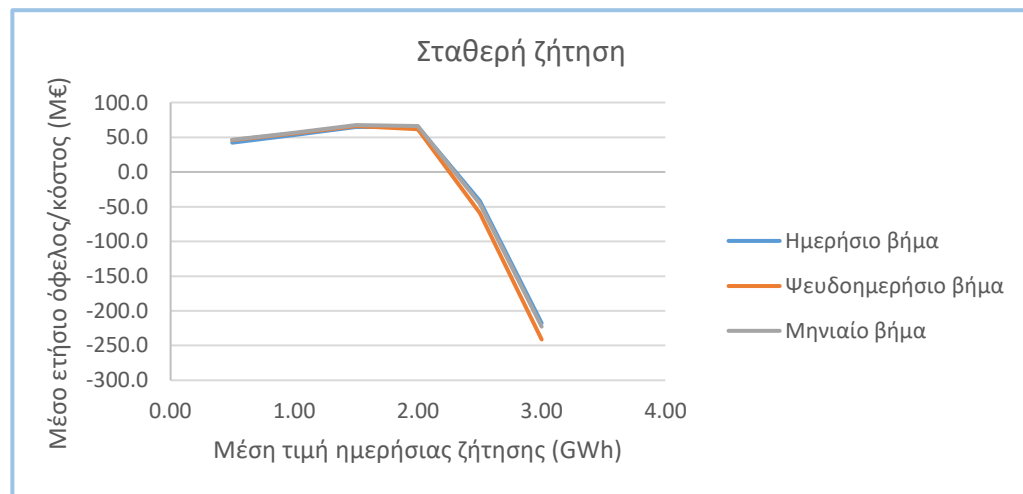
61.00

2.5

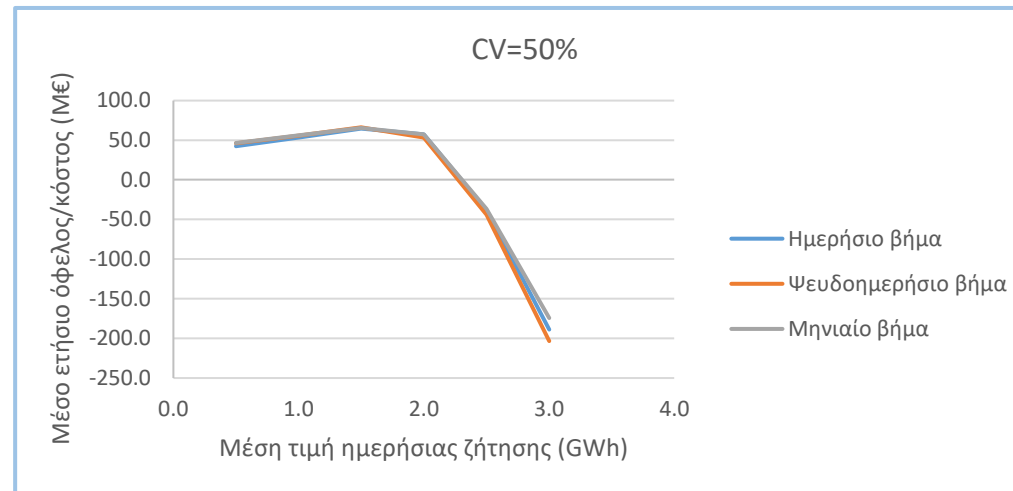
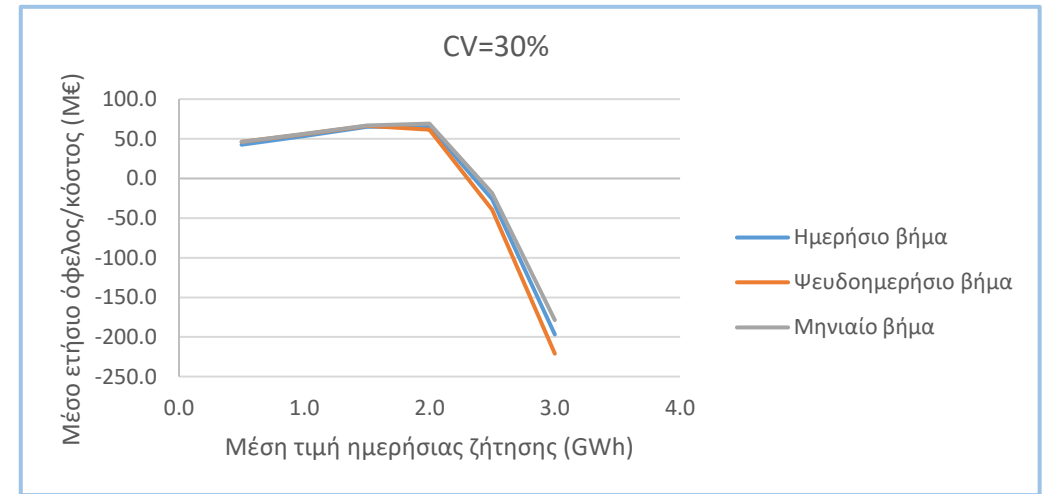
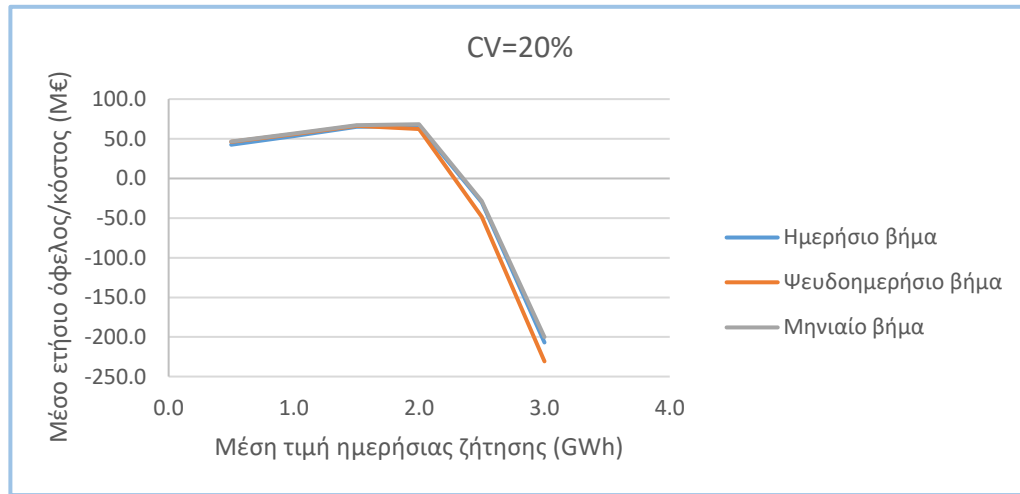
76.25

3.0

91.50







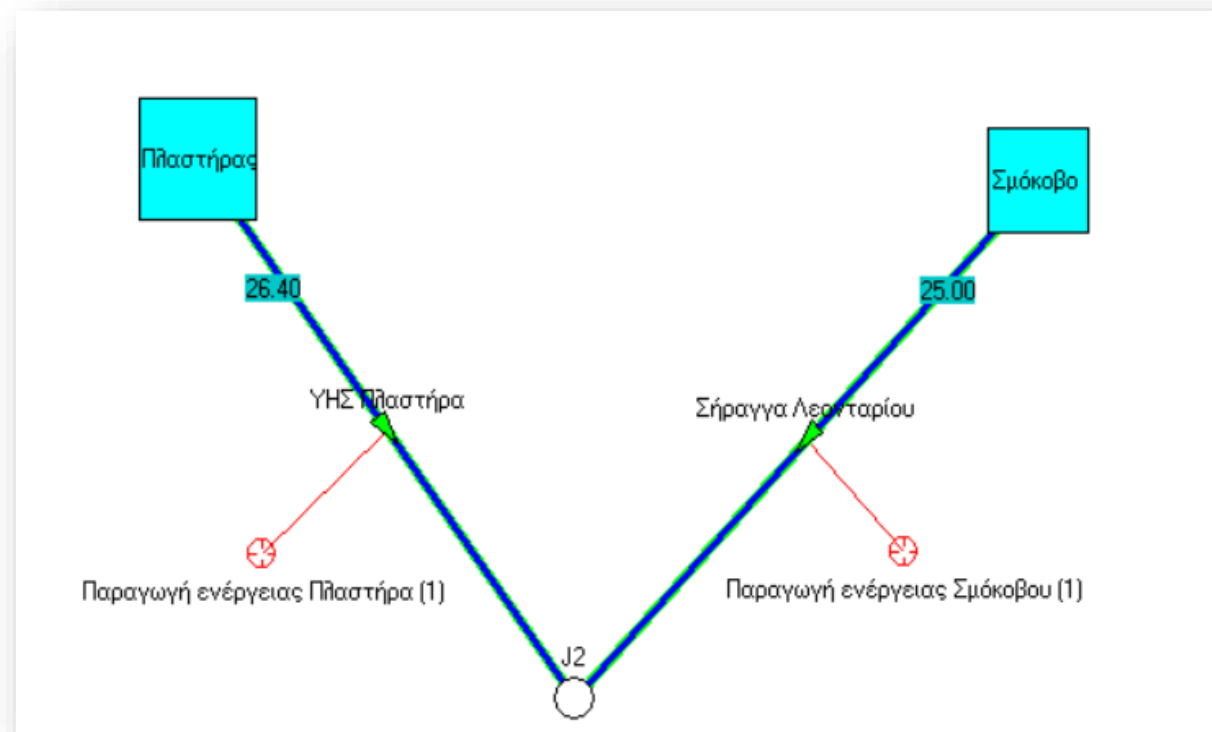
**Παρατήρηση:** Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι το μέσο ετήσιο όφελος/κόστος, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, επηρεάζεται ελάχιστα από μεταβαλλόμενες τιμές ζήτησης (ακόμα και για CV=50%), γι' αυτό και σε κάθε χρονικό βήμα (ημερήσιο, ψευδοημερήσιο, μηνιαίο κ.λπ.) διατηρήθηκε σταθερή τιμή ζήτησης, για όλη την περίοδο προσομοίωσης του ταμειυτήρα Κρεμαστών.

# Σύγκριση μοντέλου διγράφου με το λογισμικό Υδρονομέας σε προβλήματα προσομοίωσης υδροενεργειακών συστημάτων

## 2 παράλληλοι ταμιευτήρες

Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων Πλαστήρα και Σμοκόβου

	Πλαστήρας	Σμοκόβο
Λεκάνη απορροής (km <sup>2</sup> )	161.3	376.5
Κατώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	776.0	330.0
Ανώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	792.0	375.0
Στάθμη πυθμένα (m)	750.0	285.0
Παράμετρος κ	0.0042	0.002
Παράμετρος λ	3.0512	2.5615
Νεκρός όγκος (hm <sup>3</sup> )	87.2	34.3
Ωφέλιμη χωρητικότητα (hm <sup>3</sup> )	289.6	168.4
Παράμετρος ψ (GWh/hm <sup>4</sup> )	0.25	0.22
Στάθμη εξόδου αγωγού φυγής (m)	206.4	290.0
Παροχευτικότητα αγωγού φυγής (m <sup>3</sup> /s)	26.4	25.0



Εικόνα 3: Σύστημα παράλληλων ταμιευτήρων Πλαστήρα – Σμοκόβου στο λογισμικό Υδρονομέας

Πίνακας 13: Δεδομένα βελτιστοποίησης συστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου (λογισμικό Υδρονομέας)

Στοχική συνάρτηση (objective function):	$\min(-Ef)$ ( $Ef$ : Πρωτεύουσα ενέργεια που παράγεται από το σύστημα)
Μεταβλητές ελέγχου (control variables):	$E_1^*$ ( $E_1^*$ : Στόχος παραγόμενης ενέργειας στροβίλου Πλαστήρα)
	$E_2^*$ ( $E_2^*$ : Στόχος παραγόμενης ενέργειας στροβίλου Σμοκόβου)
Όρια μεταβλητών ελέγχου (bounds):	$0 \leq E_1^* \leq 50$ $0 \leq E_2^* \leq 50$

Πίνακας 15: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου

Πρωτεύουσα ενέργεια που παράγεται από το σύστημα ( $Ef$ ) (GWh/μήνα)	
Λογισμικό Υδρονομέας	18.36
Μοντέλο διγράφου	22.70

Πίνακας 14: Δεδομένα βελτιστοποίησης συστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου (μοντέλο διγράφου)

Στοχική συνάρτηση (objective function):	$\min(-Ef)$ ( $Ef$ : Πρωτεύουσα ενέργεια που παράγεται από το σύστημα)
Μεταβλητές ελέγχου (control variables):	$p_1$ ( $p_1$ : Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμειυτήρα Πλαστήρα)
	$E^*$ ( $E^*$ : Στόχος παραγόμενης ενέργειας συστήματος)
Όρια μεταβλητών ελέγχου (bounds):	$0 \leq p_1 \leq 1$ $0 \leq E^* \leq 50$

Πίνακας 16: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης λογισμικού Υδρονομέα και μοντέλου διγράφου

	Υδρονομέας	Μοντέλο διγράφου
Αστοχίες συστήματος	5	3
Αξιοπιστία παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας (%)	98.9	99.4
Μέσο ετήσιο όφελος / κόστος (Μ€)	21.7	26.7

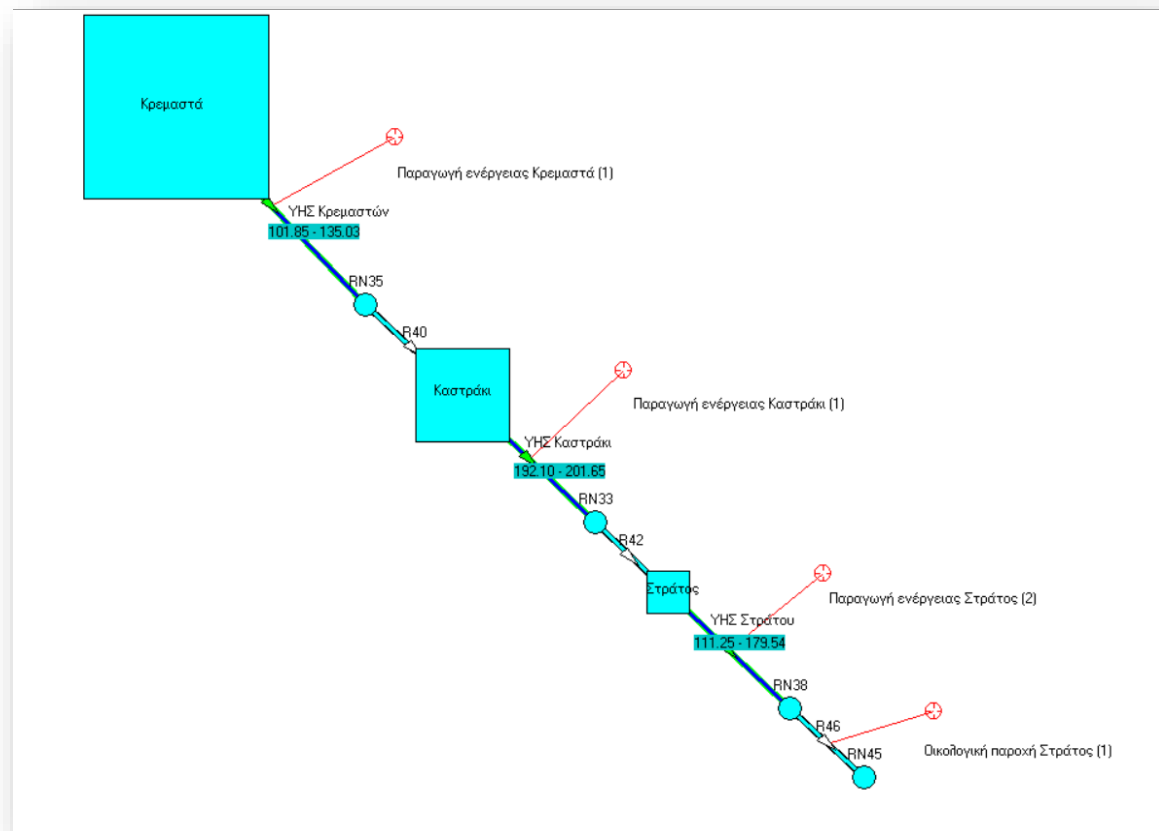
### Σύγκριση:

Το μοντέλο διγράφου παράγει 24% περισσότερη πρωτεύουσα ενέργεια και εξασφαλίζει 23% περισσότερο όφελος συγκριτικά με τον Υδρονομέα.

### 3 ταμιευτήρες σε σειρά

Πίνακας 17: Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων Αχελώου

	Κρεμαστά	Καστράκι	Στράτος
Λεκάνη απορροής (km <sup>2</sup> )	3570.0	548.0	202.0
Κατώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	227.0	142.0	67.0
Ανώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	282.0	146.0	68.6
Στάθμη πυθμένα (m)	160.0	70.0	51.0
Παράμετρος κ	0.0756	0.0208	0.2328
Παράμετρος λ	2.2882	2.4539	2.029
Νεκρός όγκος (hm <sup>3</sup> )	1140.1	751.2	64.6
Ωφέλιμη χωρητικότητα (hm <sup>3</sup> )	3352.8	106.6	13.8
Παράμετρος ψ (GWh/hm <sup>4</sup> )	0.2257	0.2358	0.241
Στάθμη εξόδου αγωγού φυγής (m)	143.5	68.8	31.6



Εικόνα 4: Σύστημα ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου σε σειρά στο λογισμικό Υδρονομίας

Πίνακας 18: Δεδομένα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (λογισμικό Υδρονομέας)

Στοχική συνάρτηση (objective function):	$\min(-Ef)$ ( $Ef$ : Πρωτεύουσα ενέργεια που παράγεται από το σύστημα)
Μεταβλητές ελέγχου (control variables):	$E_1^*$ ( $E_1^*$ : Στόχος παραγόμενης ενέργειας στροβίλου Κρεμαστών)
	$E_2^*$ ( $E_2^*$ : Στόχος παραγόμενης ενέργειας στροβίλου Καστρακίου)
	$E_3^*$ ( $E_3^*$ : Στόχος παραγόμενης ενέργειας στροβίλου Στράτου)
Όρια μεταβλητών ελέγχου (bounds):	$0 \leq E_1^* \leq 300$ $0 \leq E_2^* \leq 300$ $0 \leq E_3^* \leq 300$

Πίνακας 20: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου

Πρωτεύουσα ενέργεια που παράγεται από το σύστημα ( $Ef$ ) (GWh/μήνα)	
Λογισμικό Υδρονομέας	121.82
Μοντέλο διγράφου	138.00

Πίνακας 19: Δεδομένα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (μοντέλο διγράφου)

Στοχική συνάρτηση (objective function):	$\min(-Ef)$ ( $Ef$ : Πρωτεύουσα ενέργεια που παράγεται από το σύστημα)
Μεταβλητές ελέγχου (control variables):	$p_1$ ( $p_1$ : Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμειυτήρα Κρεμαστών)
	$p_2$ ( $p_2$ : Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμειυτήρα Καστρακίου)
	$E^*$ ( $E^*$ : Στόχος παραγόμενης ενέργειας συστήματος)
Περιορισμοί (constraints):	$0 \leq p_1 + p_2 \leq 1$
Όρια μεταβλητών ελέγχου (bounds):	$0 \leq p_1 \leq 1$ $0 \leq p_2 \leq 1$ $0 \leq E^* \leq 300$

Πίνακας 21: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης λογισμικού Υδρονομέα και μοντέλου διγράφου

	Υδρονομέας	Μοντέλο διγράφου
Αστοχίες συστήματος	5	3
Αξιοπιστία παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας (%)	99.0	99.4
Μέσο ετήσιο όφελος / κόστος (Μ€)	158.07	176.26

### Σύγκριση:

Το μοντέλο διγράφου παράγει 13% περισσότερη πρωτεύουσα ενέργεια και εξασφαλίζει 12% περισσότερο όφελος συγκριτικά με τον Υδρονομέα.

## Συμπεράσματα (1)

- Κύριο ζητούμενο της παρούσας έρευνας ήταν η **βελτίωση του μεθοδολογικού πλαισίου του λογισμικού Υδρονομέας**, ως προς το σκέλος της προσομοίωσης υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων και της βελτιστοποίησης της διαχειριστικής τους πολιτικής.
- Η εργασία κατέληξε στην ανάπτυξη ενός **καινοτόμου μοντέλο διγράφου για τις ενεργειακές ροές των υδροσυστημάτων**, με υπόβαθρο τη θεωρία των γράφων και το πρόβλημα μεταφόρτωσης, το οποίο ενσωματώνει έναν νέο κανόνα λειτουργίας, **προσαρμοσμένο στις ιδιαιτερότητες της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας** (π.χ. διασύνδεση όλων των πηγών παραγωγής με τη ζήτηση, δυνατότητα παραγωγής δευτερεύουσας ενέργειας, παραγωγή ενέργειας σε ταμιευτήρες σε σειρά αξιοποιώντας μία μόνο απόληψη από τον ανάντη ταμιευτήρα).
- Το μοντέλο αυτό εστιάζει στη **διαχείριση των ενεργειακών ζητήσεων** σε συστήματα ταμιευτήρων ανεξαρτήτως του μεγέθους και της τοπολογίας τους (είτε παράλληλοι είτε σε σειρά) και δεν λαμβάνει υπόψη άλλες χρήσεις.
- Η διαφορά με τον Υδρονομέα είναι ότι το μοντέλο επιτρέπει την **αναπροσαρμογή των στόχων παραγωγής ενέργειας μεταξύ των ταμιευτήρων** του συστήματος, σε περίπτωση αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης ή παραγωγής δευτερεύουσας ενέργειας σε κάποιο επιμέρους έργο. Αντίθετα, ο Υδρονομέας αντιμετωπίζει κάθε ταμιευτήρα χωριστά, δηλαδή καθένας παράγει ενέργεια σύμφωνα με τις δυνατότητες του και το στόχο που του ανατίθεται, και ως ενέργεια συστήματος λαμβάνεται το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών των ταμιευτήρων.

## Συμπεράσματα (2)

- Βάσει των αναλύσεων που έγιναν με παράδειγμα τον ταμιευτήρα Κρεμαστών, διαπιστώθηκε ότι η **χρονική διακριτότητα** διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της προσομοίωσης, και η επιλογή του χρονικού βήματος (πραγματικού, δηλαδή όπως προκύπτει από τη διακριτότητα των δεδομένων εισόδου, ή τεχνητού, που υλοποιείται με επιμερισμό των δεδομένων) επιφέρει **ουσιώδεις διαφοροποιήσεις** στα τελικά αποτελέσματα.
- Ειδικότερα, κατά τον έλεγχο πέντε χρονικών βημάτων προσομοίωσης (ημερήσιο, ψευδοημερήσιο, ¼ του μήνα, δεκαπενθήμερο και μηνιαίο) παρατηρήθηκε ότι **μέση ετήσια υπερχείλιση** του ταμιευτήρα μειώνεται όσο αυξάνει το χρονικό βήμα.
- Γενικά, διαπιστώθηκε ότι το χρονικό βήμα σίγουρα διαφοροποιεί τα αποτελέσματα των αναλύσεων, όμως σε καμιά περίπτωση δεν θα πρέπει να παραλείπεται η διατήρηση μιας επιθυμητής **ισορροπίας μεταξύ της ακρίβειας των αναλύσεων και του υπολογιστικού φόρτου της προσομοίωσης**.
- Το πιο βασικό συμπέρασμα είναι ότι και στα δύο **πραγματικά υδροσυστήματα** που εξετάστηκαν, δηλαδή το σύστημα Πλαστήρα - Σμοκόβου (παράλληλοι ταμιευτήρες) και το σύστημα Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (ταμιευτήρες σε σειρά), **η βελτιστοποιημένη παραγωγή ενέργειας προκύπτει σημαντικά μεγαλύτερη με το νέο μοντέλο προσομοίωσης** σε σχέση με το υφιστάμενο.
- «Μεταφράζοντας» τις ροές νερού σε ροές ενέργειας, ο νέος κανόνας παρέχει πολύ **μεγαλύτερη διαχειριστική ευελιξία**, και τελικά οδηγεί σε **πιο ρεαλιστικές πολιτικές λειτουργίας των ταμιευτήρων**, και συνακόλουθα σε **υψηλότερες επιδόσεις** (σε όρους παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας, οικονομικού οφέλους, κ.τ.λ.).

## Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Το μοντέλο διγράφου για διαχείριση υδροηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται να ενταχθεί σε ένα **ευρύτερο πλαίσιο διαχείρισης υδροσυστημάτων**, που θα συνδυάζεται και με άλλες χρήσεις του νερού (ύδρευση, άρδευση, κ.λπ.) αλλά και με διαφορετικές πηγές νερού, πέρα των ταμιευτήρων, όπως π.χ. γεωτρήσεις, που σχετίζονται με τη διαχείριση των υπόγειων υδάτων. Ήδη, **βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη η ενσωμάτωση του νέου μοντέλου στο μεθοδολογικό πλαίσιο της υπό ανάπτυξη έκδοσης Υδρονομίας 2020**.
- Στο ευρύτερο φάσμα της ενεργειακής ζήτησης, πέρα της μεμονωμένης αξιοποίησης των υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων στη παραγωγή ενέργειας, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η **ένταξή τους σε συνδυασμένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας** και η διερεύνηση της βελτιστοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από ένα τέτοιο περίπλοκο σύστημα.
- Επιπλέον, λόγω της αβεβαιότητας που διέπει όλες τις διεργασίες των συστημάτων υδατικών πόρων, είναι πολύ σημαντική η **εφαρμογή της στοχαστικής προσέγγισης όχι μόνο στις υδρολογικές διεργασίες, που αφορούν στην προσφορά του νερού, αλλά και στις ζητήσεις, που συνδέονται τόσο με κλιματικές διεργασίες όσο και με κοινωνικο-οικονομικές συνθήκες**. Στο πλαίσιο αυτό, είναι αναγκαία η χρήση συνθετικών (και μάλιστα συσχετισμένων) χρονοσειρών εισροών, ζητήσεων νερού, ενεργειακών στόχων κ.λπ., εξασφαλίζοντας έτσι μια πολύ πιο πλήρη πιθανοτική προσέγγιση του προβλήματος προσομοίωσης - βελτιστοποίησης συστημάτων νερού - ενέργειας.



Γραφικό περιβάλλον Unix/X-Windows  
Χάρτες  
Μητρώο μετρητικών σταθμών

Μητρώο σταθμών

Όνομα	Μονάδα	Υψόμετρο	φ	λ
ΑΓΙΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ	ΑΠΟΡΡΟΗ	37.40.00	21.50.00	
ΑΓΡΑΦΙΩΤΗΣ	ΕΥΡΥΤΑΝ	39.01.00	21.36.00	
ΑΞΕΛΑΟΣ ΑΥΑΚΙ	ΚΑΡΑΙΤΣΑ	39.10.00	21.17.00	
			21.44.00	
			21.41.00	
			21.41.00	

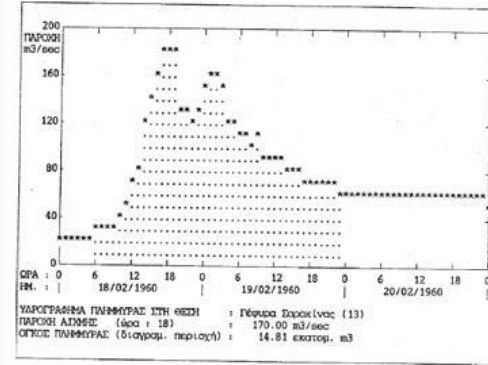
Γενετική προσομοίωση D:SIMULATE5000.GSM

Αρχείο Επεξεργασία Δεδομένα Οδηγίες

0 5000 702.10

Σύστημα Τυρριεστών Στερεά Ελλάδα

Υδατικό ισοζύγιο Διαγράμματα Υδατικό σύστημα Αρχείο



Γενετική προσομοίωση D:SIMULATE5000.GSM

Αρχείο Επεξεργασία Δεδομένα Οδηγίες

0 5000 702.10

Πιθανότητα αστοχίας 0.01000

	Εόργος	Μόρνος	Υάκη	Σύνολο
Απορροή	321.143	311.041	353.246	985.430
Βροχή	3.945	27.040	7.941	38.926
Εξάτμιση	3.807	24.511	24.649	52.967
Διαρροή	0.000	12.678	96.162	108.840
Υπερχειλίση	74.778	31.170	4.279	110.227
Υδρευση	0.000	516.216	187.357	703.573
Ήρδευση	0.000	0.000	48.905	48.905
Ανταλλαγή	-246.491	246.491	0.000	0.000

Υδατικό ισοζύγιο (mm3)

Υδατικό ισοζύγιο Διαγράμματα Υδατικό σύστημα Αρχείο

Υδρονομείας: 25 χρόνια και συνεχίζουμε...

Ευχαριστώ για την προσοχή σας!

