



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**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

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

**Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος
Καθηγητής ΕΜΠ**

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
« ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**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

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί και το πέρας των σπουδών μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Σε αυτή μου την προσπάθεια συνέβαλαν, καθένας με τον τρόπο του, αρκετοί άνθρωποι τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου Ανδρέα Ευστρατιάδη για τη πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου καθώς και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Οι γνώσεις του και οι εύστοχες υποδείξεις του αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, Χρήστο Μακρόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή, και Ηλία Παπακωνσταντή, Λέκτορα, για τη συμβολή τους στην εργασία μου, μέσω χρήσιμων παρατηρήσεων και συμβουλών.

Επιπλέον, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Υποψ. Δρ. Διονύση Νικολόπουλο για το ενδιαφέρον και τη συνεχή του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της ερευνητικής μου εργασίας. Οι θεωρητικές και τεχνικές γνώσεις του πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο διευκόλυναν σε μεγάλο βαθμό την διεξαγωγή της συγκεκριμένης έρευνας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την αμέριστη κατανόηση και υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο πρόγραμμα.

Σταυρούλα Μανούρη

Ιούλιος 2020

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	xi
Abstract	xiii
Extended Abstract	xv
1 Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγικό σημείωμα	1
1.2 Αντικείμενο και ερευνητικοί στόχοι.....	2
1.3 Διάρθρωση εργασίας	3
2 Βασικές έννοιες ανάλυσης υδροενεργειακών συστημάτων	5
2.1 Συστημική προσέγγιση στη διαχείριση υδατικών πόρων	5
2.2 Υδατικό ισοζύγιο	6
2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια	7
2.4 Σχήμα παραμετροποίηση - προσομοίωση - βελτιστοποίηση	8
3 Ανάπτυξη διαχειριστικού πλαισίου συστημάτων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων	11
3.1 Δεδομένα εισόδου.....	11
3.2 Προσομοίωση υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρα	12
3.3 Περιγραφή του προβλήματος μεταφόρτωσης - Θεωρία γράφων	18
3.4 Ανάπτυξη μοντέλου διγράφου για τη διαχείριση της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας από ταμιευτήρες	21
3.5 Θεωρητική περιγραφή μοντέλου διγράφου σε δύο παράλληλους ταμιευτήρες	23
3.6 Θεωρητική περιγραφή μοντέλου διγράφου σε τρεις παράλληλους ταμιευτήρες	28
4 Αριθμητικά παραδείγματα	33
4.1 Σύστημα δύο παράλληλων ταμιευτήρων.....	33

4.1.1	Παράδειγμα 1: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και δημιουργία ελλειμμάτων.....	34
4.1.2	Παράδειγμα 2: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας από τον ταμιευτήρα 1, χωρίς δημιουργία ελλειμμάτων.....	36
4.1.3	Παράδειγμα 3: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και από τους δύο, χωρίς δημιουργία ελλειμμάτων.....	38
4.1.4	Παράδειγμα 4: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας, με δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2.....	40
4.1.5	Παράδειγμα 5: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και από τους δύο και δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2.....	42
4.2	Σύστημα τριών παράλληλων ταμιευτήρων.....	44
4.2.1	Παράδειγμα 1: Προσομοίωση τριών παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας, με κάλυψη του ελλείμματος του ταμιευτήρα 2 από τους υπόλοιπους.....	44
4.2.2	Παράδειγμα 2: Προσομοίωση τριών παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας στον ταμιευτήρα 3 και δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2.....	47
5	Υπολογιστικά ζητήματα μοντέλων προσομοίωσης υδατικού ισοζυγίου	51
5.1	Προβλήματα που εξετάζονται.....	51
5.2	Δεδομένα εισόδου ταμιευτήρα Κρεμαστών.....	51
5.3	Διερεύνηση προβλημάτων χρονικής διακριτότητας και διατύπωσης αριθμητικού σχήματος υπολογισμών.....	54
5.3.1	Τοποθέτηση του προβλήματος και παραδοχές.....	54
5.3.2	Καμπύλες διάρκειας - παραγωγής ενέργειας.....	56
5.3.3	Μέση ετήσια υπερχείλιση.....	62
5.3.4	Μέσο ετήσιο όφελος / κόστος από τη παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.....	63
5.4	Διερεύνηση μεταβλητότητας ζήτησης ενέργειας.....	66
5.5	Επίδραση Ανώτατης Στάθμης Λειτουργίας (ΑΣΛ) ταμιευτήρα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.....	69

6 Ένταξη μοντέλου διγράφου στην νέα έκδοση του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων Υδρονομίας	71
6.1 Ιστορική αναδρομή.....	71
6.2 Υδρονομίας 2020	72
7 Εφαρμογές μοντέλου προσομοίωσης σε συστήματα υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων	75
7.1 Προσομοίωση υδροσυστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου	75
7.2 Προσομοίωση υδροσυστήματος υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων Αχελώου (Κρεμαστά - Καστράκι - Στράτος)	81
7.2.1 Αποτελέσματα μηνιαίου χρονικού βήματος.....	88
7.2.2 Αποτελέσματα ψευδοημερήσιου χρονικού βήματος.....	90
7.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	92
8 Σύγκριση μοντέλου διγράφου με το λογισμικό Υδρονομίας σε προβλήματα προσομοίωσης υδροενεργειακών συστημάτων	93
8.1 Προσομοίωση υδροσυστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου	93
8.2 Προσομοίωση υδροσυστήματος υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων Αχελώου (Κρεμαστά - Καστράκι - Στράτος)	97
9 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	103
9.1 Σύνοψη εργασιών και βασικά συμπεράσματα.....	103
9.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	105
Βιβλιογραφία	107

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά δύο παράλληλων ταμιευτήρων.....	33
Πίνακας 4.2: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα δύο παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 1.....	34
Πίνακας 4.3: Υπολογισμοί μοντέλου για δύο παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 1	34
Πίνακας 4.4: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα δύο παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 2.....	36
Πίνακας 4.5: Υπολογισμοί μοντέλου για δύο παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 2	36
Πίνακας 4.6: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα δύο παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 3.....	38
Πίνακας 4.7: Υπολογισμοί μοντέλου για δύο παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 3	38
Πίνακας 4.8: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα δύο παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 4.....	40
Πίνακας 4.9: Υπολογισμοί μοντέλου για δύο παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 4	40
Πίνακας 4.10: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα δύο παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 5	42
Πίνακας 4.11: Υπολογισμοί μοντέλου για δύο παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 5	42
Πίνακας 4.12: Χαρακτηριστικά τριών παράλληλων ταμιευτήρων	44
Πίνακας 4.13: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα τριών παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 1	45
Πίνακας 4.14: Υπολογισμοί μοντέλου για τρεις παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 1	45
Πίνακας 4.15: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα τριών παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 2	47
Πίνακας 4.16: Υπολογισμοί μοντέλου για τρεις παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 2	47
Πίνακας 5.1: Δεδομένα ταμιευτήρα Κρεμαστών	52
Πίνακας 5.2: Στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής λεκάνης Κρεμαστών για τα υδρολογικά έτη 1966 - 67 έως 2007 - 08	54
Πίνακας 5.3: Στατιστικά μεγέθη ημερήσιας και μηνιαίας χρονοσειράς εισροών ταμιευτήρα Κρεμαστών.....	54
Πίνακας 5.4: Μέση ετήσια υπερχειλίση ταμιευτήρα Κρεμαστών σε διαφορετικά βήματα προσομοίωσης.....	62
Πίνακας 5.5: Τιμές κόστους ενέργειας.....	64
Πίνακας 5.6: Μέσο ετήσιο όφελος/κόστος από την παραγωγή ενέργειας στον ταμιευτήρα Κρεμαστών σε διαφορετικά βήματα προσομοίωσης	65
Πίνακας 5.7: Μέσες τιμές ζήτησης ενέργειας.....	66
Πίνακας 5.8: Επίδραση αλλαγής ΑΣΛ στη μέση ετήσια υπερχειλίση	69

Πίνακας 5.9: Επίδραση αλλαγής ΑΣΛ στο μέσο ετήσιο όφελος/κόστος.....	69
Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων Πλαστήρα και Σμοκόβου	76
Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου	79
Πίνακας 7.3: Μέση ετήσια υπερχειλίση ταμιευτήρων Πλαστήρα και Σμοκόβου.....	80
Πίνακας 7.4: Αποτελέσματα μηνιαίας προσομοίωσης συστήματος παράλληλων ταμιευτήρων Πλαστήρα - Σμοκόβου	81
Πίνακας 7.5: Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων Αχελώου.....	82
Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου για μηνιαίο βήμα	88
Πίνακας 7.7: Μέση ετήσια υπερχειλίση ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (μηνιαίο βήμα προσομοίωσης)	89
Πίνακας 7.8: Αποτελέσματα προσομοίωσης συστήματος ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (μηνιαίο βήμα).....	89
Πίνακας 7.9: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου για ψευδομερήσιο βήμα	90
Πίνακας 7.10: Μέση ετήσια υπερχειλίση ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (ψευδομερήσιο βήμα προσομοίωσης).....	91
Πίνακας 7.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης συστήματος ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (ψευδομερήσιο βήμα).....	91
Πίνακας 8.1: Δεδομένα βελτιστοποίησης συστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου (λογισμικό Υδρονομίας)	95
Πίνακας 8.2: Δεδομένα βελτιστοποίησης συστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου (μοντέλο διγράφου)...	95
Πίνακας 8.3: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου	95
Πίνακας 8.4: Ποσοστά αξιοπιστίας στην παραγωγή ανά ταμιευτήρα (λογισμικό Υδρονομίας).....	96
Πίνακας 8.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης λογισμικού Υδρονομία και μοντέλου διγράφου.....	96
Πίνακας 8.6: Δεδομένα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (λογισμικό Υδρονομίας)	99
Πίνακας 8.7: Δεδομένα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (μοντέλο διγράφου)	99
Πίνακας 8.8: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου	99
Πίνακας 8.9: Ποσοστά αξιοπιστίας στην παραγωγή ανά ταμιευτήρα (λογισμικό Υδρονομίας).....	100
Πίνακας 8.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης λογισμικού Υδρονομία και μοντέλου διγράφου.....	101

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Απεικόνιση μονάδας παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας (Ευστρατιάδης κ.ά., 2020)...	8
Εικόνα 3.1: Μοντέλο διγράφου σε δύο παράλληλους ταμιευτήρες	24
Εικόνα 3.2: Μοντέλο διγράφου σε τρεις παράλληλους ταμιευτήρες	29
Εικόνα 4.1: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και δημιουργία ελλειμμάτων	35
Εικόνα 4.2: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας από τον ταμιευτήρα 1, χωρίς δημιουργία ελλειμμάτων	37
Εικόνα 4.3: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και από τους δύο, χωρίς δημιουργία ελλειμμάτων	39
Εικόνα 4.4: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας, με δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2	41
Εικόνα 4.5: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και από τους δύο και δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2	43
Εικόνα 4.6: Προσομοίωση τριών παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας, με δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2	46
Εικόνα 4.7: Προσομοίωση τριών παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας στον ταμιευτήρα 3 και δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2	48
Εικόνα 5.1: Διάγραμμα βάθους νερού - αποθέματος ταμιευτήρα Κρεμαστών	52
Εικόνα 5.2: Διάγραμμα βάθους νερού - επιφάνειας ταμιευτήρα Κρεμαστών	53
Εικόνα 5.3: Διάγραμμα ύψους πτώσης - παροχετευτικότητας στροβίλου ταμιευτήρα Κρεμαστών	53
Εικόνα 5.4: Καμπύλη διάρκειας - ημερήσιας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών	57
Εικόνα 5.5: Αρχική καμπύλη διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών	58
Εικόνα 5.6: Εξομαλυμένη καμπύλη διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών	58
Εικόνα 5.7: Καμπύλη διάρκειας - ημερήσιας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών	59
Εικόνα 5.8: Καμπύλη διάρκειας - ψευδοημερήσιας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών ...	59
Εικόνα 5.9: Καμπύλη διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών	60
Εικόνα 5.10: Καμπύλη διάρκειας - δεκαπενθήμερης παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών .	60
Εικόνα 5.11: Καμπύλη διάρκειας - παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών με βήμα 1/4 του μήνα	61
Εικόνα 5.12: Μέση ετήσια υπερχείλιση ταμιευτήρα Κρεμαστών σε διαφορετικά βήματα προσομοίωσης	63
Εικόνα 5.13: Μέσο ετήσιο όφελος/κόστος από την παραγωγή ενέργειας στον ταμιευτήρα Κρεμαστών σε διαφορετικά βήματα προσομοίωσης	65
Εικόνα 5.14: Διάγραμμα σταθερής ζήτησης ενέργειας - μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους	67

Εικόνα 5.15: Διάγραμμα μεταβαλλόμενης ζήτησης ενέργειας (CV=10%) - μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους.....	67
Εικόνα 5.16: Διάγραμμα μεταβαλλόμενης ζήτησης ενέργειας (CV=20%) - μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους.....	67
Εικόνα 5.17: Διάγραμμα μεταβαλλόμενης ζήτησης ενέργειας (CV=30%) - μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους.....	68
Εικόνα 5.18: Διάγραμμα μεταβαλλόμενης ζήτησης ενέργειας (CV=50%) - μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους.....	68
Εικόνα 6.1: Πρωτόλειες εκδόσεις του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, που αργότερα εξελίχθηκαν στο λογισμικό Υδρονομέας.....	72
Εικόνα 6.2: Περιβάλλον ανάπτυξης μοντέλου διγράφου σε γλώσσα Python.....	73
Εικόνα 7.1: Διάγραμμα ύψους - αποθέματος ταμιευτήρα Πλαστήρα.....	77
Εικόνα 7.2: Διάγραμμα ύψους - επιφάνειας ταμιευτήρα Πλαστήρα.....	77
Εικόνα 7.3: Διάγραμμα ύψους - αποθέματος ταμιευτήρα Σμοκόβου.....	78
Εικόνα 7.4: Διάγραμμα ύψους - επιφάνειας ταμιευτήρα Σμοκόβου.....	78
Εικόνα 7.5: Διάγραμμα διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας συστήματος παράλληλων ταμιευτήρων Πλαστήρα και Σμοκόβου.....	80
Εικόνα 7.6: Διάγραμμα ύψους - αποθέματος ταμιευτήρα Κρεμαστών.....	83
Εικόνα 7.7: Διάγραμμα ύψους - επιφάνειας ταμιευτήρα Κρεμαστών.....	83
Εικόνα 7.8: Διάγραμμα ύψους πτώσης - παροχετευτικότητας στροβίλου ταμιευτήρα Κρεμαστών.....	84
Εικόνα 7.9: Διάγραμμα ύψους - αποθέματος ταμιευτήρα Καστρακίου.....	84
Εικόνα 7.10: Διάγραμμα ύψους - επιφάνειας ταμιευτήρα Καστρακίου.....	85
Εικόνα 7.11: Διάγραμμα ύψους πτώσης - παροχετευτικότητας στροβίλου ταμιευτήρα Καστρακίου.....	85
Εικόνα 7.12: Διάγραμμα ύψους - αποθέματος ταμιευτήρα Στράτου.....	86
Εικόνα 7.13: Διάγραμμα ύψους - επιφάνειας ταμιευτήρα Στράτου.....	86
Εικόνα 7.14: Διάγραμμα ύψους πτώσης - παροχετευτικότητας στροβίλου ταμιευτήρα Στράτου.....	87
Εικόνα 7.15: Διάγραμμα διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας συστήματος ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου.....	89
Εικόνα 7.16: Διάγραμμα διάρκειας - ψευδοημερήσιας παραγωγής ενέργειας συστήματος ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου.....	91
Εικόνα 8.1: Σύστημα παράλληλων ταμιευτήρων Πλαστήρα - Σμοκόβου.....	94
Εικόνα 8.2: Καμπύλη διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας με χρήση του λογισμικού Υδρονομέας και του μοντέλου διγράφου.....	97
Εικόνα 8.3: Σύστημα ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου σε σειρά.....	98
Εικόνα 8.4: Καμπύλη διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας με χρήση του λογισμικού Υδρονομέας και του μοντέλου διγράφου.....	101

Περίληψη

Η διαχείριση πολλαπλών υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων με στόχο την κάλυψη ενός συνολικού στόχου ενέργειας αποτελεί ένα σύνθετο και πολύπλευρο αντικείμενο μελέτης, που μπορεί να διατυπωθεί ως πρόβλημα παραμετροποίησης - προσομοίωσης - βελτιστοποίησης. Η μελέτη τέτοιων προβλημάτων διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση κατάλληλων κανόνων λειτουργίας, προσαρμοσμένων στους περιορισμούς του συστήματος. Καθοριστικός παράγοντας της διαχείρισης υδροενεργειακών έργων είναι και το ίδιο το χρονικό βήμα προσομοίωσης που επιλέγεται, το οποίο σαφώς επηρεάζει τα παραγόμενα αποτελέσματα. Έχοντας μια συνολική θεώρηση της πολυπλοκότητας που εμφανίζει η διαχείριση υδροενεργειακών συστημάτων, αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο προσομοίωσης συστημάτων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων, στο οποίο υλοποιήθηκε ένας καινοτόμος κανόνας λειτουργίας για την βελτιστοποίηση των ζητούμενων ποσοτήτων ενέργειας από κάθε ταμιευτήρα. Οι στόχοι ενέργειας για κάθε ταμιευτήρα εκφράζονται ως ποσοστά της συνολικής ενεργειακής ζήτησης που καλείται να καλύψει το σύστημα, τα οποία μπορούν να διατυπωθούν και ως οι μεταβλητές ελέγχου ενός προβλήματος βελτιστοποίησης μέτρων επίδοσης όπως, η πρωτεύουσα ενέργεια και το συνολικό οικονομικό όφελος του συστήματος. Το νέο μοντέλο διαχειρίζεται οποιαδήποτε τοπολογία ταμιευτήρων, επιτρέποντας την αναπροσαρμογή των στόχων μεταξύ των ταμιευτήρων, σε περίπτωση αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης ή παραγωγής πλεονάζουσας ενέργειας σε κάποιο έργο. Το νέο πλαίσιο που αναπτύχθηκε εξετάστηκε σε θεωρητικά προβλήματα καθώς και σε δύο περιπτώσεις πραγματικών συστημάτων στον Ελληνικό χώρο, με συγκριτική ανάλυση των ίδιων συστημάτων με το λογισμικό διαχείρισης υδατικών πόρων και υποστήριξης αποφάσεων Υδρονομέας. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο προσφέρει ορθότερη αναπαράσταση των ροών ενέργειας εντός του συστήματος και καλύτερες λύσεις ως προς την κατανομή των στόχων παραγωγής σε σύγκριση με την τρέχουσα μεθοδολογία του Υδρονομέα.

Abstract

The management of multiple hydroelectric reservoirs which are primarily used to cover an overall energy target is a complex and multidimensional topic of study, which can be formulated as a parameterization - simulation - optimization problem. The study of such problems is strongly facilitated by the use of appropriate operational rules, adapted to the system constraints. A crucial factor in the management of hydropower systems is the simulation time step chosen, which clearly affects the derived results. Having an overview of the complexity of the management of hydropower systems, a new simulation model for hydroelectric reservoir systems is developed, in which an innovative operational rule was implemented to optimize the required energy quantities from each reservoir. The target energy of each reservoir is expressed as a percentage of the total energy demand that the system is required to meet; these can also be considered as control variables within the optimization of performance measures such as the firm energy and the total economic benefit of the system. The new model handles any reservoir topology, by allowing for reallocating the target sharing among the reservoirs, in the case of inability to meet the demand or when surplus energy is produced in a specific component. The new framework was tested in theoretical problems as well as in two cases of real - world systems in Greece, by employing a comparative analysis of the same systems by using the water management software and decision support system Hydronomeas. The results indicate that the proposed methodological framework offers a more accurate representation of the energy fluxes across the system and better solutions with respect to the distribution of the energy production targets.

Extended Abstract

The planning and management of reservoir systems which are primarily used to cover hydroelectric energy demands is an issue of particular interest, since they exhibit a multitude of benefits, and several peculiarities as well. The main advantages are the long - term regulation of inflows, offered by the storage capacity of the reservoirs, and the fact that power plants have the ability to commence their operation instantly, providing energy when needed. Therefore, through an appropriate scheduling of the turbine operation, these systems are able to produce both base as well as peak energy, and thus their role in the overall energy mix is very important. Apart from peak energy, which is the most typical case, the hydroelectric reservoirs quite often produce excess energy, in order to save water that would be otherwise released through the spillway. This form of energy is called secondary, and its price is lower than the peak one.

It is well-known that the energy production by hydroelectric reservoirs is based on the transformation of the hydrodynamic energy of the water stored in the reservoir, to kinetic energy of falling water, next to mechanical energy in the turbines and finally electrical energy. The hydropower is the product of the water released from the turbines multiplied by the head; the latter is created by the elevation difference between the water level in the reservoir and the outlet level of the power station (the exact definition depends on the turbine type). In this respect, for a given energy production target, the amount of water to be released also depends on the head. Actually, the nonlinearity of the flow-energy transformation, the ability of producing excess energy and the extent of the electricity grid, render the management of hydropower systems significantly different and more challenging than the management of water resource systems the only serve consumptive uses.

The context of our research is the modelling of hydroelectric reservoir systems that are aimed to cover a global energy demand, which is configured as a parameterization - simulation - optimization (PSO) problem. The handling of such problems is greatly facilitated by the use of appropriate operational rules, which express the hydrosystem control on the basis of a relatively small number of parameters. Our backbone is the PSO approach and the associated parameterization employed within the decision support system Hydroneas, which is adapted in order to account for the complexities and peculiarities of hydroelectricity. As a result, the major objective of this thesis is the development of generic and improved operational rules for the management of multiple hydroelectric reservoirs, and their implementation within the existing methodological framework of Hydroneas.

Taking into account the above objectives, a new digraph model was created which has its background in the theory of graphs and the transshipment problem. The key idea is the configuration of a virtual model comprising nodes and edges, to represent the energy fluxes across multi-reservoir

hydropower systems of any topology, and their transformation to water fluxes. Figure 1 presents a theoretical example of three parallel reservoirs, which are used to cover the total energy demand of such a system. **T** is used to symbolize the reservoirs, whereas **Z** represent the total energy demand of the system and **X** corresponds to a cumulative sink node, which is introduced for ensuring a balanced configuration of the transshipment problem. The amount of energy transferred from reservoirs is symbolized x , u symbolizes the maximum power that can be produced or transferred (which is easily translated into flow capacity), and k is the unit cost or profit of each route. Under this formulation, there are multiple alternative solutions (i.e., feasible combinations of energy fluxes) that fulfill the model constraints, while the aim is to find the one that minimizes the total cost of the system, thus fulfilling the total energy demand or, at least, minimizing the total deficit with respect to the running target.

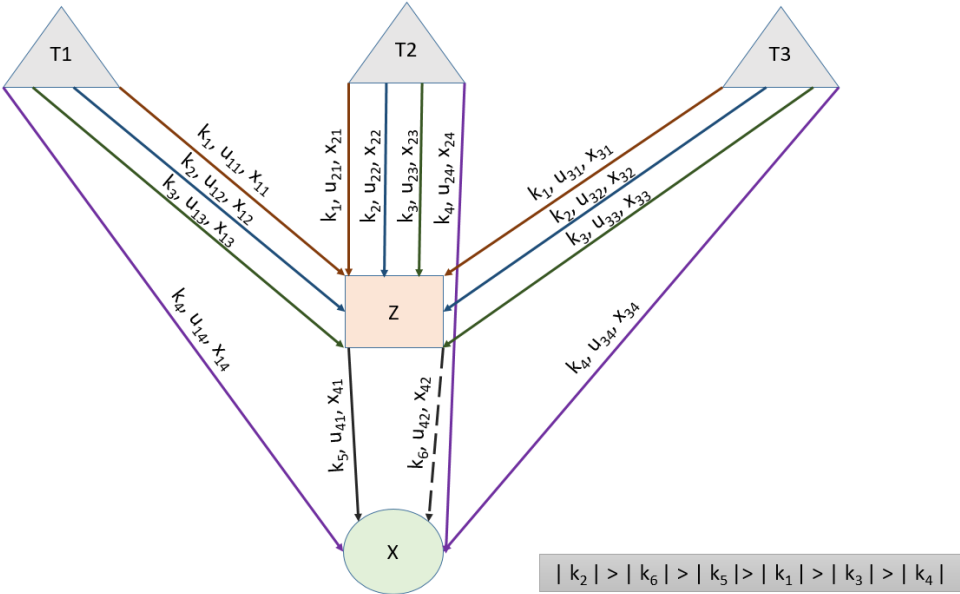


Figure 1: Digraph model of three parallel reservoirs

The new digraph model and the associated methodological framework, which are developed in a Python programming environment, also implement a novel operational rule for allocating energy targets to each reservoir. This rule differs from the one used so far in Hydroneas. In particular, each reservoir is initially asked to cover a percentage of a total energy target. If one or more reservoirs cannot meet their target or when a reservoir is forced to over-produce energy (i.e. as a means to avoid spills), the model allows for the reallocation of energy targets between all system components; this is a key advantage over the existing operational rule of Hydroneas, which is more suitable for consumptive water uses. As long as a reservoir manages to meet its own energy target and has the ability to generate additional energy, it can contribute to the system by offering extra amount of

energy to cover deficits that may arise in other reservoirs. Thus, if a reservoir cannot meet its own target, the system can receive at least a part of this energy deficit from the other reservoirs. Or, in case of over-production of one of the reservoirs, the other energy targets are lowered, in order to sum up to the global energy production target. On the contrary, Hydronomeas treats each reservoir of the system separately, i.e. each one produces energy according to its capacity and target, without allowing reallocations since the total energy of the system is the sum of individual energy production targets that are assigned to the reservoirs. Due to this difference, the new digraph model provides much better results, in terms of energy production and associated metrics (reliability, profit) for any reservoir system and any topology.

Another important contribution of this thesis is the investigation of several computational issues that mainly arise from the discretization of the water balance equations and essential simplifications made in the context of simulation models. Such issues are the formulation of the simulation model (explicit or implicit) and the selection of the time interval of computations, which is typically determined by the temporal resolution of input data (i.e. inflows). Taking as example the hydroelectric reservoir of Kremasta, for which there are available daily inflows for a 42-year period, it is first demonstrated that the use of an implicit scheme requiring only one iteration cycle ensures much more stable results, since the level-dependent quantities (head, discharge capacity, power production) are estimated by considering the average level at the beginning and the end of each simulation step.

Next, a number of theoretical investigations are employed, by means of sensitivity analyses. In particular, a simulation/optimization model is established and it is run with different time steps (daily, pseudo-daily, monthly, etc.) in order to examine how this affects its results. From this analysis it emerged that the average annual spill volumes decrease as the time step increases. For example, in the simulation case study concerning the reservoir of Kremasta, comparing the daily step and the monthly one, there is a noticeable difference in spill volumes. This is due to the fact that in monthly step simulation, a large inflow (which would take the reservoir over its capacity limit and spill) is evenly distributed over several days (throughout the month) and as a result the net monthly capacity of turbines allow a greater outflow. On the contrary, in daily step, the possibility of spill concerns each day separately and thus it is concentrated in a small number of days. In this case, the daily capacity of turbines is more possible to be inadequate to receive the total amount of spill, and as such the total volume of spills is increased. In the same case study, regarding the average annual benefit / cost, it arises that the benefit from the daily step is greater than the corresponding monthly one. As a result, it's obvious that the selection of time step actually affects the accuracy of simulation but in any case, the modeller should take into account the trade-off between achieving a satisfactory accuracy with respect to the computational cost that is analogous to the time resolution.

The proposed modelling framework is initially tested and validated in a number of challenging theoretical problems involving hydroelectric reservoirs in series and in parallel, in which it is examined a wide number of possible operation modes of hydropower systems. The model is flexible across the different topologies and ensures in all cases an optimal and realistic allocation of the desirable energy fluxes.

Next, the model is tested in two real-world hydroelectric reservoir systems in Greece, i.e. the two parallel reservoirs of Plastiras and Smokovo (Figure 2), at Western Thessaly, and the three cascade reservoirs along river Achelous, i.e. Kremasta, Kastraki and Stratos (Figure 3). In the real-world cases, for which some essential simplifications are made, the outcomes are also compared of our approach with a similar configuration employed within the current version of Hydronomeas. Table 1 provides summary results for the two case studies, while the optimized energy - duration curves are illustrated in Figure 4 and Figure 5. For both systems it can be easily concluded that the new digraph model ensures better results with respect to Hydronomeas.

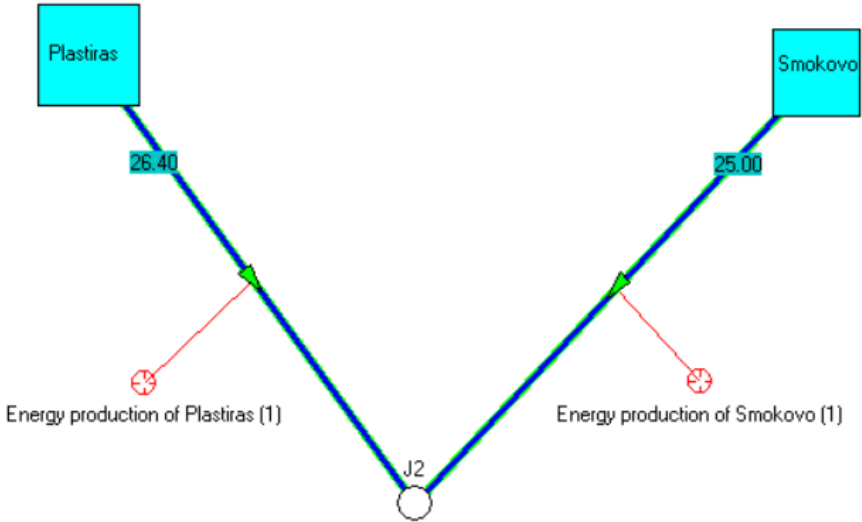


Figure 2: Schematization of two parallel reservoirs of Plastiras and Smokovo in Hydronomeas environment

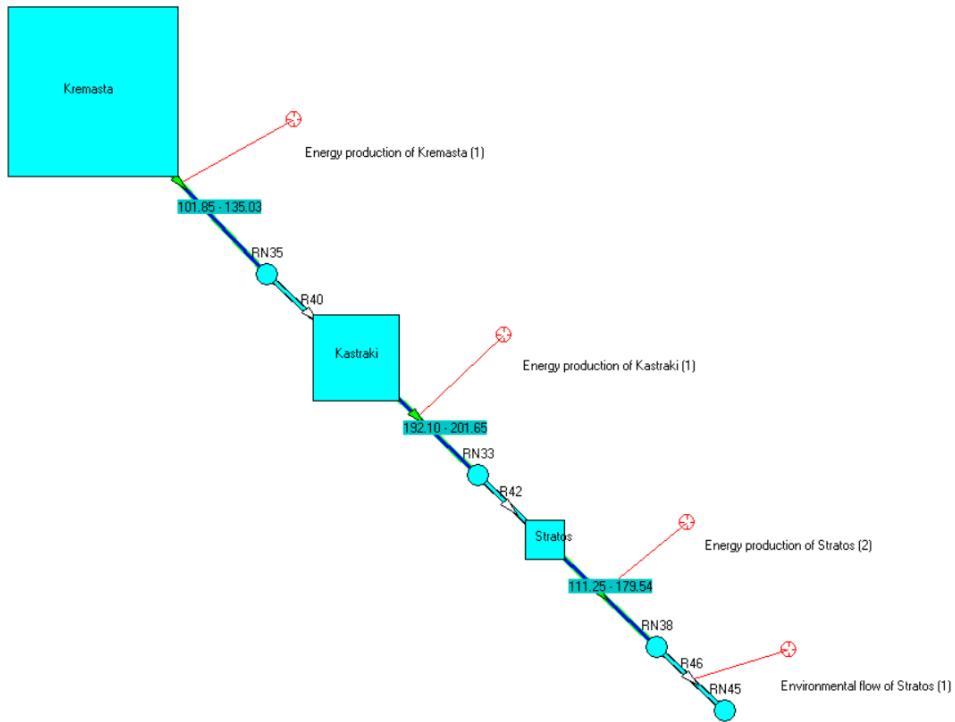


Figure 3: Schematization of three cascade reservoirs of Kremasta, Kastraki and Stratos in Hydronomeas environment

Table 1: Optimization results

Firm energy production in the system (E_f) (GWh/month)		
	Plastiras - Smokovo	Kremasta - Kastraki - Stratos
<i>Hydronomeas software</i>	18.36	121.82
<i>Digraph model</i>	22.70	138.00

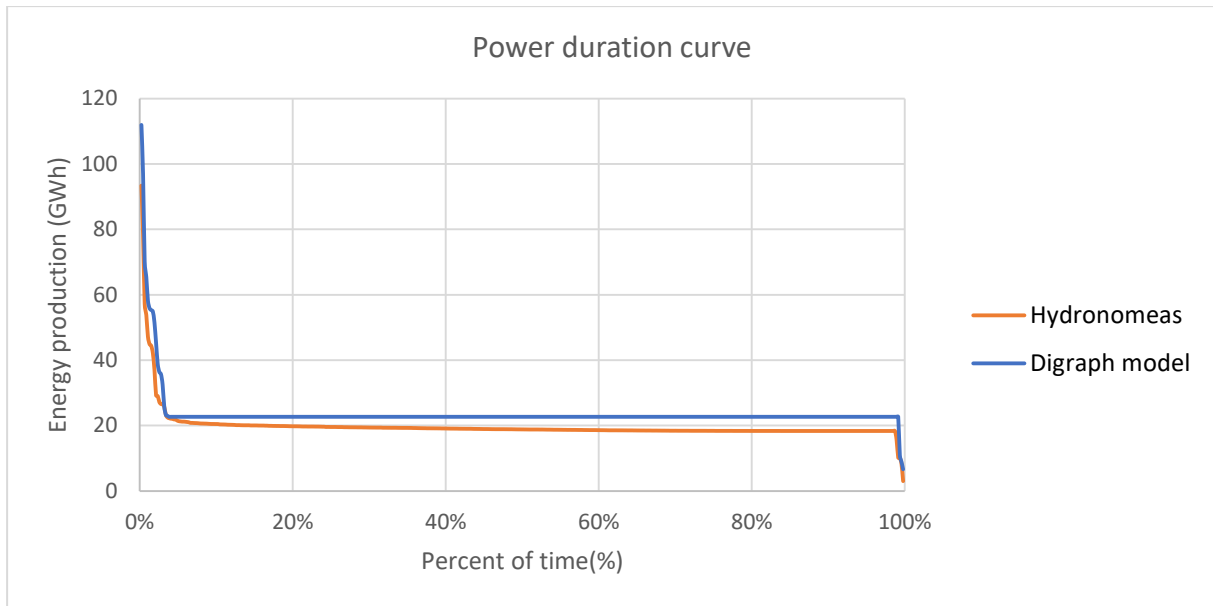


Figure 4: Power duration curve of Plastiras - Smokovo

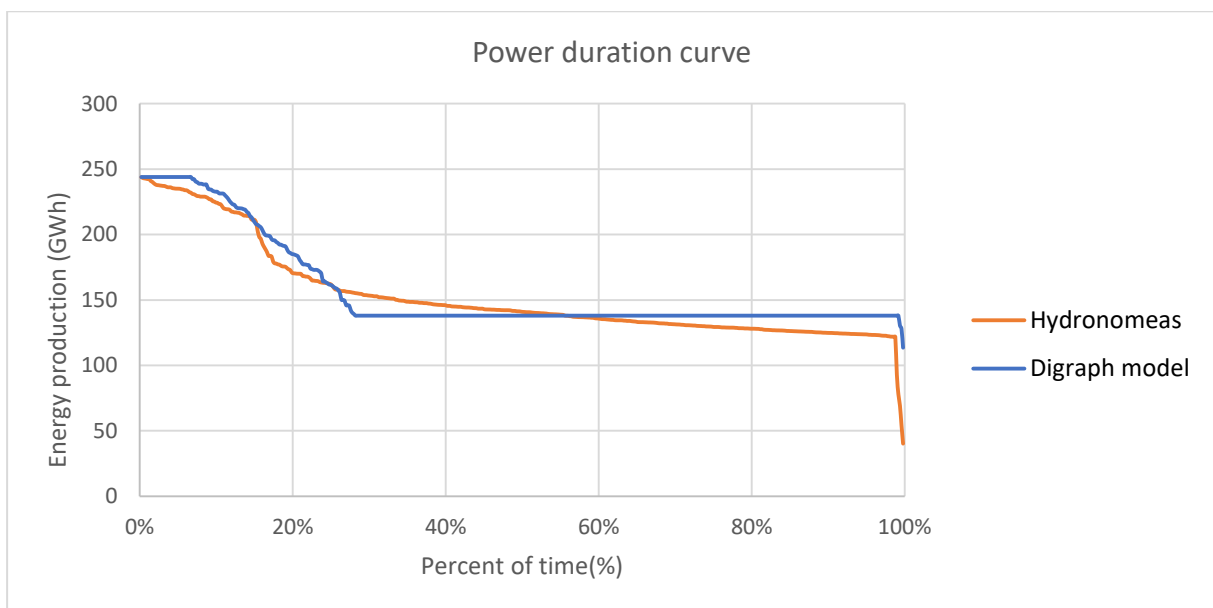


Figure 5: Power duration curve of Kremasta - Kastraki - Stratos

In the context of future steps, key research target is to integrate the energy allocation operational rule in the next version of the decision support system, called Hydronomeas 2020. The latter is developed in Python environment and will be released as a freeware package until the end of this year. The overall methodology will comprise the “parallel” implementation of two graph optimization models, one for the water fluxes and one for the energy fluxes. This scheme may also conclude additional power production and consumption components, and particularly renewable energy sources and hybrid schemes, also comprising pumped-storage plants.

1 Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικό σημείωμα

Η μελέτη και συνδυασμένη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία, που καθίσταται ακόμα πιο σύνθετη όταν στις άλλες χρήσεις νερού εμπλέκεται η παραγωγή ενέργειας από υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες. Ειδικότερα, όταν αναφερόμαστε στη διαχείριση υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων, γίνεται αναζήτηση μιας πολιτικής λειτουργίας που είναι βέλτιστη ως προς κριτήρια που εκφράζονται ως πιθανοτικά ενεργειακά μεγέθη (π.χ. πρωτεύουσα ενέργεια). Αν θεωρήσουμε ένα τέτοιο σύστημα ως υπολογιστικό γράφο δικτυακής μορφής, οι ταμιευτήρες αυτοί μπορεί να είναι συνδεδεμένοι είτε παράλληλα (δηλαδή να ανήκουν σε διαφορετικές λεκάνες ή υπολεκάνες απορροής) είτε σε σειρά (δηλαδή να βρίσκονται κατά μήκος ενός υδατορεύματος) είτε, στη γενική περίπτωση, να διαμορφώνουν ένα δίκτυο τυχαίας τοπολογίας. Το σύστημα αυτό δύναται να εξυπηρετεί, πέραν της παραγωγής ενέργειας, και άλλες χρήσεις νερού, όπως ύδρευση, άρδευση, διατήρηση περιβαλλοντικής ροής κτλ., και να διαθέτει εναλλακτικές διαδρομές για τη διασύνδεση πηγών και καταναλωτών. Η ροή του νερού στο σύστημα περιγράφεται μέσω των εξισώσεων υδατικού ισοζυγίου και υπόκειται σε διάφορους περιορισμούς, φυσικούς ή λειτουργικούς, που συνήθως διατυπώνονται με τη μορφή ορίων. Στους λειτουργικούς περιορισμούς εντάσσονται και οι κανόνες λειτουργίας του συστήματος, η τήρηση των οποίων είναι απαραίτητη προκειμένου να εξασφαλίζεται μια συστηματική διαχείριση του συστήματος. Οι παραμετρικοί αυτοί κανόνες, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου και τους περιορισμούς, συνιστούν τελικά το μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος (Ευστρατιάδης κ.ά., 2015).

Όσον αφορά στη παραπάνω διερεύνηση είναι πολύ σημαντική η ακρίβεια της αριθμητικής προσέγγισης που γίνεται στη διατύπωση της δυναμική του συστήματος (εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου), και η οποία συνδέεται άμεσα με τη χρονική διακριτότητα που επιλέγεται κάθε φορά. Τονίζεται ότι οι διεργασίες του συστήματος εξελίσσονται σε συνεχή χρόνο, ενώ στο μοντέλο εκφράζονται σε διακριτή μορφή, κατά κανόνα σε μηνιαία χρονική κλίμακα (αφού αναφερόμαστε σε υδροσυστήματα). Όσο μειώνεται η χρονική διακριτότητα, τόσο πιο ακριβής είναι η προσέγγιση αλλά και περισσότερα βήματα απαιτούνται για την προσομοίωση της περιόδου που εξετάζεται, οπότε οι υπολογισμοί καθίστανται πιο χρονοβόροι. Για το λόγο αυτό, σε τέτοιου τύπου μοντέλα προκύπτει το ζήτημα εντοπισμού του καλύτερου δυνατού συνδυασμού ακρίβειας και υπολογιστικού φόρτου, ανάλογα με το σκοπό και τη φύση του προβλήματος.

1.2 Αντικείμενο και ερευνητικοί στόχοι

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ αναπτύσσεται ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης συστημάτων υδατικών πόρων (Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997; Koutsoyiannis and Economou, 2003), το οποίο εντάχθηκε στο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων Υδρονομίας (Koutsoyiannis et al., 2002). Αντικείμενο της εργασίας είναι η εξέλιξη, προσαρμογή και γενίκευση του υπόψη πλαισίου για τη βέλτιστη διαχείριση συστημάτων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων τυχαίας τοπολογίας, η υπολογιστική του υλοποίηση με τρόπο που να εξασφαλίζει έναν πρόσφορο συνδυασμό ακρίβειας και ταχύτητας, και η ενσωμάτωση και έλεγχός του στη νέα έκδοση του λογισμικού (Υδρονομίας 2020).

Ειδικότερα, έχοντας ως αφετηρία το υφιστάμενο σχήμα παραμετροποίηση - προσομοίωση - βελτιστοποίηση, αναπτύχθηκε ένα βελτιωμένο πλαίσιο αναπαράστασης της διαχείρισης συστημάτων πολλαπλών υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων σε βάση νέων παραμετρικών κανόνων λειτουργίας τους, προκειμένου να επιτυγχάνεται η κάλυψη της συνολικής ζήτησης ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, κάθε ταμιευτήρας συμβάλλει στην κάλυψη της ζήτησης βάσει μιας προεπιλεγμένης πολιτικής λειτουργίας των στροβίλων, αλλά και σε κάθε υπολογιστικό βήμα δίνεται η δυνατότητα αναπροσαρμογής της παραγωγής σε επιμέρους έργα, λόγω συνήθων αποκλίσεων από τις ιδεατές συνθήκες (π.χ. παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας για ελαχιστοποίηση των απωλειών νερού λόγω υπερχειλίσεων, κατανομή ελλειμμάτων για εξασφάλιση ανθεκτικότητας). Το νέο πλαίσιο διαχείρισης, μαζί με τον νέο κανόνα λειτουργίας, εφαρμόζονται μέσω ενός μοντέλου μορφής υπολογιστικού διγράφου, που υλοποιεί την κατανομή των ροών ενέργειας σε κάθε χρονικό βήμα. Μέσω εσωτερικής βελτιστοποίησης του διγράφου προκύπτουν οι ποσότητες ενέργειας που απαιτούνται από κάθε ταμιευτήρα, προκειμένου να καλυφθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ζήτησης, δεδομένων και των λοιπών κανόνων, στόχων και περιορισμών του συστήματος. Η κατανομή των ποσοστών συνεισφοράς κάθε ταμιευτήρα στον ολικό στόχο ενεργειακής ζήτησης προκύπτουν μέσω εξωτερικής βελτιστοποίησης, με στόχο την μεγιστοποίηση της συνολικής παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας του συστήματος (ενέργεια που παράγεται με πολύ υψηλή αξιοπιστία) ή/και άλλων κριτηρίων επίδοσης.

Επιπλέον, επιχειρείται μια εκτενής ανάλυση των υπολογιστικών ζητημάτων που προκύπτουν σε προβλήματα προσομοίωσης της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, που αφορά στη χρονική διακριτότητα των εξισώσεων δυναμικής και στις διαφοροποιήσεις που αυτή επιφέρει στα παραγόμενα υδροενεργειακά μεγέθη. Η επιλογή του κατάλληλου χρονικού βήματος, λαμβάνοντας υπόψη τον βέλτιστο συνδυασμό ακρίβειας και υπολογιστικού φόρτου, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην υπολογιστική υλοποίηση του προβλήματος, ενώ έχει καίρια σημασία και στις μετέπειτα διαχειριστικές αποφάσεις.

Στο τελικό στάδιο της παρούσας έρευνας γίνεται η κατάστρωση του μοντέλου σε υπολογιστικό περιβάλλον Python και η εφαρμογή του σε δύο διαφορετικές μελέτες περίπτωσης πραγματικών συστημάτων, με δύο παράλληλους και τρεις εν σειρά υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που παράγονται με τη χρήση της υφιστάμενης έκδοσης του λογισμικού Υδρονομέας, καθώς το διαχειριστικό μοντέλο που καταρτίζεται φιλοδοξεί να ενσωματωθεί ως ενεργειακός επιλυτής στην υπό ανάπτυξη νέα του έκδοση με την ονομασία Υδρονομέας 2020.

Επισημαίνεται ότι πρόδρομα αποτελέσματα της εργασίας, που κυρίως αφορούν στο σκέλος της υπολογιστικής υλοποίησης (ανάπτυξη λογισμικού Υδρονομέας 2020), παρουσιάστηκαν στο ετήσιο συνέδριο της European Geosciences Union (Karavokiros et al., 2020).

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από εννέα κεφάλαια.

Στο παρόν **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μια εισαγωγή που εστιάζει κυρίως στο αντικείμενο και τους στόχους της εργασίας. Με τον τρόπο αυτό, παρουσιάζονται εν συντομία, το περιεχόμενο της έρευνας καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίστηκε, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να επιτευχθούν οι συγκεκριμένοι στόχοι.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται μια συνοπτική αναδρομή στο ευρύτερο μεθοδολογικό πλαίσιο που αφορά στη διαχείριση υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων, τα οποία αποτέλεσαν και βασική πηγή γνώσης προκειμένου να υλοποιηθεί η παρούσα εργασία.

Στο **τρίτο κεφάλαιο**, που αποτελεί και το κατεξοχήν ερευνητικό σκέλος της εργασίας, παρουσιάζεται το καινοτόμο μεθοδολογικό πλαίσιο παραμετροποίησης και προσομοίωσης της διαχείρισης υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων που αναπτύχθηκε. Ακόμη, γίνεται αναφορά στο πρόβλημα μεταφόρτωσης και στη θεωρία των γράφων, στα οποία στηρίχθηκε η μετέπειτα υλοποίηση του μοντέλου διγράφου σε περιβάλλον Python.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** εξετάζονται κάποια αριθμητικά παραδείγματα σε υποθετικά συστήματα παράλληλων και εν σειρά ταμιευτήρων, θεωρώντας εναλλακτικές καταστάσεις του ίδιου συστήματος, προκειμένου να γίνει πιο αντιληπτή η εφαρμογή του θεωρητικού πλαισίου που αναπτύχθηκε.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** περιγράφονται οι υπολογιστικές αναλύσεις που έγιναν, με εφαρμογή στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών, προκειμένου να διερευνηθεί το ζήτημα της χρονικής διακριτότητας και να αναδειχθούν οι διαφοροποιήσεις που αυτή επιφέρει στα αποτελέσματα της υδροενεργειακής προσομοίωσης.

Στο **έκτο κεφάλαιο** γίνεται μια σύντομη αναφορά στο λογισμικό Υδρονομέας και στις καινοτομίες που θα συμπεριλαμβάνει η νέα έκδοση του (Υδρονομέα 2020), μέρος των οποίων θα είναι και το μοντέλο διγράφου που υλοποιείται στην παρούσα εργασία.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** παρατίθενται δύο υπολογιστικά παραδείγματα διαχείρισης πολλαπλών συστημάτων υδροενεργειακών ταμιευτήρων, για μία παράλληλη διάταξη (υδροσύστημα Πλαστήρα - Σμοκόβου) και μία σε σειρά (ταμιευτήρες Κρεμαστών, Καστρακίου και Στράτου στον Αχελώο), με χρήση του μοντέλου διγράφου που αναπτύχθηκε. Μέσω διαδικασίας βελτιστοποίησης, προκύπτει η παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια του συστήματος καθώς και τα ποσοστά συνεισφοράς κάθε ταμιευτήρα στην κάλυψη του συνολικού στόχου του συστήματος.

Στο **όγδοο κεφάλαιο** γίνεται σύγκριση μεταξύ του μοντέλου διγράφου, που υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Python, και του λογισμικού Υδρονομέας, όσον αφορά στην εφαρμογή τους σε συστήματα υδροενεργειακών ταμιευτήρων, με στόχο την κάλυψη της ζήτησης σε ενέργεια. Αρχικά εφαρμόζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης της παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας στα δύο παραδείγματα του προηγούμενου κεφαλαίου, ενώ ακολουθούν η σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων των δύο προσεγγίσεων.

Τέλος, στο **ένατο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από την ανάλυση των αποτελεσμάτων όσο και από τη γενικότερη έρευνα που διεξήχθη. Τίθενται, επίσης, ορισμένοι προβληματισμοί αλλά και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

2 Βασικές έννοιες ανάλυσης υδροενεργειακών συστημάτων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται θεμελιώδεις έννοιες και ορισμοί οι οποίοι σχετίζονται με την ανάλυση και διαχείριση υδροενεργειακών συστημάτων και αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο της ανάλυσης που ακολουθεί και βασίζεται στη συστημική προσέγγιση του προβλήματος. Ειδικότερα, περιγράφονται οι μεθοδολογίες μοντελοποίησης των ροών νερού και ενέργειας μέσω των εξισώσεων υδατικού ισοζυγίου, γίνεται διαχωρισμός της παραγόμενης ενέργειας σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα, και αναλύεται το συνδυαστικό σχήμα παραμετροποίηση - προσομοίωση - βελτιστοποίηση ως το πλέον πρόσφορο διαχειριστικό εργαλείο των συστημάτων αυτών. Με τον τρόπο αυτό, τίθεται ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο διαχείρισης υδροενεργειακών συστημάτων, το οποίο διευκολύνει την περαιτέρω μελέτη τους.

2.1 Συστημική προσέγγιση στη διαχείριση υδατικών πόρων

Με τον όρο σύστημα νοείται ένα σύνολο αποτελούμενο από ανεξάρτητα μεταξύ τους στοιχεία, το οποίο έχει τα εξής χαρακτηριστικά (Mays and Tung, 1992):

- ένα σύνορο που καθορίζει αν το στοιχείο ανήκει στο σύστημα ή το περιβάλλον
- αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον (είσοδοι, έξοδοι)
- ένα σύνολο σχέσεων μεταξύ των στοιχείων που ανήκουν στο σύστημα και των εισόδων και εξόδων του.

Τα συστήματα διακρίνονται σε στατικά, εφόσον οι συνθήκες που σχετίζονται με τις εισόδους ή τα χαρακτηριστικά του δεν μεταβάλλονται χρονικά και σε δυναμικά όταν ισχύει το αντίθετο.

Οι μεθοδολογίες μοντελοποίησης των ροών νερού και ενέργειας, μέσω των εξισώσεων υδατικού ισοζυγίου, ακολουθούν τη συστημική προσέγγιση. Κύριο χαρακτηριστικό της προσέγγισης αυτής είναι η διαδικασία αποδόμησης ενός συστήματος σε μικρότερα απλούστερα μέρη, με σκοπό την μακροσκοπική αναγνώριση του τρόπου με τον οποίο αλληλεπιδρούν τα στοιχεία του συστήματος τόσο μεταξύ τους όσο και με το περιβάλλον, χωρίς ωστόσο να αποβλέπει στη λεπτομερειακή εξέταση των σχέσεων ή φυσικών διεργασιών που τα διέπουν (Grigg, 1996).

Ως υδροσύστημα (hydrosystem) νοείται ένα σύστημα που περιλαμβάνει τα φυσικά υδάτινα σώματα και τεχνικά έργα των οποίων η συνδυασμένη λειτουργία εξυπηρετεί έναν ή περισσότερους σκοπούς, που σχετίζονται τόσο με την αξιοποίηση του νερού ως φυσικού πόρου, όσο και με την προστασία από τις καταστροφικές επιπτώσεις της δράσης του ως φυσικού κινδύνου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2007). Τα υδροσύστημα ανήκουν στην κατηγορία των δυναμικών συστημάτων, καθώς τόσο οι

είσοδοι τους (φυσικές και ανθρωπογενείς διεργασίες, ήτοι εισροές και ζητήσεις) όσο και τα χαρακτηριστικά του (τεχνικά έργα και ιδιότητές τους) είναι χρονικά μεταβαλλόμενα.

2.2 Υδατικό ισοζύγιο

Η δυναμική ενός υδροσυστήματος, δηλαδή οι ροές νερού, περιγράφονται με τη χρήση των εξισώσεων υδατικού ισοζυγίου, οι οποίες προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της μάζας. Σε θεωρητικό επίπεδο, αυτές διατυπώνονται σε συνεχή χρόνο, με τη μορφή διαφορικών εξισώσεων ως εξής:

$$\frac{ds(t)}{dt} = i(t) - r(t) \quad (2.1)$$

όπου $\frac{ds(t)}{dt}$ είναι ο ρυθμός αποθήκευσης νερού π.χ. σε ταμιευτήρα, $i(t)$ οι εισροές (π.χ. απορροές από ανάντη λεκάνη απορροής, κατακρημνίσεις κ.ά.), και $r(t)$ οι εκροές (π.χ. εξάτμιση, υπόγειες διαφυγές, απολήψεις, υπερχειλίσεις κ.ά.). Στο συνεχή χρόνο, τόσο οι εισροές όσο και οι εκροές εκφράζονται σε όρους παροχής.

Στα μαθηματικά μοντέλα των υδροσυστημάτων, οι εξισώσεις αναγκαστικά διατυπώνονται σε διακριτή μορφή, χωρίζοντας την περίοδο μελέτης σε ίσα διαστήματα $\Delta t = t_j - t_{j-1}$. Έτσι, οι εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου παίρνουν την παρακάτω μορφή:

$$s_j = s_{j-1} + i_j - r_j \quad (2.2)$$

όπου οι εισροές και εκροές εκφράζονται σε μονάδες όγκου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2015).

Η δυναμική ενός υδροσυστήματος, όπως περιγράφηκε παραπάνω, διέπεται από ένα σύνολο περιορισμών, που διακρίνονται σε φυσικούς και λειτουργικούς. Οι φυσικοί περιορισμοί προκύπτουν από τα όρια του φυσικού συστήματος (π.χ. δυναμικότητα υδροφορέα) και των τεχνικών έργων (π.χ. παροχευετικότητα υδραγωγείου, στάθμη υπερχειλίσης κ.ά.). Οι λειτουργικοί περιορισμοί, τίθενται από τον διαχειριστή του συστήματος με τη μορφή δεσμεύσεων που έχουν ως στόχο την ομαλή λειτουργία του συστήματος και την ικανοποίηση των χρήσεων νερού. Μεγάλο μέρος των φυσικών και λειτουργικών περιορισμών διατυπώνεται με τη μορφή ορίων (άνω και κάτω). Στους λειτουργικούς περιορισμούς εντάσσονται και οι κανόνες λειτουργίας του συστήματος, οι οποίοι δεν μπορούν να εκφραστούν μέσω ορίων ή αναλυτικών μαθηματικών σχέσεων, καθώς διαθέτουν μια πιο πολύπλοκη μορφή. Οι φυσικοί περιορισμοί είναι απόλυτα δεσμευτικοί, ενώ οι λειτουργικοί μπορεί και να μην είναι, σε περίπτωση που δεν είναι εφικτό να συναληθεύουν.

Στην περίπτωση ενός υδροσυστήματος αποτελούμενου από πολλαπλούς ταμιευτήρες, συνδεδεμένους είτε παράλληλα είτε σε σειρά, οι εκφράσεις του υδατικού ισοζυγίου εφαρμόζονται με κάποιες διαφοροποιήσεις, που εξαρτώνται από την τοπολογία (π.χ. όταν οι ταμιευτήρες είναι σε σειρά οι εκροές του ενός αποτελούν εισροές του άλλου, κ.λπ.).

2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Μια από τις κύριες χρήσεις νερού που εξυπηρετούν οι ταμιευτήρες είναι η παραγωγή ενέργειας (Εικόνα 2.1). Η ποσότητα της ενέργειας αυτής εξαρτάται κυρίως από τον διαθέσιμο όγκο νερού στον ταμιευτήρα και από το ύψος πτώσης, δηλαδή την υψομετρική διαφορά που δημιουργείται μεταξύ της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα και της στάθμης εξόδου του αγωγού φυγής (θέση σταθμού παραγωγής). Αρχικά, η δυναμική ενέργεια που έχει το νερό που βρίσκεται σε κάποιο υψόμετρο (στάθμη ταμιευτήρα) μετατρέπεται σε υδραυλική (κινητική ενέργεια και ενέργεια πίεσης), όταν αυτό ρέει προς περιοχές χαμηλότερου υψομέτρου. Με τη σειρά της, η υδραυλική ενέργεια, μέσω μιας υδροδυναμικής μηχανής, που ονομάζεται στρόβιλος και των συνοδών του Η/Μ έργων (γεννήτρια, μετασχηματιστής), μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική. Η βασική σχέση που διέπει την παραγόμενη ενέργεια, σε μια χρονική στιγμή t , E_t , δίνεται από τη σχέση:

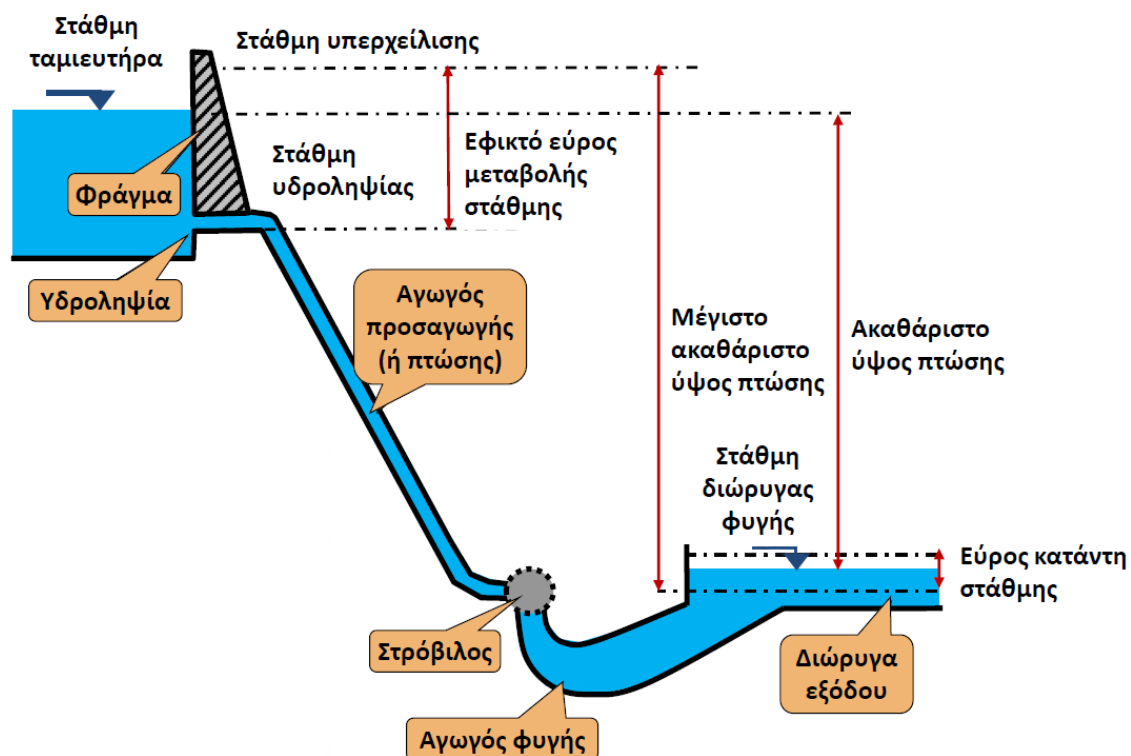
$$E_t = \psi V_t H_t \quad (2.3)$$

όπου ψ είναι η ειδική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα ύψους πτώσης, V_t είναι ο όγκος νερού που διέρχεται από το στρόβιλο και H_t το ολικό ύψος πτώσης. Η ειδική ενέργεια δίνεται από τη σχέση:

$$\psi = 0.2725 \eta \frac{H_n}{H} \quad (2.4)$$

όπου η είναι ο βαθμός απόδοσης του στρόβιλου, H το ολικό (ακαθάριστο) ύψος πτώσης και H_n το καθαρό ύψος πτώσης, το οποίο προκύπτει με αφαίρεση των απωλειών ενέργειας (γραμμικών και τοπικών) από το ολικό ύψος πτώσης.

Η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από ένα υδροσύστημα διακρίνεται σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα. Πρωτεύουσα ενέργεια καλείται η ποσότητα εκείνη που δύναται να παραχθεί από το σύστημα χωρίς καμία ή με πολύ μικρή διακοπή για το σύνολο της περιόδου λειτουργίας του (Mays and Tung, 1992). Η επιπλέον ενέργεια που παράγεται πέραν της πρωτεύουσας ονομάζεται δευτερεύουσα, και συναντάται κυρίως σε χρονικές περιόδους μεγάλων εισροών στον ταμιευτήρα. Οι μεγαλύτερες εκροές πραγματοποιούνται με σκοπό την αποφυγή υπερχειλίσεων.



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση μονάδας παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας (Ευστρατιάδης κ.ά., 2020)

2.4 Σχήμα παραμετροποίηση - προσομοίωση - βελτιστοποίηση

Κατά την ανάλυση συστημάτων που αφορούν σε προβλήματα λήψης αποφάσεων (decision - making), προκύπτει μια σειρά από εναλλακτικές επιλογές (alternatives), οι επιπτώσεις των οποίων αξιολογούνται (evaluations). Έστω ότι υπάρχει ένα σύνολο μεταβλητών ελέγχου (control variables), $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, που μπορεί να περιγράψει κάθε μία από τις επιλογές αυτές και σε κάθε τέτοια περιγραφή μπορεί να αντιστοιχιστεί ένα μέτρο επίδοσης (performance measure), τότε η επιλογή που βελτιστοποιεί (μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί, ανάλογα τη φύση του του προβλήματος) αυτό το μέτρο επίδοσης, θεωρείται η βέλτιστη. Το μέτρο επίδοσης αποδίδεται μέσω μαθηματικής έκφρασης που ονομάζεται αντικειμενική ή στοχική συνάρτηση (objective function). Ανάλογα με το αν το μέτρο επίδοσης εμπεριέχει ένα ή περισσότερα κριτήρια, η στοχική συνάρτηση είναι, κατ' αντιστοιχία, βαθμωτή ή διανυσματική.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο παραμετροποίηση - προσομοίωση - βελτιστοποίηση αποτελεί μια καλά τεκμηριωμένη τεχνική για την ανάλυση συστημάτων, και έχει ως στόχο την καλύτερη δυνατή περιγραφή της λειτουργίας του με όσο το δυνατό μικρότερο υπολογιστικό φόρτο. Ειδικότερα, η παραμετροποίηση αναφέρεται στο καθορισμό των μεταβλητών ελέγχου του συστήματος με φειδωλότητα, δηλαδή με τη χρήση μικρού αριθμού παραμέτρων, ώστε να περιοριστεί ο υπολογιστικός φόρτος κατά τη βελτιστοποίηση του. Η προσομοίωση αφορά στην αναπαράσταση της

λειτουργίας και συμπεριφοράς ενός δυναμικού συστήματος, όπως αυτό εξελίσσεται στο χρόνο (Winston, 1994). Καθώς η προσομοίωση δεν γίνεται στο πρωτότυπο σύστημα, είναι αναγκαία η κατάστρωση ενός μοντέλου. Τα μοντέλα συνήθως κωδικοποιούνται σε γλώσσα προγραμματισμού και αποτελούνται από μαθηματικές και λογικές σχέσεις με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται φυσική και στατιστική συνέπεια του αρχικού συστήματος. Εφόσον το σύστημα διέπεται από αβεβαιότητες (κάτι που είναι εγγενές σε υδροσυστήματα, λόγω της αβέβαιης φύσης του υδρολογικού κύκλου αλλά και των κοινωνικο-οικονομικών διεργασιών), αναφερόμαστε σε μοντέλα στοχαστικής προσομοίωσης. Αυτό εξασφαλίζεται με τη χρήση συνθετικών χρονοσειρών εισόδου, που διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων και τη συσχέτιση μεταξύ τους, αλλά και την εισαγωγή στατιστικής συμπεριφοράς σε στοιχεία του συστήματος. Τέλος, η βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία συστηματικής αναζήτησης της βέλτιστης τιμής (μέγιστης ή ελάχιστης, ανάλογα τη φύση του προβλήματος) της στοχαστικής συνάρτησης ως προς τις μεταβλητές ελέγχου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2015). Συνήθως ανάγεται σε ένα επαναληπτικό βρόγχο όπου επιλέγονται τιμές των μεταβλητών ελέγχου, αξιολογούνται οι επιπτώσεις τους στο μέτρο επίδοσης και κατόπιν επαναπροσδιορίζονται, ανάλογα με τον επιλεγμένο αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

3 Ανάπτυξη διαχειριστικού πλαισίου συστημάτων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων

Το πρώτο βήμα που αφορά στην ανάπτυξη του διαχειριστικού πλαισίου σχετίζεται με την προσομοίωση λειτουργίας ενός ταμιευτήρα, μέσω των εξισώσεων του υδατικού ισοζυγίου. Το υδατικό ισοζύγιο περιγράφει τη σχέση μεταξύ προσφοράς (διαθέσιμης ποσότητας) και ζήτησης νερού για την κάλυψη διαφόρων αναγκών (π.χ. ύδρευση, άρδευση, παραγωγή ενέργειας κ.λπ.) από τον ταμιευτήρα, για το χρονικό ορίζοντα που εξετάζεται. Επειδή η ακριβής περιγραφή των διεργασιών ενός τέτοιου συστήματος είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, αναγκαστικά γίνονται ορισμένες παραδοχές που αφορούν τόσο στον τρόπο λειτουργίας του συστήματος όσο και στη διαδοχική σειρά των διεργασιών μέσα σε αυτό. Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος και την επιλογή του χρονικού βήματος που επιλέγεται (π.χ. ημερήσιο, μηνιαίο κ.λπ.) ορισμένες διεργασίες είναι πιθανό είτε να παραληφθούν είτε να περιγραφούν με απλούστερο τρόπο.

Στο κεφάλαιο αυτό, μετά την αναλυτική περιγραφή των εξισώσεων υδατικού ισοζυγίου για ένα ταμιευτήρα (με την ενσωμάτωση διάφορων παραδοχών), ακολουθεί εκτενής αναφορά στο πρόβλημα μεταφόρτωσης και στη θεωρία των γράφων. Σε αυτές τις μεθοδολογίες στηρίχθηκε η μετέπειτα υλοποίηση του μοντέλου διγράφου σε περιβάλλον Python για την διαχείριση υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων, όπως περιγράφεται στο τέλος του κεφαλαίου.

3.1 Δεδομένα εισόδου

Για την κατάστρωση του υδατικού ισοζυγίου, είναι απαραίτητη η συλλογή διαφόρων στοιχείων που αφορούν τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και στα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Ιδιαίτερης σημασίας είναι τα διαθέσιμα δεδομένα των υδρολογικών διεργασιών. Τέτοια μεγέθη είναι οι εισροές από τη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα που αφορούν στο χρονικό ορίζοντα μελέτης και οι οποίες δίνονται (ή δημιουργούνται σε περίπτωση που δεν είναι γνωστές για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο αλλά υπάρχουν ιστορικά δεδομένα) με τη μορφή χρονοσειρών. Οι εισροές αυτές θα πρέπει να βρίσκονται σε συμφωνία με το χρονικό βήμα που επιλέγεται να εξετασθεί. Για παράδειγμα, στην περίπτωση μηνιαίας προσομοίωσης, θα πρέπει να είναι γνωστές οι εισροές κάθε μήνα για όλη την περίοδο ελέγχου, ενώ για ημερήσια προσομοίωση θα πρέπει να είναι γνωστές οι ημερήσιες τιμές εισροών, κ.ο.κ. Άλλα υδρολογικά δεδομένα, ανηγμένα στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, είναι οι απώλειες λόγω εξάτμισης (που συνήθως εκτιμώνται με κάποια προσεγγιστική μέθοδο) και οι εισροές λόγω βροχόπτωσης.

Πέραν των υδρολογικών δεδομένων, είναι απαραίτητη η γνώση των τεχνικών χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα, όπως είναι η Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ), η Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας

(ΚΣΛ), η στάθμη εξόδου του αγωγού φυγής, η παροχετευτικότητα του αγωγού προσαγωγής κ.λπ. Ακόμη, πρέπει να είναι γνωστές οι σχέσεις μεταβολής της επιφάνειας και του αποθέματος, για διάφορες στάθμες. Οι υπόψη σχέσεις δίνονται είτε σε μορφή νομογραφήματος (καμπύλες ταμιευτήρα) είτε σε αναλυτική μορφή.

Επίσης, είναι αναγκαία η γνώση των ποσοτικών μεγεθών που αφορούν στις ζητήσεις νερού που αναμένεται να καλύψει ο ταμιευτήρας. Τέτοιες ζητήσεις σχετίζονται με την ύδρευση, την άρδευση, την διατήρηση της περιβαλλοντικής ροής κατάντη του ταμιευτήρα, την παραγωγή ενέργειας κ.λπ. Οι ζητήσεις αυτές τίθενται ως στόχοι που καλείται να καλύψει ένα σύστημα. Συνήθως, όταν ένα σύστημα είναι σχεδιασμένο ώστε να καλύπτει πάνω από μια ζητήσεις, ο διαχειριστής επιλέγει να δώσει σειρά προτεραιότητας για την κάλυψη τους, ανάλογα με τη φύση του συστήματος. Στη συγκεκριμένη εργασία, προς απλοποίηση του προβλήματος, αλλά χωρίς βλάβη της γενικότητας, επιλέχθηκε η εξέταση αμιγώς υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων που έχουν ως στόχο την κάλυψη ενεργειακών αναγκών. Βέβαια, στο πλαίσιο αυτό εφαρμόζεται πάντα και η διατήρηση της περιβαλλοντικής ροής στα κατάντη, καθώς είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση και προστασία των οικοσυστημάτων που αναπτύσσονται στην περιοχή και για το λόγο αυτό δεν μπορεί να παραληφθεί σε σύγχρονα συστήματα ταμιευτήρων.

Παρακάτω, περιγράφονται αναλυτικά όλες οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την κατάστρωση του υδατικού ισοζυγίου ενός ταμιευτήρα. Το ισοζύγιο διαμορφώθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετεί τις ανάγκες της παρούσας ερευνητικής εργασίας, και για τον λόγο αυτό ορισμένες φυσικές διεργασίες (π.χ. απώλειες λόγω εξάτμισης ή υπόγειων διαφυγών) παραλείφθηκαν, ενώ άλλες απλοποιήθηκαν.

3.2 Προσομοίωση υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρα

Έστω ότι η χρονική περίοδος χωρίζεται σε ίσα διαστήματα $\Delta t = t_j - t_{j-1}$. Όλες οι εξισώσεις που ακολουθούν δείχνουν τα στάδια υπολογισμού του ισοζυγίου σε ένα χρονικό βήμα j . Η πρώτη σχέση που παρατίθεται είναι η εξίσωση που δίνει το απόθεμα S_j συναρτήσει της στάθμης Z_j :

$$S_j = k(Z_j - Z_0)^\lambda \quad (3.1)$$

Επιλύοντας την εξίσωση (3.1) ως προς Z_j , προκύπτει η επόμενη σχέση, η οποία προϋποθέτει τη γνώση της στάθμης πυθμένα (Z_0) και του αρχικού αποθέματος (S_0) του ταμιευτήρα στην αρχή της περιόδου που εξετάζεται. Με βάση αυτό, υπολογίζεται η στάθμη Z για το χρονικό βήμα j ως εξής:

$$Z_j = Z_0 + \left(\frac{S_{j-1}}{k} \right)^{1/\lambda} \quad (3.2)$$

όπου, Z_j είναι η στάθμη του νερού σε m, Z_0 η στάθμη πυθμένα σε m, S_{j-1} το απόθεμα του ταμιευτήρα σε hm^3 στο τέλος του προηγούμενο βήματος (για το λόγο αυτό στο πρώτο βήμα της προσομοίωσης πρέπει να είναι γνωστό το αρχικό απόθεμα S_0), κ και λ είναι οι συντελεστές κλίμακας και σχήματος, αντίστοιχα, και περιγράφουν τη γεωμετρία της λεκάνης κατάκλυσης που σχηματίζεται ανάντη του φράγματος, συναρτήσει της στάθμης.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το ύψος πτώσης, που προκύπτει ως η υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα και της στάθμης εξόδου του αγωγού φυγής, ως εξής:

$$H_j = Z_j - Zp_j \quad (3.3)$$

όπου H_j είναι το ύψος πτώσης, Z_j η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα και Zp_j η στάθμη εξόδου του αγωγού φυγής, εκφρασμένα σε m.

Με βάση το ύψος πτώσης, υπολογίζεται η παροχευετικότητα του αγωγού προσαγωγής (ή πτώσης). Αυτό γίνεται μέσω μιας μη γραμμικής σχέσης της γενικής μορφής $y = ax^b$. Έτσι προκύπτει:

$$q_j = a H_j^b \quad (3.4)$$

όπου q_j είναι η παροχευετικότητα του αγωγού προσαγωγής σε hm^3 , H_j το ύψος πτώσης σε m και a , b συντελεστές. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι η σχέση (3.4) εκφράζεται σε όρους όγκου νερού που μπορεί να διέλθει από τον αγωγό στο διάστημα ενός μήνα, άρα η τιμή του συντελεστή κλίμακας a αναφέρεται σε μηνιαίο βήμα προσομοίωσης. Στην περίπτωση ημερήσιου βήματος η σχέση αυτή μετασχηματίζεται σε:

$$q_j = \left(\frac{a}{N}\right) H_j^b \quad (3.5)$$

όπου N οι μέρες του μήνα που εξετάζεται.

Στη συνέχεια υλοποιούνται οι εισροές και εκροές νερού, με μια προκαθορισμένη σειρά που ορίζεται συμβατικά. Προφανώς, αυτό αποτελεί παραδοχή του αριθμητικού σχήματος, δεδομένου ότι οι διεργασίες του υδατικού ισοζυγίου εξελίσσονται σε συνεχή χρόνο. Σημειώνεται ότι η ακρίβεια της διακριτοποίησης αποτελεί ένα από τα κύρια ζητήματα που διερευνώνται στη παρούσα εργασία, και συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 5. Σε κάθε περίπτωση, μετά το πέρας κάθε προσθήκης ή αφαίρεσης νερού, επικαιροποιείται το απόθεμα του ταμιευτήρα. Με τον τρόπο αυτό, σε κάθε στάδιο υπολογισμών εντός του ίδιου χρονικού βήματος, προκύπτει ένα «ενδιάμεσο» απόθεμα που θα επισημαίνεται με τον αντίστοιχο δείκτη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στο πρώτο στάδιο ο προσδιορισμός του νέου αποθέματος προκύπτει μετά από την προσθήκη των εισροών στον ταμιευτήρα ως εξής:

$$S_j^1 = S_{j-1} + I_j \quad (3.6)$$

όπου S_j^1 είναι το νέο ενδιάμεσο απόθεμα, I_j οι εισροές στον ταμιευτήρα και S_{j-1} το απόθεμα του ταμιευτήρα στο τέλος του προηγούμενου βήματος. Όλα τα μεγέθη της εξίσωσης είναι εκφρασμένα σε hm^3 .

Η πρώτη σε προτεραιότητα ζήτηση που δύναται να καλύψει ο ταμιευτήρας είναι η διατήρηση της περιβαλλοντικής ροής στα κατάντη. Για τον λόγο αυτό, υπολογίζεται η απόληψη για εξασφάλιση της περιβαλλοντικής ροής με τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$Renv_j = \min(Venv, \max(S_j^1 - Vd, 0)) \quad (3.7)$$

όπου $Renv_j$ είναι η απόληψη για εξασφάλιση της περιβαλλοντικής ροής και S_j^1 είναι το απόθεμα στον ταμιευτήρα στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Το μέγεθος Vd υποδηλώνει τον νεκρό όγκο του ταμιευτήρα. Όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε hm^3 . Ο όγκος που απαιτείται για τη διατήρηση της περιβαλλοντικής ροής συμβολίζεται με $Venv$ και γενικά έχει μια σταθερή τιμή. Σε κάποιες αναλύσεις, πιο απλοποιητικά, θα μπορούσε να εκφραστεί ως σταθερό ποσοστό (π.χ. 10%) του μέσου όρου των συνολικών εισροών ως εξής:

$$Venv = 10\% \text{ average}(I) \quad (3.8)$$

όπου I είναι οι εισροές στον ταμιευτήρα στη χρονική περίοδο που εξετάζεται. Τόσο οι εισροές όσο και ο όγκος $Venv$ είναι εκφρασμένα σε hm^3 .

Μετά την απόληψη για διατήρηση της περιβαλλοντικής ροής επικαιροποιείται το απόθεμα του ταμιευτήρα, ώστε να χρησιμοποιηθεί στους μετέπειτα υπολογισμούς. Έτσι προκύπτει:

$$S_j^2 = S_j^1 - Renv_j \quad (3.9)$$

όπου S_j^1, S_j^2 οι αλλαγές στο απόθεμα κατά τη διάρκεια του βήματος j και $Renv_j$ η απόληψη για εξασφάλιση της περιβαλλοντικής ροής στο βήμα αυτό. Όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε hm^3 .

Η επόμενη χρήση νερού που πρέπει να καλυφθεί από τον ταμιευτήρα είναι η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια. Έχοντας ως δεδομένο ένα στόχο ενέργειας, σταθερό σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης, τον οποίο αναμένεται να καλύψει ο ταμιευτήρας, η ζήτηση σε όρους όγκου στο βήμα j υπολογίζεται ως εξής:

$$Venergy_j = \frac{E^*}{\psi H_j} \quad (3.10)$$

όπου $Venergy_j$ είναι η ζήτηση για κάλυψη του ενεργειακού στόχου στο βήμα j σε hm^3 , E^* ο στόχος ενέργειας του βήματος (σταθερός για κάθε βήμα), εκφρασμένος σε GWh, ψ είναι η ειδική ενέργεια,

δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα ύψους πτώσης, εκφρασμένη σε GWh/hm^4 , και H_j είναι το ύψος πτώσης σε hm .

Με βάση αυτή τη ζήτηση και σε συνδυασμό με ορισμένους περιορισμούς, υπολογίζεται η εκροή του στροβίλου στο βήμα j , μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$Re_j = \min(Venergy_j, \max(S_j^2 - Vd, 0), q_j) \quad (3.11)$$

όπου Re_j είναι η εκροή του στροβίλου, S_j^2 είναι το απόθεμα στον ταμιευτήρα στο συγκεκριμένο στάδιο της προσομοίωσης και q_j είναι η παροχτετευτικότητα του αγωγού προσαγωγής. Το μέγεθος Vd υποδηλώνει το νεκρό όγκο του ταμιευτήρα. Όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε hm^3 .

Μετά την αφαίρεση της εκροής του στροβίλου υπολογίζεται εκ νέου το απόθεμα του ταμιευτήρα, ώστε να χρησιμοποιηθεί στους μετέπειτα υπολογισμούς. Έτσι προκύπτει:

$$S_j^3 = S_j^2 - Re_j \quad (3.12)$$

όπου S_j^2, S_j^3 οι αλλαγές στο απόθεμα κατά τη διάρκεια του βήματος j και Re_j η εκροή του στροβίλου στο βήμα αυτό. Όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε hm^3 .

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως υπάρχει και η δυνατότητα σε ένα έργο να επιτρέπεται η κάλυψη της περιβαλλοντικής ροής από τις εκροές για παραγωγή ενέργειας μέσω των στροβίλων. Στην περίπτωση αυτή, αν η εκροή για κάλυψη της ζήτησης σε ενέργεια αρκεί και για ταυτόχρονη κάλυψη της διατήρησης της περιβαλλοντικής ροής, τότε αυτή καλύπτεται πλήρως. Σε περίπτωση δυνατότητας μερικής κάλυψης, υπολογίζεται η επιπλέον εκροή που απαιτείται, ενώ σε περίπτωση που δεν καλύπτεται καθόλου από την εκροή αυτή υπολογίζεται η συνολική εκροή που απαιτείται προκειμένου να καλυφθεί πλήρως. Σε περίπτωση που δεν επιτρέπεται ταυτόχρονη κάλυψη των δύο ζητήσεων, η εκροή περιβαλλοντικής διατήρησης τίθεται σε πρώτη προτεραιότητα, και προηγείται της εκροής για ενέργεια, όπως στις παραπάνω σχέσεις.

Έχοντας υπολογίσει τις ζητήσεις του συστήματος, απομένει να εξεταστεί αν υπάρχει περίσσεια αποθέματος στον ταμιευτήρα, δηλαδή αν το απόθεμα, όπως προέκυψε, υπερβαίνει την μέγιστη χωρητικότητά του. Αν υπάρχει, θα χρησιμοποιηθεί αρχικά για την παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και στη συνέχεια ό,τι περισσέψει θα υπερχειλίσει από τον ταμιευτήρα. Η σειρά των σταδίων της διαδικασίας αυτής έχει ως εξής:

Αρχικά, ελέγχεται αν υπάρχει περίσσεια αποθέματος, συγκρίνοντας το τρέχον απόθεμα με την μικτή χωρητικότητα του ταμιευτήρα, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$Smax = \kappa(A\sigma A - Z_0)^\lambda \quad (3.13)$$

όπου S_{max} είναι η μικτή χωρητικότητα σε hm^3 , ΑΣΛ είναι η Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας του ταμιευτήρα σε m, Z_0 η στάθμη πυθμένα σε m, κ και λ είναι οι συντελεστές κλίμακας και σχήματος της σχέσης στάθμης - αποθέματος.

Στη συνέχεια ελέγχεται αν υπάρχει περίσσεια νερού, ήτοι υπέρβαση της χωρητικότητας, με χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$Sur_j = \max(S_j^3 - S_{max}, 0) \quad (3.14)$$

όπου Sur_j είναι η περίσσεια αποθέματος, S_j^3 είναι το απόθεμα στον ταμιευτήρα στο συγκεκριμένο στάδιο της προσομοίωσης και S_{max} η μικτή χωρητικότητα, όλα εκφρασμένα σε hm^3 .

Αν υπάρχει περίσσεια τότε δρομολογείται μια πρόσθετη εκροή, η οποία αργότερα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της δευτερεύουσας ενέργειας που παράγεται από το σύστημα, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η πρόσθετη εκροή τίθεται μηδέν, ως εξής:

$$Rplus_j = \min(q_j - Re_j, Sur_j) \quad (3.15)$$

όπου $Rplus_j$ είναι η πρόσθετη εκροή, Sur_j είναι η περίσσεια αποθέματος, q_j είναι η παροχτευτικότητα του αγωγού προσαγωγής και Re_j είναι η εκροή του στροβίλου. Όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε hm^3 .

Επόμενο υπολογιστικό στάδιο είναι η ενημέρωση του αποθέματος μετά την αφαίρεση της πρόσθετης εκροής, σύμφωνα με τον τύπο:

$$S_j^4 = S_j^3 - Rplus_j \quad (3.16)$$

όπου S_j^3, S_j^4 οι ενδιάμεσες τιμές στο απόθεμα κατά τη διάρκεια του βήματος j και $Rplus_j$ πρόσθετη εκροή στο βήμα αυτό. Όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε hm^3 .

Αν μετά την αλλαγή του αποθέματος συνεχίζει να υπάρχει περίσσεια στον ταμιευτήρα, η ποσότητα αυτή φεύγει από τον ταμιευτήρα μέσω υπερχειλίσης. Αυτή η διαδικασία διατυπώνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$Rspill_j = \max(S_j^4 - S_{max}, 0) \quad (3.17)$$

όπου $Rspill_j$ είναι η ποσότητα υπερχειλίσης, S_j^4 είναι το απόθεμα στον ταμιευτήρα στο συγκεκριμένο στάδιο της προσομοίωσης και S_{max} η μικτή χωρητικότητα, όλα εκφρασμένα σε hm^3 .

Μετά τον έλεγχο υπερχειλίσης, υπολογίζεται το τελικό απόθεμα στον ταμιευτήρα ως εξής:

$$S_j^5 = S_j^4 - Rspill_j \quad (3.18)$$

όπου S_j^4, S_j^5 οι αλλαγές στο απόθεμα κατά τη διάρκεια του βήματος j και $Rspill_j$ η ποσότητα υπερχειλίσης στο βήμα αυτό. Όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε hm^3 .

Στο σημείο αυτό γίνεται επαναπροσδιορισμός της στάθμης, χρησιμοποιώντας στη σχέση (3.2) το απόθεμα S_j^5 ως εξής:

$$Z_{newj} = Z_0 + \left(\frac{S_j^5}{\kappa} \right)^{1/\lambda} \quad (3.19)$$

όπου Z_{newj} είναι η τελική στάθμη του νερού σε m, Z_0 η στάθμη πυθμένα σε m, S_j^5 το απόθεμα του ταμιευτήρα στο συγκεκριμένο στάδιο της προσομοίωσης σε hm^3 , κ και λ είναι οι συντελεστές κλίμακας και σχήματος της σχέσης στάθμης - αποθέματος.

Αντίστοιχα με τη σχέση (3.3) και χρησιμοποιώντας την στάθμη στην αρχή και το πέρας του χρονικού βήματος υπολογίζεται το αντίστοιχο ύψος πτώσης ως εξής:

$$H_{newj} = \frac{Z_j + Z_{newj}}{2} - Zp_j \quad (3.20)$$

όπου H_{newj} είναι το νέο ύψος πτώσης, Z_j, Z_{newj} η αρχική και τελική στάθμη του νερού και Zp_j η στάθμη εξόδου του αγωγού φυγής, όλα εκφρασμένα σε m.

Ο υπολογισμός του νέου ύψους πτώσης γίνεται διότι στη συνέχεια, αφού γίνει ένας επαναληπτικός κύκλος με το νέο ύψος πτώσης, στην εξίσωση υπολογισμού της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας χρησιμοποιείται το νέο αντί του αρχικού ύψους πτώσης (3.3). Αυτό γίνεται με σκοπό την ακριβέστερη εκτίμηση των υδροενεργειακών μεγεθών που εξαρτώνται από τη στάθμη, εξασφαλίζοντας ακόμη την εξομάλυνση της καμπύλης διάρκειας - παραγωγής ενέργειας, η οποία αποτελεί ένα από τα βασικά ζητούμενα της προσομοίωσης.

Μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών αυτών, προσδιορίζεται η πρωτεύουσα ενέργεια που παράγεται στο βήμα j και δίνεται από τον τύπο:

$$Ef_j = \psi Re_j H_{newj} \quad (3.21)$$

όπου Ef_j είναι η παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια σε GWh, ψ είναι η ειδική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα ύψους πτώσης, εκφρασμένη σε GWh/hm^4 , Re_j είναι η εκροή του στρόβιλου σε hm^3 και H_{newj} είναι το νέο ύψος πτώσης σε hm.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση που έχουμε πρόσθετη εκροή από τον στρόβιλο, γίνεται υπολογισμός της δευτερεύουσας ενέργειας που παράγεται ως εξής:

$$Es_j = \psi Rplus_j H_{newj} \quad (3.22)$$

όπου Es_j είναι η παραγόμενη δευτερεύουσα ενέργεια σε GWh, ψ είναι η ειδική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα ύψους πτώσης, εκφρασμένη σε GWh/hm^4 , $Rplus_j$ είναι η πρόσθετη εκροή σε hm^3 και $Hnew_j$ είναι το νέο ύψος πτώσης σε hm.

Η συνολική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα στο βήμα j είναι το άθροισμα της πρωτεύουσας (Ef_j) και της δευτερεύουσας (Es_j), δηλαδή:

$$Etotal_j = Ef_j + Es_j \quad (3.23)$$

Στη συνέχεια, ερευνάται το ενδεχόμενο ελλείμματος πρωτεύουσας ενέργειας (Def_j) δηλαδή η περίπτωση που ο στόχος E^* του βήματος είναι μεγαλύτερος από την παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια (Ef_j). Υπολογίζεται η διαφορά:

$$Def_j = E^* - Ef_j \quad (3.24)$$

Όλα τα μεγέθη εκφράζονται σε GWh.

Στο τελευταίο στάδιο, τίθεται το απόθεμα S_j^5 (εκφρασμένο σε hm^3), ως τελικό απόθεμα του τρέχοντος βήματος j , το οποίο στη συνέχεια αποτελεί και το αρχικό απόθεμα του επόμενου βήματος $j + 1$, δηλαδή:

$$S_j = S_j^5 \quad (3.25)$$

Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώνεται το μαθηματικό σκέλος που αφορά στο υδατικό ισοζύγιο για ένα χρονικό βήμα j . Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλα τα βήματα του χρονικού ορίζοντα που εξετάζεται. Στη συνέχεια, βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και χρησιμοποιώντας ενδεικτικές τιμές πώλησης πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας και μια τιμή ρήτρας ελλείμματος ενέργειας π.χ. σε € ανά kWh, μπορεί να γίνει κάποια απλουστευμένη αποτίμηση του μέσου ετήσιου οφέλους ή κόστους. Η υπολογιστική αυτή διαδικασία πρόκειται να εφαρμοστεί σε επόμενο κεφάλαιο με σκοπό τη μελέτη των επιπτώσεων που επιφέρουν στο μέσο ετήσιο όφελος/κόστος αλλαγές που αφορούν στο χρονικό βήμα προσομοίωσης που επιλέγεται.

3.3 Περιγραφή του προβλήματος μεταφόρτωσης - Θεωρία γράφων

Μια από τις εφαρμογές της επιχειρησιακής έρευνας είναι το πρόβλημα μεταφόρτωσης (transshipment problem), το οποίο βασίζεται στη θεωρία των γράφων (Smith, 1982). Με τον όρο γράφος (graph) νοείται ένα σύνολο σημείων (κόμβων) N , όπου κάθε κόμβος συνδέεται με ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών (τόξα ή κλάδοι ή ακμές) M , και μπορεί να παρασταθεί με τη μορφή (N, M) . Ο γράφος του οποίου οι κλάδοι ακολουθούν μια καθορισμένη φορά (προσανατολισμένοι κλάδοι)

ονομάζεται διγράφος (digraph). Αν στα στοιχεία ενός γράφου (κόμβοι και κλάδοι) αντιστοιχίζονται ορισμένες ιδιότητες τότε αναφερόμαστε σε αυτόν με τον όρο δίκτυο (network).

Έστω ότι μελετάται ένας διγράφος που αποτελείται από n κόμβους και m κλάδους. Τότε, η τοπολογία του περιγράφεται μαθηματικά μέσω ενός μητρώου A (μητρώο πρόσπτωσης - incidence matrix), με διαστάσεις $(n \times m)$, το οποίο αποτελείται από τις τιμές -1, 0 και 1. Οι τιμές αυτές αφορούν στη σύνδεση μεταξύ ενός κόμβου i και ενός κλάδου j και ορίζονται ως εξής:

- Αν η φορά είναι από τον κόμβο i προς τον κλάδο j , τότε για το στοιχείο a_{ij} του μητρώου A ισχύει $a_{ij} = 1$.
- Αν η φορά είναι ανάστροφη, δηλαδή από τον κλάδο j προς τον κόμβο i , τότε $a_{ij} = -1$.
- Αν δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ του κόμβου i και του κλάδου j , τότε $a_{ij} = 0$.

Το μητρώο A ($n \times m$) έχει τη μορφή:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

Ο βασικός στόχος ενός προβλήματος μεταφόρτωσης σε ένα δίκτυο αποτελούμενο από n κόμβους και m κλάδους είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς μιας δεδομένης ποσότητας από τους κόμβους των πηγών (sources) στους κόμβους κατανάλωσης (sinks). Στους κόμβους πηγών ανατίθεται η προσφορά των αγαθών ενώ στους κόμβους κατανάλωσης η ζήτηση τους. Οι κόμβοι που δεν έχουν ούτε προσφορά ούτε ζήτηση καλούνται ενδιάμεσοι (intermediate) (Ευστρατιάδης κ.ά., 2015).

Στα προβλήματα μεταφόρτωσης γίνονται ορισμένες υποθέσεις που αφορούν κυρίως στις εξισώσεις συνέχειας και σε ορισμένους περιορισμούς του συστήματος. Η πρώτη υπόθεση είναι ότι η συνολική προσφορά είναι ίση με τη συνολική ζήτηση (balanced transshipment problem). Σε περίπτωση που αυτό δεν ικανοποιείται (unbalanced transshipment problem), όπως για παράδειγμα σε προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων όπου η παραγωγή είναι αβέβαιη, εισάγεται ένας εικονικός σωρευτικός (sink) κόμβος ο οποίος έχει ως ζήτηση το άθροισμα της προσφοράς. Αυτό γίνεται προκειμένου να ισορροπήσει το πρόβλημα και να ισχύει η υπόθεση ότι η συνολική προσφορά ισούται με την συνολική ζήτηση. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι:

$$\sum_{i=1}^n y_i = 0 \tag{3.26}$$

όπου y_i η τιμή της προσφοράς ή ζήτησης του κόμβου i , διατηρώντας το πρόσημο της (θετικό ή αρνητικό).

Η δεύτερη υπόθεση είναι ότι σε κάθε κόμβο i του δικτύου πρέπει να ισχύει η εξίσωση συνέχειας, δηλαδή η συνολική ποσότητα που εισέρχεται να ισούται με τη συνολική ποσότητα που εξέρχεται μείον αυτή που καταναλώνεται (σημειώνεται πως σε προβλήματα με εισαγωγή εικονικών

σωρευτικών κόμβων δεν υπάρχει κατανάλωση στους ενδιάμεσους κόμβους). Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, η εξίσωση συνέχειας, με τη μορφή μητρώων, διατυπώνεται ως εξής:

$$Ax = y$$

ή πιο αναλυτικά

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n1} & \cdots & \alpha_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

όπου A είναι το μητρώο πρόσπτωσης με α_{ij} το στοιχείο (i, j) , όπου i ο δείκτης κόμβου και j ο δείκτης του διασυνδεδεμένου κλάδου, x το διάνυσμα των μεταφερόμενων ποσοτήτων και y το διάνυσμα προσφοράς ή ζήτησης.

Η τρίτη υπόθεση αφορά στην ποσότητα x_j που μεταφέρεται σε κάθε κλάδο j , η οποία είναι μη αρνητική και δεν μπορεί να υπερβαίνει τη μεταφορική του ικανότητα (παροχетеυτικότητα) u_j . Οι περιορισμοί που αφορούν στην παροχетеυτικότητα των κλάδων του δικτύου, διατυπώνονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Σε συνέχεια των όσων αναφέρθηκαν, σε κάθε κλάδο j του δικτύου αντιστοιχίζεται ένα μοναδιαίο κόστος μεταφοράς c_j . Το κόστος αυτό θα πρέπει να είναι θετικό, αρνητικό ή 0. Στην περίπτωση που δεν είναι επιθυμητή ή είναι απαγορευτική μια συγκεκριμένη μεταφορά αγαθού θα πρέπει να είναι θετική η τιμή, δηλαδή να εκφράζει ποινή, από τη στιγμή που το πρόβλημα τίθεται ως ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς. Στην περίπτωση είναι αναγκαία η εκροή αγαθού για κάλυψη μιας ζήτησης για παράδειγμα, το κόστος αυτό θα πρέπει να είναι αρνητικό ώστε να είναι θελκτική η πραγματοποίηση αυτής της μεταφοράς. Αν μια μεταφορά είναι αδιάφορη για το πρόβλημα τότε το κόστος τίθεται ίσο με το 0. Δηλαδή, όσο μεγαλύτερο το κόστος τόσο λιγότερο επιθυμητή γίνεται η συγκεκριμένη μεταφορά νερού και αντίστροφα (Ευστρατιάδης κ.ά., 2015).

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, το πρόβλημα μεταφόρτωσης ανάγεται τελικά σε πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, με στοχική συνάρτηση:

$$f(x_1, \dots, x_m) = \sum_{j=1}^m c_j x_j \quad (3.29)$$

όπου c_j το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς και x_j οι μεταφερόμενες ποσότητες σε κάθε τόξο j .

Με τη μορφή μητρώων το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{minimize } f(x) &= c^T x \\ \text{έτσι ώστε } Ax &= y \text{ και} \\ 0 &\leq x \leq u \end{aligned} \tag{3.30}$$

όπου x το διάνυσμα των μεταφερόμενων ποσοτήτων, οι οποίες αποτελούν και τις μεταβλητές ελέγχου, c το διάνυσμα τιμών μοναδιαίου κόστους, A το μητρώο πρόσπτωσης, y το διάνυσμα προσφοράς ή ζήτησης, 0 το μηδενικό διάνυσμα και u το διάνυσμα τιμών παροχευτικότητας.

3.4 Ανάπτυξη μοντέλου διγράφου για τη διαχείριση της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας από ταμιευτήρες

Η θεωρία των γράφων, όπως περιγράφηκε, εφαρμόζεται ευρέως σε προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων. Στη παρούσα έρευνα, αναπτύχθηκε ένα καινοτόμο μοντέλο διγράφου που ενσωματώνει έναν νέο κανόνα λειτουργίας για τη διαχείριση της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας από ταμιευτήρες, έχοντας ως στόχο την κάλυψη μιας συνολικής ενεργειακής ζήτησης (στόχου ενέργειας) E^* . Στόχος είναι η κατανομή των ποσοτήτων ενέργειας που χρειάζεται να παραχθούν από ένα σύνολο n ταμιευτήρων. Στη συνέχεια, ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των μαθηματικών σχέσεων του μοντέλου διγράφου, το οποίο κωδικοποιήθηκε σε περιβάλλον Python, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις ισοζυγίου που περιγράφηκαν στο υποκεφάλαιο 3.2, για τη περίπτωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων. Η διαδικασία της προσομοίωσης αφορά σε ένα χρονικό βήμα t και επαναλαμβάνεται για όλα τα βήματα του χρονικού ορίζοντα μελέτης.

Έστω ένα σύστημα υδατικών πόρων που αποτελείται από n ταμιευτήρες, οι οποίοι καλούνται να καλύψουν ένα συνολικό στόχο ενέργειας E^* (σε GWh). Κάθε ταμιευτήρας i , στο χρονικό βήμα t , πρέπει να καλύψει ένα ποσοστό του συνολικού στόχου, δηλαδή:

$$e_i^*(t) = p_i(t) E^* \tag{3.31}$$

όπου $e_i^*(t)$ ο στόχος ενέργειας κάθε ταμιευτήρα σε GWh, $p_i(t)$ είναι ο κανόνας λειτουργίας του συστήματος, με τη μορφή ποσοστού, όπου στην περίπτωση n ταμιευτήρων θα πρέπει να ισχύει ότι $\sum_{i=0}^n p_i(t) = 1$ και E^* ο συνολικός στόχος ενέργειας.

Βάσει των χαρακτηριστικών των στρόβιλων κάθε ταμιευτήρα, υπολογίζεται η μέγιστη δυνητική παραγωγή ενέργειας από το στρόβιλο, ως εξής:

$$e_{imax}(t) = \psi_i \min(S_i(t) - Vd_i, q_i(t))H_i(t) \tag{3.32}$$

όπου $e_{imax}(t)$ η μέγιστη δυνητική παραγωγή ενέργειας από το στρόβιλο σε GWh, ψ_i η ειδική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα ύψους πτώσης, εκφρασμένη σε GWh/hm⁴, $S_i(t)$ το απόθεμα στον ταμιευτήρα, που προκύπτει από το αρχικό απόθεμα με την

προσθήκη των εισροών του χρονικού βήματος t και εκφράζεται σε hm^3 , Vd_i ο νεκρός όγκος του ταμιευτήρα i σε hm^3 , $q_i(t)$ η παροχτετευτικότητα του αγωγού προσαγωγής σε hm^3 και $H_i(t)$ το ύψος πτώσης σε hm , όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου που προηγείται.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η δευτερεύουσα ενέργεια που δύναται να παραχθεί από τον ταμιευτήρα i στο χρονικό βήμα t , σύμφωνα με τη σχέση:

$$e_{id}(t) = \max[\psi_i \min(S_i(t) - S_{max_i}, q_i(t))H_i(t), 0] \quad (3.33)$$

όπου $e_{id}(t)$ η δευτερεύουσα ενέργεια που παράγεται σε GWh, ψ_i η ειδική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα ύψους πτώσης, εκφρασμένη σε GWh/hm^4 , $S_i(t)$ το απόθεμα στον ταμιευτήρα, που προκύπτει από το αρχικό απόθεμα με την προσθήκη των εισροών του χρονικού βήματος t και εκφράζεται σε hm^3 , S_{max_i} η μέγιστη χωρητικότητα του ταμιευτήρα i σε hm^3 , $q_i(t)$ η παροχτετευτικότητα του αγωγού προσαγωγής σε hm^3 και H_i το ύψος πτώσης σε hm , όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου που προηγείται.

Σε περίπτωση που υπάρχει παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας λόγω υπερχειλίσης, ο στόχος παραγωγής αναπροσαρμόζεται, καθώς με την διαθέσιμη δευτερεύουσα καλύπτεται ένας μέρος του ή και ολόκληρος, και έτσι υπολογίζεται ο υπολειπόμενος στόχος που πρέπει να καλυφθεί, σύμφωνα με τη σχέση:

$$e_{iextra}^*(t) = \max(e_i^*(t) - e_{id}(t), 0) \quad (3.34)$$

όπου $e_{iextra}^*(t)$ είναι η ποσότητα που χρειάζεται να παραχθεί πέραν της δευτερεύουσας $e_{id}(t)$ για κάλυψη του στόχου $e_i^*(t)$. Όλα τα μεγέθη εκφράζονται σε GWh.

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της ποσότητας που μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας i , βάσει του δυναμικού του και δίνεται από την σχέση:

$$e_{ic}(t) = \min(e_{imax}(t), e_i^*(t)) \quad (3.35)$$

όπου $e_{ic}(t)$ η ποσότητα της ενέργειας στόχου που μπορεί να καλύψει κάθε ταμιευτήρας, $e_{imax}(t)$ είναι η μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας από το στρόβιλο και $e_i^*(t)$ ο στόχος ενέργειας κάθε ταμιευτήρα, όλα εκφρασμένα σε GWh.

Η ποσότητα του στόχου που δεν μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας i , προκύπτει ως η διαφορά του αρχικού του στόχου μείον τη ποσότητα που μπορεί να καλύψει, δηλαδή:

$$e_{inc}(t) = e_i^*(t) - e_{ic}(t) \quad (3.36)$$

όπου $e_{inc}(t)$ είναι η ποσότητα του στόχου που δεν καλύπτεται, $e_i^*(t)$ είναι ο στόχος και $e_{ic}(t)$ το μέρος του στόχου που μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας. Όλα τα μεγέθη εκφράζονται σε GWh.

Επιπρόσθετα, σε περίπτωση που ένας ταμιευτήρας έχει δυνατότητα παραγωγής μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας από αυτή που χρειάζεται για να καλύψει το στόχο του, μπορεί να δώσει μέρος

ή ακόμα και ολόκληρη αυτή την επιπλέον ποσότητα ενέργειας προκειμένου να καλύψει πιθανά ελλείμματα άλλων ταμιευτήρων του συστήματος, οι οποίοι δεν μπορούν από μόνοι τους να καλύψουν τον αντίστοιχο ενεργειακό τους στόχο. Με την ανταλλαγή αυτή, μειώνονται τα ελλείμματα που προκύπτουν στο σύστημα των ταμιευτήρων και επομένως και οι αστοχίες του. Η ανταλλαγή αυτή περιγράφεται ως εξής:

$$e_{ires}(t) = \max(e_{imax}(t) - e_{iextra}^*(t) - e_{id}(t), 0) \quad (3.37)$$

όπου $e_{ires}(t)$ η πλεονάζουσα ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάλυψη των ελλειμμάτων του συστήματος, $e_{imax}(t)$ είναι η μέγιστη παραγωγή ενέργειας από το στρόβιλο και $e_{iextra}^*(t)$ είναι η ποσότητα που χρειάζεται να παραχθεί πέραν της δευτερεύουσας $e_{id}(t)$ για κάλυψη του αρχικού στόχου $e_i^*(t)$. Όλα τα μεγέθη εκφράζονται σε GWh.

Βάσει των παραπάνω, ακολουθεί ανάλυση του μοντέλου διγράφου σε δύο γενικά παραδείγματα παράλληλων ταμιευτήρων, με εφαρμογή των εξισώσεων που αναφέρθηκαν, χωρίς ωστόσο την παραγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων, η οποία περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο. Το πρώτο παράδειγμα αφορά σε δύο παράλληλους ταμιευτήρες, όπου το πρόβλημα είναι σχετικά πιο απλό, ενώ το δεύτερο παράδειγμα περιλαμβάνει τρεις παράλληλους ταμιευτήρες, στο οποίο εισάγεται ένας νέος κανόνας λειτουργίας (λόγοι αντικατάστασης) και αφορά στις αναπροσαρμογές ποσοτήτων ενέργειας μεταξύ όλων των ταμιευτήρων για κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου μέρους των ελλειμμάτων και αποφυγή παραγωγής πλεονάζουσας ενέργειας. Με την ίδια λογική εφαρμόζεται η διαδικασία και στη γενική περίπτωση n ταμιευτήρων. Εφόσον οι ταμιευτήρες είναι σε σειρά, το μόνο που αλλάζει είναι η σειρά ορισμένων βημάτων της διαδικασίας, όπως για παράδειγμα στο υδατικό ισοζύγιο, όπου οι εκροές του ενός ταμιευτήρα ανάντη αποτελούν εισροές για τον κατάντη. Τέτοιο παράδειγμα θα παρατεθεί σε επόμενο κεφάλαιο, όπου θα περιγραφεί πιο αναλυτικά η διαδικασία.

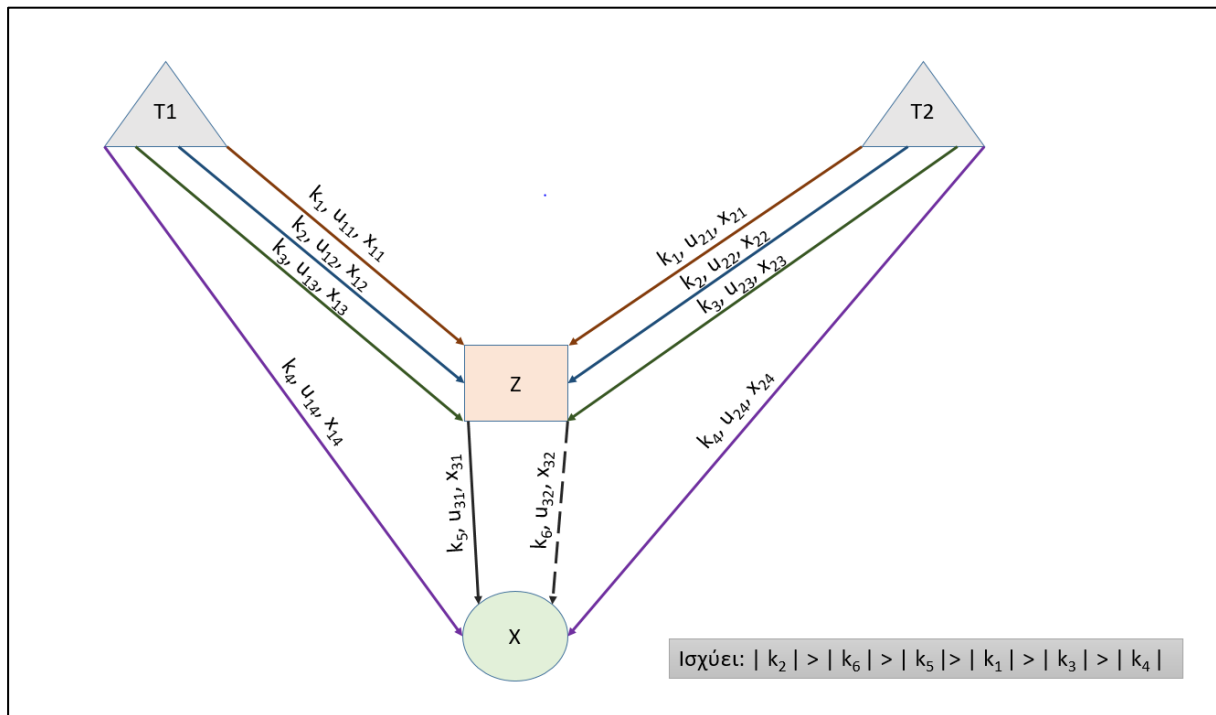
3.5 Θεωρητική περιγραφή μοντέλου διγράφου σε δύο παράλληλους ταμιευτήρες

Στην περίπτωση της διαχείρισης παραγωγής ενέργειας δύο παράλληλων ταμιευτήρων, με τη χρήση του μοντέλου διγράφου, είναι απαραίτητη η σχηματοποίηση του δικτύου που προκύπτει, η οποία βοηθάει στην μετέπειτα ανάλυση του συστήματος. Σε πρώτο στάδιο, ορίζεται η τοπολογία του συστήματος και επιλέγονται οι κόμβοι και οι κλάδοι που απαιτούνται για τη λειτουργία του. Το σύστημα αποτελείται από τέσσερις κόμβους, οι οποίοι αριθμούνται ως εξής:

1. Ταμιευτήρας 1, **T1**
2. Ταμιευτήρας 2, **T2**

3. Κόμβος ολικής ζήτησης, **Z**, που τοπολογικά αντιπροσωπεύει έναν εικονικό κόμβο στον οποίο συγκεντρώνεται η συνολική ζήτηση ενέργειας
4. Σωρευτικός κόμβος, **X**

Το σύστημα περιλαμβάνει πέρα των τεσσάρων κόμβων και δέκα κλάδους που συνδέονται μαζί τους.



Εικόνα 3.1: Μοντέλο διγράφου σε δύο παράλληλους ταμιευτήρες

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1, στην οποία απεικονίζεται η τοπολογία του συστήματος, σε κάθε κλάδο του αντιστοιχούν ορισμένα χαρακτηριστικά. Από τα χαρακτηριστικά αυτά, με το σύμβολο x συμβολίζονται οι μεταφερόμενες ποσότητες κάθε κλάδου, με u τα άνω όρια που αφορούν στις μεταφερόμενες ποσότητες, δηλαδή οι παροχτευτικότητες των κλάδων, και με k τα κόστη μεταφοράς, όπως αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.3. Τα κόστη έχουν ως δείκτη των αριθμό του κλάδου που ανήκουν, ενώ τόσο στα x όσο και στα u δίνεται διπλός δείκτης (ij) όπου το i εκφράζει τον αριθμό του κόμβου (όπως ορίστηκε στην αρχή του παρόντος υποκεφαλαίου 3.5) από τον οποίο ξεκινάει ο κλάδος και το j την κατηγορία σύνδεσης του κόμβου εκκίνησης με άλλους κόμβους του δικτύου. Για παράδειγμα, το στοιχείο x_{14} δηλώνει τη ποσότητα του κλάδου που ξεκινάει από τον κόμβο 1 (Ταμιευτήρας 1, **T1**) και αποτελεί σύνδεση κατηγορίας 4 με άλλο κόμβο του δικτύου κ.ο.κ. Οι τρεις πρώτες κατηγορίες κλάδων συνδέουν τους ταμιευτήρες (**T1** και **T2**) με τον κόμβο ζήτησης **Z**.

Πιο αναλυτικά, η πρώτη κατηγορία κλάδων (καφέ χρώμα) σχετίζεται με την επιπλέον ποσότητα ενέργειας, πέραν της δευτερεύουσας, που πρέπει να παραχθεί από κάθε έναν ταμιευτήρα, προκειμένου να καλύψει το στόχο ζήτησης του (σε ένα χρονικό βήμα t), όπως αυτός προκύπτει από την εξίσωση (3.31). Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κλάδων αυτών είναι τα εξής:

- $k_1 = -c_1$, όπου c_1 είναι μια τιμή κόστους. Το κόστος μεταφοράς είναι αρνητικό γιατί με τον τρόπο αυτό δηλώνεται ότι επιβάλλεται η συγκεκριμένη εκροή προκειμένου να ικανοποιηθεί ο στόχος ενέργειας.
- $u_{11} = e_{1extra}^*(t)$ και $u_{21} = e_{2extra}^*(t)$, όπου υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (3.34), αποτελεί τη ποσότητα που χρειάζεται να παραχθεί πέραν της δευτερεύουσας και τίθεται ως το άνω όριο παροχτευτικότητας των κλάδων αυτών.

Η δεύτερη κατηγορία κλάδων (μπλε χρώμα) αφορά στην ποσότητα της δευτερεύουσας ενέργειας που δύναται να παραχθεί προκειμένου να αποφευχθεί η υπερχειλίση του νερού στον ταμιευτήρα. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κλάδων αυτών είναι τα εξής:

- $k_2 = -\infty$. Η μεγάλη αρνητική αυτή τιμή δίνεται προκειμένου να τεθεί σε πρώτη προτεραιότητα η παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας (εφόσον υπάρχει τέτοια δυνατότητα) και έτσι να αποφευχθεί η υπερχειλίση στον ταμιευτήρα. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση υπερχειλίσης, πάντα θα μεταφέρεται ενέργεια από αυτόν τον κλάδο. Αν η ενέργεια αυτή είναι μεγαλύτερη από τον στόχο τότε αναφερόμαστε σε δευτερεύουσα ενέργεια, ενώ σε αντίθετη περίπτωση πρόκειται για μέρος του ενεργειακού στόχου.
- $u_{12} = e_{1d}(t)$ και $u_{22} = e_{2d}(t)$, όπου υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (3.33) και αποτελεί την ποσότητα της δυνητικής δευτερεύουσας ενέργειας (ενέργεια που μπορεί να παραχθεί πάνω από τον στόχο του ταμιευτήρα), η οποία τίθεται ως άνω όριο παροχτευτικότητας του κλάδου.

Η τρίτη κατηγορία κλάδων (πράσινο χρώμα) μεταφέρουν την περισσευούμενη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάλυψη των ελλειμμάτων του συστήματος (εξίσωση (3.37)). Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κλάδων αυτών είναι τα εξής:

- $k_3 = -c_3$, όπου c_3 είναι μια τιμή κόστους. Το κόστος μεταφοράς είναι αρνητικό, γιατί με τον τρόπο αυτό δηλώνεται ότι επιβάλλεται η συγκεκριμένη εκροή προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση - στόχος ενέργειας. Αυτό γίνεται γιατί με την εκροή αυτή καλύπτονται πιθανά ελλείμματα που θα προκύψουν στο σύστημα από την αδυναμία επαρκούς ποσότητας παραγωγής από άλλους ταμιευτήρες του.
- $u_{13} = e_{2nc}(t)$ και $u_{23} = e_{1nc}(t)$, που υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (3.36) και αποτελεί την ποσότητα του στόχου που δεν καλύπτεται από τον άλλο ταμιευτήρα και η οποία τίθεται ως άνω όριο παροχτευτικότητας του κλάδου. Συγκεκριμένα, ο ταμιευτήρας 1 ή 2 θα προσπαθήσει να καλύψει πιθανό έλλειμμα του ταμιευτήρα 2 ή 1 αντίστοιχα, εφόσον έχει καλύψει τον δικό του στόχο ενέργειας και έχει επιπλέον ποσότητα που μπορεί να διαθέσει. Αυτό προϋποθέτει ότι κάθε ταμιευτήρας έχει καλύψει τον στόχο ενεργειακής παραγωγής του

πριν προσπαθήσει να καλύψει το έλλειμμα του άλλου, και αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3.1 όπου ισχύει ότι $|k_1| > |k_3|$. Με τον τρόπο αυτό δίνεται προτεραιότητα στην κάλυψη του στόχου ενέργειας που αφορά στον ίδιο τον ταμιευτήρα, αφού μεγαλύτερη τιμή αρνητικού κόστους μεταφοράς σημαίνει προτεραιότητα στην συγκεκριμένη εκροή.

Η τέταρτη κατηγορία κλάδων (μωβ χρώμα) συνδέουν τους ταμιευτήρες με τον σωρευτικό κόμβο **X** και αφορούν στην αποθήκευση του πλεονάζοντος υδροδυναμικού κάθε ταμιευτήρα, δηλαδή την προσφορά ενέργειας που δεν αξιοποιείται από το σύστημα. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κλάδων αυτών είναι τα εξής:

- $k_4 = 0$, που υποδηλώνει ότι το κόστος μεταφοράς είναι ουδέτερο, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη επιβολής (αρνητικό κόστος) ή αποφυγής (θετικό κόστος) της συγκεκριμένης ροής.
- $u_{14} = e_{1max}(t)$ και $u_{24} = e_{2max}(t)$, που υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (3.32) και αποτελεί τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας από το στρόβιλο, η οποία τίθεται ως όριο παροχτετευτικότητας του κλάδου.

Αφού ο κόμβος **Z** συγκεντρώνει τις ροές ενέργειας που παράγονται από το σύστημα των δύο ταμιευτήρων, τις μεταφέρει στον σωρευτικό κόμβο **X** μέσω δύο κλάδων. Ο ένας κλάδος (μαύρη συνεχής γραμμή) μεταφέρει τις ροές αυτές 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. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κλάδων αυτών είναι τα εξής:

- $k_5 = -c_5$, όπου c_5 είναι μια τιμή κόστους μεταφοράς, η οποία είναι αρνητική, ώστε να επιβάλλεται να μεταφερθεί η ζήτηση που έχουμε στο βήμα t , εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα ενέργειας. Επιπλέον, δίνεται μεγάλη αρνητική τιμή ώστε να αναγκάσει τις εισροές ενέργειας στον κόμβο να πραγματοποιηθούν και να είναι ίσες συνολικά με το στόχο ενέργειας ή όσο το δυνατόν πιο κοντά. Αυτό εξασφαλίζεται θέτοντας στο $|k_5|$ μεγαλύτερη τιμή από το άθροισμα των απόλυτων τιμών του $|k_1|$ όλων των κλάδων κατηγορίας 1.
- $u_{31} = E^*$, δηλαδή ως άνω όριο παροχτετευτικότητας του κλάδου τίθεται ο συνολικός στόχος ενέργειας του δικτύου.
- $k_6 = c_6$, όπου c_6 είναι μια τιμή κόστους. Το κόστος μεταφοράς είναι μεγάλο και θετικό γιατί δεν είναι επιθυμητή η συγκεκριμένη εκροή, εκτός αν εισέρχονται μεγάλες ποσότητες στον κόμβο **Z**, λόγω παραγωγής περισσότερης ενέργειας από το συνολικό στόχο εξαιτίας υπερχειλίσεων στους ταμιευτήρες. Το γεγονός ότι $|k_6| > |k_5| > |k_1|$, οδηγεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης σε λύσεις όπου αν παράγεται περισσότερη ενέργεια από το στόχο $e_i^*(t)$ λόγω υπερχειλίσης σε έναν ταμιευτήρα, στον άλλο (ή στους άλλους καθώς αυτό γενικεύεται

και σε n ταμιευτήρες) η ποσότητα x_{i1} θα προκύψει, εφόσον αυτό είναι δυνατό (δηλαδή αν δεν υπάρχει και εκεί παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας μεγαλύτερης από $e_i^*(t)$), μικρότερη από την μέγιστη τιμή της $e_{iextra}^*(t)$, προκειμένου να μην εισέλθουν συνολικά στον κόμβο **Z** ποσότητες μεγαλύτερες από E^* , οι οποίες θα πρέπει να μεταφερθούν τελικά από τον κλάδο κατηγορίας 6. Με άλλα λόγια, στις περιπτώσεις παραγωγής περισσότερης ενέργειας σε ένα από τα έργα του συστήματος, ελέγχεται η δυνατότητα μικρότερης παραγωγής στα υπόλοιπα.

- $u_{32} = e_{1max}(t) + e_{2max}(t)$, δηλαδή ως άνω όριο παροχτετευτικότητας του κλάδου τίθεται η μέγιστη δυνητική παραγωγή ενέργειας του συστήματος. Τα μεγέθη $e_{1max}(t)$, $e_{2max}(t)$ υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση (3.32).

Για τις απόλυτες τιμές του κόστους μεταφοράς των κλάδων ισχύει τελικά (Εικόνα 3.1):

$$|k_2| > |k_6| > |k_5| > |k_1| > |k_3| > |k_4|$$

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, εφαρμόζεται η διαδικασία επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού (3.30). Ο πίνακας πρόσπτωσης **A** αποτελείται από τις τιμές -1, 0 και 1, όπως ορίστηκε παραπάνω, και δείχνει τον τρόπο σύνδεσης των κόμβων και κλάδων.

Επομένως, για το παράδειγμα των δύο παράλληλων ταμιευτήρων, προκύπτει ο πίνακας **A** που αποτελείται από τόσες γραμμές όσοι οι κόμβοι του συστήματος και τόσες στήλες όσοι οι κλάδοι του, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$A_{(4 \times 10)} = \begin{array}{c|cccccccccc} & \mathbf{x}_{11} & \mathbf{x}_{12} & \mathbf{x}_{13} & \mathbf{x}_{14} & \mathbf{x}_{21} & \mathbf{x}_{22} & \mathbf{x}_{23} & \mathbf{x}_{24} & \mathbf{x}_{31} & \mathbf{x}_{32} \\ \hline \mathbf{1} & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \mathbf{Z} & -1 & -1 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ \mathbf{X} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{array}$$

ή πιο συνοπτικά:

$$A_{(4 \times 10)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Το διάνυσμα προσφοράς ή ζήτησης **y** είναι το εξής:

$$y_{(4 \times 1)} = \begin{bmatrix} e_{1max} \\ e_{2max} \\ 0 \\ -(e_{1max} + e_{2max}) \end{bmatrix}$$

Οι δύο πρώτες γραμμές του διανύσματος **y** αφορούν στη διαθέσιμη προσφορά στους ταμιευτήρες που είναι η μέγιστη δυνητική ποσότητα ενέργειας που μπορούν να παράξουν, δηλαδή τα e_{1max} και

e_{2max} . Ο κόμβος ζήτησης **Z**, λαμβάνει την τιμή 0, καθώς ισχύει η εξίσωση συνέχειας. Συνεπώς, όση ποσότητα ενέργειας εισέρχεται σε αυτόν, τόση εξέρχεται χωρίς κατανάλωση, και γενικά στα προβλήματα μεταφόρτωσης οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν έχουν ούτε προσφορά ούτε ζήτηση. Τέλος, για να ισορροπήσει το πρόβλημα, στο σωρευτικό κόμβο **X** θέτουμε ως ζήτηση το σύνολο της προσφοράς, δηλαδή $-(e_{1max} + e_{2max})$. Έτσι εξασφαλίζεται η πρώτη βασική παραδοχή του προβλήματος μεταφόρτωσης, όπως εκφράζεται από την σχέση (3.26).

Το ανάστροφο διάνυσμα του μοναδιαίου κόστους c^T είναι:

$$c^T_{(1 \times 10)} = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5 \quad k_6],$$

όπου k τα κόστη μεταφοράς των κλάδων, με τα πρόσημα τους, όπως περιγράφηκαν παραπάνω.

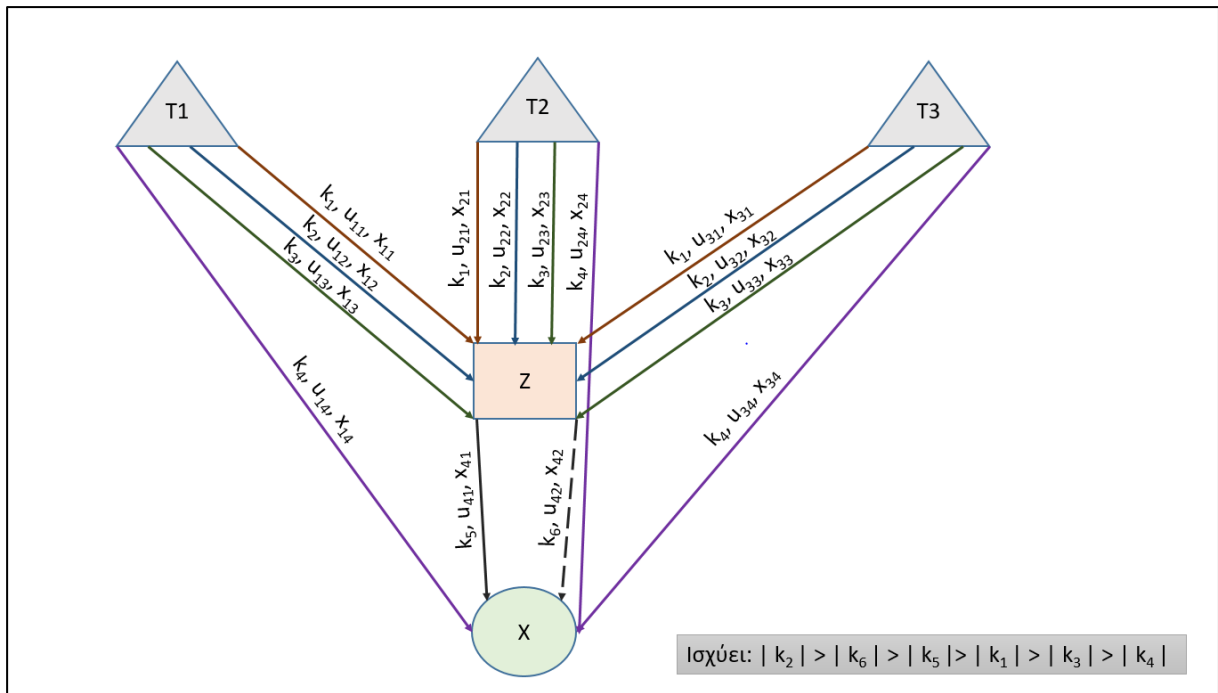
Τέλος, το διάνυσμα των ορίων παροχетеυτικότητας, u , των κλάδων προκύπτουν ως εξής:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{31} \\ x_{32} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} e_{1extra}^* \\ e_{1d} \\ e_{2nc} \\ e_{1max} \\ e_{2extra}^* \\ e_{2d} \\ e_{1nc} \\ e_{2max} \\ E^* \\ e_{1max} + e_{2max} \end{bmatrix}$$

Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώνεται η υλοποίηση των μητρώων που απαιτούνται ώστε να λυθεί το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.

3.6 Θεωρητική περιγραφή μοντέλου διγράφου σε τρεις παράλληλους ταμειυτήρες

Στην περίπτωση τριών παράλληλων ταμειυτήρων, εφαρμόζεται ακριβώς η ίδια μεθοδολογία με το παράδειγμα των δύο (υποκεφάλαιο 3.5), με τη μόνη διαφορά στη παροχетеυτικότητα της τρίτης κατηγορίας κλάδων (πράσινο χρώμα), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Μοντέλο διγράφου σε τρεις παράλληλους ταμιευτήρες

Πιο αναλυτικά, στη περίπτωση αυτή, η οποία αφορά στις αναπροσαρμογές των ποσοτήτων ενέργειας μεταξύ των ταμιευτήρων και κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου μέρους των ελλειμμάτων, υπολογίζονται οι παρακάτω λόγοι αντικατάστασης, προκειμένου να προσδιοριστούν οι ποσότητες των ανταλλαγών αυτών, οι οποίες στη συνέχεια, τίθενται ως άνω όρια παροχετευτικότητας της τρίτης κατηγορίας κλάδων (πράσινο χρώμα). Ακολουθώντας λοιπόν τα βήματα που περιγραφήκαν στο υποκεφάλαιο 3.4, μέχρι και τη σχέση (3.37), προστίθεται με τη μορφή ψευδοκώδικα άλλος ένας έλεγχος που αφορά στο έλλειμμα ενέργειας κάθε ταμιευτήρα.

- Το έλλειμμα του Ταμιευτήρα 1 κατανέμεται στους άλλους δύο σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{if } e_{1nc}(t) > 0 \text{ and } (e_{2res}(t) + e_{3res}(t)) > 0$$

then

$$e_{2to1}(t) = (e_{2res}(t) / (e_{2res}(t) + e_{3res}(t))) e_{1nc}(t)$$

$$e_{3to1}(t) = (e_{3res}(t) / (e_{2res}(t) + e_{3res}(t))) e_{1nc}(t)$$

else

$$e_{2to1}(t) = 0$$

$$e_{3to1}(t) = 0$$

όπου $e_{1nc}(t)$ είναι η ποσότητα του στόχου του Ταμιευτήρα 1, η οποία δεν μπορεί να καλυφθεί από τον ίδιο, $e_{2res}(t)$, $e_{3res}(t)$ η περισευόμενη ποσότητα του Ταμιευτήρα 2 και 3 αντίστοιχα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάλυψη των ελλειμμάτων του

Ταμειυτήρα 1 και $e_{2to1}(t)$, $e_{3to1}(t)$ οι αντίστοιχες ποσότητες ενέργειας που αναμένεται να δοθούν από τους δύο ταμειυτήρες ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα του πρώτου.

- Το έλλειμμα του Ταμειυτήρα 2 κατανέμεται στους άλλους δύο σύμφωνα με τη σχέση:

if $e_{2nc}(t) > 0$ and $(e_{1res}(t) + e_{3res}(t)) > 0$

then

$$e_{1to2}(t) = (e_{1res}(t) / (e_{1res}(t) + e_{3res}(t))) e_{2nc}(t)$$

$$e_{3to2}(t) = (e_{3res}(t) / (e_{1res}(t) + e_{3res}(t))) e_{2nc}(t)$$

else

$$e_{1to2}(t) = 0$$

$$e_{3to2}(t) = 0$$

όπου $e_{2nc}(t)$ είναι η ποσότητα του στόχου του Ταμειυτήρα 2, η οποία δεν μπορεί να καλυφθεί από τον ίδιο, $e_{1res}(t)$, $e_{3res}(t)$ η περισσευούμενη ποσότητα του Ταμειυτήρα 1 και 3 αντίστοιχα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάλυψη των ελλειμμάτων του Ταμειυτήρα 2 και $e_{1to2}(t)$, $e_{3to2}(t)$ οι αντίστοιχες ποσότητες ενέργειας που αναμένεται να δοθούν από τους δύο ταμειυτήρες ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα του δεύτερου.

- Το έλλειμμα του Ταμειυτήρα 3 κατανέμεται στους άλλους δύο σύμφωνα με τη σχέση:

if $e_{3nc}(t) > 0$ and $(e_{1res}(t) + e_{2res}(t)) > 0$

then

$$e_{1to3}(t) = (e_{1res}(t) / (e_{1res}(t) + e_{2res}(t))) e_{3nc}(t)$$

$$e_{2to3}(t) = (e_{2res}(t) / (e_{1res}(t) + e_{2res}(t))) e_{3nc}(t)$$

else

$$e_{1to3}(t) = 0$$

$$e_{2to3}(t) = 0$$

όπου $e_{3nc}(t)$ είναι η ποσότητα του στόχου του Ταμειυτήρα 3, η οποία δεν μπορεί να καλυφθεί από τον ίδιο, $e_{1res}(t)$, $e_{2res}(t)$ η περισσευούμενη ποσότητα του Ταμειυτήρα 1 και 2 αντίστοιχα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάλυψη των ελλειμμάτων του Ταμειυτήρα 3 και $e_{1to3}(t)$, $e_{2to3}(t)$ οι αντίστοιχες ποσότητες ενέργειας που αναμένεται να δοθούν από τους δύο ταμειυτήρες ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα του τρίτου.

Βάσει των παραπάνω στοιχείων, τα όρια παροχетеυτικότητας των κλάδων της τρίτης κατηγορίας διαμορφώνονται ως εξής:

$$u_{13} = e_{1to2}(t) + e_{1to3}(t)$$

$$u_{23} = e_{2to1}(t) + e_{2to3}(t)$$

$$u_{33} = e_{3to1}(t) + e_{3to2}(t)$$

όπου $e_{itoj}(t)$ είναι η ποσότητα ενέργειας που αναμένεται να δοθεί από τον ταμιευτήρα i στον j , προκειμένου ο τελευταίος να καλύψει το έλλειμμα του.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην περίπτωση αυτή είναι η ίδια με το παράδειγμα των δύο ταμιευτήρων (υποκεφάλαιο 3.5) και γενικεύεται ακόμα περισσότερο στην περίπτωση n παράλληλων ταμιευτήρων. Είναι σαφές πως χρειάζεται μια επαναληπτική διαδικασία, στην οποία για κάθε ελλειμματικό ταμιευτήρα θα υπολογίζει την περίσσεια υδροδυναμικής ενέργειας των υπολοίπων και θα θέτει στους κλάδους της κατηγορίας 3 τιμή παροχτευτικότητας αναλογικά με την περίσσεια αυτή και το συνολικό έλλειμμα. Αν θεωρήσουμε $\sum Def = \sum_1^n e_{inc}$ το συνολικό έλλειμμα και $\sum_1^n e_{ires}$ την συνολική περίσσεια ενέργειας, για κάθε ταμιευτήρα i με περίσσεια $e_{ires} > 0$ θα ισχύει:

$$u_{i3} = \frac{e_{ires}}{\sum_1^n e_{ires}} \sum Def \quad (3.38)$$

Στο επόμενο κεφάλαιο παρατίθενται ενδεικτικά αριθμητικά παραδείγματα με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του μοντέλου. Στα παραδείγματα αυτά, μεταβάλλονται τα ποσοστά συνεισφοράς δύο και τριών υποθετικών ταμιευτήρων στην κάλυψη ενός στόχου ενέργειας του συστήματος καθώς και τα αποθέματα τους, προκειμένου να μελετηθούν διάφορες περιπτώσεις και να γίνει αντιληπτός ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου διγράφου.

4 Αριθμητικά παραδείγματα

Στο κεφάλαιο αυτό ελέγχεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, με βάση δύο υποθετικά συστήματα παράλληλων ταμιευτήρων. Για κάθε σύστημα θεωρούνται κοινά χαρακτηριστικά μεγέθη των ταμιευτήρων και κοινός στόχος παραγωγής ενέργειας, και διαφοροποιείται το τρέχον απόθεμα και η κατανομή των ενεργειακών στόχων στους ταμιευτήρες. Με τον τρόπο αυτό, τεκμηριώνεται η γενικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης, καθώς διερευνώνται όλες οι διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να υπάρξουν σε ένα πραγματικό πρόβλημα διαχείρισης υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων.

4.1 Σύστημα δύο παράλληλων ταμιευτήρων

Έστω ότι έχουμε δύο παράλληλους ταμιευτήρες, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο θεωρητικής τεκμηρίωσης, για τους οποίους τίθεται συνολικός στόχος παραγωγής ενέργειας ίσος με 22.0 GWh. Ο Πίνακας 4.1 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των δύο ταμιευτήρων.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά δύο παράλληλων ταμιευτήρων

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

4.1.1 Παράδειγμα 1: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και δημιουργία ελλειμμάτων

Πέραν των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν (Πίνακας 4.1), το ποσοστό συνεισφοράς κάθε ταμιευτήρα στην κάλυψη του συνολικού στόχου ενέργειας E^* , καθώς και τα αποθέματά τους, όπως διαμορφώθηκαν για τις ανάγκες του παραδείγματος, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.2):

Πίνακας 4.2: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα δύο παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 1

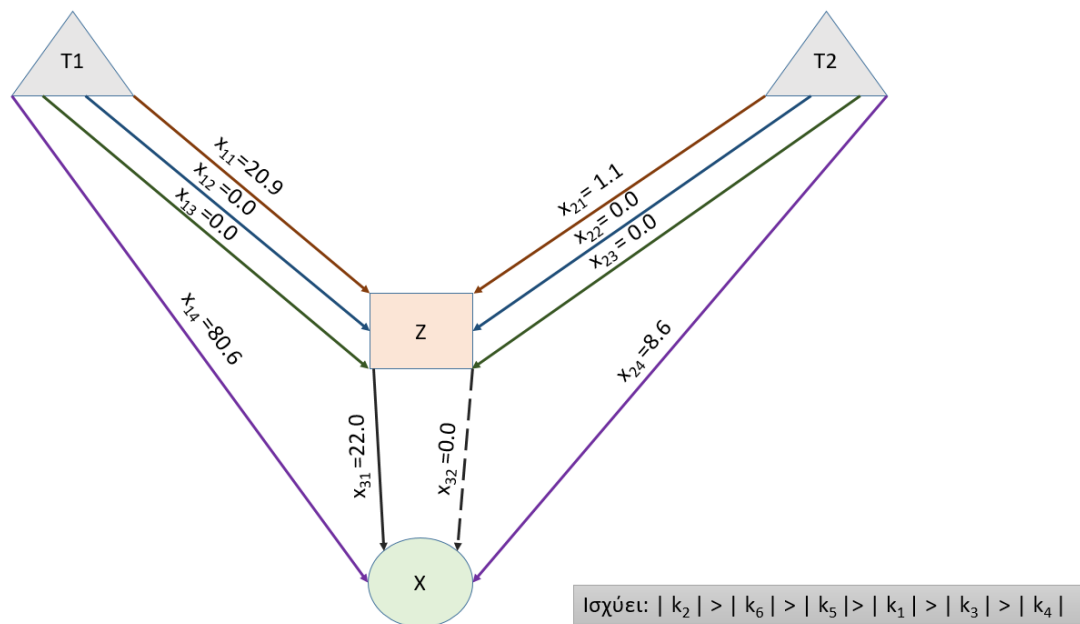
Δεδομένο	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Ποσοστό συνεισφοράς, p_i (%)	95	5
Απόθεμα, S_i (hm ³)	232.00	118.00

Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά στο μοντέλο, σύμφωνα με τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.4, υπολογίστηκαν οι παρακάτω μεταβλητές (Πίνακας 4.3), προκειμένου να δημιουργηθεί το διάνυσμα των ορίων παροχτετευτικότητας, \mathbf{u} :

Πίνακας 4.3: Υπολογισμοί μοντέλου για δύο παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 1

Μεταβλητή	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Στόχος ενέργειας, e_i^* (GWh)	20.9	1.1
Μέγιστη δυναμική 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

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο, μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 4.1, όπου φαίνονται αναλυτικά οι ροές ενέργειας από τους ταμιευτήρες.



Εικόνα 4.1: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και δημιουργία ελλειμμάτων

Ξεκινώντας από τη δεύτερη κατηγορία κλάδων (μπλε χρώμα) παρατηρείται ότι δεν προκύπτει παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας σε κανέναν από τους δύο ταμιευτήρες. Για το λόγο αυτό, στην πρώτη κατηγορία κλάδων (καφέ χρώμα), η επιπλέον ποσότητα ενέργειας, πέραν της δευτερεύουσας, που πρέπει να παραχθεί από κάθε έναν ταμιευτήρα, έχει την τιμή της ποσότητας του στόχου ενέργειας που ζητείται να καλύψει κάθε ταμιευτήρας. Έτσι, φαίνεται ότι κάθε ένας ταμιευτήρας έχει δυνατότητα πλήρους κάλυψης του στόχου του και επομένως δε χρειάζεται να «δανειστεί» ενέργεια από τον άλλο. Για το λόγο αυτό, η τρίτη κατηγορία κλάδων (πράσινο χρώμα) λαμβάνει μηδενική τιμή, αφού δεν υπάρχουν ελλείμματα στο σύστημα. Η τέταρτη κατηγορία κλάδων (μωβ χρώμα) αφορά στην αποθήκευση πλεονάζοντος υδροδυναμικού κάθε ταμιευτήρα, δηλαδή την προσφορά ενέργειας που δεν αξιοποιείται από το σύστημα και προκύπτει από τη διαφορά της μέγιστης δυνατικής παραγωγής ενέργειας του ταμιευτήρα με την ποσότητα ενέργειας που χρησιμοποιεί για να καλύψει το στόχο. Άρα για τον ταμιευτήρα 1, στον τέταρτο κλάδο ισχύει $101.5 - 20.9 = 80.6$ GWh και για τον ταμιευτήρα 2, $9.7 - 1.1 = 8.6$ GWh. Τέλος, ο κόμβος Z μεταφέρει τη συγκεντρωμένη ποσότητα ενέργειας που παράγεται από το σύστημα των δύο ταμιευτήρων στον σωρευτικό κόμβο X μέσω δύο κλάδων. Ο ένας κλάδος (μαύρη συνεχής γραμμή) μεταφέρει την ποσότητα έως τη συνολική ζήτηση του συστήματος. Για το λόγο αυτό η τιμή του είναι $20.9 + 1.1 = 22$ GWh, όσο ο συνολικός στόχος του συστήματος, καθώς δεν παρατηρούνται ελλείμματα. Ο άλλος κλάδος (μαύρη διακεκομμένη

γραμμή) μεταφέρει την πλεονάζουσα ενέργεια (ενέργεια πέραν του ολικού στόχου), η οποία στο παράδειγμα είναι μηδενική.

4.1.2 Παράδειγμα 2: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας από τον ταμιευτήρα 1, χωρίς δημιουργία ελλειμμάτων

Πέραν των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν (Πίνακας 4.1), το ποσοστό συνεισφοράς κάθε ταμιευτήρα στην κάλυψη του συνολικού στόχου ενέργειας E^* , καθώς και τα αποθέματά τους, όπως διαμορφώθηκαν για τις ανάγκες του παραδείγματος, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.4):

Πίνακας 4.4: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα δύο παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 2

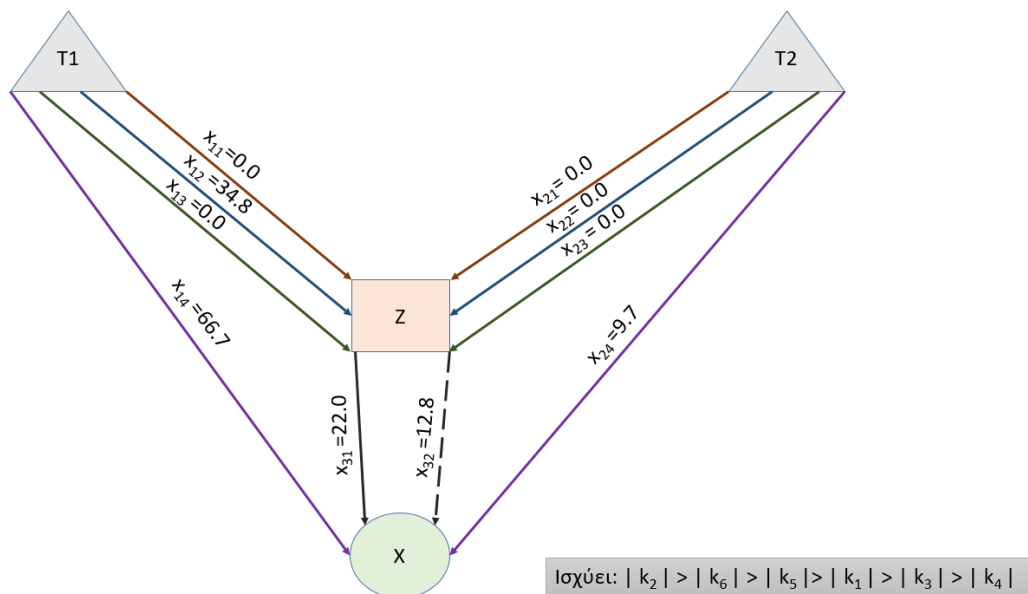
Δεδομένο	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Ποσοστό συνεισφοράς, p_i (%)	95	5
Απόθεμα, S_i (hm ³)	400.00	118.00

Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά στο μοντέλο, σύμφωνα με τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.4, υπολογίστηκαν οι παρακάτω μεταβλητές (Πίνακας 4.5), προκειμένου να δημιουργηθεί το διάνυσμα των ορίων παροχτετευτικότητας, \mathbf{u} :

Πίνακας 4.5: Υπολογισμοί μοντέλου για δύο παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 2

Μεταβλητή	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Στόχος ενέργειας, e_i^* (GWh)	20.9	1.1
Μέγιστη δυνατή 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

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο, μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 4.2, όπου φαίνονται αναλυτικά οι ροές ενέργειας από τους ταμιευτήρες.



Εικόνα 4.2: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας από τον ταμιευτήρα 1, χωρίς δημιουργία ελλειμμάτων

Ξεκινώντας από τη δεύτερη κατηγορία κλάδων (μπλε χρώμα) παρατηρείται ότι ο ταμιευτήρας 1 παράγει δευτερεύουσα ενέργεια ίση με 34.8 GWh. Με την ποσότητα αυτή καλύπτει πλήρως τον στόχο του (20.9 GWh) και έχει και περισσευούμενη ποσότητα. Η περισσευούμενη ποσότητα δευτερεύουσας ενέργειας αρκεί ώστε να καλύψει και το στόχο του ταμιευτήρα 2. Για το λόγο αυτό, στη πρώτη κατηγορία κλάδων (καφέ χρώμα), η επιπλέον ποσότητα ενέργειας, πέραν της δευτερεύουσας, που πρέπει να παραχθεί από κάθε έναν ταμιευτήρα, λαμβάνει μηδενική τιμή και στους δύο ταμιευτήρες. Εφόσον και οι δύο στόχοι καλύπτονται από την δευτερεύουσα ενέργεια που παράγει ο ταμιευτήρας 1, κανένας δε χρειάζεται να «δανειστεί» ενέργεια από τον άλλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η τρίτη κατηγορία κλάδων (πράσινο χρώμα) να λαμβάνει μηδενική τιμή, αφού δεν υπάρχουν ελλείμματα στο σύστημα. Στην τέταρτη κατηγορία κλάδων (μωβ χρώμα), που αφορά στην προσφορά ενέργειας που δεν αξιοποιείται από το σύστημα, για τον ταμιευτήρα 1 ισχύει $101.5 - 34.8 = 66.7$ GWh και για τον ταμιευτήρα 2, 9.7 GWh, εφόσον δεν χρειάστηκε να παράξει καθόλου ενέργεια. Τέλος, από τον κόμβο Z προς τον σωρευτικό κόμβο X, ο ένας κλάδος (μαύρη συνεχής γραμμή) μεταφέρει την ποσότητα έως τη συνολική ζήτηση του συστήματος. Για το λόγο αυτό η τιμή του είναι $20.9 + 1.1 = 22$ GWh, όσο ο συνολικός στόχος του συστήματος, καθώς δεν παρατηρούνται ελλείμματα. Ο άλλος κλάδος (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) μεταφέρει την πλεονάζουσα ενέργεια (ενέργεια πέραν του ολικού στόχου), η οποία στο παράδειγμα είναι ίση με την παραγόμενη

δευτερεύουσα μείον τη ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε για να καλύψει το στόχο του συστήματος, δηλαδή $34.8 - 22 = 12.8$ GWh.

4.1.3 Παράδειγμα 3: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και από τους δύο, χωρίς δημιουργία ελλειμμάτων

Πέραν των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν (Πίνακας 4.1), το ποσοστό συνεισφοράς κάθε ταμιευτήρα στην κάλυψη του συνολικού στόχου ενέργειας E^* , καθώς και τα αποθέματά τους, όπως διαμορφώθηκαν για τις ανάγκες του παραδείγματος, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.6):

Πίνακας 4.6: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα δύο παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 3

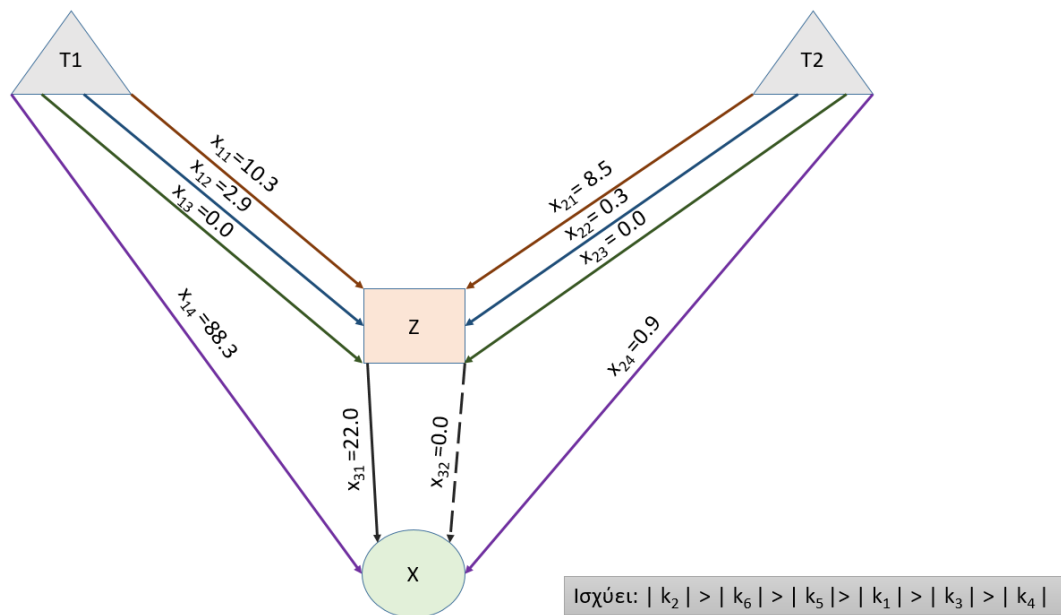
Δεδομένο	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Ποσοστό συνεισφοράς, p_i (%)	60	40
Απόθεμα, S_i (hm ³)	378.00	204.00

Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά στο μοντέλο, σύμφωνα με τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.4, υπολογίστηκαν οι παρακάτω μεταβλητές (Πίνακας 4.7), προκειμένου να δημιουργηθεί το διάγραμμα των ορίων παροχτετευτικότητας, u :

Πίνακας 4.7: Υπολογισμοί μοντέλου για δύο παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 3

Μεταβλητή	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Στόχος ενέργειας, e_i^* (GWh)	13.2	8.8
Μέγιστη δυναμική 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)	10.3	8.5
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, e_{ic} (GWh)	13.2	8.8
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που δεν μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, e_{inc} (GWh)	0.0	0.0

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο, μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 4.3, όπου φαίνονται αναλυτικά οι ροές ενέργειας από τους ταμιευτήρες.



Εικόνα 4.3: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και από τους δύο, χωρίς δημιουργία ελλειμμάτων

Ξεκινώντας από τη δεύτερη κατηγορία κλάδων (μπλε χρώμα) παρατηρείται ότι ο ταμιευτήρας 1 παράγει δευτερεύουσα ενέργεια ίση με 2.9 GWh και ο ταμιευτήρας 2 ίση με 0.3 GWh. Με τον τρόπο αυτό, κάθε ένας καλύπτει ένα μέρος του στόχου ενέργειας του. Η επιπλέον ποσότητα που μπορεί να παραχθεί προκειμένου να καλυφθεί ο στόχος ενέργειας φαίνεται στη πρώτη κατηγορία κλάδων (καφέ χρώμα), όπου για τον ταμιευτήρα 1 είναι $13.2 - 2.9 = 10.3$ GWh και για τον ταμιευτήρα 2 είναι $8.8 - 0.3 = 8.5$ GWh. Εφόσον και οι δύο στόχοι καλύπτονται πλήρως κανένας δε χρειάζεται να «δανειστεί» ενέργεια από τον άλλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η τρίτη κατηγορία κλάδων (πράσινο χρώμα) να λαμβάνει μηδενική τιμή, αφού δεν υπάρχουν ελλείμματα στο σύστημα. Στην τέταρτη κατηγορία κλάδων (μωβ χρώμα), που αφορά στην προσφορά ενέργειας που δεν αξιοποιείται από το σύστημα, για τον ταμιευτήρα 1 ισχύει $101.5 - 13.2 = 88.3$ GWh και για τον ταμιευτήρα 2, $9.7 - 8.8 = 0.9$ GWh. Τέλος, από τον κόμβο Z προς τον σωρευτικό κόμβο X, ο ένας κλάδος (μαύρη συνεχής γραμμή) μεταφέρει την ποσότητα έως τη συνολική ζήτηση του συστήματος. Για το λόγο αυτό η τιμή του είναι $13.2 + 8.8 = 22$ GWh, όσο ο συνολικός στόχος του συστήματος, καθώς δεν παρατηρούνται ελλείμματα. Ο άλλος κλάδος (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) μεταφέρει την πλεονάζουσα ενέργεια (ενέργεια πέραν του ολικού στόχου), η οποία στο παράδειγμα αυτό έχει μηδενική τιμή.

4.1.4 Παράδειγμα 4: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας, με δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2

Πέραν των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν (Πίνακας 4.1), το ποσοστό συνεισφοράς κάθε ταμιευτήρα στην κάλυψη του συνολικού στόχου ενέργειας E^* , καθώς και τα αποθέματά τους, όπως διαμορφώθηκαν για τις ανάγκες του παραδείγματος, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.8):

Πίνακας 4.8: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα δύο παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 4

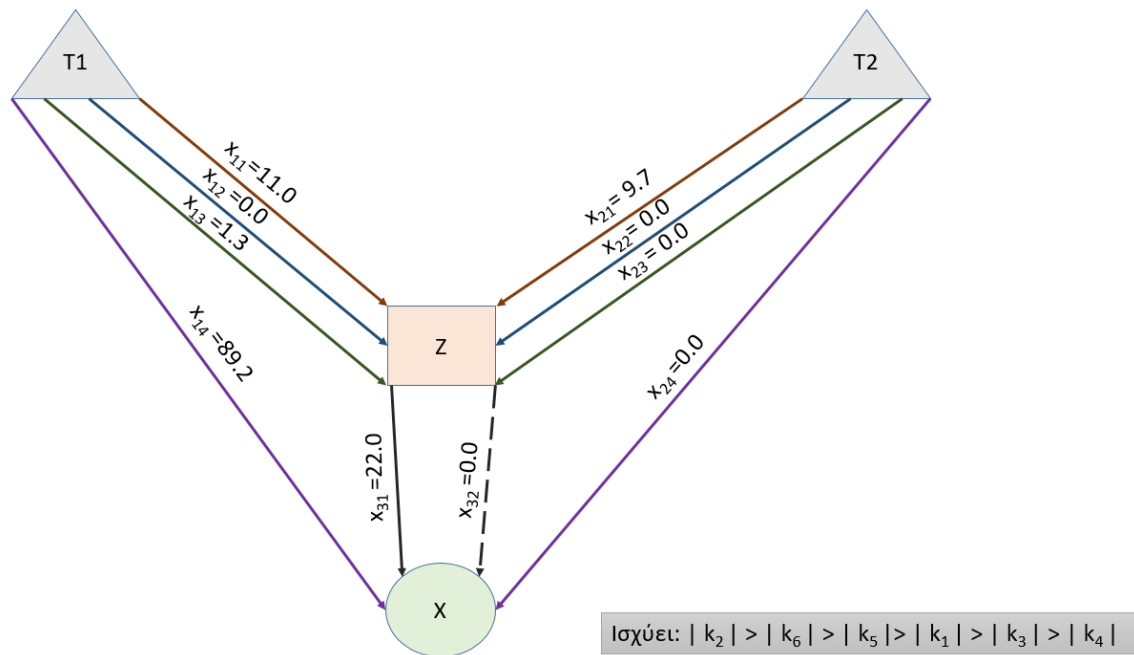
Δεδομένο	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Ποσοστό συνεισφοράς, p_i (%)	50	50
Απόθεμα, S_i (hm ³)	374.00	118.00

Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά στο μοντέλο, σύμφωνα με τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.4, υπολογίστηκαν οι παρακάτω μεταβλητές (Πίνακας 4.9), προκειμένου να δημιουργηθεί το διάνυσμα των ορίων παροχτετευτικότητας, \mathbf{u} :

Πίνακας 4.9: Υπολογισμοί μοντέλου για δύο παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 4

Μεταβλητή	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Στόχος ενέργειας, e_i^* (GWh)	11.0	11.0
Μέγιστη δυναμική 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)	11.0	11.0
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, e_{ic} (GWh)	11.0	9.7
Ποσότητα της ενέργειας στόχου που δεν μπορεί να καλύψει ο ταμιευτήρας, e_{inc} (GWh)	0.0	1.3

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο, μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 4.4, όπου φαίνονται αναλυτικά οι ροές ενέργειας από τους ταμιευτήρες.



Εικόνα 4.4: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας, με δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2

Ξεκινώντας από τη δεύτερη κατηγορία κλάδων (μπλε χρώμα) παρατηρείται ότι δεν προκύπτει παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας σε κανέναν από τους δύο ταμιευτήρες. Για το λόγο αυτό, στη πρώτη κατηγορία κλάδων (καφέ χρώμα), η επιπλέον ποσότητα ενέργειας, πέραν της δευτερεύουσας, που πρέπει να παραχθεί από κάθε έναν ταμιευτήρα, έχει την τιμή της ποσότητας του στόχου ενέργειας που ζητείται να καλύψει κάθε ταμιευτήρας. Με βάση αυτό, προκύπτει ότι ο ταμιευτήρας 1 μπορεί να καλύψει πλήρως τον στόχο του ενώ αντίθετα ο ταμιευτήρας 2 έχει έλλειμμα ίσο με $11.0 - 9.7 = 1.3$ GWh. Προκειμένου να καλύψει το έλλειμμα του, και εφόσον υπάρχει δυνατότητα από τον ταμιευτήρα 1 να καλύψει αυτό το έλλειμμα, ο ταμιευτήρας 2 «δανείζεται» ενέργεια ίση με το έλλειμμα του από τον ταμιευτήρα 1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η τρίτη κατηγορία κλάδων (πράσινο χρώμα) στον ταμιευτήρα 1 να λαμβάνει τιμή 1.3 GWh, δηλαδή την ποσότητα που θα δώσει για να καλύψει το έλλειμμα που δημιουργείται στο σύστημα. Στην τέταρτη κατηγορία κλάδων (μωβ χρώμα), που αφορά στην προσφορά ενέργειας που δεν αξιοποιείται από το σύστημα, για τον ταμιευτήρα 1 ισχύει $101.5 - 11 - 1.3 = 89.2$ GWh και για τον ταμιευτήρα 2 προκύπτει μηδενική τιμή καθώς όση ενέργεια μπορούσε να παράξει την έδωσε για κάλυψη του στόχου του. Τέλος, από τον κόμβο Z προς τον σωρευτικό κόμβο X, ο ένας κλάδος (μαύρη συνεχής γραμμή) μεταφέρει την ποσότητα έως τη συνολική ζήτηση του συστήματος. Για το λόγο αυτό η τιμή του είναι $11 + 11 = 22$ GWh, όσο ο

συνολικός στόχος του συστήματος, καθώς δεν παρατηρούνται ελλείμματα. Ο άλλος κλάδος (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) μεταφέρει την πλεονάζουσα ενέργεια (ενέργεια πέραν του ολικού στόχου), η οποία στο παράδειγμα αυτό έχει μηδενική τιμή.

4.1.5 Παράδειγμα 5: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και από τους δύο και δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2

Πέραν των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν (Πίνακας 4.1), το ποσοστό συνεισφοράς κάθε ταμιευτήρα στην κάλυψη του συνολικού στόχου ενέργειας E^* , καθώς και τα αποθέματά τους, όπως διαμορφώθηκαν για τις ανάγκες του παραδείγματος, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.10):

Πίνακας 4.10: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα δύο παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 5

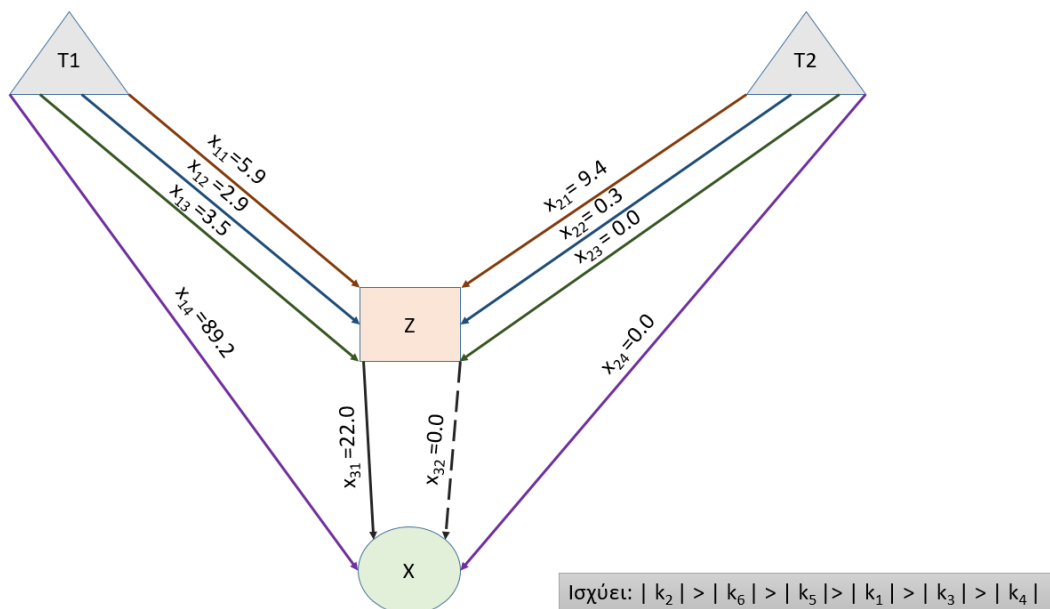
Δεδομένο	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Ποσοστό συνεισφοράς, p_i (%)	40	60
Απόθεμα, S_i (hm ³)	378.00	204.00

Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά στο μοντέλο, σύμφωνα με τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.4, υπολογίστηκαν οι παρακάτω μεταβλητές (Πίνακας 4.11), προκειμένου να δημιουργηθεί το διάνυσμα των ορίων παροχτετευτικότητας, u :

Πίνακας 4.11: Υπολογισμοί μοντέλου για δύο παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 5

Μεταβλητή	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Στόχος ενέργειας, e_i^* (GWh)	8.8	13.2
Μέγιστη δυνατή 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

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο, μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 4.5, όπου φαίνονται αναλυτικά οι ροές ενέργειας από τους ταμιευτήρες.



Εικόνα 4.5: Προσομοίωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και από τους δύο και δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2

Ξεκινώντας από τη δεύτερη κατηγορία κλάδων (μπλε χρώμα) παρατηρείται ότι ο ταμιευτήρας 1 παράγει δευτερεύουσα ενέργεια ίση με 2.9 GWh και ο ταμιευτήρας 2 ίση με 0.3 GWh. Με τον τρόπο αυτό, κάθε ένας καλύπτει ένα μέρος του στόχου ενέργειας του. Η επιπλέον ποσότητα που πρέπει να παραχθεί προκειμένου να καλυφθεί ο στόχος ενέργειας φαίνεται στη πρώτη κατηγορία κλάδων (καφέ χρώμα), όπου για τον ταμιευτήρα 1 είναι $8.8 - 2.9 = 5.9$ GWh. Για τον ταμιευτήρα 2, η ποσότητα που χρειάζεται, πέραν της δευτερεύουσας, για να καλύψει το στόχο του είναι $13.2 - 0.3 = 12.9$ GWh. Όμως, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του, μπορεί να παράξει επιπλέον $9.7 - 0.3 = 9.4$ GWh, όπως φαίνεται και στην πρώτη κατηγορία κλάδων που του αντιστοιχεί. Επομένως, για τον ταμιευτήρα 2 προκύπτει έλλειμμα ίσο με $13.2 - 9.7 = 3.5$ GWh. Προκειμένου να καλύψει το έλλειμμα του, και εφόσον παρέχεται τέτοια δυνατότητα από τον ταμιευτήρα 1, ο ταμιευτήρας 2 «δανείζεται» ενέργεια ίση με το έλλειμμα του από τον ταμιευτήρα 1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η τρίτη κατηγορία κλάδων (πράσινο χρώμα) στο ταμιευτήρα 1 να λαμβάνει τιμή 3.5 GWh, δηλαδή την ποσότητα που θα δώσει για να καλύψει το έλλειμμα που δημιουργείται στο σύστημα. Στην τέταρτη κατηγορία κλάδων (μωβ χρώμα), που αφορά στην προσφορά ενέργειας που δεν αξιοποιείται από το σύστημα, για τον ταμιευτήρα 1 ισχύει $101.5 - 8.8 - 3.5 = 89.2$ GWh και για τον ταμιευτήρα 2 προκύπτει μηδενική

τιμή καθώς όση ενέργεια μπορούσε να παράξει την έδωσε για κάλυψη του στόχου του. Τέλος, από τον κόμβο **Z** προς τον σωρευτικό κόμβο **X**, ο ένας κλάδος (μαύρη συνεχής γραμμή) μεταφέρει την ποσότητα έως τη συνολική ζήτηση του συστήματος. Για το λόγο αυτό η τιμή του είναι $8.8 + 13.2 = 22$ GWh, όσο ο συνολικός στόχος του συστήματος, καθώς δεν παρατηρούνται ελλείμματα. Ο άλλος κλάδος (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) μεταφέρει την πλεονάζουσα ενέργεια (ενέργεια πέραν του ολικού στόχου), η οποία στο παράδειγμα αυτό έχει μηδενική τιμή.

4.2 Σύστημα τριών παράλληλων ταμιευτήρων

Έστω ότι έχουμε τρεις παράλληλους ταμιευτήρες, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο θεωρητικής τεκμηρίωσης, για τους οποίους τίθεται συνολικός στόχος παραγωγής ενέργειας ίσος με 22.0 GWh. Ο Πίνακας 4.12 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των δύο ταμιευτήρων.

Πίνακας 4.12: Χαρακτηριστικά τριών παράλληλων ταμιευτήρων

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

4.2.1 Παράδειγμα 1: Προσομοίωση τριών παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας, με κάλυψη του ελλείμματος του ταμιευτήρα 2 από τους υπόλοιπους

Πέραν των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν (Πίνακας 4.12), το ποσοστό συνεισφοράς κάθε ταμιευτήρα στην κάλυψη του συνολικού στόχου ενέργειας E^* , καθώς και τα αποθέματά τους, όπως

διαμορφώθηκαν για τις ανάγκες του παραδείγματος, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.13):

Πίνακας 4.13: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα τριών παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 1

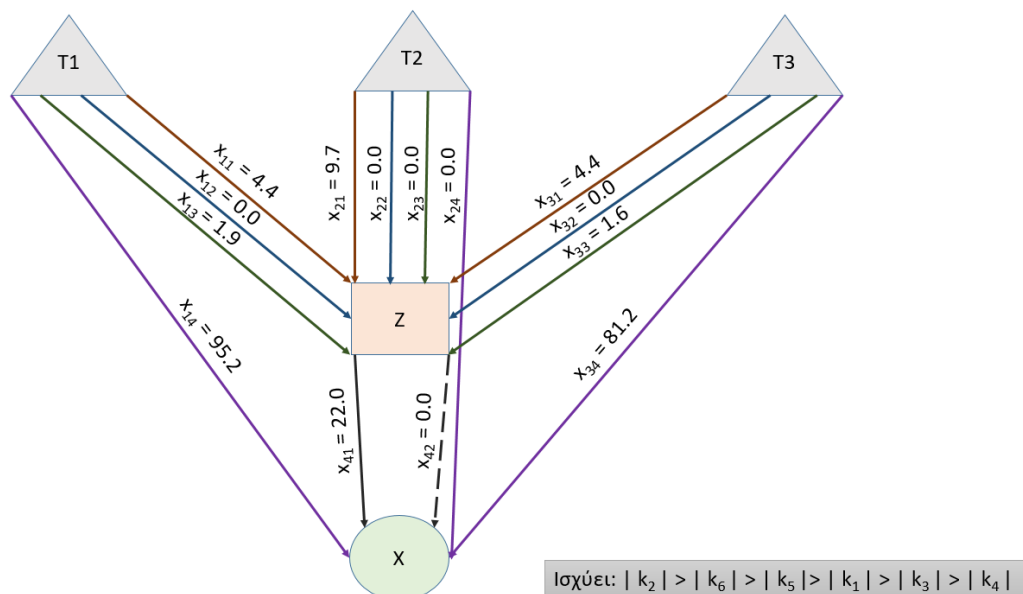
Δεδομένο	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2	Ταμιευτήρας 3
Ποσοστό συνεισφοράς, p_i (%)	20	60	20
Απόθεμα, S_i (hm ³)	372.00	118.00	4300.00

Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά στο μοντέλο, σύμφωνα με τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.4, υπολογίστηκαν οι παρακάτω μεταβλητές (Πίνακας 4.14), προκειμένου να δημιουργηθεί το διάλυμα των ορίων παροχетеυτικότητας, u :

Πίνακας 4.14: Υπολογισμοί μοντέλου για τρεις παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 1

Μεταβλητή	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2	Ταμιευτήρας 3
Στόχος ενέργειας, e_i^* (GWh)	4.4	13.2	4.4
Μέγιστη δυνητική παραγωγή ενέργειας από στρόβιλο, e_{imax} (GWh)	101.5	9.7	87.2
Δευτερεύουσα ενέργεια από στρόβιλο, e_{id} (GWh)	0.0	0.0	0.0
Ποσότητα που χρειάζεται να παραχθεί πέραν της δευτερεύουσας για κάλυψη του στόχου του ταμιευτήρα, e_{iextra}^* (GWh)	4.4	13.2	4.4
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

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο, μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 4.6, όπου φαίνονται αναλυτικά οι ροές ενέργειας από τους ταμιευτήρες.



Εικόνα 4.6: Προσομοίωση τριών παράλληλων ταμιευτήρων χωρίς παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας, με δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2

Ξεκινώντας από τη δεύτερη κατηγορία κλάδων (μπλε χρώμα) παρατηρείται ότι δεν προκύπτει παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας σε κανέναν από τους τρεις ταμιευτήρες. Για το λόγο αυτό, στην πρώτη κατηγορία κλάδων (καφέ χρώμα), η επιπλέον ποσότητα ενέργειας, πέραν της δευτερεύουσας, που πρέπει να παραχθεί από κάθε έναν ταμιευτήρα, έχει την τιμή της ποσότητας του στόχου ενέργειας που ζητείται να καλύψει κάθε ταμιευτήρας. Με βάση αυτό, προκύπτει ότι οι ταμιευτήρες 1 και 3 μπορούν να καλύψουν πλήρως τον στόχο τους, ενώ αντίθετα ο ταμιευτήρας 2 έχει έλλειμμα ίσο με $13.2 - 9.7 = 3.5$ GWh. Εφόσον υπάρχει δυνατότητα από τους ταμιευτήρες 1 και 3 να καλύψουν αυτό το έλλειμμα, ο ταμιευτήρας 2 «δανείζεται» ισόποση ενέργεια από τους άλλους δύο, σύμφωνα με τον έλεγχο που γίνεται στο υποκεφάλαιο 3.6. Από αυτόν τον έλεγχο προκύπτει ότι ο ταμιευτήρας 1 θα δώσει στον 2 ενέργεια ίση με 1.9 GWh και ο 3 θα δώσει στον 2 ενέργεια ίση με 1.6 GWh. Σε κάθε ροή της τρίτης κατηγορία κλάδων (πράσινο χρώμα) των ταμιευτήρων φαίνεται η ποσότητα που δίνουν για την κάλυψη του ελλείμματος που προκύπτει στο σύστημα. Στην τέταρτη κατηγορία κλάδων (μωβ χρώμα), που αφορά στην προσφορά ενέργειας που δεν αξιοποιείται από το σύστημα, για τον ταμιευτήρα 1 ισχύει $101.5 - 4.4 - 1.9 = 95.2$ GWh, για τον ταμιευτήρα 2 προκύπτει μηδενική τιμή, καθώς όση ενέργεια μπορούσε να παράξει την έδωσε για κάλυψη του στόχου του, και για τον ταμιευτήρα 3 ισχύει $87.2 - 4.4 - 1.6 = 81.2$ GWh. Τέλος, από τον κόμβο Z προς τον σωρευτικό κόμβο X, ο ένας κλάδος (μαύρη συνεχής γραμμή) μεταφέρει την ποσότητα έως

τη συνολική ζήτηση του συστήματος. Για το λόγο αυτό η τιμή του είναι $4.4 + 13.2 + 4.4 = 22$ GWh, όσο ο συνολικός στόχος του συστήματος, καθώς δεν παρατηρούνται ελλείμματα. Ο άλλος κλάδος (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) μεταφέρει την πλεονάζουσα ενέργεια (ενέργεια πέραν του ολικού στόχου), η οποία στο παράδειγμα αυτό έχει μηδενική τιμή.

4.2.2 Παράδειγμα 2: Προσομοίωση τριών παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας στον ταμιευτήρα 3 και δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2

Πέραν των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν (Πίνακας 4.12), το ποσοστό συνεισφοράς κάθε ταμιευτήρα στην κάλυψη του συνολικού στόχου ενέργειας E^* , καθώς και τα αποθέματά τους, όπως διαμορφώθηκαν για τις ανάγκες του παραδείγματος, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.15):

Πίνακας 4.15: Ποσοστό συνεισφοράς και τρέχον απόθεμα τριών παράλληλων ταμιευτήρων - Παράδειγμα 2

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

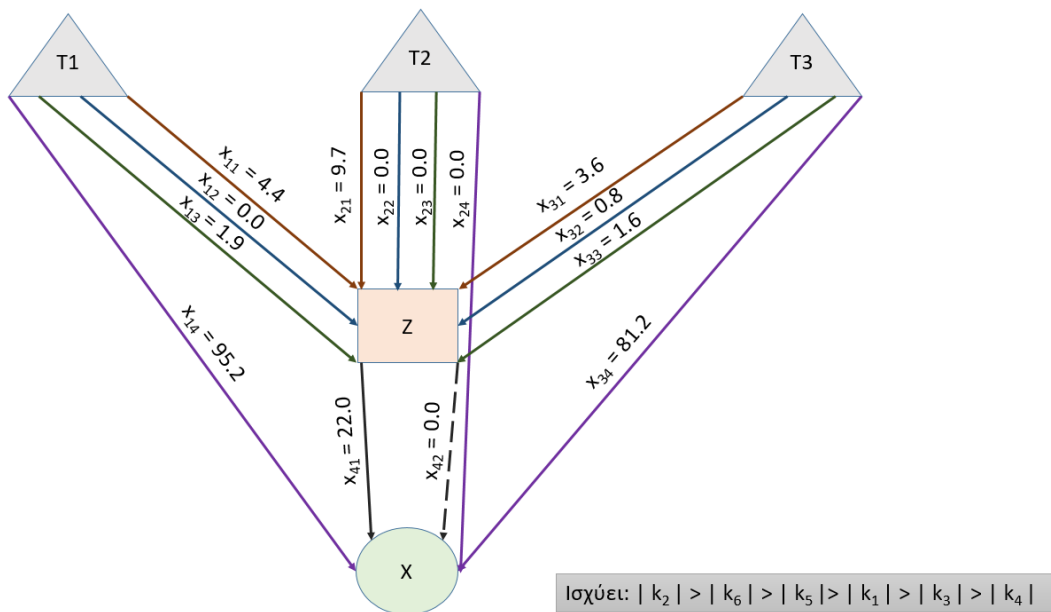
Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά στο μοντέλο, σύμφωνα με τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.4, υπολογίστηκαν οι παρακάτω μεταβλητές (Πίνακας 4.16), προκειμένου να δημιουργηθεί το διάνυσμα των ορίων παροχτετευτικότητας, \mathbf{u} :

Πίνακας 4.16: Υπολογισμοί μοντέλου για τρεις παράλληλους ταμιευτήρες - Παράδειγμα 2

Μεταβλητή	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2	Ταμιευτήρας 3
Στόχος ενέργειας, e_i^* (GWh)	4.4	13.2	4.4
Μέγιστη δυναμική 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

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο, μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 4.7, όπου φαίνονται αναλυτικά οι ροές ενέργειας από τους ταμιευτήρες.



Εικόνα 4.7: Προσομοίωση τριών παράλληλων ταμιευτήρων με παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας στον ταμιευτήρα 3 και δημιουργία ελλείμματος στον ταμιευτήρα 2

Ξεκινώντας από τη δεύτερη κατηγορία κλάδων (μπλε χρώμα) προκύπτει παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας μόνο στον ταμιευτήρα 3 ίση με 0.8 GWh. Για το λόγο αυτό, στη πρώτη κατηγορία κλάδων (καφέ χρώμα) φαίνεται η επιπλέον ποσότητα ενέργειας, πέραν της δευτερεύουσας, που πρέπει να παραχθεί από κάθε έναν ταμιευτήρα. Έτσι, για τους ταμιευτήρες 1 και 2 έχει την τιμή της ποσότητας του στόχου ενέργειας που ζητείται να καλύψει καθένας ενώ για τον

ταμιευτήρα 3 έχει την επιπλέον ποσότητα, πέραν της δευτερεύουσας που παράγει. Με βάση αυτό, προκύπτει ότι οι ταμιευτήρας 1 και 3 καλύπτουν πλήρως τον στόχο τους αφού μπορούν να παράξουν την ενέργεια που χρειάζονται. Όσον αφορά στον ταμιευτήρα 3, χρειάζεται να παράξει 3.6 GWh επιπλέον της δευτερεύουσας για να καλύψει το στόχο του. Ο ταμιευτήρας 2 έχει έλλειμμα ίσο με $13.2 - 9.7 = 3.5$ GWh. Προκειμένου να καλύψει το έλλειμμα του, και εφόσον υπάρχει δυνατότητα από τους ταμιευτήρες 1 και 3 να καλύψουν αυτό το έλλειμμα, ο ταμιευτήρας 2 «δανείζεται» ενέργεια, ίση με το έλλειμμα του, από τους άλλους δύο σύμφωνα με τον έλεγχο που γίνεται στο υποκεφάλαιο 3.6. Από αυτόν τον έλεγχο προκύπτει ότι ο ταμιευτήρας 1 θα δώσει στον 2 1.9 GWh και ο 3 θα δώσει στον 2 1.6 GWh. Σε κάθε ροή της τρίτης κατηγορία κλάδων (πράσινο χρώμα) των ταμιευτήρων φαίνεται η ποσότητα που δίνουν για την κάλυψη του ελλείμματος που προκύπτει στο σύστημα. Στην τέταρτη κατηγορία κλάδων (μωβ χρώμα), που αφορά στην προσφορά ενέργειας που δεν αξιοποιείται από το σύστημα, για τον ταμιευτήρα 1 ισχύει $101.5 - 4.4 - 1.9 = 95.2$ GWh, για τον ταμιευτήρα 2 προκύπτει μηδενική τιμή καθώς όση ενέργεια μπορούσε να παράξει την έδωσε για κάλυψη του στόχου του και για τον ταμιευτήρα 3 ισχύει $87.2 - 3.6 - 0.8 - 1.6 = 81.2$ GWh. Τέλος, από τον κόμβο **Z** προς τον σωρευτικό κόμβο **X**, ο ένας κλάδος (μαύρη συνεχής γραμμή) μεταφέρει την ποσότητα έως τη συνολική ζήτηση του συστήματος. Για το λόγο αυτό η τιμή του είναι $4.4 + 13.2 + 4.4 = 22$ GWh, όσο ο συνολικός στόχος του συστήματος, καθώς δεν παρατηρούνται ελλείμματα. Ο άλλος κλάδος (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) μεταφέρει την πλεονάζουσα ενέργεια (ενέργεια πέραν του ολικού στόχου), η οποία στο παράδειγμα αυτό έχει μηδενική τιμή.

5 Υπολογιστικά ζητήματα μοντέλων προσομοίωσης υδατικού ισοζυγίου

5.1 Προβλήματα που εξετάζονται

Κατά τη διαδικασία προσομοίωσης του υδατικού ισοζυγίου ενός ταμιευτήρα, εν γένει, και ακόμα περισσότερο ενός υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα, γίνεται μια σειρά απλοποιήσεων και παραδοχών, λόγω της περίπλοκης δομής και λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος. Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος και το χρονικό βήμα που επιλέγεται (π.χ. ημερήσιο, μηνιαίο κ.λπ.), ορισμένες διεργασίες είναι πιθανό είτε να παραληφθούν είτε να περιγραφούν με απλούστερο τρόπο. Ακόμη, η σειριακή εκτέλεση των υπολογισμών (εισορές, εκροές) αποτελεί μια μείζονα απλοποίηση, που είναι σε αντίθεση με τη φυσική των διεργασιών του υδατικού ισοζυγίου, οι οποίες εξελίσσονται σε συνεχή χρόνο. Όλα τα παραπάνω συνδέονται με μια σειρά σφαλμάτων που εισάγονται στο σύστημα και διαφοροποιούν το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης.

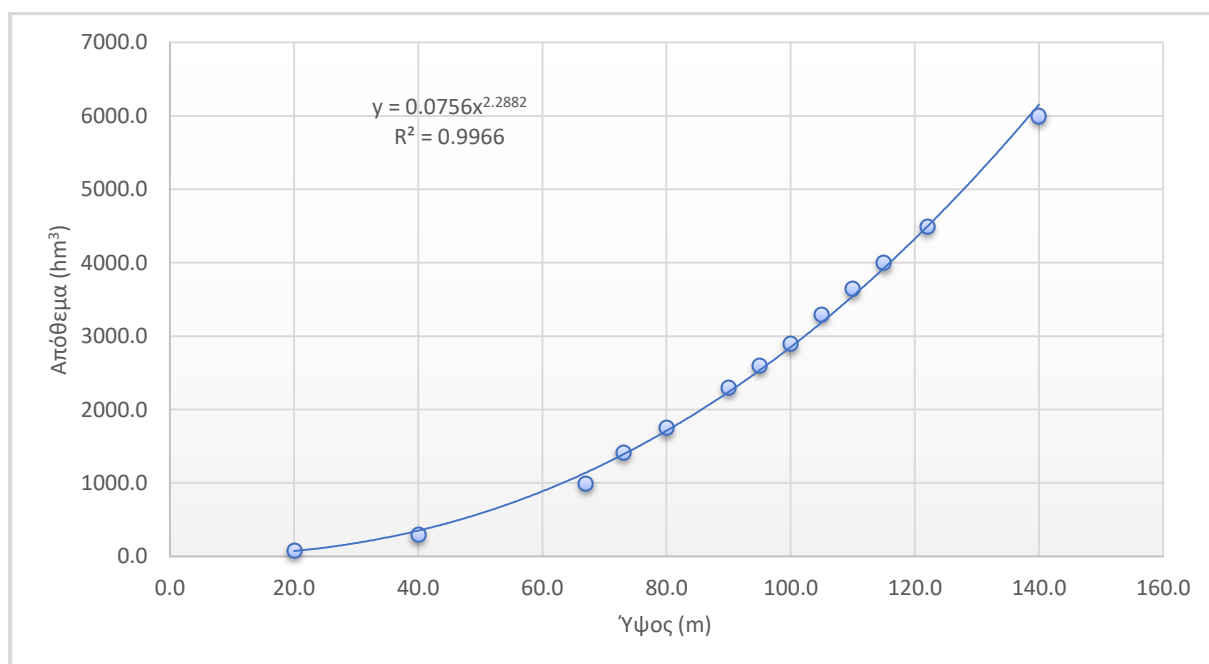
Για τη διερεύνηση των ως άνω υπολογιστικών προβλημάτων προσομοιώνεται η λειτουργία του ταμιευτήρα των Κρεμαστών για μια χρονική περίοδο 42 υδρολογικών ετών (Οκτώβριος 1966 - Σεπτέμβριος 2008), εφαρμόζοντας με διαφορετικές παραδοχές το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου που περιγράφεται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.2. Ως μοντέλο αναφοράς θεωρούμε το σχήμα ισοζυγίου με είσοδο την ημερήσια χρονοσειρά εισροών στον ταμιευτήρα, το οποίο συγκρίνεται με απλουστευμένες του εκδοχές. Τα ζητήματα που μας απασχολούν είναι: (α) η χρονική διακριτικότητα των υπολογισμών, (β) η διατύπωση του σχήματος επίλυσης σε ρητή ή άρρητη μορφή, με εφαρμογή ενός επαναληπτικού κύκλου, (γ) η εκτίμηση των υπερχειλίσεων και η δυνατότητα βελτίωσης της ακρίβειας των υπολογισμών με τεχνητή αλλαγή της Ανώτατης Στάθμης Λειτουργίας (ΑΣΛ) του ταμιευτήρα, και (δ) η θεώρηση μεταβλητής ζήτησης ενέργειας αντί σταθερού στόχου στην προσομοίωση.

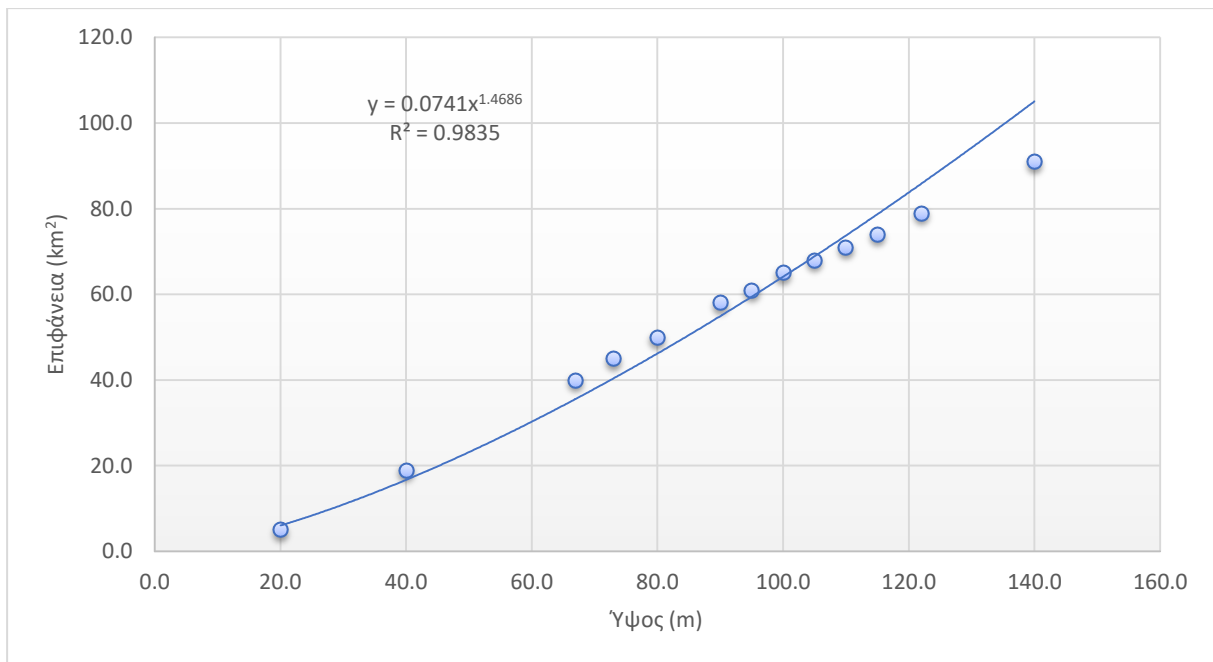
5.2 Δεδομένα εισόδου ταμιευτήρα Κρεμαστών

Ο Πίνακας 5.1 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ταμιευτήρα των Κρεμαστών, για τον οποίο δίνονται επίσης σε μορφή γραφήματος οι σχέσεις βάθους νερού - αποθέματος (Εικόνα 5.1), βάθους νερού - επιφάνειας (Εικόνα 5.2), και ύψους πτώσης - παροχетеυτικότητας του αγωγού προσαγωγής (Εικόνα 5.3).

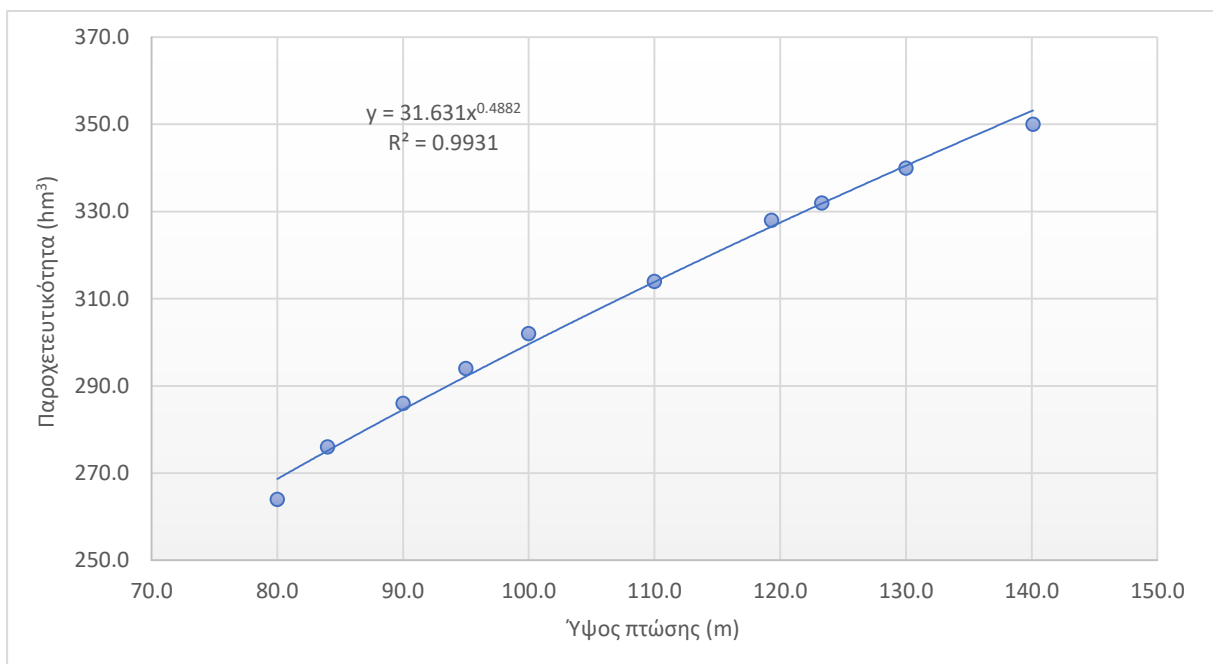
Πίνακας 5.1: Δεδομένα ταμιευτήρα Κρεμαστών

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Λεκάνη απορροής (km ²)	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 ³)	1140.1
Μικτή χωρητικότητα (hm ³)	4492.9
Ωφέλιμη χωρητικότητα (hm ³)	3352.8
Παράμετρος ψ (GWh/hm ⁴)	0.226
Στάθμη εξόδου αγωγού φυγής (m)	143.5

**Εικόνα 5.1: Διάγραμμα βάθους νερού - αποθέματος ταμιευτήρα Κρεμαστών**



Εικόνα 5.2: Διάγραμμα βάθους νερού - επιφάνειας ταμιευτήρα Κρεμαστών



Εικόνα 5.3: Διάγραμμα ύψους πτώσης - παροχρητευτικότητας στροβίλου ταμιευτήρα Κρεμαστών

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του μηνιαίου δείγματος απορροών, από τον Οκτώβριο του 1966 μέχρι τον Σεπτέμβριο 2008, δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2: Στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής λεκάνης Κρεμαστών για τα υδρολογικά έτη 1966 - 67 έως 2007 - 08

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή (hm³)	147.8	321.3	588.5	477.5	470.8	487.9	460.7	295.0	135.2	85.7	66.8	67.2	3608.1
Τυπική απόκλιση (hm³)	117.0	169.8	312.2	271.4	223.8	203.8	138.5	108.8	35.6	18.1	12.8	28.3	881.1
Συντελεστής μεταβλητότητας (CV)	0.791	0.528	0.530	0.568	0.475	0.418	0.301	0.369	0.264	0.211	0.192	0.421	0.244
Συντελεστής ασυμμετρίας	1.91	1.31	0.51	0.78	0.27	0.61	0.54	0.52	0.76	-0.17	0.17	1.91	-0.36

Επιπλέον, παρατίθενται τα στατιστικά μεγέθη της ημερήσιας και μηνιαίας χρονοσειράς εισροών (Πίνακας 5.3):

Πίνακας 5.3: Στατιστικά μεγέθη ημερήσιας και μηνιαίας χρονοσειράς εισροών ταμιευτήρα Κρεμαστών

	Ημερήσια χρονοσειρά	Μηνιαία χρονοσειρά
Μέση τιμή	9.9	300.7
Τυπική απόκλιση	12.8	250.4
Συντελεστής μεταβλητότητας (CV)	1.294	0.833

Σχετικά με το συντελεστή μεταβλητότητας (CV) παρατηρείται ότι όσο μικραίνει η κλίμακα τόσο πιο μεγάλη γίνεται η διασπορά σε σχέση με τη μέση τιμή.

5.3 Διερεύνηση προβλημάτων χρονικής διακριτότητας και διατύπωσης αριθμητικού σχήματος υπολογισμών

5.3.1 Τοποθέτηση του προβλήματος και παραδοχές

Ως γνωστό, στα διαχειριστικά μοντέλα που αναφέρονται σε υδροσυστήματα σχετικά μεγάλης κλίμακας, συχνά επιλέγεται η χρήση μηνιαίου βήματος, το οποίο επιβάλλεται κυρίως για λόγους

επιτάχυνσης της υπολογιστικής διαδικασίας. Πράγματι, ειδικά σε προβλήματα βελτιστοποίησης με χρήση συνθετικών χρονοσειρών στην προσομοίωση, ο υπολογιστικός φόρτος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη λήψη ικανοποιητικών λύσεων σε εύλογο χρόνο. Συνεπώς, η εφαρμογή του μηνιαίου βήματος αποτελεί, στην πραγματικότητα, ένα συμβιβασμό μεταξύ ακρίβειας και ταχύτητας. Σε αρκετές επίσης περιπτώσεις, το μηνιαίο βήμα επιβάλλεται από την ίδια τη χρονική διακριτότητα των χρονοσειρών εισόδου, καθώς σε τέτοιου τύπου προβλήματα παρατηρείται συχνά έλλειψη δεδομένων σε μικρές χρονικές κλίμακες.

Έχοντας γνωστές τις ημερήσιες χρονοσειρές εισροών στον ταμειυτήρα, έγινε μέσω συνάθροισης η παραγωγή των μηνιαίων χρονοσειρών της περιόδου αναφοράς. Βάσει των μηνιαίων χρονοσειρών, δημιουργήθηκαν τρεις ακόμα χρονοσειρές εισροών για κανονικοποιημένα χρονικά βήματα, όπως ψευδοημερήσιο βήμα (μηνιαίο/30.5), δεκαπενθήμερο (μηνιαίο/2) και βήμα $\frac{1}{4}$ του μήνα (μηνιαίο/4). Έτσι η προσομοίωση που έγινε αφορά στα παρακάτω χρονικά βήματα:

- Πραγματικό ημερήσιο βήμα
- Ψευδοημερήσιο βήμα (μήνας/30.5)
- Μηνιαίο βήμα
- Δεκαπενθήμερο βήμα (μήνας/2)
- Βήμα $\frac{1}{4}$ του μήνα (μήνας/4)

Έχοντας γνωστά τα μεγέθη που αφορούν στον ταμειυτήρα όπως π.χ. Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ), Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΚΣΛ), στάθμη πυθμένα, νεκρός όγκος, ωφέλιμη χωρητικότητα κτλ. και με τη βοήθεια απλοποιημένων σχέσεων που προκύπτουν από διαγράμματα που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμειυτήρα, έγινε προσομοίωση της λειτουργίας του για όλα τα χρονικά βήματα που προαναφέρθηκαν (μηνιαίο, ημερήσιο κ.λπ.).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται σε όρους καμπυλών διάρκειας - παραγωγής ενέργειας, μέσης ετήσιας υπερχείλισης και μέσου ετήσιου ενεργειακού οφέλους.

5.3.2 Καμπύλες διάρκειας - παραγωγής ενέργειας

Βάσει των αποτελεσμάτων που αφορούν στην παραγωγή της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας, το άθροισμα των οποίων δίνει τη συνολική παραγόμενη ενέργεια (σχέσεις (3.21) - (3.23)) για το σύνολο των υδρολογικών ετών, δημιουργείται η καμπύλη διάρκειας - παραγωγής ενέργειας. Δεδομένου ενός στόχου ενέργειας E^* , σταθερού για κάθε βήμα της προσομοίωσης, η παραγόμενη ενέργεια διακρίνεται ως εξής:

- Η παραγωγή ενέργειας που εξασφαλίζεται στο μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου (δηλαδή τουλάχιστον 95 - 99%) αφορά στην εγγυημένη ή πρωτεύουσα ενέργεια, E_{fj} . Σε ένα καλά ορισμένο (βελτιστοποιημένο) σύστημα αυτή θα πρέπει να ταυτίζεται με τον στόχο παραγωγής E^* .
- Η παραγωγή ενέργειας πάνω από το στόχο αφορά στη δευτερεύουσα ενέργεια, E_{sj} .

Σε περίπτωση που η παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια δεν φτάνει να καλύψει το στόχο E^* , αναφερόμαστε σε έλλειμμα ενέργειας, Def_j .

Κατατάσσοντας σε φθίνουσα σειρά τη χρονοσειρά της συνολικής ενέργειας, E_{total_j} και αντιστοιχίζοντας μια πιθανότητα υπέρβασης σε κάθε τιμή, προκύπτει τελικά η καμπύλη διάρκειας - παραγωγής ενέργειας. Η πιθανότητα υπέρβασης (p_i) της ταξινομημένης τιμής που βρίσκεται στη θέση i εκτιμάται από την εμπειρική κατανομή:

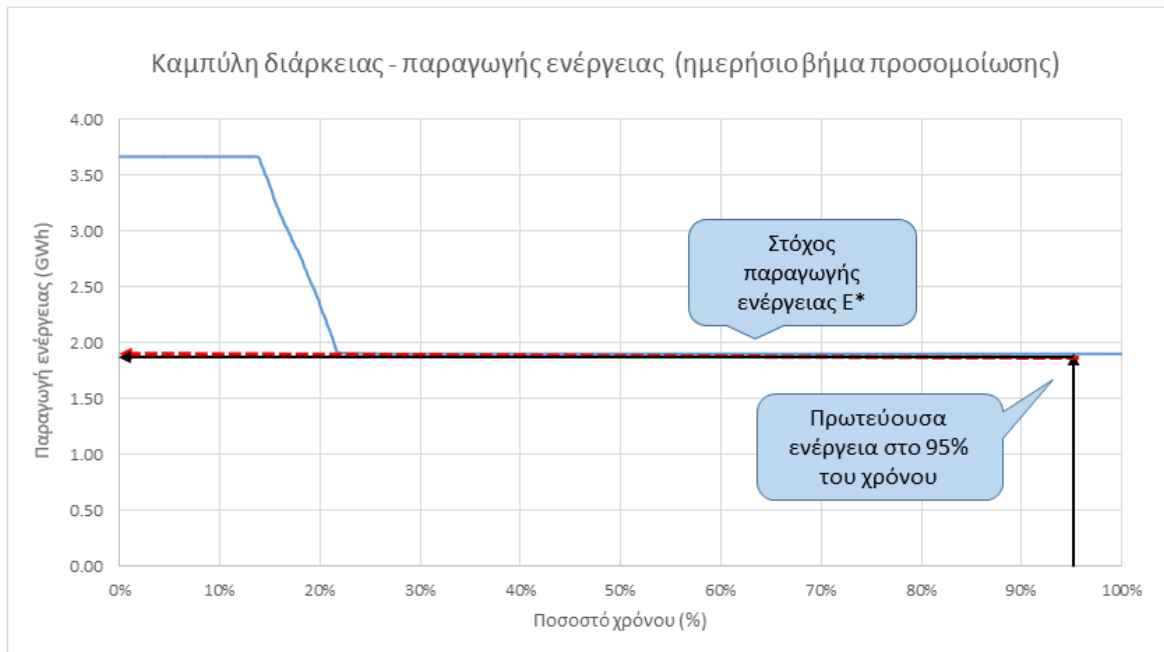
$$p_i = i / (n + 1) \quad (5.1)$$

όπου n είναι το μέγεθος της προσομοιωμένης χρονοσειράς.

Με βάση την καμπύλη διάρκειας - παραγωγής ενέργειας μπορεί να εκτιμηθεί η ενέργεια που εξασφαλίζεται για υψηλό (της τάξης του 95% ως 99%) ποσοστό του χρόνου (πρωτεύουσα ενέργεια).

Όλα τα παραπάνω, φαίνονται αναλυτικά στην Εικόνα 5.4, όπου με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται ο στόχος ενέργειας στο ημερήσιο βήμα προσομοίωσης του ταμιευτήρα Κρεμαστών, ενώ με μαύρη γραμμή φαίνεται η πρωτεύουσα ενέργεια στο 95% του χρόνου. Στην προκειμένη περίπτωση, στο χρονικό διάστημα αυτό, φαίνεται ότι η ζήτηση ενέργειας ικανοποιεί τον στόχο, δηλαδή δεν παρατηρείται έλλειμμα ενέργειας, καθώς οι δύο γραμμές ταυτίζονται.

Στο σημείο αυτό, είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι οι τιμές στόχου ενέργειας για κάθε χρονικό βήμα υπολογίστηκαν μέσω βελτιστοποίησης με σκοπό τη μεγιστοποίηση του μέσου ετήσιου οφέλους/ κόστους και ήταν αυτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα Κρεμαστών. Στο ημερήσιο βήμα η τιμή του στόχου ενέργειας προέκυψε ίση με 1.9 GWh.

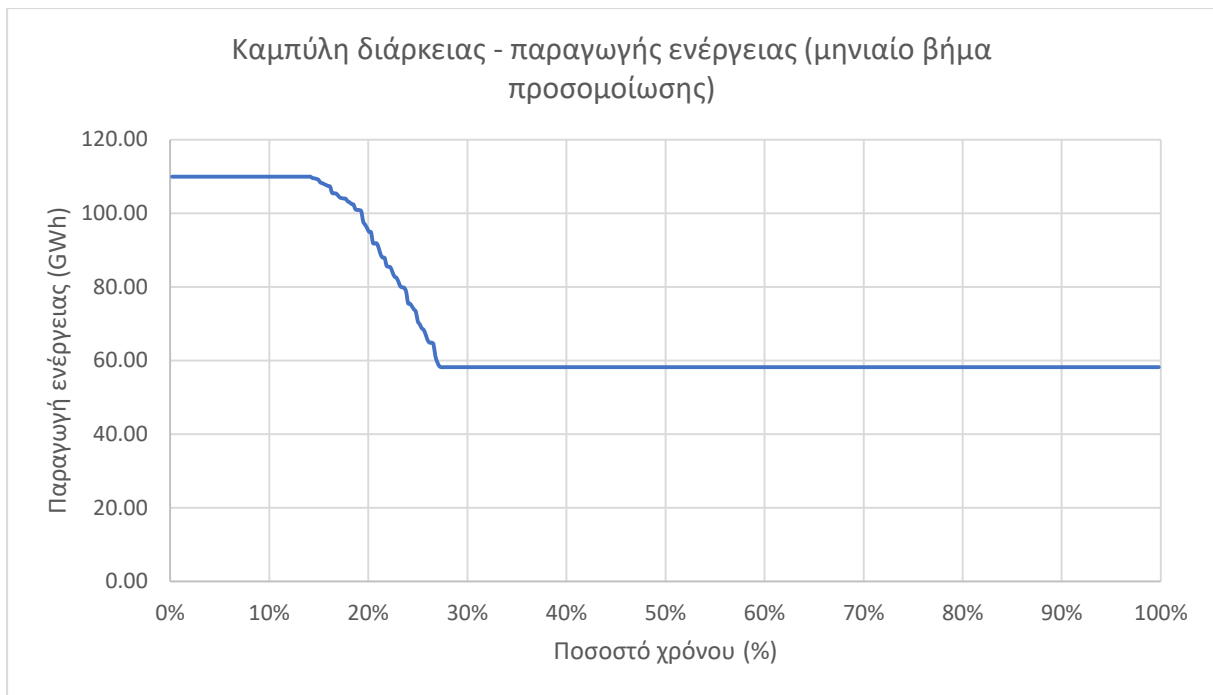


Εικόνα 5.4: Καμπύλη διάρκειας - ημερήσιας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών

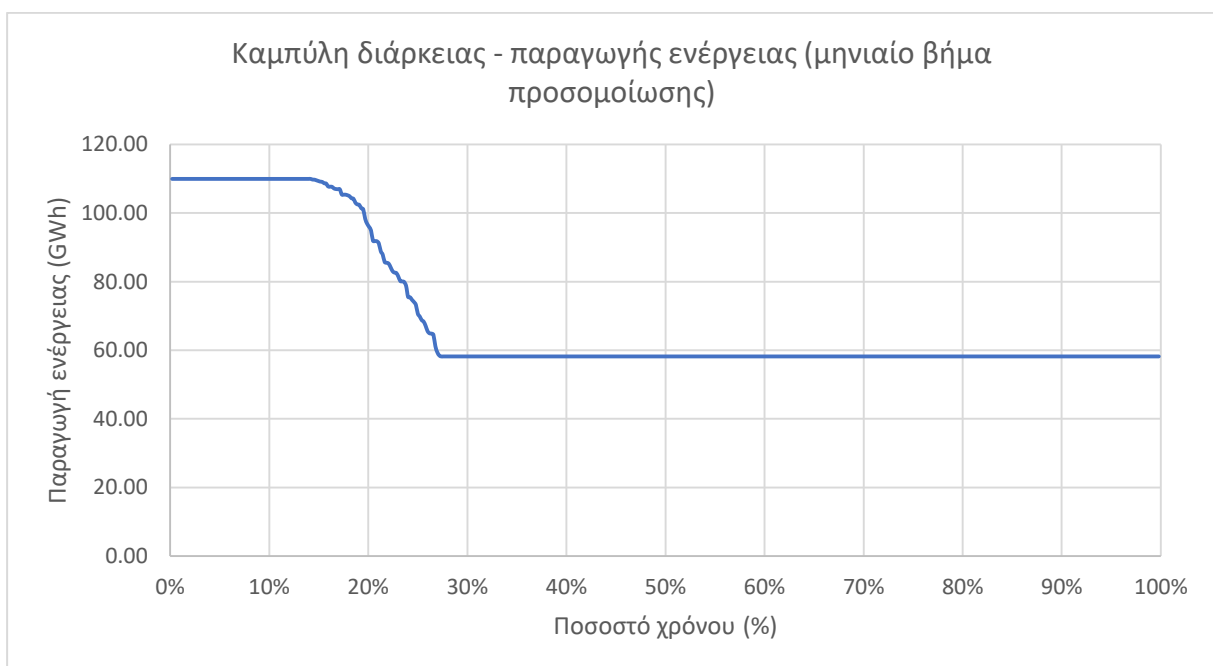
Ένα από τα ζητήματα που εξετάστηκε είναι η εξομάλυνση της καμπύλης διάρκειας, η οποία, όπως προαναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.2, έγινε με εκ νέου υπολογισμό της στάθμης και του ύψους πτώσης (σχέσεις (3.19), (3.20)), όπως αυτά έχουν διαμορφωθεί στην πορεία της προσομοίωσης. Για τον υπολογισμό του νέου ύψους πτώσης για την παραγωγή ενέργειας, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος της αρχικής και τελικής στάθμης. Η αρχική (Εικόνα 5.5) και η εξομαλυμένη (Εικόνα 5.6) καμπύλη για τον ταμιευτήρα που εξετάζεται, σε μηνιαίο βήμα προσομοίωσης, φαίνονται στην συνέχεια.

Στις παρακάτω εικόνες παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών δεν είναι μεγάλη, οπότε δεν κρίνεται και αναγκαία η εφαρμογή της στο συγκεκριμένο παράδειγμα (θα μπορούσε να παραληφθεί για απλοποίηση). Επειδή όμως σε άλλες περιπτώσεις ταμιευτήρων πιθανώς να είναι αισθητή, η διαδικασία ακολουθήθηκε με τις εξομαλυμένες καμπύλες για όλα τα χρονικά βήματα που προαναφέρθηκαν.

Με βάση τα παραπάνω παρατίθενται τα αποτελέσματα του μοντέλου που υλοποιήθηκε στον ταμιευτήρα των Κρεμαστών και αφορούν στις καμπύλες διάρκειας - παραγωγής ενέργειας για κάθε χρονικό βήμα διακριτοποίησης (Εικόνα 5.7 - Εικόνα 5.11).



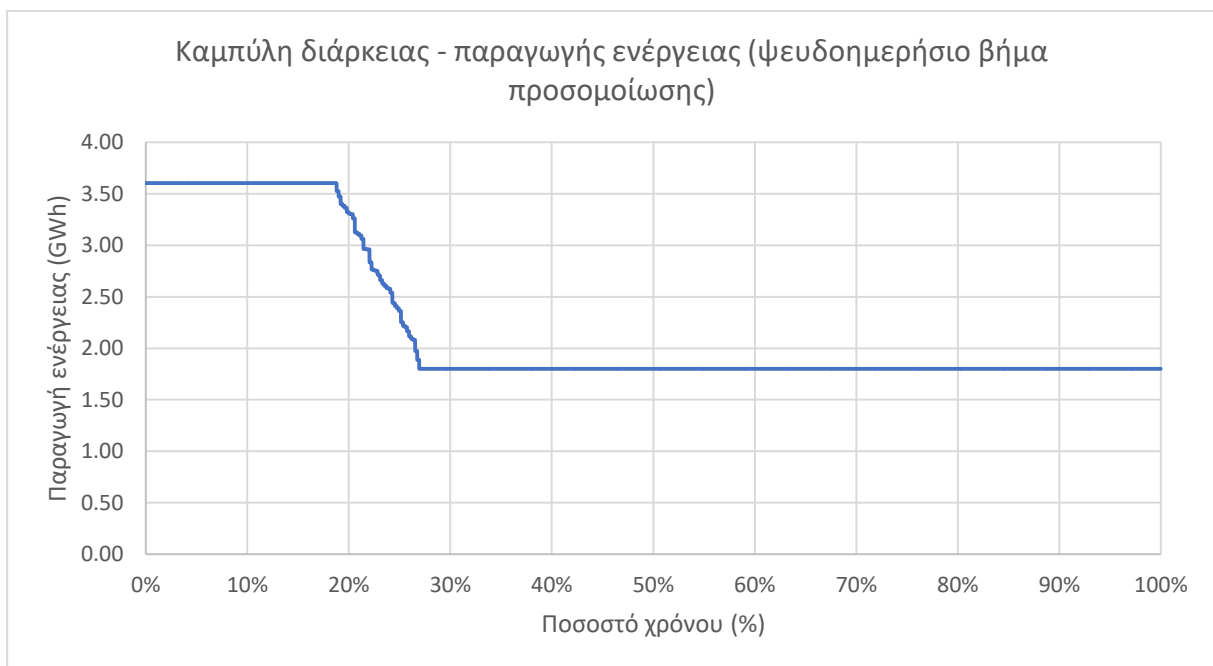
Εικόνα 5.5: Αρχική καμπύλη διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών



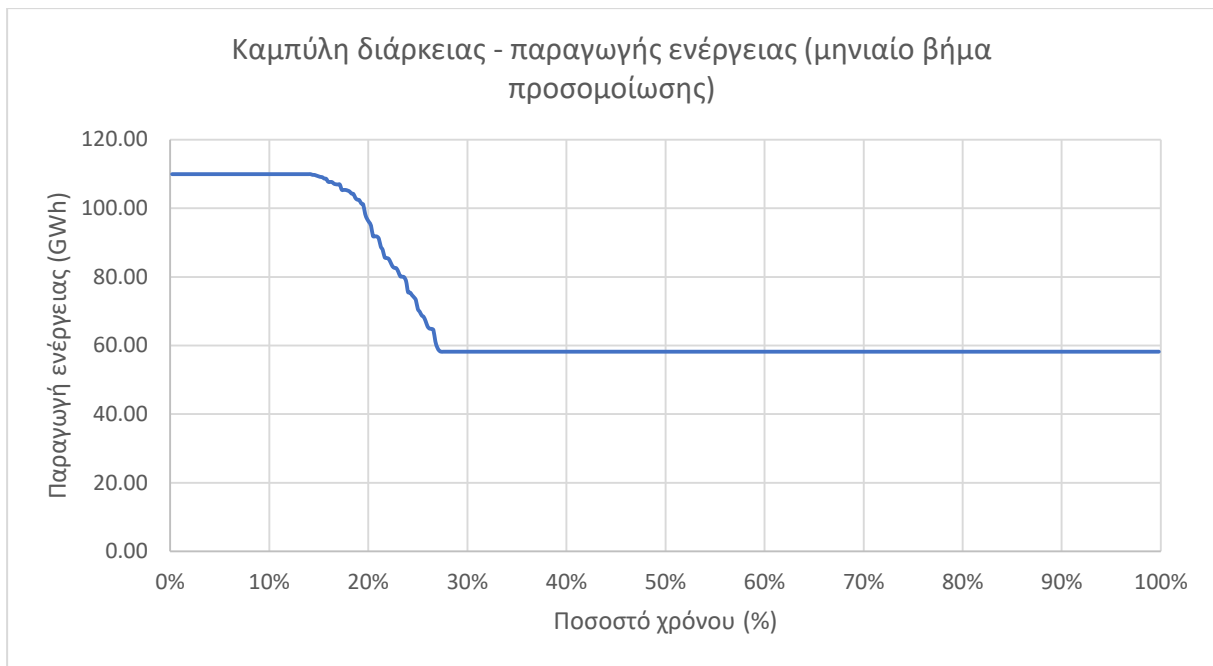
Εικόνα 5.6: Εξομαλωμένη καμπύλη διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών



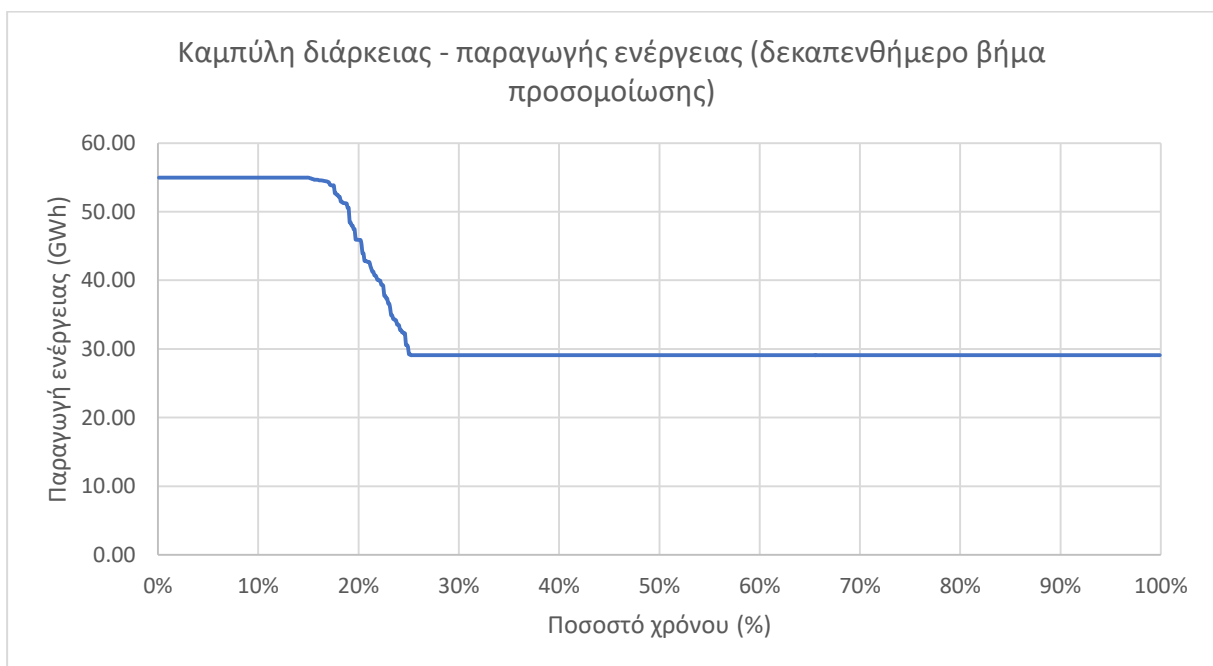
Εικόνα 5.7: Καμπύλη διάρκειας - ημερήσιας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών



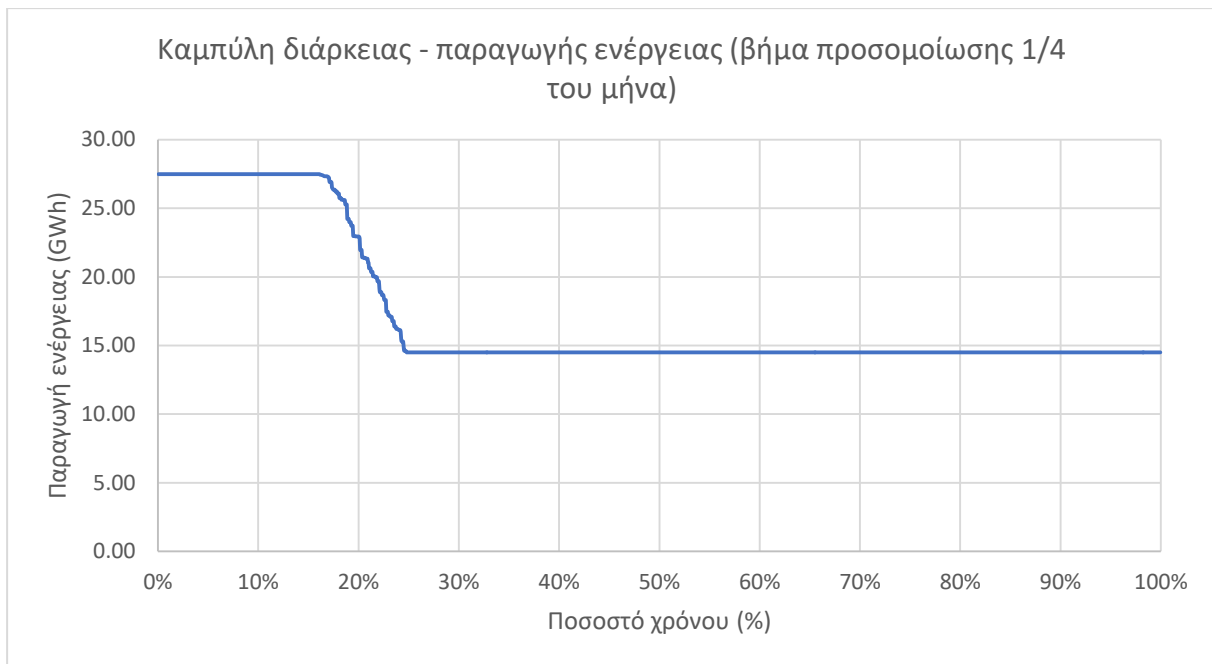
Εικόνα 5.8: Καμπύλη διάρκειας - ψευδοημερήσιας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών



Εικόνα 5.9: Καμπύλη διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών



Εικόνα 5.10: Καμπύλη διάρκειας - δεκαπενθήμερης παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών



Εικόνα 5.11: Καμπύλη διάρκειας - παραγωγής ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών με βήμα 1/4 του μήνα

Συγκρίνοντας τις παραπάνω καμπύλες για τα διάφορα χρονικά βήματα παρατηρούνται τα εξής:

- Σε όλα τα χρονικά βήματα που υλοποιήθηκαν, η πρωτεύουσα ενέργεια είναι διαθέσιμη για το 95% του χρόνου, κατά το οποίο η ζήτηση ικανοποιεί τον αντίστοιχο στόχο, και δεν παρατηρείται έλλειμμα ενέργειας ή αν παρατηρείται είναι πολύ μικρό.
- Σε όλα τα χρονικά βήματα που υλοποιήθηκαν έχουμε παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας (ενέργεια πέραν του στόχου).
- Πέρα της καμπύλης που αφορά στο πραγματικό ημερήσιο βήμα προσομοίωσης, όλες οι άλλες παρουσιάζουν μικρές διαταραχές όσον αφορά στην ενέργεια που παράγεται πέραν του στόχου (δευτερεύουσα ενέργεια). Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι στην ημερήσια κλίμακα, λόγω των πραγματικών δεδομένων εισροών με ίδιο σταθερό βήμα, η εκτίμηση της παραγωγή ενέργειας είναι περισσότερο ομαλή, καθώς οι μεταβολές του ύψους πτώσης είναι ανεπαίσθητες. Αντίθετα, στα υπόλοιπα βήματα, όπου τα δεδομένα εισροών προέκυψαν βάσει των πραγματικών ημερήσιων και από συναθροίσεις, παρατηρούνται μικρές ανωμαλίες στις καμπύλες διάρκειας - ενέργειας, στο τμήμα που αφορά στην παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας. Αυτές οι διακυμάνσεις μεταφέρονται και στα υπόλοιπα τρία κοινωνικοποιημένα βήματα που προκύπτουν με βάση το μηνιαίο βήμα.
- Συγκρίνοντας το πραγματικό ημερήσιο και το μηνιαίο βήμα της προσομοίωσης παρατηρείται ότι ενώ στην παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας σε ετήσια κλίμακα οι τιμές που προκύπτουν είναι σχεδόν οι ίδιες, οι αντίστοιχες τιμές για τη δευτερεύουσα ενέργεια διαφοροποιούνται αρκετά. Συγκεκριμένα, εξετάζοντας το διάγραμμα στην Εικόνα 5.7 προκύπτει ότι η

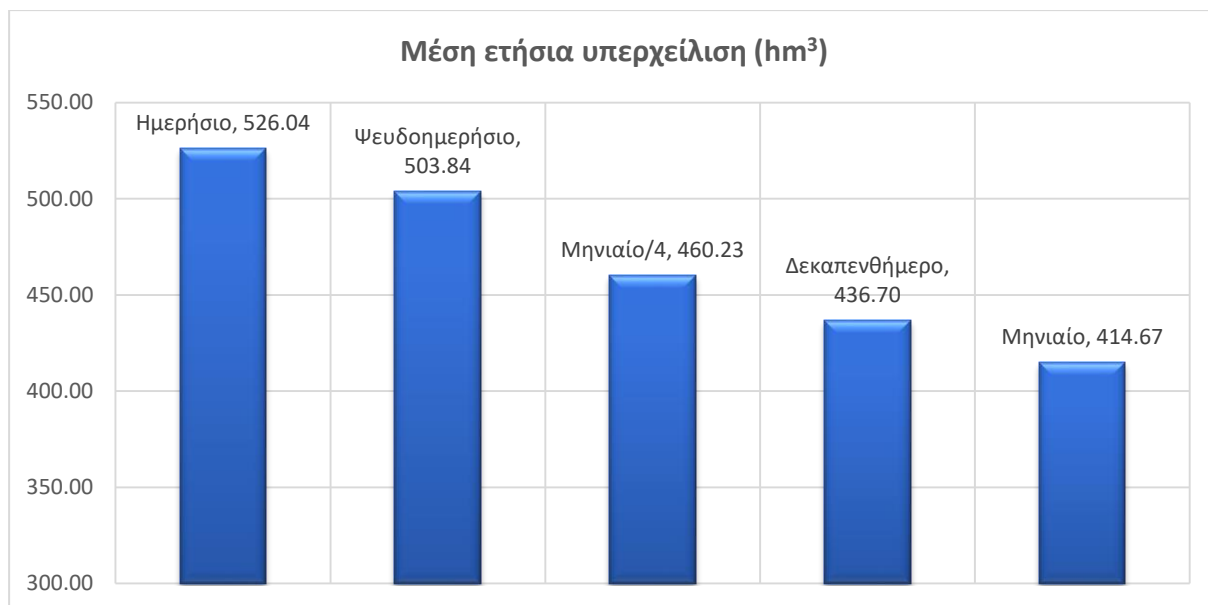
πρωτεύουσα ενέργεια (στο 95% του χρόνου) που παράγεται σε ημερήσιο βήμα είναι της τάξης των 1.9 GWh, δηλαδή $1.9 \times 365 \cong 694$ GWh στο έτος. Αντίστοιχα από το διάγραμμα της μηνιαίας παραγωγής (Εικόνα 5.9) φαίνεται ότι στο 95% του χρόνου παράγονται 58.2 GWh, δηλαδή $58.2 \times 12 \cong 698$ GWh στο έτος. Επομένως, η διαφορά στην παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας είναι πολύ μικρή. Όσον αφορά στη δευτερεύουσα ενέργεια, από τα αποτελέσματα των υπολογισμών προκύπτει ότι με το ημερήσιο βήμα παράγονται περίπου 112 GWh ετησίως, ενώ αντίστοιχα με το μηνιαίο περίπου 138 GWh. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, καθώς όπως θα αναφερθεί παρακάτω, από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, προκύπτει ότι σε ημερήσιο βήμα η μέση ετήσια υπερχείλιση είναι αρκετά μεγαλύτερη απ' ότι με το μηνιαίο βήμα. Επομένως, αφού μέρος των εισροών χάνεται λόγω υπερχείλισης, είναι αναμενόμενο ότι η δευτερεύουσα ενέργεια θα είναι μικρότερη με το ημερήσιο βήμα από ότι με το μηνιαίο.

5.3.3 Μέση ετήσια υπερχείλιση

Ένας από τους υπολογισμούς που έγινε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για όλα τα χρονικά βήματα που επιλέχθηκαν είναι η ποσότητα νερού που τελικά υπερχείλισε από τον ταμιευτήρα, εκφρασμένη σε μέση ετήσια κλίμακα (hm^3). Οι τιμές που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 5.4) και απεικονίζονται όλες σε ένα διάγραμμα (Εικόνα 5.12) προκειμένου να διευκολυνθεί η σύγκρισή τους.

Πίνακας 5.4: Μέση ετήσια υπερχείλιση ταμιευτήρα Κρεμαστών σε διαφορετικά βήματα προσομοίωσης

Βήμα	Στόχος ενέργειας (GWh)	Μέση ετήσια υπερχείλιση (hm^3)
Ημερήσιο	1.9	526.04
Ψευδοημερήσιο	1.8	503.84
Μηνιαίο/4	14.5	460.23
Δεκαπενθήμερο	29.1	436.70
Μηνιαίο	58.2	414.67



Εικόνα 5.12: Μέση ετήσια υπερχειλίση ταμιευτήρα Κρεμαστών σε διαφορετικά βήματα προσομοίωσης

Βάσει των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι η μέση ετήσια υπερχειλίση μειώνεται όσο αυξάνεται το χρονικό βήμα. Για παράδειγμα, συγκρίνοντας το ημερήσιο βήμα με το μηνιαίο παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις υπερχειλίσεις, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι στο μήνα η υπερχειλίση εξομαλύνεται, αφού κατανέμεται ομοιόμορφα σε περισσότερες ημέρες (όλο τον μήνα) και η συνολική μηνιαία ικανότητα εκρών μέσω του στροβίλου μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερο μέρος της. Αντίθετα, στο ημερήσιο βήμα η υπερχειλίση αφορά σε κάθε μέρα χωριστά και έτσι συγκεντρώνεται σε λίγες μέρες. Όπως είναι λογικό, η παροχετευτικότητα του αγωγού προσαγωγής και των στροβίλων μπορεί να παραλάβει μικρότερο μέρος από αυτή την υπερχειλίση. Επιπλέον, μεταξύ πραγματικού ημερήσιου και ψευδοημερήσιου βήματος παρατηρείται ότι το ψευδοημερήσιο έχει λίγο μικρότερη μέση ετήσια υπερχειλίση, καθώς στην ουσία πρόκειται για ένα χρονικό βήμα όπου οι εισροές είναι ισοκαταμεμημένες σε όλες τις ημέρες του μήνα, ενώ στο ημερήσιο οι εισροές εμφανίζουν αρκετά έντονες διακυμάνσεις (π.χ. λόγω των πλημμυρικών επεισοδίων, που διαφορετικά εξομαλύνονται).

5.3.4 Μέσο ετήσιο όφελος / κόστος από τη παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας

Μετά το πέρας της προσομοίωσης του ταμιευτήρα Κρεμαστών για τα διαφορετικά χρονικά βήματα που εξετάστηκαν, παράγεται η χρονοσειρά πρωτεύουσας και μια δευτερεύουσας ενέργειας σύμφωνα με τις σχέσεις (3.21) και (3.22). Θεωρώντας κάποιες ενδεικτικές τιμές από το εγχώριο χρηματιστήριο ενέργειας για το κέρδος από την πώληση πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας, καθώς και μια ρήτρα ενέργειας σε περίπτωση ελλειμμάτων παραγωγής (Πίνακας 5.5), υπολογίστηκε το μέσο ετήσιο όφελος / κόστος για κάθε ένα από τα βήματα που εξετάστηκαν.

Πίνακας 5.5: Τιμές κόστους ενέργειας

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

Με βάση τις τιμές αυτές και τις ποσότητες πρωτεύουσας (E_{fj}) και δευτερεύουσας (E_{sj}) ενέργειας καθώς και πιθανών ελλειμμάτων ενέργειας, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ισοζυγίου, σε ένα βήμα j υπολογίζονται τα εξής:

- Κέρδος από πώληση πρωτεύουσας ενέργειας (K_{fj}) σε €, σύμφωνα με τη σχέση:

$$K_{fj} = t_f \min(E_{totalj}, E^*) 10^6 \quad (5.2)$$

όπου t_f η τιμή πώλησης της πρωτεύουσας ενέργειας (€/kWh), E_{totalj} η συνολική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα στο βήμα j και E^* ο στόχος ενέργειας του βήματος σε GWh.

- Κέρδος από πώληση δευτερεύουσας ενέργειας (K_{sj}) σε €, σύμφωνα με τη σχέση:

$$K_{sj} = t_s \max(0, E_{totalj} - E^*) 10^6 \quad (5.3)$$

όπου t_s η τιμή πώλησης της δευτερεύουσας ενέργειας (€/kWh), E_{totalj} η συνολική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα στο βήμα j και E^* ο στόχος ενέργειας του βήματος σε GWh.

- Κόστος λόγω ρήτρας (K_{pj}) σε €, σύμφωνα με τη σχέση:

$$K_{pj} = -t_p \max(0, E^* - E_{totalj}) 10^6 \quad (5.4)$$

όπου t_p η τιμή πώλησης της δευτερεύουσας ενέργειας (€/kWh), E_{totalj} η συνολική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα στο βήμα j και E^* ο στόχος ενέργειας του βήματος σε GWh.

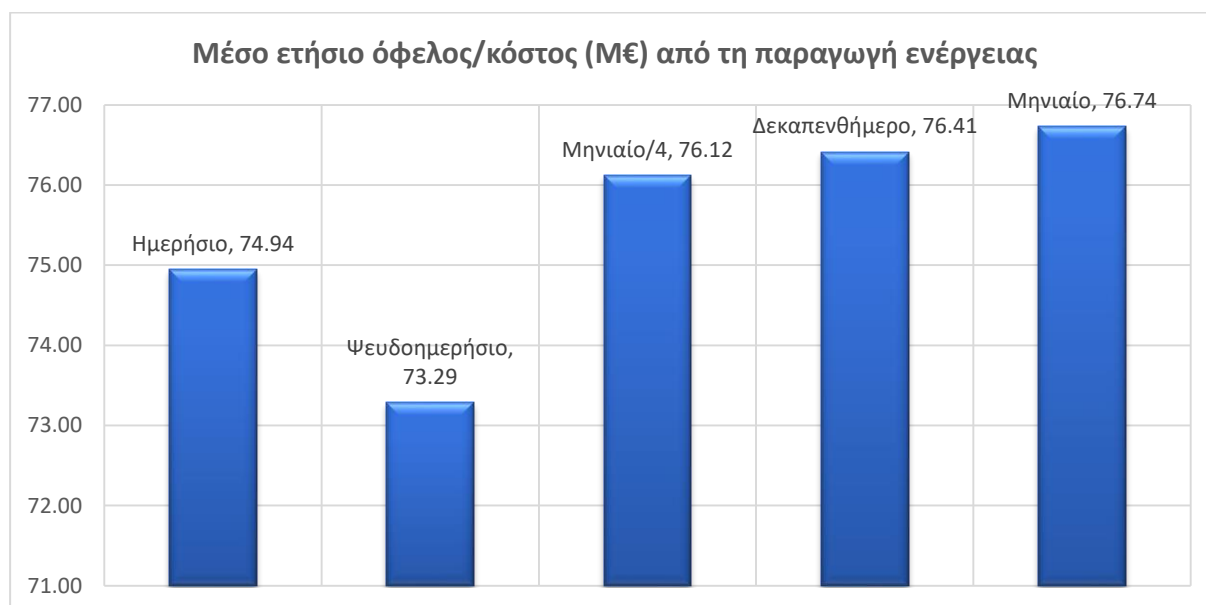
- Το συνολικό όφελος/κόστος (K_{totalj}) του βήματος j , σύμφωνα με τη σχέση:

$$K_{totalj} = K_{fj} + K_{sj} + K_{pj} \quad (5.5)$$

Το μέσο ετήσιο όφελος/κόστος από την παραγωγή ενέργειας για όλα τα χρονικά βήματα προσομοίωσης και για τον αντίστοιχο στόχο ενέργειας, φαίνεται παρακάτω (Πίνακας 5.6 και Εικόνα 5.13):

Πίνακας 5.6: Μέσο ετήσιο όφελος/κόστος από την παραγωγή ενέργειας στον ταμιευτήρα Κρεμαστών σε διαφορετικά βήματα προσομοίωσης

Βήμα	Στόχος ενέργειας (GWh)	Μέσο ετήσιο όφελος/κόστος (Μ€)
Ημερήσιο	1.9	74.94
Ψευδοημερήσιο	1.8	73.29
Μηνιαίο/4	14.5	76.12
Δεκαπενθήμερο	29.1	76.41
Μηνιαίο	58.2	76.74



Εικόνα 5.13: Μέσο ετήσιο όφελος/κόστος από την παραγωγή ενέργειας στον ταμιευτήρα Κρεμαστών σε διαφορετικά βήματα προσομοίωσης

Γενικά, παρατηρείται ότι το μέσο ετήσιο όφελος αυξάνεται, έστω και οριακά, όσο αυξάνεται το χρονικό βήμα. Η μεγαλύτερη τιμή οφέλους εμφανίζεται στο μηνιαίο χρονικό βήμα, όπου εντοπίζεται η μεγαλύτερη παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας, ενώ η ελάχιστη στο ψευδοημερήσιο βήμα, όπου υπάρχει και η μικρότερη παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας.

5.4 Διερεύνηση μεταβλητότητας ζήτησης ενέργειας

Άλλο ένα σημαντικό ζήτημα που εξετάστηκε είναι η επίδραση της ζήτησης ενέργειας στο μέσο ετήσιο όφελος/κόστος. Αρχικά, για διάφορες τιμές σταθερής ζήτησης, υπολογίστηκαν τα μέσα ετήσια οφέλη/κόστη σε ημερήσιο, ψευδοημερήσιο και μηνιαίο βήμα. Στη συνέχεια, για διάφορες τιμές του συντελεστή μεταβλητότητας (10%, 20%, 30% και 50%) και για τις ίδιες μέσες τιμές ζήτησης, υπολογίστηκε το μέσο ετήσιο κόστος όφελος του ημερήσιου, ψευδοημερήσιου και μηνιαίου βήματος.

Ο συντελεστής μεταβλητότητας (coefficient of variation - CV) εκφράζει την ομοιογένεια των τιμών μιας τυχαίας μεταβλητής, X . Αν μ είναι η μέση τιμή της ζήτησης ενέργειας και σ η τυπική απόκλιση, ο συντελεστής μεταβλητότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$CV = \sigma/\mu \quad (5.6)$$

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

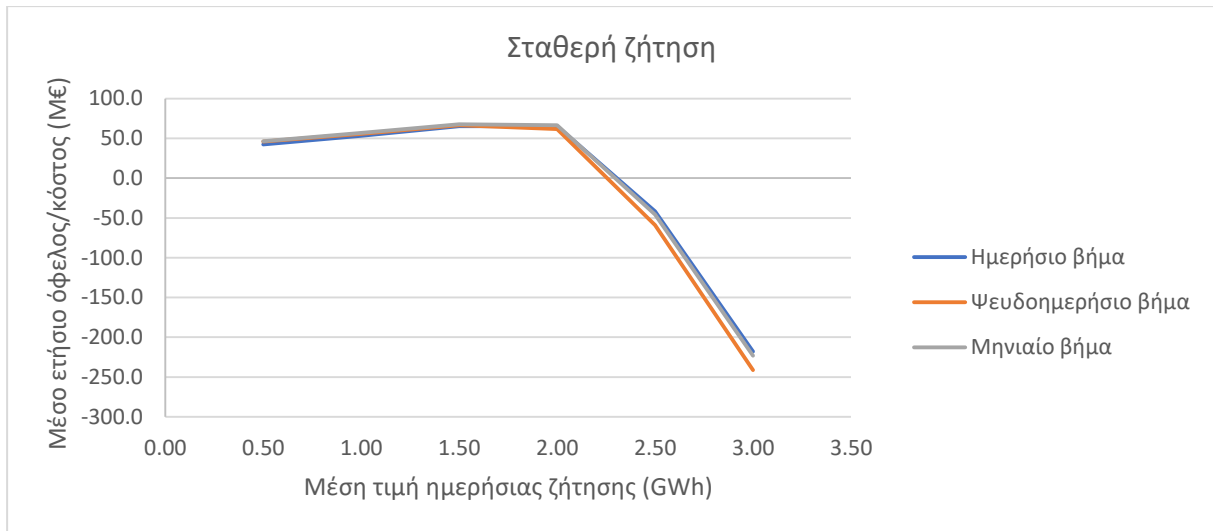
$$E^* = \mu + z \sigma = \mu (1 + z CV) \quad (5.7)$$

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

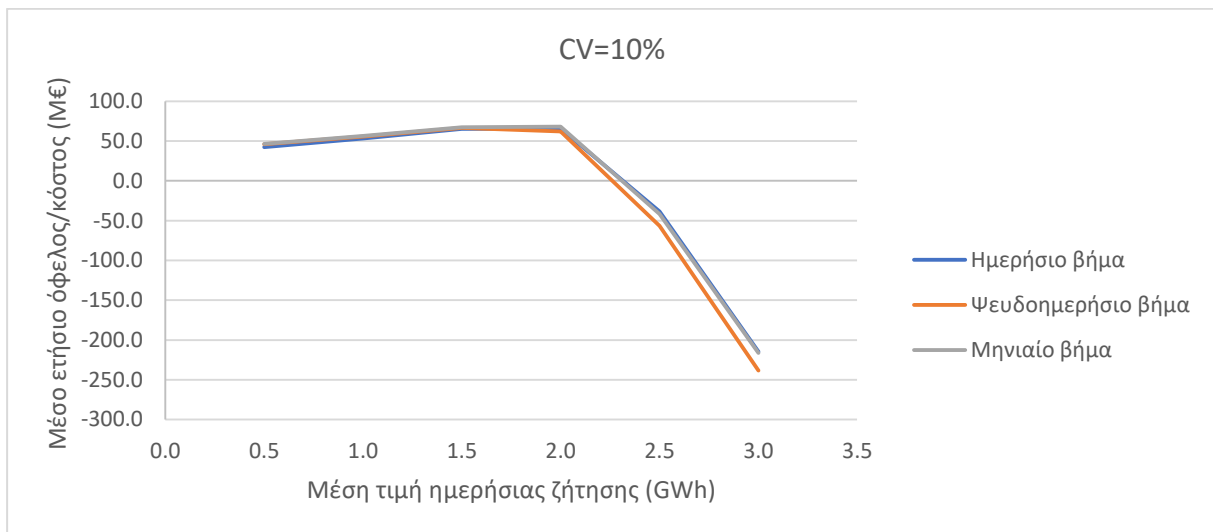
Βάσει των παραπάνω, επιλέχθηκαν να εξεταστούν οι μεταβολές σε ημερήσιο, ψευδοημερήσιο και μηνιαίο βήμα για αρχικά σταθερές μέσες τιμές ζήτησης και στη συνέχεια για μεταβαλλόμενες τιμές βάσει διαφόρων συντελεστών μεταβλητότητας (Εικόνα 5.14 - Εικόνα 5.18). Για κάθε μία από τις τιμές ζήτησης ενέργειας υπολογίστηκε το μέσο ετήσιο όφελος/κόστος. Οι μέσες τιμές ζήτησης που εξετάστηκαν, φαίνονται στη συνέχεια (Πίνακας 5.7):

Πίνακας 5.7: Μέσες τιμές ζήτησης ενέργειας

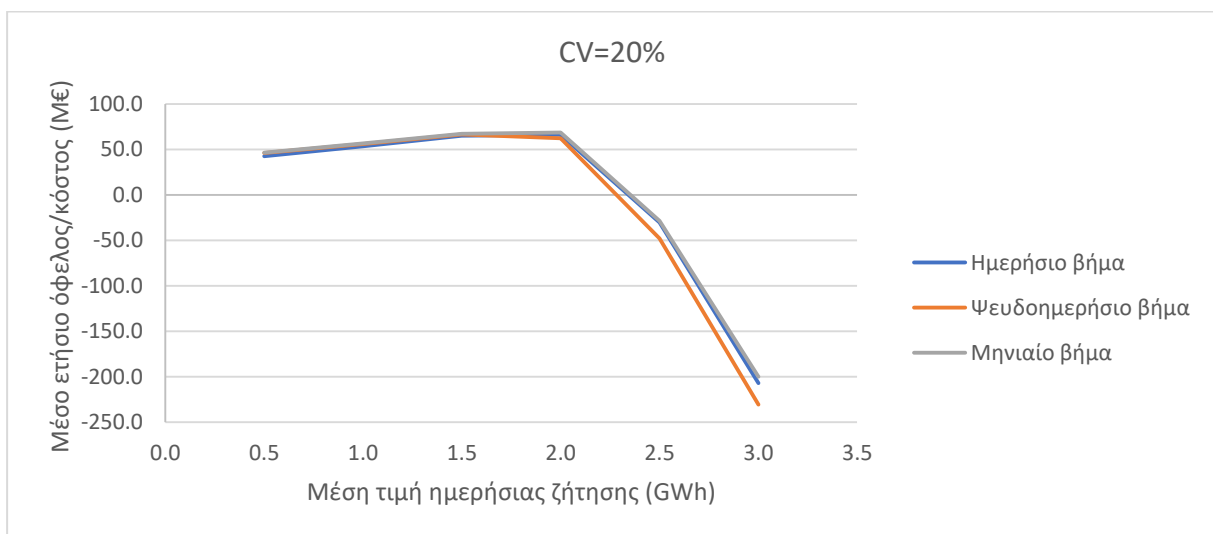
Μέση τιμή ημερήσιας ζήτησης (GWh)	Μέση τιμή μηνιαίας ζήτησης (GWh)
0.5	15.25
1.0	30.50
1.5	45.75
2.0	61.00
2.5	76.25
3.0	91.50



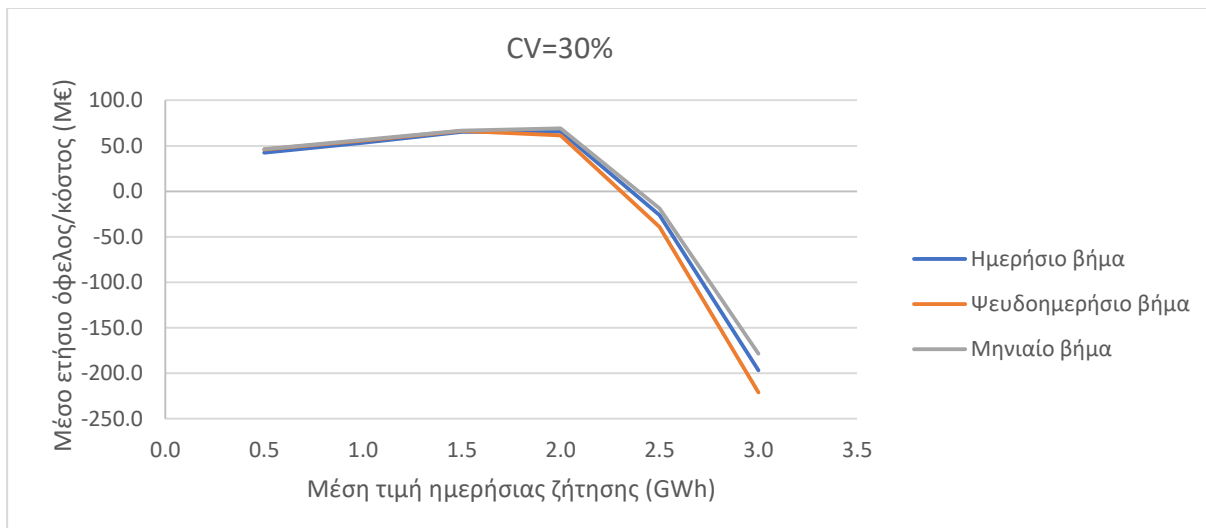
Εικόνα 5.14: Διάγραμμα σταθερής ζήτησης ενέργειας - μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους



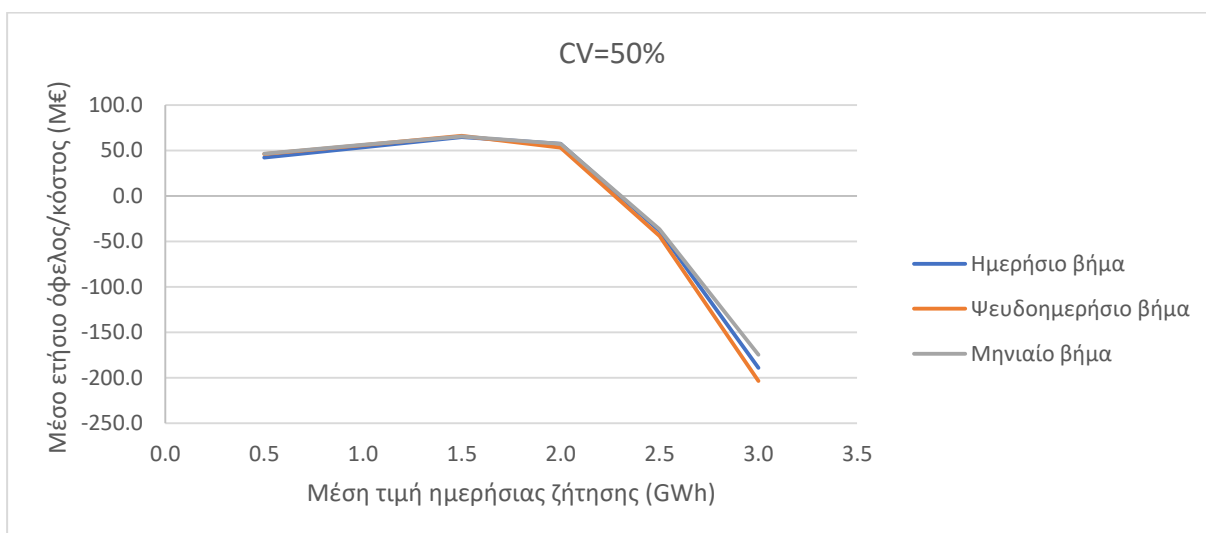
Εικόνα 5.15: Διάγραμμα μεταβαλλόμενης ζήτησης ενέργειας (CV=10%) - μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους



Εικόνα 5.16: Διάγραμμα μεταβαλλόμενης ζήτησης ενέργειας (CV=20%) - μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους



Εικόνα 5.17: Διάγραμμα μεταβαλλόμενης ζήτησης ενέργειας (CV=30%) - μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους



Εικόνα 5.18: Διάγραμμα μεταβαλλόμενης ζήτησης ενέργειας (CV=50%) - μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους

Από τα παραπάνω 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, καθόλη τη διάρκεια προσομοίωσης του ταμιευτήρα Κρεμαστών. Βεβαίως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η επίδραση της μεταβλητότητας στη ζήτηση εξαρτάται τόσο από τη μεταβλητότητα των εισροών όσο και από την κλίμακα του συστήματος που εξετάζεται. Το μεγάλο μέγεθος του ταμιευτήρα των Κρεμαστών, σε συνδυασμό με τη στατιστική δίαιτα της απορροής του Αχελώου, που γενικά ακολουθεί κανονική κατανομή, φαίνεται ότι «απορροφούν» τις μεταβολές της ζήτησης, κάτι που σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να τεκμηριωθεί ως γενικό συμπέρασμα.

5.5 Επίδραση Ανώτατης Στάθμης Λειτουργίας (ΑΣΛ) ταμιευτήρα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης

Ένα τελευταίο σημαντικό υπολογιστικό ζήτημα που εξετάστηκε είναι η επίδραση της Ανώτατης Στάθμης Λειτουργίας του ταμιευτήρα των Κρεμαστών (+282.0 m) στα αποτελέσματα της προσομοίωσης των διαφόρων χρονικών βημάτων, και ειδικότερα στις εκτιμώμενες υπερχειλίσεις, που από τις προηγούμενες αναλύσεις φαίνεται να διαφοροποιούνται συναρτήσει του χρονικού βήματος. Για τον λόγο αυτό, υλοποιήσαμε μια ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου προσομοίωσης, μεταβάλλοντας την ΑΣΛ του ταμιευτήρα κατά ± 0.5 και ± 1.0 m, χωρίς αλλαγή στις τιμές της ζήτησης ενέργειας του αντίστοιχου βήματος. Για κάθε δοκιμή υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές μέσης ετήσιας υπερχείλισης (Πίνακας 5.8) και μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους (Πίνακας 5.9) όλων των βημάτων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε χρονικό βήμα, φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 5.8: Επίδραση αλλαγής ΑΣΛ στη μέση ετήσια υπερχείλιση

Μέση ετήσια υπερχείλιση (hm ³)					
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
Στόχος ενέργειας (GWh):	1.9	1.8	14.5	29.1	58.2

Πίνακας 5.9: Επίδραση αλλαγής ΑΣΛ στο μέσο ετήσιο όφελος/κόστος

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
Στόχος ενέργειας (GWh):	1.9	1.8	14.5	29.1	58.2

Από την παραπάνω ανάλυση ευαισθησίας παρατηρείται ότι, για κάθε χρονικό βήμα, όσο αυξάνεται/μειώνεται η ΑΣΛ του ταμιευτήρα αυξάνεται/μειώνεται η μέση ετήσια υπερχείλιση και το μέσο ετήσιο όφελος/κόστος. Αυτό συμβαίνει διότι π.χ. με την αύξηση της ΑΣΛ, μεγαλώνει το ύψος πτώσης, το οποίο οδηγεί σε μείωση της ζητούμενης ποσότητας για κάλυψη του ενεργειακού στόχου

(σχέση (3.10)) από τον ταμιευτήρα (ο στόχος ενέργειας παραμένει σταθερός). Επομένως, χρησιμοποιείται μικρότερη ποσότητα νερού για κάλυψη του στόχου και παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας και περισσεύει μεγαλύτερη ποσότητα, η οποία τελικά υπερχειλίζει. Όσον αφορά στο κόστος όφελος, αυτή η αύξηση στην ποσότητα του διαθέσιμου νερού οδηγεί σε μείωση των ελλειμμάτων και επομένως σε αύξηση του μέσου ετήσιου οφέλους.

6 Ένταξη μοντέλου διγράφου στην νέα έκδοση του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων Υδρονομίας

Ένας από τους στόχους της παρούσας έρευνας είναι η ένταξη του μοντέλου που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Python και αφορά στη διαχείριση της ενέργειας συστήματος πολλαπλών ταμιευτήρων, ανεξαρτήτου τοπολογίας, στη νέα έκδοση του λογισμικού Υδρονομίας (Υδρονομίας 2020).

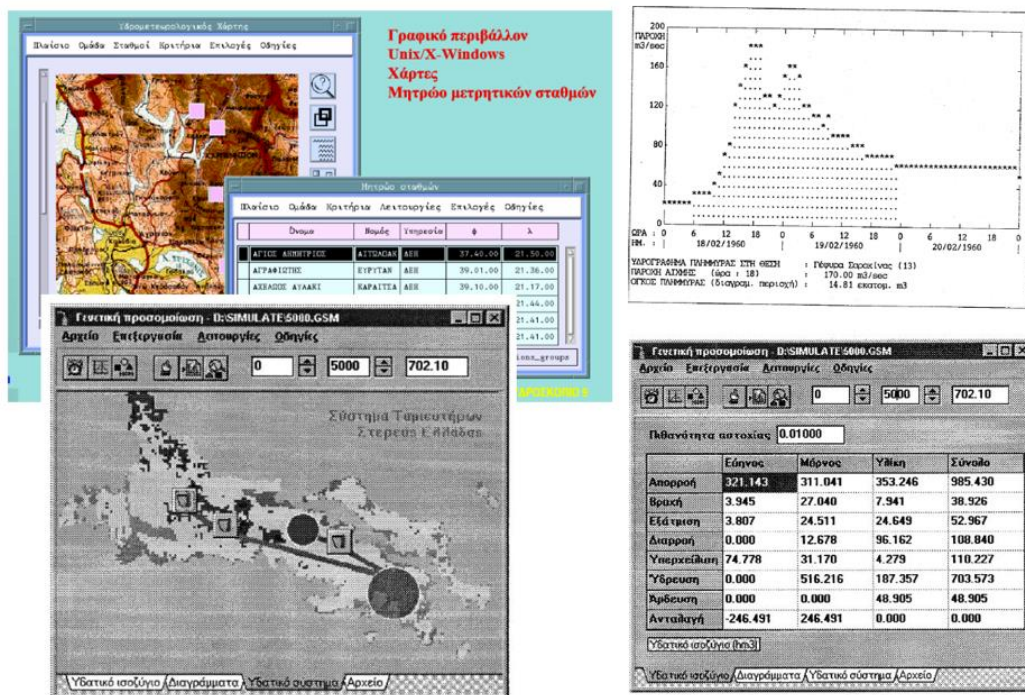
6.1 Ιστορική αναδρομή

Το λογισμικό Υδρονομίας είναι ένα επιχειρησιακό εργαλείο που σχεδιάστηκε με στόχο τη προσομοίωση και βελτιστοποίηση σύνθετων συστημάτων υδατικών πόρων, και αποτελεί προϊόν πολυετούς εμπειρίας του Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ. Η μεθοδολογία αναπτύσσεται ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997; Koutsoyiannis et al., 2002, 2003b; Koutsoyiannis and Economou, 2003; Efstratiadis et al., 2004). Ο Υδρονομίας, στις διάφορες εκδοχές του, έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές διαχείρισης πολύπλοκων συστημάτων υδατικών πόρων, όπως το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας, το υδροσύστημα Αχελώου, το υδροσύστημα Δυτικής Θεσσαλίας, το υδροσύστημα Σμοκόβου, κτλ. Η πλέον εκτενής εφαρμογή ήταν η προσομοίωση του (υποθετικά ενοποιημένου) υδροσυστήματος Αχελώου - Θεσσαλίας, που έγινε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου CRESSENDO (Koukouninos et al., 2015).

Πρωτόλειες εκδοχές του υπολογιστικού συστήματος (Τσακαλίας και Κουτσογιάννης, 1995) αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον DOS/UNIX (Εικόνα 6.1), ενώ από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 και για μια περίοδο δύο δεκαετιών η ανάπτυξη συνεχίστηκε σε περιβάλλον Delphi (Καραβοκυρός κ.ά., 1999, 2004 · Ευστρατιάδης κ.ά., 2007). Η πλέον πρόσφατη εκδοχή του μεθοδολογικού πλαισίου και λογισμικού περιγράφονται από τους Ευστρατιάδη κ.ά. (2015) και Σίσκο κ.ά. (2015), αντίστοιχα. Όπως εξηγείται στη συνέχεια, στην παρούσα φάση γίνεται μια ριζική αναδιαμόρφωση του υπολογιστικού περιβάλλοντος, καθώς και σημαντικές βελτιώσεις στη μεθοδολογία, στο πλαίσιο ερευνητικής συνεργασίας του ΕΜΠ με την ΕΥΔΑΠ.

Οι δυνατότητες του προγράμματος δεν περιορίζονται στην προσομοίωση κάποιου δεδομένου συστήματος, αλλά διευρύνονται σε οποιοδήποτε σύστημα αποτελείται από ποτάμια, ταμιευτήρες, γεωτρήσεις, αντλιοστάσια, σταθμούς παραγωγής ενέργειας, δίκτυα υδραγωγείων, σημεία ζήτησης, κ.λπ. Η δυνατότητα που προσφέρει το πρόγραμμα σχετικά με τη χρήση πραγματικών ή υποθετικών σεναρίων διαχείρισης οδηγεί σε καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων και των επιπτώσεων κάθε επιλογής. Επιπλέον, η δυνατότητα απλοποίησης ορισμένων χαρακτηριστικών του συστήματος διευκολύνει σημαντικά τη μελέτη του. Πέραν των άλλων, δίνεται η επιλογή της δημιουργίας πολλαπλών στόχων (ανταγωνιστικών και μη), δίνοντας σε αυτούς σειρά προτεραιότητας ανάλογα με

τις ανάγκες του σεναρίου. Το σύστημα βελτιστοποίησης στοχεύει στην εύρεση του αποδοτικότερου τρόπου διαχείρισης, προσομοιώνοντας το σύστημα πολλές φορές με διαφορετικούς κανόνες λειτουργίας. Κατά τη διαδικασία προσομοίωσης, η λειτουργία του συστήματος εκφράζεται παραμετρικά μέσω των κανόνων αυτών, έχοντας ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση του υπολογιστικού φόρτου. Με βάση τα αποτελέσματα, επιλέγεται ο βέλτιστος κανόνας διαχείρισης, βάσει ορισμένων κριτηρίων όπως για παράδειγμα μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος, μεγιστοποίηση της τιμής κάποιου στόχου ή μεγιστοποίηση της συνολικής παραγόμενης υδροηλεκτρικής ενέργειας κ.ά.



Εικόνα 6.1: Πρωτόλειες εκδόσεις του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, που αργότερα εξελίχθηκαν στο λογισμικό Υδρονομέας.

6.2 Υδρονομέας 2020

Η εξέλιξη του λογισμικού Υδρονομέας συνεχίζεται μέχρι και σήμερα με τη νέα έκδοσή του, που αναπτύσσεται σε περιβάλλον Python και ενσωματώνει σημαντικές καινοτομίες (Karavokiros et al., 2020). Ενδεικτικά αναφέρονται οι εξής:

- Αποδοχή αυθαίρετης κλίμακας προσομοίωσης, δηλαδή η νέα έκδοση θα δέχεται δεδομένα εισόδου οποιουδήποτε χρονικού βήματος π.χ. μηνιαία, ημερήσια ή υψηλότερης χρονικής ανάλυσης και θα τα επεξεργάζεται. Τέτοιες αναλύσεις, που σχετίζονται με τη χρονική διακριτότητα της προσομοίωσης παρατίθενται στο Κεφάλαιο 5 της παρούσας εργασίας.

- Πιθανοτική περιγραφή των χρήσεων νερού, με ενσωμάτωση χρονοσειρών ζήτησης που παράγονται από στοχαστικά μοντέλα, ώστε τόσο η προσφορά όσο και η ζήτηση νερού να αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές.
- Διατύπωση νέων κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων που θα είναι πιο φιλικό στον τελικό χρήστη και τον διαχειριστή του συστήματος, και θα λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς της τοπολογίας (διασύνδεση κόμβων ζήτησης με κόμβους προσφοράς), την ιεράρχηση των πηγών που συνδέονται με κάθε χρήση, αλλά και τη δυνατότητα διανομής των ελλειμμάτων νερού σε μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα.
- Βελτιστοποίηση της κατανομής των ρών νερού και ενέργειας εντός κάθε χρονικού βήματος προσομοίωσης, για δεδομένους στόχους και περιορισμούς.

Στην τελευταία καινοτομία εντάσσεται το μοντέλο που δημιουργείται σε περιβάλλον Python (Εικόνα 6.2) και περιγράφεται στην παρούσα εργασία (υποκεφάλαιο 3.4). Ο νέος αλγόριθμος έχει ήδη ενσωματωθεί σε μορφή πρωτοτύπου (prototype) στον υπό διαμόρφωση κώδικα της νέας έκδοσης του Υδρονομέα και χρησιμοποιήθηκε σε δύο εφαρμογές (case studies). Η μία αφορά σε σύστημα δύο ταμιευτήρων παράλληλης τοπολογίας, του Πλαστήρα και του Σμοκόβου, ενώ η δεύτερη σε σύστημα τριών ταμιευτήρων σε σειρά, των Κρεμαστών, του Καστρακίου και του Στρατού (με σειρά από ανάντη προς κατόντη). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το νέο μοντέλο συγκρίνονται με αυτά από τη προηγούμενη έκδοση του Υδρονομέα.

```

1  -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Sun Apr 12 17:13:37 2020
4
5  @author: stavroula
6  """
7
8  import numpy as np
9  import scipy as sp
10 import gurobipy
11
12
13 def strovilo(p, Estar, psi1, psi2, psi3, Smax1, Smax2, Smax3, H1, H2, H3, S1, S2, S3, DeadVolume1,
14
15 e1star=[0]*Estar #Gwh #stoxoi pou baze
16 e2star=[1]*Estar
17 e3star=[2]*Estar
18
19 e1max=psi1*min(S1-DeadVolume1, q1)*(H1/100) #Gwh #ti mporei na paraxthei apo kathe strovilo #
20 e2max=psi2*min(S2-DeadVolume2, q2)*(H2/100)
21 e3max=psi3*min(S3-DeadVolume3, q3)*(H3/100)
22
23 e1d=max((psi1*min(S1-Smax1, q1)*(H1/100)),0) #deutereousa energela
24 e2d=max((psi2*min(S2-Smax2, q2)*(H2/100)),0)
25 e3d=max((psi3*min(S3-Smax3, q3)*(H3/100)),0)
26
27 e1star_extra=max(e1star-e1d,0) # edu to susto E* einai meiw th DE
28 e2star_extra=max(e2star-e2d,0)
29 e3star_extra=max(e3star-e3d,0)
30
31 e1c=min(e1max, e1star) #Gwh #ti meros tou stoxou mporei na kalypsei o kathenas
32 e2c=min(e2max, e2star)
33 e3c=min(e3max, e3star)
34
35 e1nc=e1star-e1c #Gwh #ti meros tou stoxou den mporei na kalypsei o kathenas
36 e2nc=e2star-e2c
37 e3nc=e3star-e3c
38
39 e1res=max(e1max-e1star_extra-e1d,0) #Gwh #ti tou menoi pou mporei na dusei
40 e2res=max(e2max-e2star_extra-e2d,0)
41 e3res=max(e3max-e3star_extra-e3d,0)

```

Εικόνα 6.2: Περιβάλλον ανάπτυξης μοντέλου διγράφου σε γλώσσα Python.

7 Εφαρμογές μοντέλου προσομοίωσης σε συστήματα υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, οι εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου, που προσομοιώνουν τη λειτουργία ενός υδροενεργειακού ταμιευτήρα, σε συνδυασμό με το μοντέλο διγράφου που υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Python (υποκεφάλαιο 3.4), αποτελούν τα δομικά στοιχεία του νέου σχήματος προσομοίωσης - βελτιστοποίησης υδροενεργειακών ταμιευτήρων, είτε αυτοί λειτουργούν παράλληλα είτε σε σειρά. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εφαρμογή του μοντέλου αυτού σε δύο πραγματικά υδροσυστήματα του ελληνικού χώρου. Το πρώτο αναφέρεται ως *υδροσύστημα Πλαστήρα - Σμοκόβου* και περιλαμβάνει δύο παράλληλους ταμιευτήρες, η προσομοίωση των οποίων γίνεται με μηνιαία δεδομένα εισροών. Το δεύτερο αναφέρεται ως *υδροσύστημα Αχελώου*, και περιλαμβάνει τους τρεις εν λειτουργία ταμιευτήρες της ΔΕΗ (Κρεμαστά, Καστράκι, Στράτος) που βρίσκονται σε σειρά. Στο υπόψη σύστημα, η ανάλυση γίνεται με χρήση και μηνιαίων αλλά και ψευδοημερήσιων δεδομένων εισροών, ώστε να υπάρξει η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων βάσει του χρονικού βήματος προσομοίωσης. Ο κύριος στόχος του μοντέλου είναι η βέλτιστη διαχείριση της υδροενεργειακής ζήτησης και για το λόγο αυτό, κατά την προσομοίωση των δύο υδροσυστημάτων, γίνονται ορισμένες απλοποιήσεις και παραδοχές προκειμένου η ανάλυσή να επικεντρώνεται στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Μια από τις μείζονες παραδοχές κατά την προσομοίωση των συστημάτων είναι ότι για τους ταμιευτήρες που εξετάστηκαν, πέραν της χρήσης του νερού για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, δεν εξετάζονται άλλες χρήσεις (π.χ. ύδρευση, άρδευση κ.λπ.).

7.1 Προσομοίωση υδροσυστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου

Το υπόψη υδροσύστημα βρίσκεται στη Δυτική Θεσσαλία (Π.Ε. Καρδίτσας), και αποτελείται από δύο παράλληλης τοπολογίας ταμιευτήρες, του Πλαστήρα και του Σμοκόβου.

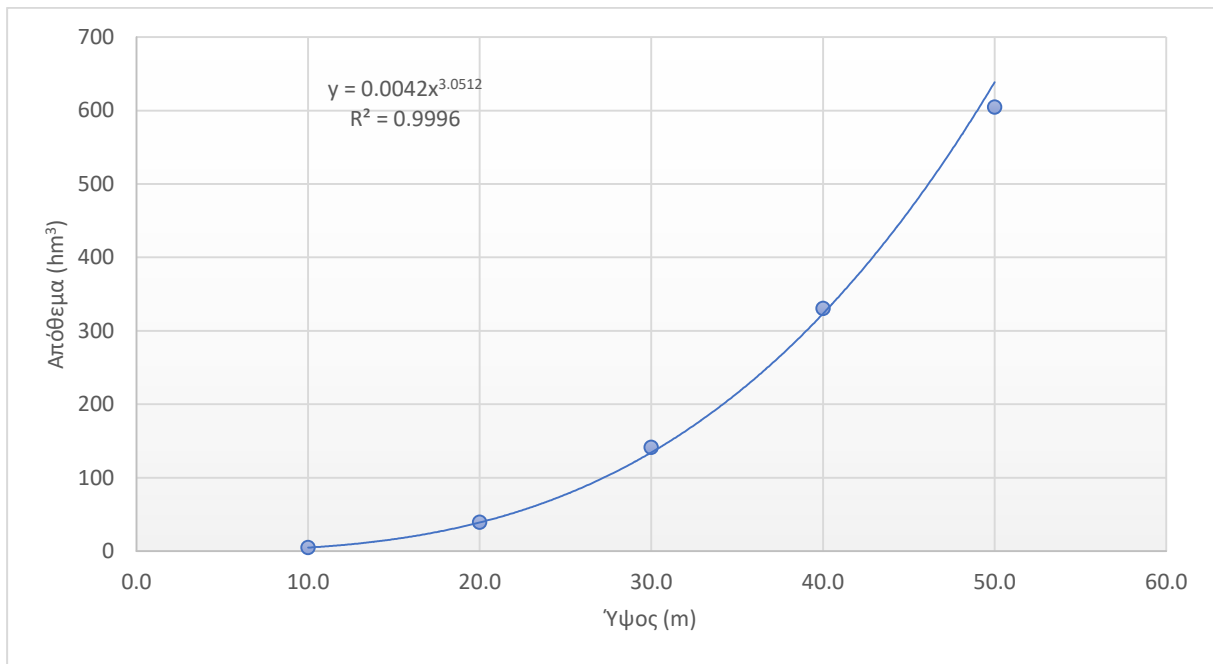
Με την κατασκευή του φράγματος Πλαστήρα, έλαβε χώρα η πρώτη εκτροπή νερού από τον Αχελώο προς την Θεσσαλία, καθώς εξέτρεψε ολόκληρο τον άνω ρου του παραπόταμού του Μέγδοβα ή Ταυρωπού στη λεκάνη απορροής του Πηνειού (Christofides et al., 2005). Η λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα είναι 161.3 km² και εκτείνεται στον ορεινό όγκο των Αγράφων, ενώ το φράγμα είναι κατασκευασμένο κοντά στο χωριό Καστανιά. Ο μικτός όγκος νερού (ωφέλιμος και νεκρός) στην ΑΣΛ του, η οποία βρίσκεται στα +792 m, είναι 373 hm³, ενώ νεκρός όγκος για στάθμη υδροληψίας τα +776 m είναι 85 hm³. Ο ΥΗΣ βρίσκεται στους πρόποδες της Πίνδου δημιουργώντας ένα μέγιστο ύψος πτώσης 577 m, ένα από τα μεγαλύτερα στην Ελλάδα. Η σήραγγα προσαγωγής έχει μήκος 2625 m και παροχετευτικότητα 54.6 hm³/μήνα (ΔΕΗ/ΔΑΥΕ, 1997).

Ο ταμιευτήρας Σμοκόβου βρίσκεται στο νομό Καρδίτσας, στη συμβολή των ρεμάτων Ρεντινιώτικου και Ονόχωνου που σχηματίζουν τον ποταμό Σοφαδίτη και η έκταση της λεκάνης απορροής του, που καλύπτει και ένα μέρος του νομού Φθιώτιδας, είναι 376.5 km² (Ευστρατιάδης κ.ά., 2008). Η στέψη του φράγματος βρίσκεται στη στάθμη +382 m, ενώ η στάθμη της στέψης του υπερχειλιστή στο +375 m, και η στάθμη υδροληψίας στο +330 m. Η συνολική χωρητικότητα του ταμιευτήρα ανέρχεται σε 237.6 hm³, με ωφέλιμο όγκο 209.2 hm³ και νεκρό όγκο 27.1 hm³. Από την υδροληψία, μέσω της σήραγγας Λεονταρίου, το νερό κατευθύνεται στο ΥΗΣ Λεονταρίου, εγκατεστημένης ισχύος 10 MW. Το μήκος της σήραγγας είναι 4120 m και η παροχευετικότητα της ως 25 hm³ (Νικολόπουλος, 2015).

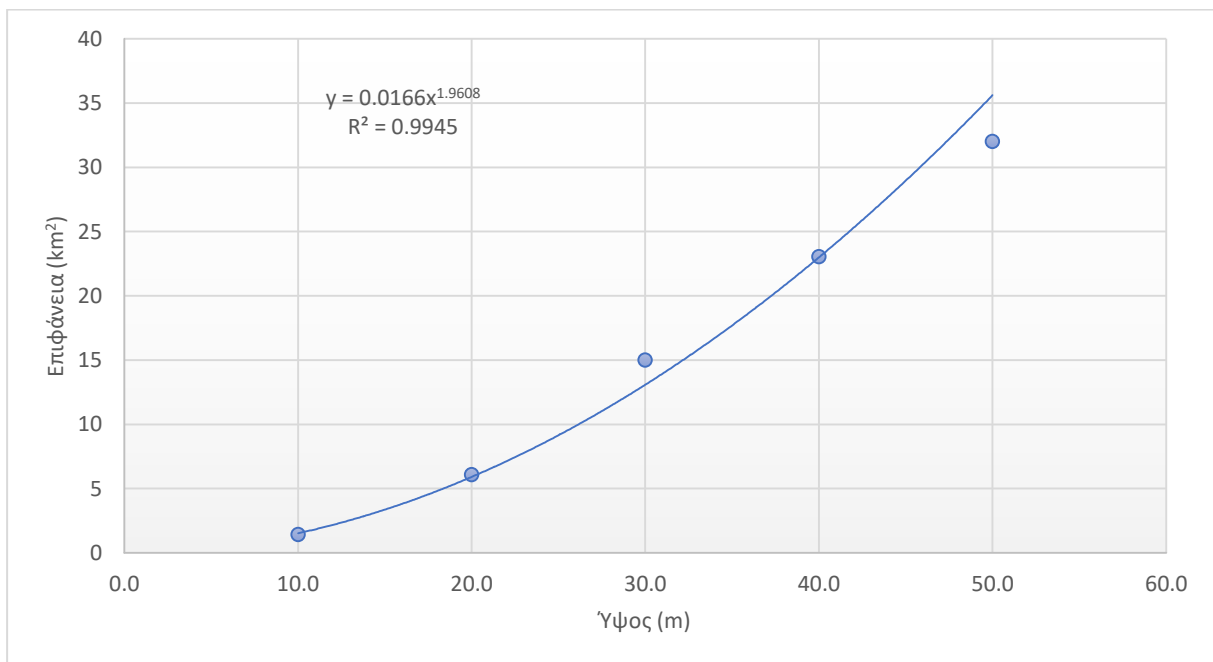
Τα μηνιαία δεδομένα εισροών που χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο παράδειγμα καλύπτουν έναν χρονικό ορίζοντα 39 ετών (Κουκουίνος et al., 2015). Έχοντας γνωστά τα μεγέθη που αφορούν στους ταμιευτήρες όπως π.χ. Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ), Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΚΣΛ), στάθμη πυθμένα, νεκρό όγκο, ωφέλιμη χωρητικότητα κτλ. (Πίνακας 7.1) και με τη βοήθεια απλοποιημένων σχέσεων που προκύπτουν από διαγράμματα που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε ταμιευτήρα (Εικόνα 7.1 - Εικόνα 7.4) έγινε προσομοίωση της λειτουργίας τους σε μηνιαίο χρονικό βήμα.

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων Πλαστήρα και Σμοκόβου

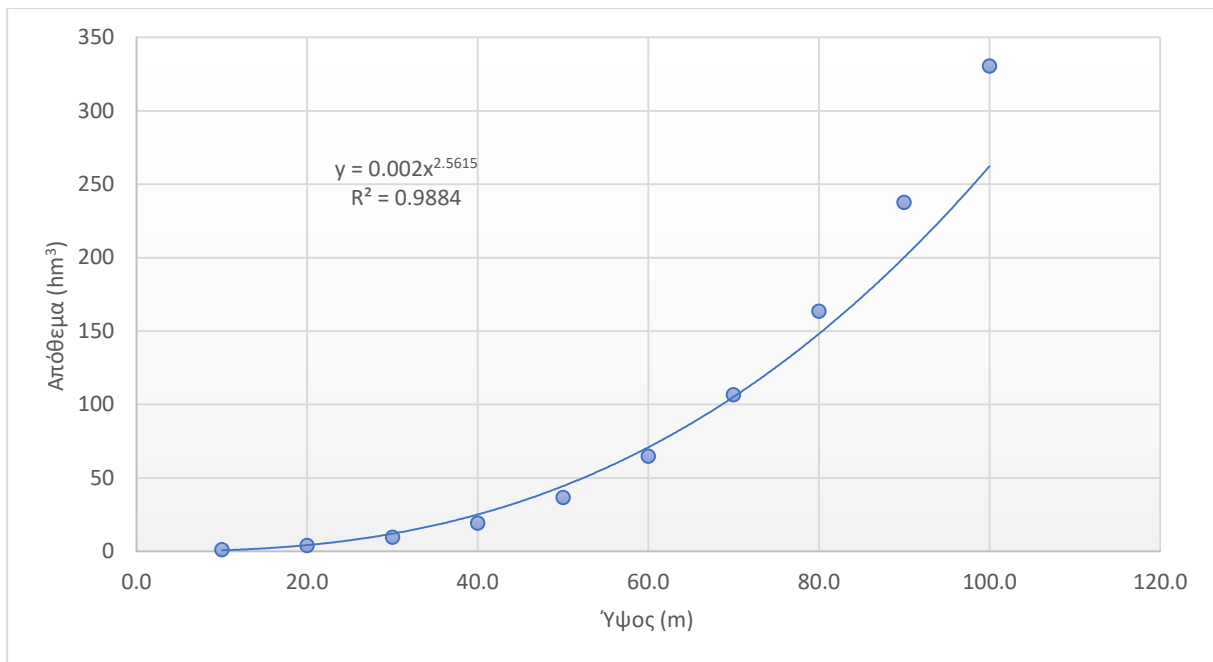
	Πλαστήρας	Σμόκοβο
Λεκάνη απορροής (km ²)	161.3	376.5
Κατώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	776.0	330.0
Ανώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	792.0	375.0
Στάθμη πυθμένα (m)	750.0	285.0
Παράμετρος κ	0.0042	0.002
Παράμετρος λ	3.0512	2.5615
Νεκρός όγκος (hm ³)	87.2	34.3
Ωφέλιμη χωρητικότητα (hm ³)	289.6	168.4
Παράμετρος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



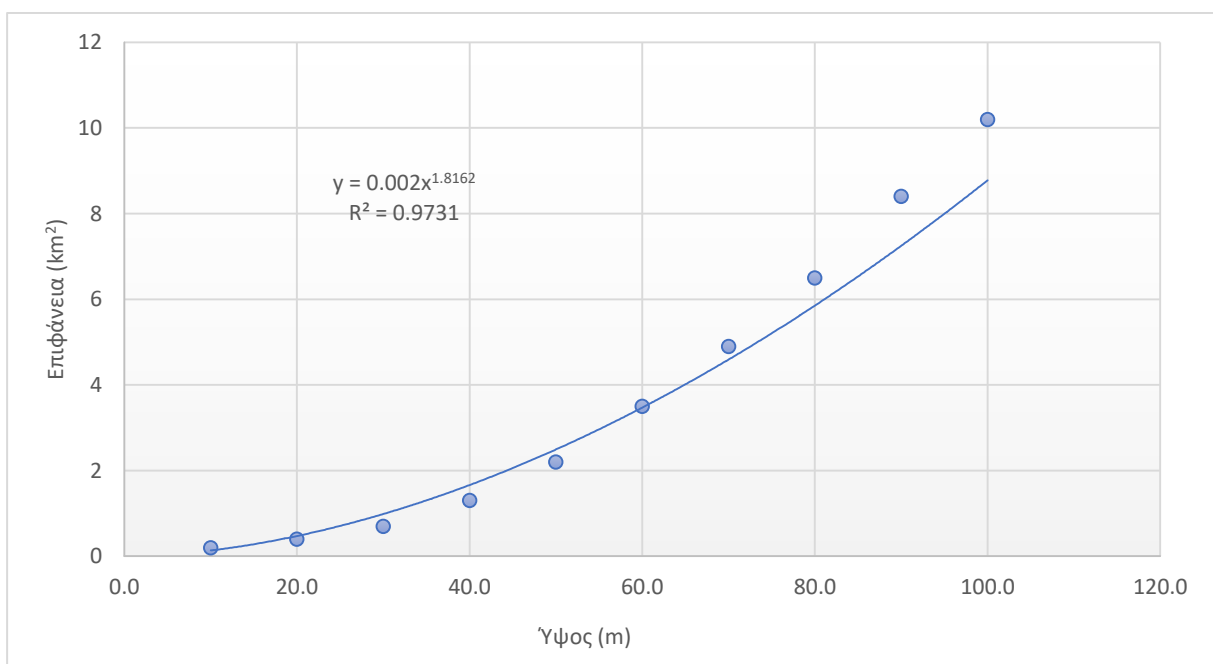
Εικόνα 7.1: Διάγραμμα ύψους - αποθέματος ταμιευτήρα Πλαστήρα



Εικόνα 7.2: Διάγραμμα ύψους - επιφάνειας ταμιευτήρα Πλαστήρα



Εικόνα 7.3: Διάγραμμα ύψους - αποθέματος ταμιευτήρα Σμοκόβου



Εικόνα 7.4: Διάγραμμα ύψους - επιφάνειας ταμιευτήρα Σμοκόβου

Βάσει των δεδομένων αυτών, έγινε η προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου των δύο ταμιευτήρων. Για κάθε βήμα της προσομοίωσης, στο αρχικό απόθεμα του ταμιευτήρα προστίθενται οι εισροές του βήματος αυτού και εν συνεχεία υπολογίζεται η στάθμη, το ύψος πτώσης και η παροχετευτικότητα του αγωγού φυγής (στο παράδειγμα αυτό είναι σταθερή). Στη συνέχεια, τα στοιχεία αυτά, σε συνδυασμό με ορισμένα χαρακτηριστικά κάθε ταμιευτήρα, εισάγονται στο μοντέλο διγράφου, που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.5 και αφορά στην περίπτωση δύο παράλληλων ταμιευτήρων, απ'

όπου τελικά υπολογίζονται οι ποσότητες της ενεργειακής ζήτησης του συστήματος που δύναται να καλύψει κάθε ταμειυτήρας. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο παράδειγμα που εξετάζεται, δεν τίθενται στόχοι διατήρησης περιβαλλοντικής ροής σε κανέναν από τους δύο ταμειυτήρες (στον Πλαστήρα δεν υπάρχει τέτοια δυνατότητα, στο Σμόκοβο υπάρχει αλλά εδώ τίθεται μηδενική). Στη συνέχεια, αφού πραγματοποιηθούν οι δύο εκροές που προαναφέρθηκαν, εξετάζεται το ενδεχόμενο υπερχειλίσεων στο συγκεκριμένο βήμα και υπολογίζεται το νέο απόθεμα αφαιρώντας, επιπλέον των εκροών, και τις υπερχειλίσεις. Έτσι διαμορφώνεται το τελικό απόθεμα κάθε βήματος, που αποτελεί αρχικό απόθεμα για το επόμενο βήμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα βήματα του εξεταζόμενου χρονικού ορίζοντα.

Σε πρώτο στάδιο, γίνεται βελτιστοποίηση του μοντέλου που προαναφέρθηκε με τη χρήση ενός εξελικτικού αλγόριθμου, με την ονομασία differential evolution algorithm (Storn and Price, 1997), που περιλαμβάνεται στο υπολογιστικό πακέτο *scipy*. Ως στοχική συνάρτηση τίθεται η μεγιστοποίηση της πρωτεύουσας ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα. Οι μεταβλητές ελέγχου αφορούν στα ποσοστά κάλυψης του συνολικού στόχου ενέργειας E^* από τους δύο ταμειυτήρες, καθώς και ο ίδιος ο στόχος. Τίθεται επίσης ο περιορισμός τα δύο ποσοστά κάλυψης να αθροίζουν στη μονάδα, δηλαδή $p_1 + p_2 = 1$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση είναι τα εξής:

Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Μέγιστη παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια (GWh)	22.70
Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμειυτήρα Πλαστήρα, p_1 (%)	95
Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμειυτήρα Σμοκόβου, p_2 (%)	5
Στόχος παραγόμενης ενέργειας E^* (GWh)	22.70

Από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης (Πίνακας 7.2) προκύπτει ότι η βέλτιστη λύση είναι εκείνη για την οποία το μεγαλύτερο μέρος (95%) του συνολικού στόχου ενέργειας E^* τίθεται ως στόχος παραγωγής από τον ταμειυτήρα Πλαστήρα, ενώ ένα πολύ μικρότερο ποσοστό (5% του συνολικού) ζητείται να καλυφθεί από τον ταμειυτήρα Σμοκόβου. Η μεγιστοποιημένη παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας του συστήματος προκύπτει ίση με 22.70 GWh/μήνα, δηλαδή όσο και ο αντίστοιχος στόχος, που σημαίνει πως τουλάχιστον στο 99% του χρόνου το σύστημα καλύπτει το στόχο ενέργειας. Σε επόμενο στάδιο, οι τιμές των μεταβλητών ελέγχου που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση, εφαρμόζονται στο μοντέλο προσομοίωσης, απ' όπου προσδιορίζονται οι αστοχίες του συστήματος, τα αποθέματα και η συνολική υπερχειλίση στο τέλος του χρονικού ορίζοντα μελέτης καθώς και η συνολική ενέργεια που παράγεται τελικά από αυτό. Βάσει των αποτελεσμάτων, ακολουθεί ο υπολογισμός του μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους του συστήματος.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι από τους δύο ταμιευτήρες δεν παρατηρούνται σημαντικές υπερχειλίσσεις. Πιο συγκεκριμένα, ο ταμιευτήρας Σμοκόβου δεν έχει καθόλου υπερχειλίση καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ ο ταμιευτήρας του Πλαστήρα έχει μια μικρή μέση ετήσια υπερχειλίση της τάξης των 0.05 hm³ (Πίνακας 7.3). Επιπλέον, από τη καμπύλη διάρκειας - παραγωγής ενέργειας, προκύπτει ότι η πρωτεύουσα ενέργεια τουλάχιστον στο 99% του χρόνου ικανοποιεί τον αντίστοιχο στόχο ενώ το έλλειμμα ενέργειας που παρατηρείται είναι μικρό. Επιπλέον, υπάρχει παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας (ενέργεια πέραν του στόχου) από το σύστημα (Εικόνα 7.5). Οι αστοχίες που παρατηρούνται στο σύνολο των μηνιαίων βημάτων προσομοίωσης (39 έτη × 12 μήνες = 468 βήματα προσομοίωσης) είναι μόλις 3. Επομένως το ποσοστό αστοχιών είναι $\frac{3}{468} \times 100\% = 0.64\%$ και κατ' επέκταση η αξιοπιστία του συστήματος προκύπτει $100\% - 0.64\% = 99.36\%$. Τέλος, σύμφωνα με τα βήματα υπολογισμού του μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους (εδάφιο 5.3.4), υπολογίζεται το μέσο ετήσιο όφελος από το σύστημα των δύο ταμιευτήρων, ίσο με 26.7 Μ€ (Πίνακας 7.4).

Πίνακας 7.3: Μέση ετήσια υπερχειλίση ταμιευτήρων Πλαστήρα και Σμοκόβου

Ταμιευτήρας	Μέση ετήσια υπερχειλίση (hm ³)
Πλαστήρας	0.05
Σμόκοβο	0.00



Εικόνα 7.5: Διάγραμμα διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας συστήματος παράλληλων ταμιευτήρων Πλαστήρα και Σμοκόβου

Πίνακας 7.4: Αποτελέσματα μηνιαίας προσομοίωσης συστήματος παράλληλων ταμιευτήρων Πλαστήρα - Σμοκόβου

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Σύνολο αστοχιών	3
Μέσο ετήσιο όφελος/κόστος συστήματος (Μ€)	26.7

7.2 Προσομοίωση υδροσυστήματος υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων Αχελώου (Κρεμαστά - Καστράκι - Στράτος)

Τα τρία φράγματα που εξετάζονται σε αυτή τη μελέτη περίπτωσης, ανήκουν στον μέσο ρου του Αχελώου και βρίσκονται σε σειρά είναι: τα Κρεμαστά, το Καστράκι και ο Στράτος (με σειρά από ανάντη προς κατόντη).

Το φράγμα των Κρεμαστών έχει ύψος 160.3 m και όγκο 8.13 hm³. Η στέψη του φράγματος βρίσκεται στη στάθμη +287 m. Η Ανώτατη και Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας του ταμιευτήρα (ΑΣΛ και ΚΣΛ αντίστοιχα) βρίσκονται στα +282 m και +227 m αντίστοιχα. Η συνολική χωρητικότητά του είναι 4500 hm³ (δεν περιλαμβάνεται η λεκάνη ανάντη του φράγματος Πλαστήρα) και η ωφέλιμη περίπου 3500 hm³. Η συνολική έκταση της ανάντη λεκάνης απορροής είναι 3570 km². Ο ΥΗΣ Κρεμαστών είναι ημιυπαίθριος σταθμός παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας με ακαθάριστο ύψος πτώσης 136 m και μέγιστη παροχетеυτικότητα της σήραγγας προσαγωγής περίπου 135 m³/s.

Το επόμενο στη σειρά φράγμα είναι του Καστρακίου με ύψος 95.7 m και όγκο 5.22 hm³. Η στέψη του φράγματος βρίσκεται στη στάθμη +154 m. Η Ανώτατη και Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ και ΚΣΛ αντίστοιχα) βρισκόταν αρχικά στα +144.2 m και +142 m αντίστοιχα, διαμορφώνοντας ταμιευτήρα συνολικού όγκου 800 hm³ και ωφέλιμου όγκου 50 hm³ περίπου. Για περαιτέρω εκμετάλλευση του διαθέσιμου ύψους του ταμιευτήρα από τη ΔΕΗ, πριν λίγα χρόνια τοποθετήθηκαν ανατρεπόμενα θυροφράγματα, με τα οποία η ΑΣΛ ανέβηκε στα +146 m. Η έκταση της ενδιάμεσης λεκάνης απορροής μεταξύ Κρεμαστών και Καστρακίου είναι 548 km². Στο έργο λειτουργεί ημιυπαίθριος σταθμός παραγωγής ενέργειας με ακαθάριστο ύψος πτώσης 75.7 m και μέγιστη παροχетеυτικότητα της σήραγγας προσαγωγής 201 m³/s.

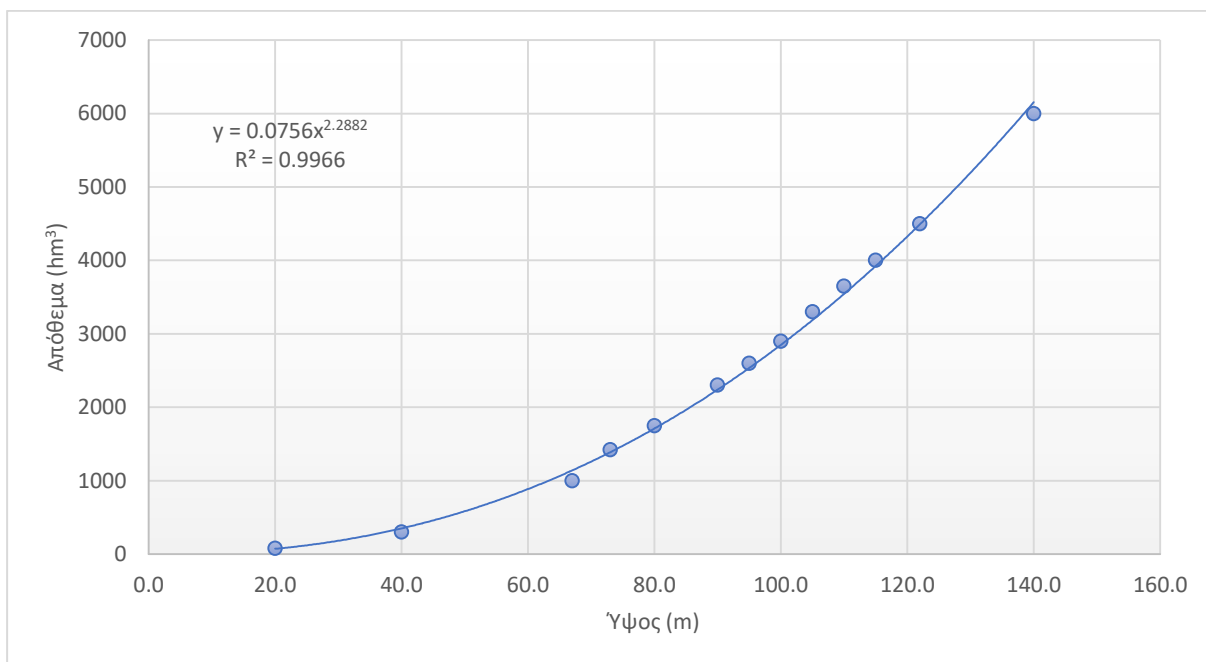
Το τρίτο έργο στη σειρά μετά το Καστράκι, είναι το φράγμα του Στράτου με ύψος 23 m και όγκο 2.80 hm³. Η στέψη του φράγματος βρίσκεται στη στάθμη +173 m. Η Ανώτατη και Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ και ΚΣΛ αντίστοιχα) βρίσκονται στα +68.6 m και +67 m αντίστοιχα. Κατά αυτόν τον τρόπο διαμορφώνεται ταμιευτήρας συνολικού όγκου 70 hm³ και ωφέλιμου 10 hm³ περίπου. Η έκταση της ενδιάμεσης λεκάνης απορροής μεταξύ Καστρακίου και Στράτου είναι 202 km². Στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος υπάρχει υπόγειος σταθμός παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας (Στράτος Ι) με 2 μονάδες Francis συνολικής ισχύος 156 MW διαθέτοντας ακαθάριστο ύψος πτώσης

36.6 m και στο αριστερό αντέρεισμα ένας υπαίθριος μικρότερος (Στράτος II), λόγω του συστήματος προσαγωγής για τις απολήψεις της αρδευτικής περιόδου, με 2 μονάδες τύπου S ισχύος 16 MW και ύψος πτώσης 16.8 m (Νικολόπουλος, 2015).

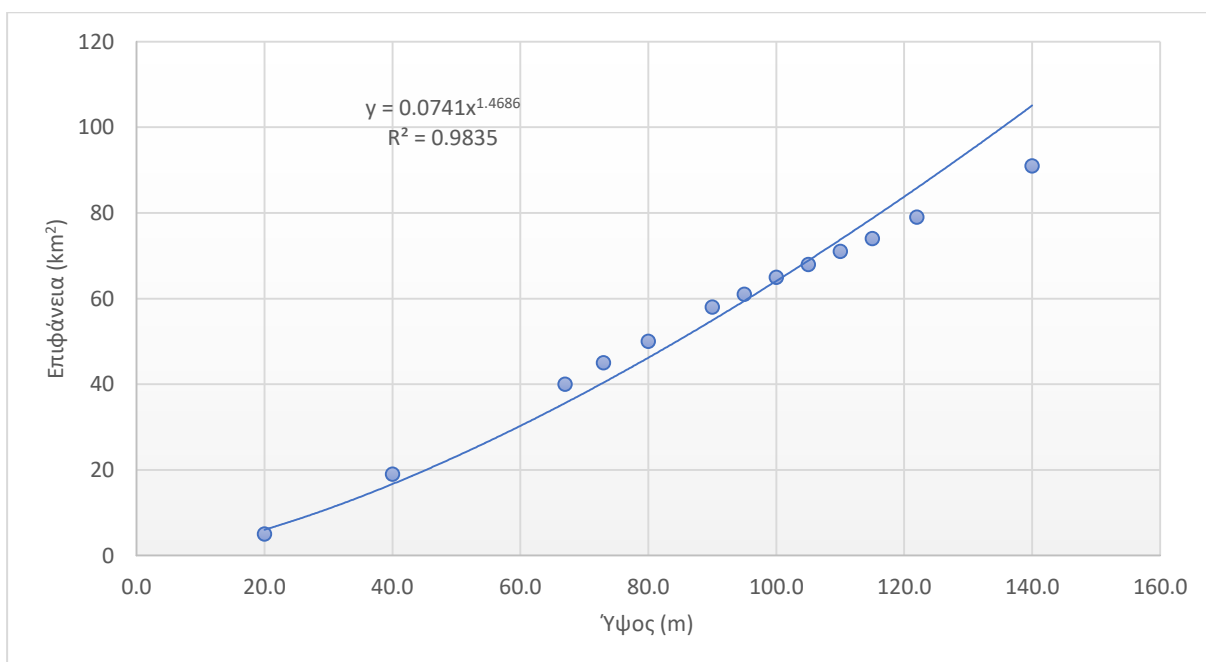
Τα δεδομένα εισροών που χρησιμοποιήθηκαν στο παράδειγμα των τριών ταμιευτήρων αφορούν σε μηνιαίες χρονοσειρές που καλύπτουν ένα χρονικό ορίζοντα 41 ετών (Ιανουάριος 1967 - Δεκέμβριος 2007). Η ψευδοημερήσια προσομοίωση έγινε για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1966 - Δεκέμβριος 2008, για το οποίο διατίθενται δεδομένα στη χρονική αυτή κλίμακα. Έχοντας γνωστά τα μεγέθη που αφορούν στους ταμιευτήρες όπως π.χ. Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ), Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΚΣΛ), στάθμη πυθμένα, νεκρό όγκο, ωφέλιμη χωρητικότητα κτλ. (Πίνακας 7.5) και με τη βοήθεια απλοποιημένων σχέσεων που προκύπτουν από διαγράμματα που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε ταμιευτήρα (Εικόνα 7.6 - Εικόνα 7.14) έγινε προσομοίωση της λειτουργίας τους σε μηνιαίο και ψευδοημερήσιο (μηνιαίο/30.5) χρονικό βήμα.

Πίνακας 7.5: Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων Αχελώου

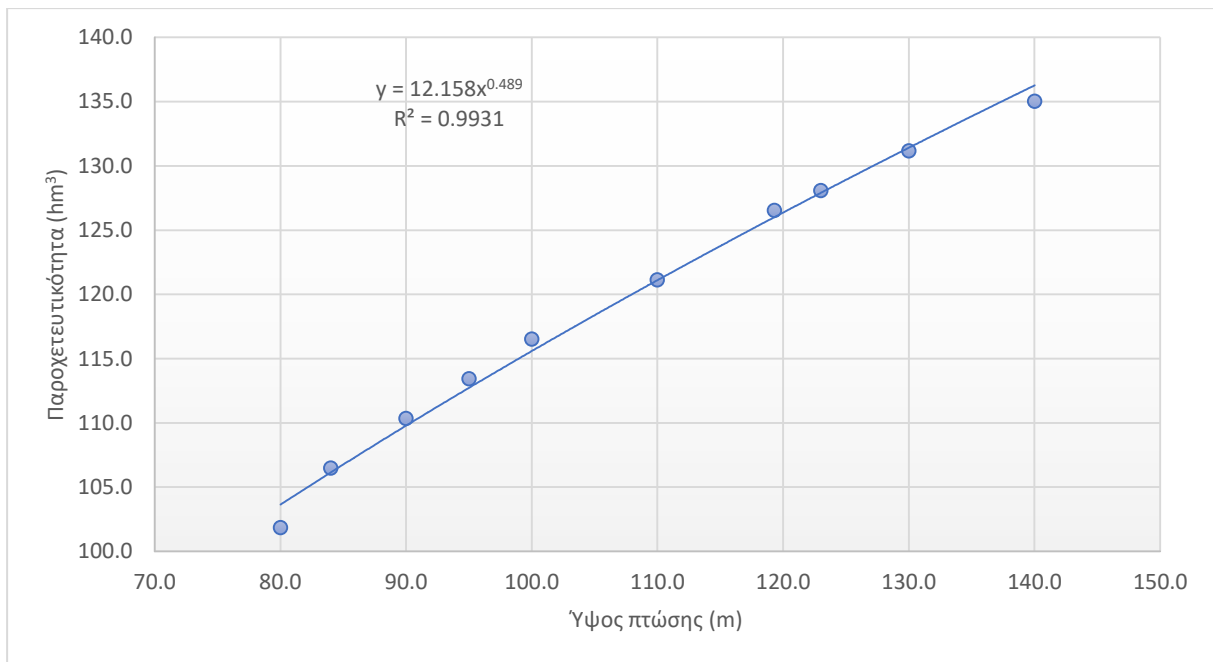
	Κρεμαστά	Καστράκι	Στράτος
Λεκάνη απορροής (km ²)	3570.0	548.0	202.0
Κατώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	227.0	142.0	67.0
Ανώτατη στάθμη λειτουργίας (m)	282.0	146.0	68.6
Στάθμη πυθμένα (m)	160.0	70.0	51.0
Παράμετρος κ	0.0756	0.0208	0.2328
Παράμετρος λ	2.2882	2.4539	2.029
Νεκρός όγκος (hm ³)	1140.1	751.2	64.6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



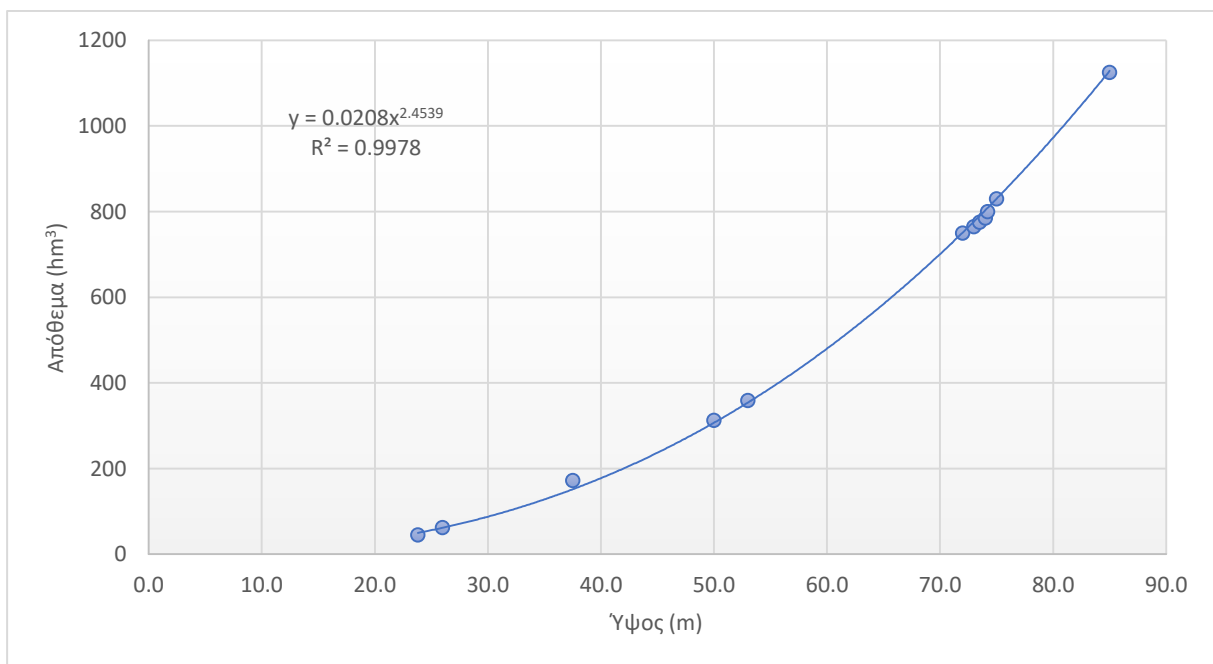
Εικόνα 7.6: Διάγραμμα ύψους - αποθέματος ταμιευτήρα Κρεμαστών



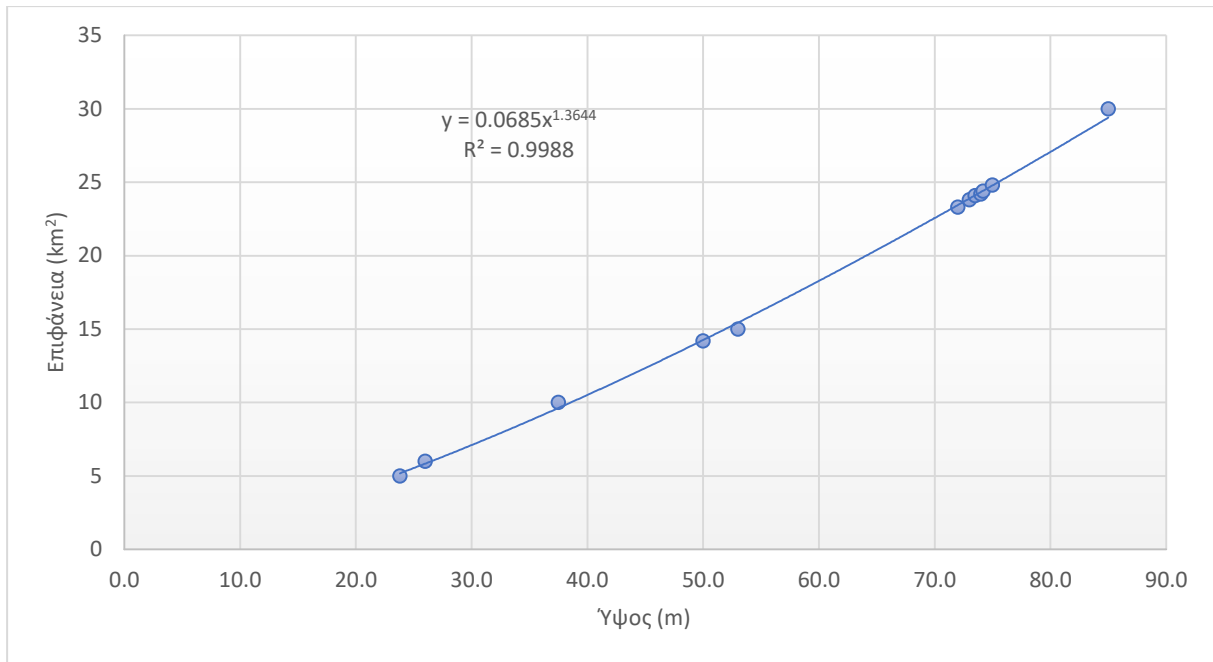
Εικόνα 7.7: Διάγραμμα ύψους - επιφάνειας ταμιευτήρα Κρεμαστών



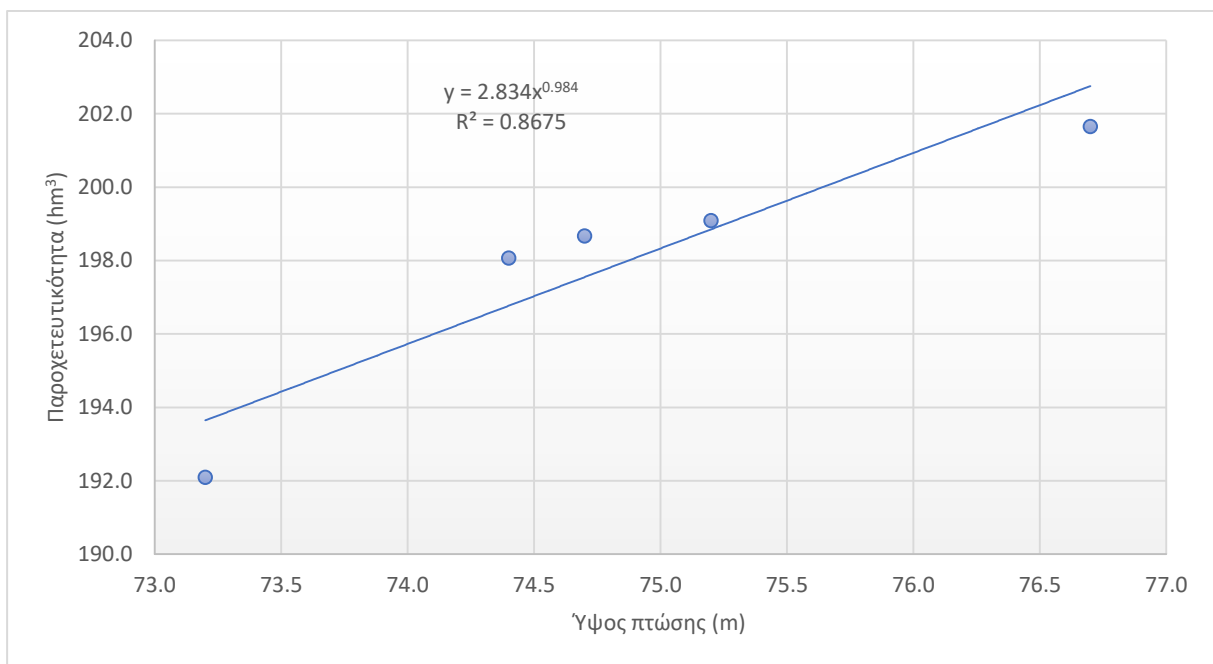
Εικόνα 7.8: Διάγραμμα ύψους πτώσης - παροχεταιυτικότητας στροβίλου ταμιευτήρα Κρεμαστών



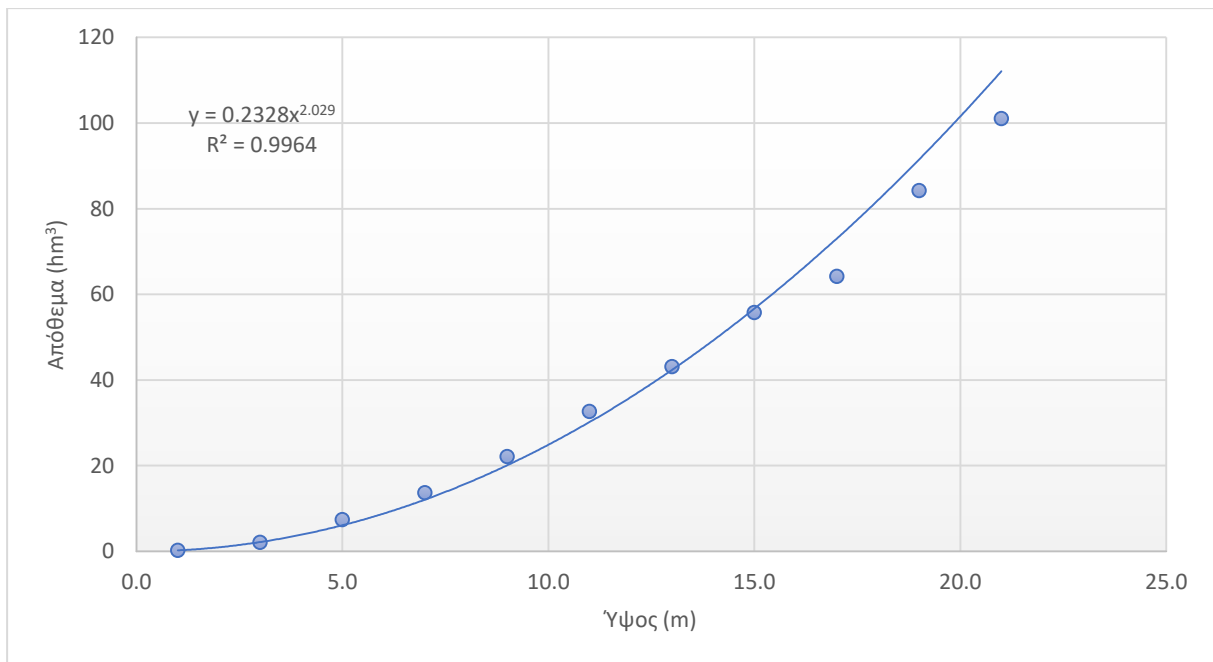
Εικόνα 7.9: Διάγραμμα ύψους - αποθέματος ταμιευτήρα Καστρακίου



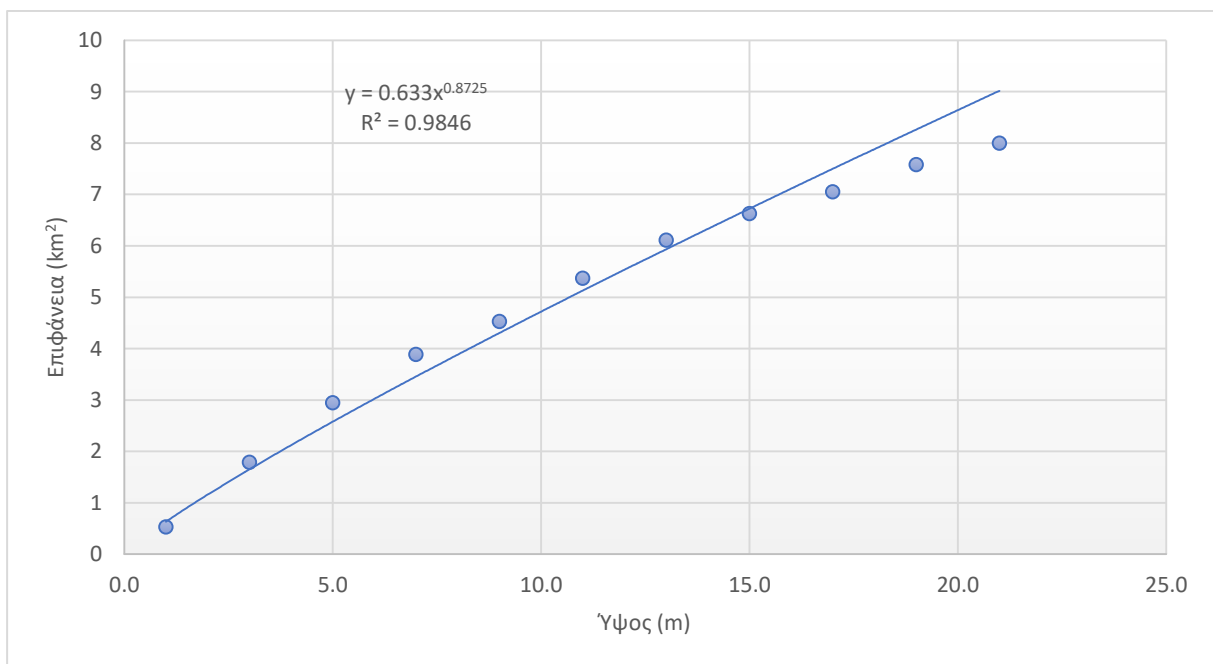
Εικόνα 7.10: Διάγραμμα ύψους - επιφάνειας ταμιευτήρα Καστρακίου



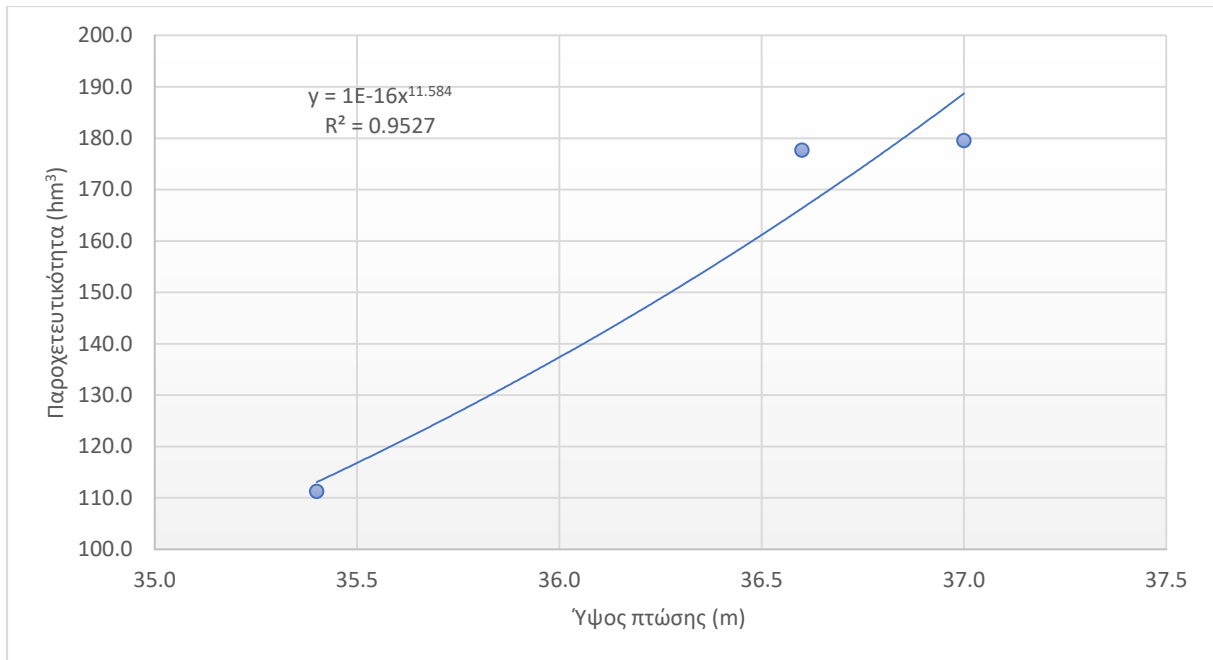
Εικόνα 7.11: Διάγραμμα ύψους πτώσης - παροχεταιυτικότητας στροβίλου ταμιευτήρα Καστρακίου



Εικόνα 7.12: Διάγραμμα ύψους - αποθέματος ταμιευτήρα Στράτου



Εικόνα 7.13: Διάγραμμα ύψους - επιφάνειας ταμιευτήρα Στράτου



Εικόνα 7.14: Διάγραμμα ύψους πτώσης - παροχετευτικότητας στροβίλου ταμιευτήρα Στράτου

Βάσει των δεδομένων αυτών, γίνεται η προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου των τριών ταμιευτήρων. Η μόνη διαφορά με το προηγούμενο παράδειγμα των δύο παράλληλων ταμιευτήρων (υποκεφάλαιο 7.1) είναι ότι για κάθε βήμα της προσομοίωσης (από το δεύτερο βήμα και έπειτα), όσον αφορά στον δεύτερο και τρίτο σε σειρά ταμιευτήρα, στο αρχικό απόθεμα πέραν των εισροών του βήματος προστίθενται οι εκροές του προηγούμενου βήματος του ανάντη ταμιευτήρα, που περιλαμβάνουν την εκροή για ενέργεια και περιβαλλοντική διατήρηση αλλά και την υπερχειλίση του, εάν υπάρχει. Αυτό σημαίνει ότι ο δεύτερος ταμιευτήρας παραλαμβάνει όλες τις εκροές του προηγούμενου βήματος από τον πρώτο, και ο τρίτος από τον δεύτερο. Στη συνέχεια υπολογίζεται η στάθμη, το ύψος πτώσης και η παροχετευτικότητα του αγωγού φυγής. Τα στοιχεία αυτά σε συνδυασμό με ορισμένα χαρακτηριστικά κάθε ταμιευτήρα εισάγονται στο μοντέλο διγράφου απ' όπου τελικά υπολογίζονται οι ποσότητες της ενεργειακής ζήτησης του συστήματος που δύναται να καλύψει κάθε ταμιευτήρας. Από τις ποσότητες ενέργειας που προκύπτουν για κάθε έναν ταμιευτήρα, υπολογίζονται οι αντίστοιχες εκροές. Από τις εκροές αυτές, εξετάζεται το ενδεχόμενο ταυτόχρονης κάλυψης της διατήρησης περιβαλλοντικής ροής κατάντη των τριών ταμιευτήρων, εφόσον υπάρχει τέτοιου είδους ζήτηση, όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.2. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο παράδειγμα που εξετάζεται, δεν τίθεται στόχος περιβαλλοντικής ροής για τους ταμιευτήρες Κρεμαστών και Καστρακίου, ενώ για τον ταμιευτήρα του Στράτου ο στόχος διατήρησης της περιβαλλοντικής ροής ανέρχεται σε 25 m³/s, δηλαδή 2.23 hm³ ανά μέρα και 66.77 hm³ ανά μήνα. Στη συνέχεια, αφού πραγματοποιηθούν οι εκροές που προαναφέρθηκαν, εξετάζεται το ενδεχόμενο υπερχειλίσεων στο συγκεκριμένο βήμα και υπολογίζεται το νέο απόθεμα αφαιρώντας, επιπλέον των εκροών, και τις υπερχειλίσεις. Έτσι διαμορφώνεται το τελικό απόθεμα κάθε βήματος, που αποτελεί

αρχικό απόθεμα για το επόμενο βήμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα βήματα του χρονικού ορίζονται που εξετάζεται.

Όπως και στο παράδειγμα των δύο παράλληλων ταμιευτήρων, σε πρώτο στάδιο έγινε βελτιστοποίηση του μοντέλου που προαναφέρθηκε με τη χρήση του ίδιου εξελικτικού αλγόριθμου (differential evolution algorithm). Ως στοχική συνάρτηση τέθηκε η μεγιστοποίηση της πρωτεύουσας ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα. Οι μεταβλητές ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα ποσοστά κάλυψης ενός συνολικού στόχου ενέργειας E^* από τους τρεις ταμιευτήρες του συστήματος καθώς και ο ίδιος ο στόχος. Τίθεται επίσης ο περιορισμός τα δύο ποσοστά κάλυψης να αθροίζουν στη μονάδα, δηλαδή $p_1 + p_2 + p_3 = 1$.

Σε επόμενο στάδιο, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση, εφαρμόζονται στο μοντέλο προσομοίωσης, απ' όπου προσδιορίζονται οι αστοχίες του συστήματος, τα αποθέματα και η συνολική υπερχειλίση στο τέλος του χρονικού ορίζοντα μελέτης καθώς και η συνολική ενέργεια που παράγεται τελικά από αυτό. Βάσει των αποτελεσμάτων, ακολουθεί ο υπολογισμός του μέσου ετήσιου οφέλους/κόστους του συστήματος. Η διαδικασία αυτή επιχειρείται για μηνιαίο και ψευδοημερήσιο βήμα προσομοίωσης αντίστοιχα.

7.2.1 Αποτελέσματα μηνιαίου χρονικού βήματος

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για το μοντέλο μηνιαίας προσομοίωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια. Ο χρονικός ορίζοντας της προσομοίωσης είναι 41 έτη (Ιανουάριος 1967 - Δεκέμβριος 2007).

Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου για μηνιαίο βήμα

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Μέγιστη παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια (GWh)	138
Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμιευτήρα Κρεμαστών, p_1 (%)	33
Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμιευτήρα Καστρακίου, p_2 (%)	41
Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμιευτήρα Στράτου, p_3 (%)	26
Στόχος παραγόμενης ενέργειας E^* (GWh)	138

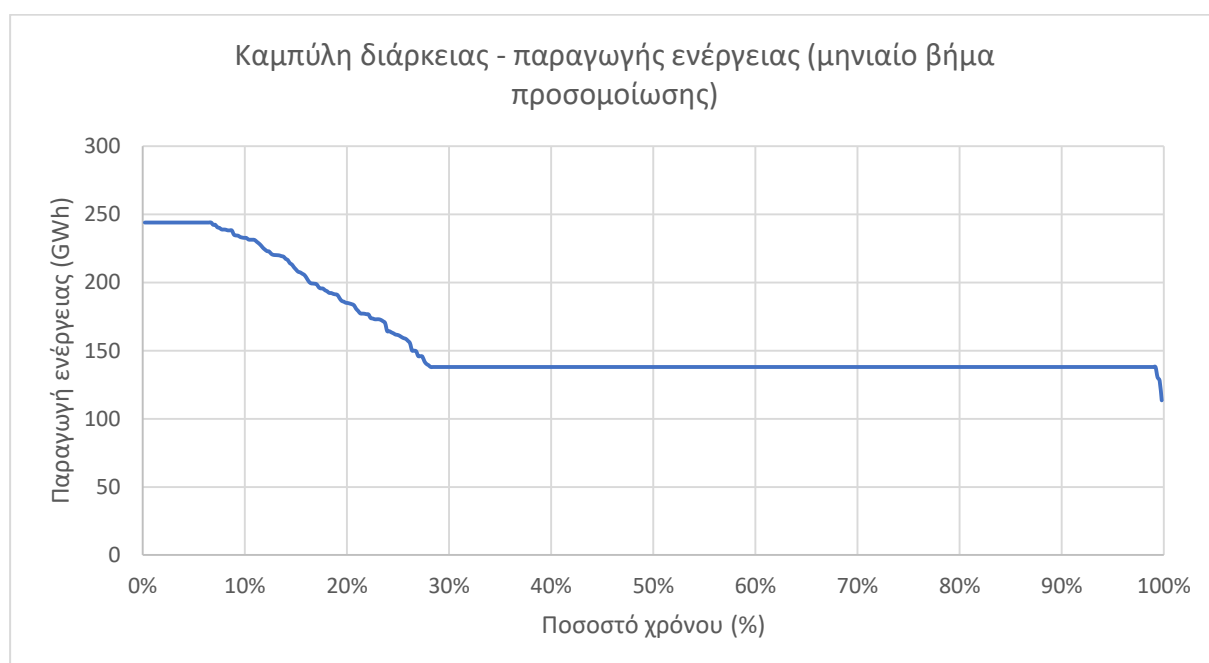
Από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης (Πίνακας 7.6) προκύπτει ότι η βέλτιστη λύση είναι αυτή κατά την οποία ο μεγαλύτερος επιμέρους στόχος ενέργειας (41% του συνολικού) κατανέμεται στον ταμιευτήρα του Καστρακίου, ενώ μικρότεροι επιμέρους στόχοι, 33% και 26% του συνολικού, στους ταμιευτήρες Κρεμαστών και Στράτου, αντίστοιχα. Η μέγιστη παραγωγή πρωτεύουσας

ενέργειας του συστήματος προκύπτει ίση με 138 GWh/ μήνα, δηλαδή όσο και ο στόχος ενέργειας του συστήματος, που σημαίνει πως τουλάχιστον στο 99% του χρόνου καλύπτεται ο υπόψη στόχος.

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που ακολούθησε και βασίστηκε στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης.

Πίνακας 7.7: Μέση ετήσια υπερχειλίση ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (μηνιαίο βήμα προσομοίωσης)

Ταμιευτήρας	Μέση ετήσια υπερχειλίση (hm ³)
Κρεμαστά	421.58
Καστράκι	231.48
Στράτος	532.90



Εικόνα 7.15: Διάγραμμα διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας συστήματος ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου

Πίνακας 7.8: Αποτελέσματα προσομοίωσης συστήματος ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (μηνιαίο βήμα)

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Σύνολο αστοχιών	3
Μέσο ετήσιο όφελος/κόστος συστήματος (Μ€)	176.26

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτουν σημαντικές τιμές μέσης ετήσιας υπερχειλίσης από τους τρεις ταμιευτήρες (Πίνακας 7.7). Επιπλέον, με βάση την καμπύλη διάρκειας -

παραγωγής ενέργειας, προκύπτει ότι η πρωτεύουσα ενέργεια τουλάχιστον στο 99% του χρόνου ικανοποιεί τον αντίστοιχο στόχο ενώ το έλλειμμα ενέργειας που παρατηρείται είναι μικρό. Επιπλέον, υπάρχει σχετικά μεγάλη παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας (ενέργεια πέραν του στόχου) από το σύστημα (Εικόνα 7.15). Οι αστοχίες που προέκυψαν στο σύνολο των μηνιαίων βημάτων προσομοίωσης (41 έτη × 12 μήνες = 492 βήματα προσομοίωσης) είναι 3. Επομένως το ποσοστό αστοχιών είναι $\frac{3}{492} \times 100\% = 0.61\%$ και κατ' επέκταση η αξιοπιστία του συστήματος προκύπτει $100\% - 0.61\% = 99.39\%$. Τέλος, το μέσο ετήσιο όφελος είναι ίσο με 176.26 Μ€ (Πίνακας 7.8).

7.2.2 Αποτελέσματα ψευδοημερήσιου χρονικού βήματος

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης στην περίπτωση ψευδοημερήσιας προσομοίωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια. Η προσομοίωση αφορά στο χρονικό διάστημα Οκτώβριος 1966 - Δεκέμβριος 2008.

Πίνακας 7.9: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου για ψευδοημερήσιο βήμα

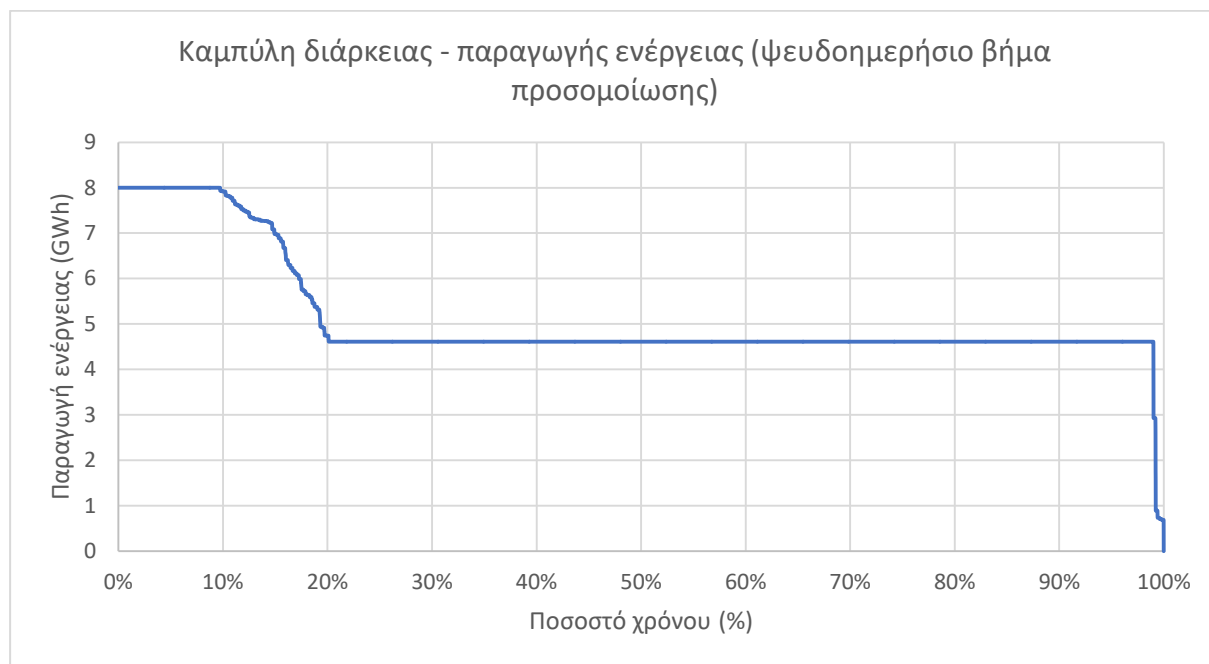
Χαρακτηριστικό	Τιμή
Μέγιστη παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια (GWh)	4.61
Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμειυτήρα Κρεμαστών, p_1 (%)	59
Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμειυτήρα Καστρακίου, p_2 (%)	21
Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμειυτήρα Στράτου, p_3 (%)	20
Στόχος παραγόμενης ενέργειας E^* (GWh)	4.61

Από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης (Πίνακας 7.9) προκύπτει ότι η βέλτιστη λύση είναι αυτή κατά την οποία ο μεγαλύτερος επιμέρους στόχος ενέργειας (59% του συνολικού) αναμένεται να καλυφθεί από τον ταμειυτήρα των Κρεμαστών, ενώ μικρότεροι επιμέρους στόχοι από τους άλλους δύο ταμειυτήρες (21% και 20% του συνολικού στόχου από το Καστράκι και τον Στράτο, αντίστοιχα). Η μεγιστοποιημένη παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας του συστήματος προκύπτει ίση με 4.61 GWh/ψευδοημέρα, δηλαδή όσο και ο στόχος ενέργειας του συστήματος, που σημαίνει πως τουλάχιστον στο 99% του χρόνου το σύστημα καλύπτει το στόχο ενέργειας.

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που ακολούθησε και βασίστηκε στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης.

Πίνακας 7.10: Μέση ετήσια υπερχειλίση ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (ψευδοημερήσιο βήμα προσομοίωσης)

Ταμιευτήρας	Μέση ετήσια υπερχειλίση (hm ³)
Κρεμαστά	386.51
Κασträκι	266.44
Στράτος	546.89



Εικόνα 7.16: Διάγραμμα διάρκειας - ψευδοημερήσιας παραγωγής ενέργειας συστήματος ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου

Πίνακας 7.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης συστήματος ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (ψευδοημερήσιο βήμα)

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Σύνολο αστοχιών	151
Μέσο ετήσιο όφελος/κόστος συστήματος (Μ€)	164.78

Οι υπερχειλίσεις στο ψευδοημερήσιο βήμα είναι αρκετά μεγάλες και στους τρεις ταμιευτήρες (Πίνακας 7.10). Επιπλέον, από τη καμπύλη διάρκειας - παραγωγής ενέργειας προκύπτει ότι η πρωτεύουσα ενέργεια ικανοποιεί τον αντίστοιχο στόχο τουλάχιστον στο 95% του χρόνου, ενώ το έλλειμμα ενέργειας που παρατηρείται είναι μικρό. Επιπλέον, υπάρχει παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας (ενέργεια πέραν του στόχου) από το σύστημα (Εικόνα 7.16). Οι αστοχίες που προέκυψαν στο σύνολο των ψευδοημερήσιων βημάτων προσομοίωσης (507 μήνες × 30 μέρες = 15210 βήματα

προσομοίωσης) είναι 151. Επομένως το ποσοστό αστοχιών είναι $\frac{151}{15210} \times 100\% = 0.99\%$ και κατ' επέκταση η αξιοπιστία του συστήματος προκύπτει $100\% - 0.99\% = 99.01\%$. Τέλος, το μέσο ετήσιο όφελος από το σύστημα των τριών ταμιευτήρων προκύπτει ίσο με 164.78 Μ€ (Πίνακας 7.11).

7.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των εδαφίων 7.2.1 και 7.2.2, δηλαδή τις διαφορές μεταξύ μηνιαίας και ψευδοημερήσιας προσομοίωσης του ίδιου συστήματος ταμιευτήρων, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Όσον αφορά στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, αν τα ανάγουμε σε κοινή βάση (μήνα), προκύπτουν πολύ κοντινές τιμές όσον αφορά στη μέγιστη πρωτεύουσα ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα.
- Αυτό που διαφοροποιείται κατά τη βελτιστοποίηση είναι τα ποσοστά κάλυψης του συνολικού στόχου, καθώς στο μηνιαίο βήμα προκύπτει ότι το μεγαλύτερο μέρος του στόχου ενέργειας αναμένεται να καλυφθεί από τον ταμιευτήρα Καστρακίου ενώ στο ψευδοημερήσιο βήμα από τον ταμιευτήρα Κρεμαστών. Αυτή η αλλαγή οφείλεται κυρίως στις υπερχειλίσεις του συστήματος, οι οποίες είναι μεγαλύτερες στο ψευδοημερήσιο βήμα. Ειδικά για την περίπτωση του ταμιευτήρα Καστρακίου, όπου παραλαμβάνει και τις υπερχειλίσεις των Κρεμαστών, ο στόχος παραγωγής τίθεται πιο μεγάλος, ώστε να υλοποιεί μεγαλύτερες εκροές.
- Όσον αφορά, στη μέση ετήσια υπερχειλίση, φαίνεται ότι αυτή μειώνεται με την αύξηση του χρονικού βήματος. Πράγματι και στο παράδειγμα αυτό, προκύπτει ότι στο ψευδοημερήσιο βήμα οι υπερχειλίσεις και στους τρεις ταμιευτήρες του συστήματος είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το μηνιαίο βήμα (Πίνακας 7.7 και Πίνακας 7.10). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε μηνιαίο βήμα η υπερχειλίση εξομαλύνεται, καθώς υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή μέσα στο μήνα, σε αντίθεση με το ψευδοημερήσιο, όπου συγκεντρώνεται σε λίγες μέρες.
- Πέρα των υπερχειλίσεων, από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις αστοχίες που προέκυψαν στο τέλος των χρονικών βημάτων. Βέβαια αυτό σχετίζεται και με τον κατά πολύ μεγαλύτερο αριθμό βημάτων προσομοίωσης στο ψευδοημερήσιο βήμα, και αυτό φαίνεται από τον δείκτη αξιοπιστίας που προκύπτει και στις δύο περιπτώσεις να είναι άνω του 99%.
- Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, το μέσο ετήσιο όφελος του συστήματος αναμενόταν να είναι μεγαλύτερο στο μηνιαίο βήμα προσομοίωσης, όπως και προέκυψε.

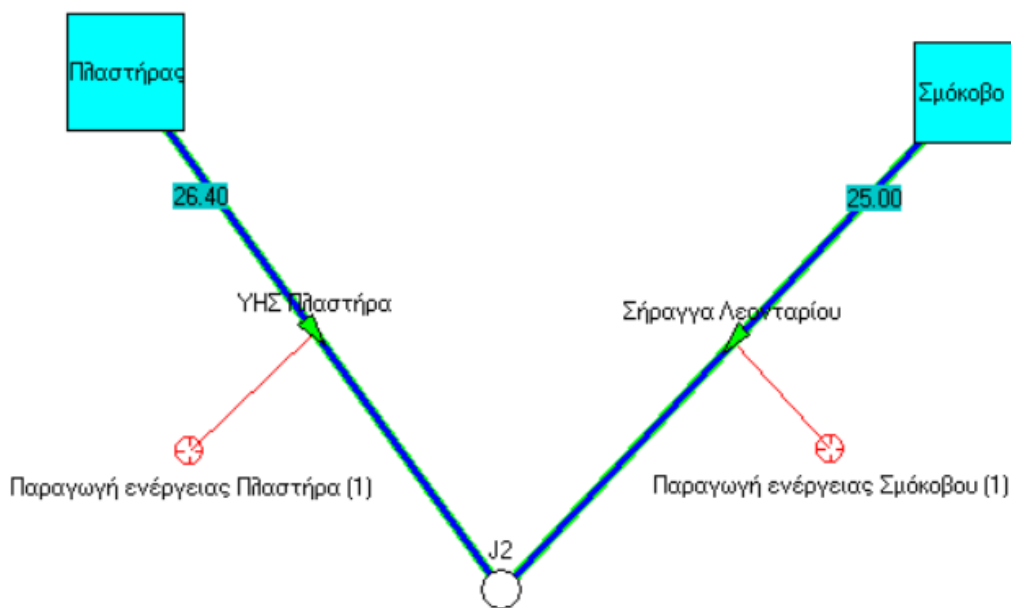
8 Σύγκριση μοντέλου διγράφου με το λογισμικό Υδρονομέας σε προβλήματα προσομοίωσης υδροενεργειακών συστημάτων

Το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων Υδρονομέας χρησιμοποιείται για προβλήματα προσομοίωσης και βελτιστοποίησης συστημάτων υδατικών πόρων και αναπαριστά πληθώρα φυσικών, λειτουργικών, περιβαλλοντικών και άλλων περιορισμών που αφορούν στη δομή και λειτουργία των συστημάτων αυτών. Πέρα των υπόλοιπων χρήσεων, προσομοιώνει και την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αποτελεί το βασικό διαχειριστικό πρόβλημα που καλείται να λύσει το μοντέλο διγράφου που υλοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία. Η προηγούμενη έκδοση του λογισμικού δεν υποστηρίζει την ολιστική (στην κλίμακα του συστήματος) επίλυση της παραγωγής ενέργειας, αλλά μπορεί να βελτιστοποιήσει την επιμέρους παραγωγή ενέργειας σε ξεχωριστούς ταμιευτήρες. Έτσι, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μοντέλου διγράφου με το νέο κανόνα λειτουργίας, καταδεικνύοντας το πρόσφορο έδαφος για την ενσωμάτωση του νέου διαχειριστικού πλαισίου στην υπό ανάπτυξη έκδοση του Υδρονομέας. Τα δύο συστήματα που πρόκειται να εξεταστούν είναι τα ίδια με αυτά του Κεφαλαίου 7, δηλαδή το ένα σύστημα περιλαμβάνει τους παράλληλους ταμιευτήρες Πλαστήρα και Σμόκοβο (υποκεφάλαιο 7.1) και το άλλο τους ταμιευτήρες Κρεμαστά, Καστράκι και Στράτο (υποκεφάλαιο 7.2).

8.1 Προσομοίωση υδροσυστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου

Σύμφωνα με την περιγραφή που προηγήθηκε στο υποκεφάλαιο 7.1, γίνεται η κατάστρωση του συστήματος των παράλληλων ταμιευτήρων Πλαστήρα και Σμοκόβου, εισάγοντας τα δεδομένα τους στο λογισμικό Υδρονομέας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.1.

Στο εννοιολογικό μοντέλο, οι ροές νερού από τους δύο ταμιευτήρες, καταλήγουν (εννοιολογικά - όχι στην πράξη καθώς το νερό του κάθε έργου καταλήγει σε διαφορετικά σημεία του Ν. Καρδίτσας) στον κόμβο J2 που συμβολίζει τη κοινή περιοχή την Π.Ε. Καρδίτσας, όπου προσφέρεται αυτή η ενέργεια. Αθροιζόμενες οι επιμέρους ροές ενέργειας καθορίζουν τη συνολική ενέργεια που παράγεται στο σύστημα. Σε κάθε έναν ταμιευτήρα έχουν εισαχθεί τα δεδομένα που αφορούν στη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά του και το ίδιο ισχύει και για τους σταθμούς παραγωγής κάθε ΥΗΕ.



Εικόνα 8.1: Σύστημα παράλληλων ταμιευτήρων Πλαστήρα - Σμοκόβου

Επειδή το συγκεκριμένο πρόβλημα προσομοίωσης - βελτιστοποίησης εστιάζει κυρίως στην κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης από το σύστημα των δύο ταμιευτήρων, οι υπόλοιπες χρήσεις που εξυπηρετούν οι ταμιευτήρες αυτοί παραλείπονται (όπως ακριβώς και στο μοντέλο διγράφου). Έτσι, ως αποκλειστικός στόχος τίθεται η κάλυψη μιας σταθερής ζήτησης ενέργειας. Το κριτήριο λοιπόν που καλείται να βελτιστοποιήσει (εδώ μεγιστοποιήσει) τόσο το λογισμικό Υδρονομέας όσο και το μοντέλου διγράφου είναι η παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας. Η διαφορά μεταξύ τους αφορά στις μεταβλητές ελέγχου, αλλά και στο πως καταρτίζεται η στοχική συνάρτηση. Ο Υδρονομέας έχει ως μεταβλητή ελέγχου έναν στόχο παραγωγής ενέργειας ανά στρόβιλο ενώ το μοντέλο διγράφου έχει ένα συνολικό στόχο ενέργειας του συστήματος και τα ποσοστά που ο στόχος αυτός επιμερίζεται στις συνιστώσες του συστήματος, δηλαδή στους ταμιευτήρες. Ως προς την στοχική συνάρτηση, στον Υδρονομέα επιλέγεται η *Total generated firm power*, δηλαδή η ενέργεια που παράγεται με αξιοπιστία 99% και προκύπτει από άθροισμα της παραγωγής κάθε ταμιευτήρα (Μπουζιώτας, 2012). Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα της βελτιστοποίησης φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 8.1 και Πίνακας 8.2), και σε αντιπαραβολή με το μοντέλο διγράφου.

Πίνακας 8.1: 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 8.2: 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 8.3: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Πλαστήρα - Σμοκόβου

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

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.3, το μοντέλο που αναπτύχθηκε παράγει περίπου 24% περισσότερη πρωτεύουσα ενέργεια το μήνα συγκριτικά με τον Υδρονομέα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στον Υδρονομέα κάθε ταμειυτήρας καλείται να καλύψει τη ζήτησή του σε ενέργεια αυτόνομα, χωρίς να αναπροσαρμόζεται ποτέ ο στόχος αυτός π.χ. λόγω δυνατότητας κάλυψης μέρους αυτής από τους άλλους ταμειυτήρες του συστήματος στην περίπτωση παραγωγής δευτερεύουσας ενέργειας. Αντιθέτως, στο μοντέλο διγράφου που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, κάθε ταμειυτήρας καλείται αρχικά να καλύψει ένα ποσοστό μιας συνολικής ζήτησης ενέργειας και εφόσον το καταφέρει,

υπάρχει δυνατότητα συνεισφοράς του στην κάλυψη ζητήσεων των υπολοίπων ταμιευτήρων του συστήματος εάν παρατηρείται έλλειμμα ή ακόμα να μειωθούν οι στόχοι παραγωγής σε ένα βήμα αν παράγεται δευτερεύουσα ενέργεια σε ένα επιμέρους έργο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ενέργεια που τελικά παράγεται από το σύστημα να είναι αρκετά μεγαλύτερη. Βάσει αυτής της ανάλυσης, παρατίθενται για πληρότητα ορισμένα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος, η οποία έγινε με τη χρήση των δεδομένων της βελτιστοποίησης για το λογισμικό Υδρονομέας.

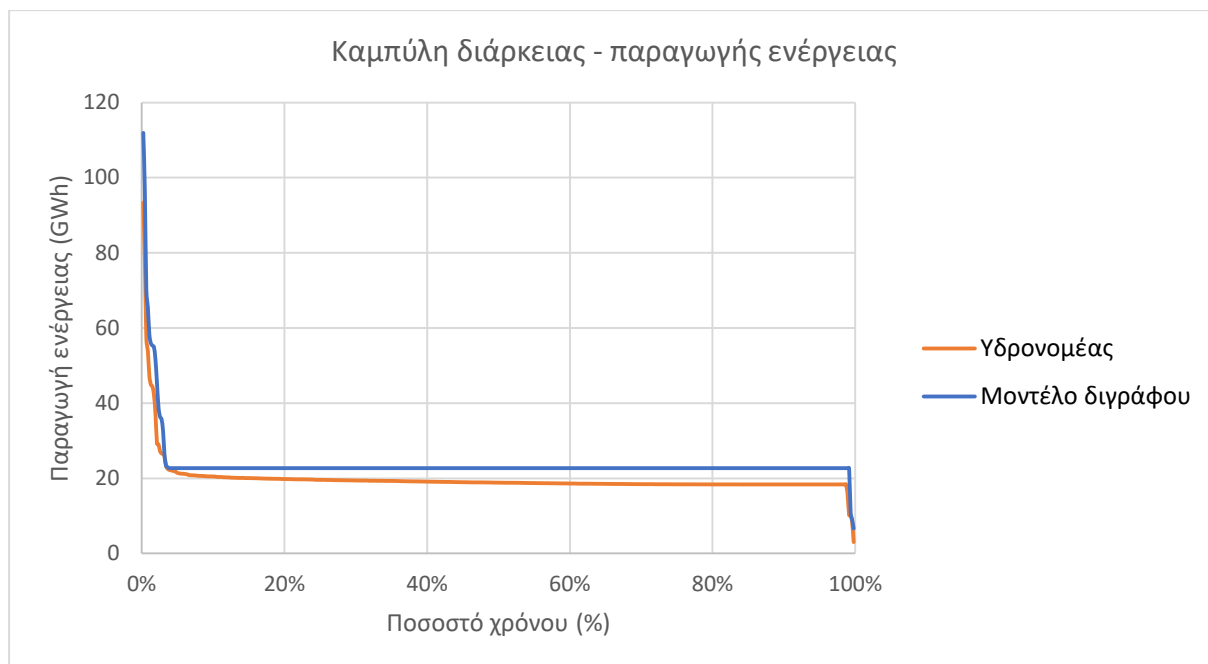
Πίνακας 8.4: Ποσοστά αξιοπιστίας στην παραγωγή ανά ταμιευτήρα (λογισμικό Υδρονομέας)

	Σύνολο βημάτων που αστόχησαν	Ποσοστό αξιοπιστίας στην παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας ανά ταμιευτήρα (%)
ΥΗΣ Πλαστήρα	5	98.9
Σήραγγα Λεονταρίου	468	0

Με διαίρεση των βημάτων όπου υπήρξαν αστοχίες προς τον συνολικό αριθμό των βημάτων προσομοίωσης υπολογίστηκε το ποσοστό αστοχιών του ταμιευτήρα Πλαστήρα δηλαδή π.χ. $\frac{5}{468} \times 100\% = 1.1\%$ και κατ' επέκταση η αξιοπιστία του, η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι $100\% - 1.1\% = 98.9\%$. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για το Σμόκοβο (Πίνακας 8.4). Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν στο σύστημα των ταμιευτήρων και προέκυψαν από τον Υδρονομέα και το μοντέλο διγράφου (Πίνακας 8.5). Στη περίπτωση του Υδρονομέα η συνολική ενέργεια του συστήματος προέκυψε από το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών που παράγουν οι ταμιευτήρες που αποτελούν το σύστημα και αποτέλεσε τη βάση για περαιτέρω υπολογισμούς. Επιπλέον, παρατίθενται οι καμπύλες διάρκειας - παραγωγής ενέργειας, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση του συστήματος στο λογισμικό Υδρονομέας και το μοντέλο διγράφου (Εικόνα 8.2).

Πίνακας 8.5: 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

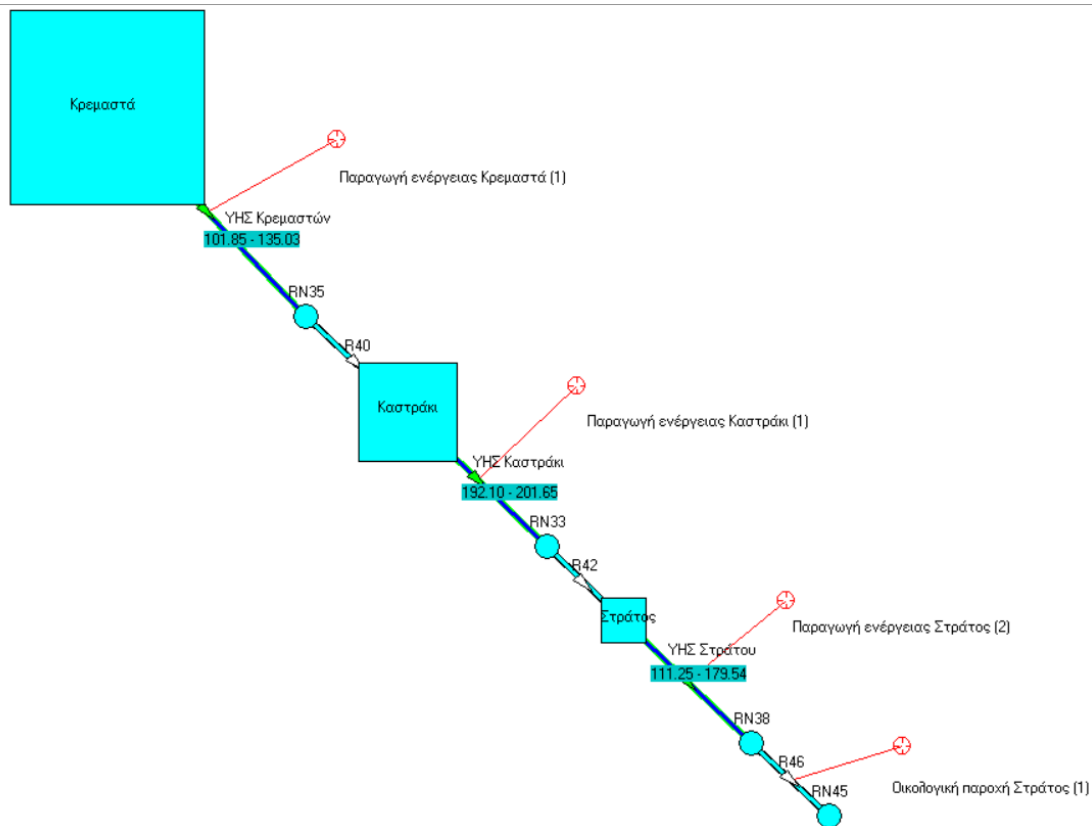


Εικόνα 8.2: Καμπύλη διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας με χρήση του λογισμικού Υδρονομέας και του μοντέλου διγράφου

Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν τόσο από το λογισμικό Υδρονομέας όσο και από το μοντέλο διγράφου, συμπεραίνεται ότι σε τέτοιου είδους διαχειριστικά προβλήματα που σχετίζονται με τη ζήτηση υδροηλεκτρικής ενέργειας από ταμιευτήρες, το μοντέλο διγράφου ανταποκρίνεται καλύτερα συγκριτικά με τον Υδρονομέα, λόγω του κανόνα λειτουργίας που εμπεριέχει. Ο κανόνας αυτός, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δίνει τη δυνατότητα αναπροσαρμογής των στόχων ενέργειας μεταξύ των ταμιευτήρων, το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας από το σύστημα συνολικά.

8.2 Προσομοίωση υδροσυστήματος υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων Αχελώου (Κρεμαστά - Καστρακι - Στράτος)

Το επόμενο πρόβλημα που θα εξεταστεί είναι το ίδιο με αυτό του υποκεφαλαίου 7.2 και αφορά στους ταμιευτήρες Κρεμαστών, Καστρακίου και Στράτου, οι οποίοι βρίσκονται σε σειρά. Η κατάστρωση του συστήματος των τριών αυτών ταμιευτήρων, με εισαγωγή των δεδομένων τους στο λογισμικό Υδρονομέας, παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.3.



Εικόνα 8.3: Σύστημα ταμιευτήρων Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου σε σειρά

Όπως απεικονίζεται παραπάνω, οι εκροές νερού περνούν από τον ένα ταμιευτήρα στον επόμενο. Κάθε ταμιευτήρας παράγει μια ποσότητα ενέργειας και αθροιζόμενες οι ενέργειες αυτές δίνουν τη συνολική ενέργεια που παράγει το σύστημα. Σε κάθε έναν ταμιευτήρα έχουν εισαχθεί τα δεδομένα που αφορούν στη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά του και το ίδιο ισχύει και για τους σταθμούς παραγωγής κάθε ΥΗΕ.

Επειδή και αυτό το πρόβλημα προσομοίωσης - βελτιστοποίησης εστιάζει κυρίως στην κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης από το σύστημα των τριών ταμιευτήρων, οι υπόλοιπες χρήσεις που εξυπηρετούν οι ταμιευτήρες αυτοί παραλείπονται (όπως ακριβώς και στο μοντέλο διγράφου). Έτσι, ως αποκλειστικός στόχος τίθεται η κάλυψη μιας ζήτησης ενέργειας. Το πρόβλημα λοιπόν που καλείται να βελτιστοποιήσει τόσο το λογισμικό Υδρονομέας όσο και το μοντέλου διγράφου είναι η παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας. Η διαφορά μεταξύ τους αφορά στις μεταβλητές ελέγχου. Ο Υδρονομέας έχει ως μεταβλητή ελέγχου έναν στόχο παραγωγής ενέργειας ανά στρόβιλο ενώ το μοντέλο διγράφου έχει ένα συνολικό στόχο ενέργειας του συστήματος και τα ποσοστά που ο στόχος αυτός επιμερίζεται στις συνιστώσες του συστήματος, δηλαδή στους τρεις ταμιευτήρες. Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα της βελτιστοποίησης φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 8.6 και Πίνακας 8.7).

Πίνακας 8.6: Δεδομένα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου (λογισμικό Υδρονομίας)

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 8.7: 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 ταμιευτήρα Κρεμαστών)
	p_2 (p_2 : Ποσοστό κάλυψης ζήτησης ενέργειας ταμιευτήρα 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 8.8: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συστήματος Κρεμαστών - Καστρακίου - Στράτου

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

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.8, το μοντέλο που αναπτύχθηκε παράγει περίπου 13.3% περισσότερη πρωτεύουσα ενέργεια το μήνα συγκριτικά με τον Υδρονομέα. Όπως προαναφέρθηκε, αυτό οφείλεται στη δυνατότητα συνεισφοράς κάθε ταμιευτήρα στην κάλυψη ζητήσεων των υπολοίπων ταμιευτήρων του συστήματος όταν υπάρχουν ελλείμματα και στην αναπροσαρμογή στόχων όταν σε επιμέρους έργα παράγεται δευτερεύουσα ενέργεια, που παρέχεται μέσω του νέου κανόνα λειτουργίας στο μοντέλο διγράφου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ενέργεια που τελικά παράγεται από το σύστημα να είναι αρκετά μεγαλύτερη. Βάσει αυτής της ανάλυσης, παρατίθενται για πληρότητα ορισμένα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος, η οποία γίνεται με τη χρήση των δεδομένων της βελτιστοποίησης στο λογισμικό Υδρονομέας.

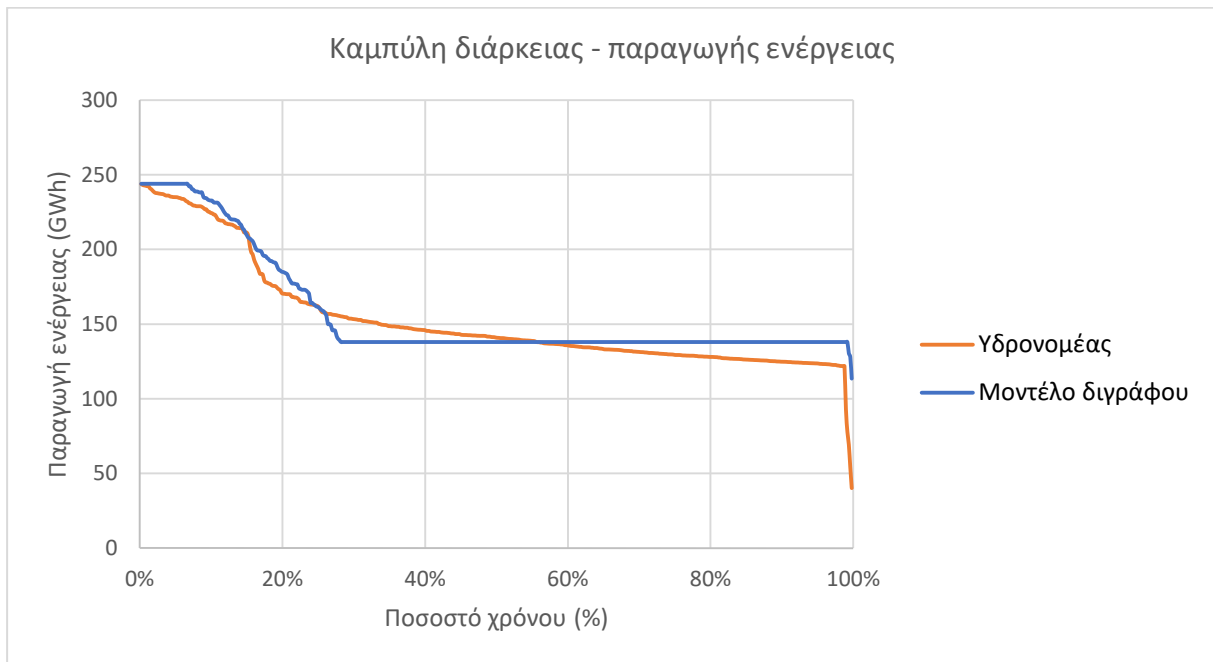
Πίνακας 8.9: Ποσοστά αξιοπιστίας στην παραγωγή ανά ταμιευτήρα (λογισμικό Υδρονομέας)

	Σύνολο βημάτων που αστόχησαν	Ποσοστό αξιοπιστίας στην παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας ανά ταμιευτήρα (%)
ΥΗΣ Κρεμαστών	47	90.4
ΥΗΣ Καστράκι	0	100.0
ΥΗΣ Στράτου	0	100.0

Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, με διαίρεση των βημάτων όπου υπήρξαν αστοχίες προς τον συνολικό αριθμό των βημάτων προσομοίωσης υπολογίστηκε το ποσοστό αστοχιών του ταμιευτήρα Κρεμαστών δηλαδή π.χ. $\frac{47}{492} \times 100\% = 9.6\%$ και κατ' επέκταση η αξιοπιστία του, η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι $100\% - 9.6\% = 90.4\%$. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τους άλλους δύο ταμιευτήρες, οι οποίοι έχουν 100% αξιοπιστία (Πίνακας 8.9). Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν στο σύστημα των ταμιευτήρων και προέκυψαν από τον Υδρονομέα και το μοντέλο διγράφου (Πίνακας 8.10). Στην περίπτωση του Υδρονομέα η συνολική ενέργεια του συστήματος προέκυψε από το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών που παράγουν οι ταμιευτήρες που αποτελούν το σύστημα και αποτέλεσε τη βάση για περαιτέρω υπολογισμούς. Επιπλέον, παρατίθενται οι καμπύλες διάρκειας - παραγωγής ενέργειας, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση του συστήματος στο λογισμικό Υδρονομέας και το μοντέλο διγράφου (Εικόνα 8.4).

Πίνακας 8.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης λογισμικού Υδρονομέας 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



Εικόνα 8.4: Καμπύλη διάρκειας - μηνιαίας παραγωγής ενέργειας με χρήση του λογισμικού Υδρονομέας και του μοντέλου διγράφου

Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και σε αυτή την περίπτωση αποδεικνύεται ότι το μοντέλο διγράφου διαχειρίζεται με μεγαλύτερη επιτυχία προβλήματα που σχετίζονται με υδροενεργειακή ζήτηση από ταμιευτήρες. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των ταμιευτήρων σε σειρά, που εξετάζονται σε αυτό το παράδειγμα, ο Υδρονομέας ανταποκρίνεται καλύτερα ως προς τη διαφορά απόδοσης με το μοντέλο διγράφου, συγκριτικά με το παράδειγμα των παράλληλων ταμιευτήρων του υποκεφαλαίου 8.1.

9 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

9.1 Σύνοψη εργασιών και βασικά συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάστηκαν διάφορα ζητήματα που συνδέονται με τη διαχείριση υδροενεργειακών συστημάτων κάθε τοπολογίας. Κύριος στόχος ήταν η διερεύνηση της κατάλληλης μεθοδολογίας, η οποία δύναται να εφαρμοσθεί σε προβλήματα προσομοίωσης - βελτιστοποίησης συστημάτων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων, εστιάζοντας κυρίως στη καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των διαθέσιμων διαχειριστικών επιλογών προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος στο πεδίο της παραγωγής ενέργειας. Βέβαια, στο πλαίσιο αυτό, λαμβάνει χώρα μια σειρά απλοποιήσεων και παραδοχών χωρίς όμως να βλάπτουν τη γενικότητα.

Το 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 υδροενεργειακών ζητήσεων σε συστήματα ταμιευτήρων ανεξαρτήτως του μεγέθους και της τοπολογίας τους (είτε παράλληλοι είτε σε σειρά) και δεν λαμβάνει υπόψη άλλες χρήσεις νερού (αφορά μόνο στις ροές ενέργειας, δεδομένου ότι οι ροές του νερού βελτιστοποιούνται από «παράλληλο» μοντέλο διγράφου). Η διαφορά με τον Υδρονομέα είναι ότι το μοντέλο αυτό 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.

Συγκεκριμένα, κάθε ταμιευτήρας καλείται να καλύψει ένα ποσοστό του συνολικού στόχου ενέργειας του συστήματος. Εφόσον καταφέρει να καλύψει το δικό του επιμέρους στόχο και υπάρχει δυνατότητα παραγωγής επιπλέον ποσότητας από αυτόν, έχει τη δυνατότητα να συνεισφέρει περαιτέρω στο σύστημα, προσφέροντας την περίσσεια ενέργειας για κάλυψη ελλειμμάτων που πιθανώς προκύψουν στους υπόλοιπους ταμιευτήρες. Έτσι, αν κάποιος ταμιευτήρας δεν μπορεί να καλύψει τον επιμέρους στόχο ενέργειας που έχει, μπορεί να παραλάβει ένα μέρος αυτής από τους υπόλοιπους ταμιευτήρες, εφόσον έχουν καλύψει πρώτα τους δικούς τους στόχους. Ακόμα, σε περίπτωση που ένας ταμιευτήρας, προκειμένου να μην υπερχειλίσει, παράγει δευτερεύουσα

ενέργεια, οι άλλοι στόχοι παραγωγής του συστήματος μειώνονται ώστε να εξασφαλίζουν αν είναι δυνατό τη μη παραγωγή πλεονάζουσας ενέργειας στο σύστημα. Ο Υδρονομέας αντίθετα, 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. Το πλεονέκτημα, λοιπόν, του μοντέλου διγράφου έγκειται στην αναπροσαρμογή των στόχων εντός του συστήματος. Λόγω αυτού, προσφέρει πολύ καλύτερα αποτελέσματα παραγωγής ενέργειας σε οποιοδήποτε σύστημα ταμιευτήρων.

Στους ερευνητικούς στόχους της εργασίας ήταν και η διερεύνηση μιας σειράς υπολογιστικών ζητημάτων που έχουν ως κοινή αφετηρία την διακριτοποιημένη έκφραση των εξισώσεων υδατικού ισοζυγίου. Βάσει των αναλύσεων που έγιναν με τυπικό παράδειγμα τον ταμιευτήρα Κρεμαστών, διαπιστώθηκε ότι η χρονική διακριτότητα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της προσομοίωσης, και η επιλογή του χρονικού βήματος (πραγματικού, ήτοι 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, $\frac{1}{4}$ του μήνα, δεκαπενθήμερο και μηνιαίο) παρατηρήθηκε ότι μέση ετήσια υπερχειλίση του ταμιευτήρα μειώνεται όσο αυξάνει το χρονικό βήμα. Στο ημερήσιο βήμα προκύπτει πολύ μεγαλύτερη υπερχειλίση από ότι στο μηνιαίο, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι στο μήνα η υπερχειλίση εξομαλύνεται καθώς κατανέμεται ομοιόμορφα σε περισσότερες ημέρες (όλο το μήνα) και έτσι η συνολική μηνιαία ικανότητα εκροών μέσω του στροβίλου μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερο μέρος της. Αντίθετα στο ημερήσιο βήμα, οι υπερχειλίσεις συγκεντρώνονται σε λίγες ημέρες και η ικανότητα εκροής από το στρόβιλο δεν αρκεί για να τις παραλάβει. Όσον αφορά στα οικονομικά μεγέθη της προσομοίωσης, στο παράδειγμα του ταμιευτήρα Κρεμαστών προέκυψε ότι το όφελος από το ημερήσιο βήμα ήταν λίγο μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μηνιαίο. 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, σε κάθε διαχειριστικό πρόβλημα τέτοιου είδους.

Τα πλεονεκτήματα του νέου μοντέλου, το οποίο υλοποιείται σε περιβάλλον Python, προκειμένου να ενταχθεί στη νέα έκδοση του Υδρονομέα, διαπιστώθηκαν τόσο σε θεωρητικές εφαρμογές όσο και σε πραγματικά συστήματα υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων της Ελλάδας, παράλληλων και σε σειρά. Στα πραγματικά προβλήματα, έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των ίδιων υδροσυστημάτων στην υφιστάμενη έκδοση του λογισμικού Υδρονομέας. Το πιο βασικό συμπέρασμα είναι ότι και στα δύο συστήματα που εξετάστηκαν, ήτοι 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. Η διαφορά αποδίδεται στην προσαρμογή του νέου κανόνα λειτουργίας στα χαρακτηριστικά της υδροηλεκτρικής παραγωγής, που απαιτούν μια πιο σύνθετη προσέγγιση στο ζήτημα της διαχείρισης των υδατικών πόρων και της κατανομής των ροών του νερού, σε σχέση με υδροσυστήματα που καλούνται να ικανοποιήσουν τυπικούς καταναλωτικούς στόχους. «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, κτλ.).

9.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε και εστίασε κυρίως στην διαχείριση της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας από ταμιευτήρες, παρέχει τη δυνατότητα για περαιτέρω έρευνα και ανάλυση. Ενδεικτικά, οι τρεις βασικοί άξονες που αφορούν στην εξέλιξη της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι:

- 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 Υδρονομέας 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 ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Βιβλιογραφία

- Christofides, A., Efstratiadis, A., Koutsyiannis, D., Sargentis, G. - F., and Hadjibiros, K. (2005). “Resolving conflicting objectives in the management of the Plastiras Lake: can we quantify beauty?” *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(5), 507–515.
- Efstratiadis, A., Koutsyiannis, D., and Xenos, D. (2004). “Minimizing water cost in the water resource management of Athens” *Urban Water Journal*, 1(1), 3–15, doi:10.1080/15730620410001732099.
- Grigg, N. S. (1996). *Water Resources Management*. McGraw - Hill, New York.
- Karavokiros, G., Nikolopoulos, D., Manouri, S., Efstratiadis, A., Makropoulos, C., Mamassis, N., and Koutsyiannis, D. (2020). “Hydronomeas 2020: Open - source decision support system for water resources management.” *European Geosciences Union General Assembly 2020, Geophysical Research Abstracts, Vol. 22*, Vienna, EGU2020-20022, doi:10.5194/egusphere-egu2020-20022.
- Koukouvinos, A., Nikolopoulos, D., Efstratiadis, A., Tegos, A., Rozos, E., Papalexou, S., Dimitriadis, P., Markonis, Y., Kossieris, P., Tyralis, C., Karakatsanis, G., Tzouka, K., Christofides, A., Karavokiros, G., Siskos, A., Mamassis, N., and Koutsyiannis, D. (2015). “Integrated water and renewable energy management: the Acheloos - Peneios region case study.” *European Geosciences Union General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts, Vol. 17*, Vienna, EGU2015 - 4912, doi:10.13140/RG.2.2.17726.69440, European Geosciences Union.
- Koutsyiannis, D., and Economou, A. (2003). “Evaluation of the parameterization - simulation - optimization approach for the control of reservoir systems.” *Water Resources Research*, 39(6), 1170, doi:10.1029/2003WR002148.
- Koutsyiannis, D., Efstratiadis, A., and Karavokiros, G. (2002). “A decision support tool for the management of multi - reservoir systems.” *Journal of the American Water Resources Association*, 38(4), 945–958, doi:10.1111/j.1752 -1688.2002.tb05536.x.
- Mays, L. W., and Tung, Y. - K. (1992). *Hydrosystems Engineering and Management*. McGraw - Hill, New York.
- Nalbantis, I., and Koutsyiannis, D. (1997). “A parametric rule for planning and management of multiple - reservoir systems.” *Water Resources Research*, 33(9), 2165–2177, doi:10.1029/97WR01034.
- Smith, D. K. (1982). *Network optimization practice: A Computational Guide*. John Wiley and Sons, New York.
- Storn, R., and Price, K. (1997). “A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces.” *Journal of Global Optimization*, 11(4).
- Winston, W. L. (1994). *Operations Research: Applications and Algorithms*. Duxbury Press, Wadsworth Publishing Company, Belmont, CA.
- ΔΕΗ/ΔΑΥΕ. (1997). *Έργα εκτροπής Αχελώου, Έργα δυτικής Θεσσαλίας κατόπιν της σήραγγας εκτροπής*

Αχελώου, Τεχνική έκθεση, Αθήνα.

- Ευστρατιάδης, Α., Καραβοκυρός, Γ., and Κουτσογιάννης, Δ. (2007). *Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ»*, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ), Ανάδοχος: ΝΑΜΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 9, 91 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Ευστρατιάδης, Α., Κουκουβίνος, Α., Μαμάσης, Ν., and Κουτσογιάννης, Δ. (2008). *Εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης και βέλτιστης λειτουργίας ταμιευτήρα Σμοκόβου και συναφών έργων*, Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου, Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τεύχος 3, 104 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Ευστρατιάδης, Α., Μαμάσης, Ν., and Κουτσογιάννης, Δ. (2020). *Σημειώσεις μαθήματος 'Ανανεώσιμη Ενέργεια & Υδροηλεκτρικά Έργα*, 8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και 2ο εξάμηνο ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.”
- Ευστρατιάδης, Α., Μαμάσης, Ν., Μαρκόνης, Γ., Κοσσιέρης, Π., and Τύραλης, Χ. (2015). *Μεθοδολογικό πλαίσιο βέλτιστου σχεδιασμού και συνδυασμένης διαχείρισης υδατικών και ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων*, Συνδυασμένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών για αειφορική ενεργειακή ανάπτυξη (CRESENDO), 154 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Καραβοκυρός, Γ., Ευστρατιάδης, Α., και Κουτσογιάννης, Δ. (2004). *Υδρονομέας (έκδοση 3.2) - Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων*, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, Τεύχος 24, 142 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Καραβοκυρός, Γ., Κουτσογιάννης, Δ. και Μανδέλλος, Ν. (1999). *Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του υδροσυστήματος της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας*, Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 3, Τεύχος 40, 161 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μπουζιώτας, Δ. (2012). *Ανάπτυξη πλαισίου βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ - Διερεύνηση στο υδροσύστημα Αχελώου - Θεσσαλίας*. Διπλωματική εργασία, 162 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Νικολόπουλος Δ. (2015). *Ανάπτυξη μοντέλου συνδυασμένης διαχείρισης λεκανών απορροής Αχελώου και Πηνειού*, Διπλωματική εργασία, 214 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σίσκος, Α., Καραβοκυρός, Γ., Χριστοφίδης, Α., και Ευστρατιάδης, Α. (2015). *Ανάπτυξη συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας*, Συνδυασμένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών για αειφορική ενεργειακή ανάπτυξη (CRESENDO), 103 σ.,

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τσακαλίας, Γ., και Κουτσογιάννης, Δ.(1995). *Πιλοτικό μοντέλο για τη διαχείριση του συστήματος ταμιευτήρων υδροδότησης της Αθήνας*, Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 2, Τεύχος 14, 52 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.