



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης για το βέλτιστο σχεδιασμό υβριδικού συστήματος υδροηλεκτρικής - αιολικής ενέργειας: Διερεύνηση με βάση το υδροσύστημα Αλιάκμονα

Παναγιώτης Δήμας

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης για το
βέλτιστο σχεδιασμό υβριδικού συστήματος
υδροηλεκτρικής - αιολικής ενέργειας: Διερεύνηση
με βάση το υδροσύστημα Αλιάκμονα

Παναγιώτης Δήμας

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2013



Το παρόν έγγραφο υπάγεται στην άδεια (CC BY-NC-SA 3.0)
Παναγιώτης Δήμας, 2013, 2014 (2^η έκδοση)

«Οι φιλόσοφοι μέχρι τώρα ερμήνευαν τον κόσμο με διάφορους τρόπους. Το ζήτημα όμως είναι να τον αλλάξουμε.»

Κ. Μαρξ, *11^η θέση για τον Φόιερμπαχ*

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη ενότητα είναι αυτή που συνήθως γράφεται τελευταία σε κάθε διπλωματική εργασία, αλλά επειδή αφορά πρόσωπα που συνέβαλαν με διάφορους τρόπους σε όλη τη διάρκεια εκπόνησής της είναι πολύ σημαντική.

Πρώτα και κύρια, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας Δημήτρη Κουτσογιάννη όχι μόνο για το εξαιρετικό ενδιαφέρον που παρουσιάζει το θέμα, αλλά κυρίως για τις ιδέες που εξέφρασε και τις συζητήσεις που είχαμε μέσα σε όλο το εξάμηνο που προηγήθηκε. Ο τρόπος διδασκαλίας του και η προσέγγισή του στην εκπαιδευτική διαδικασία συνολικότερα αποτελούν κίνητρο και έμπνευση για μένα τόσο στις σπουδές μου όσο και στη γενικότερη συγκρότησή μου.

Πολλά «ευχαριστώ» αξίζουν και στον Ανδρέα Ευστρατιάδη Δρ. Πολιτικό Μηχανικό και μέλος της ομάδας «Ιτιά» (αλλά και φίλο μου πλέον) για τη συνεχή και κρίσιμη στήριξή του σε όλη αυτή την προσπάθεια. Η επαφή και η ανταλλαγή απόψεων αποτέλεσαν το σημείο-κλειδί για όλη την έκβαση της εργασίας και το ευρύτερο περιεχόμενό της.

Ιδιαίτερη αναφορά θέλω επίσης να κάνω στους Δημήτρη Μπουζιώτα και Παναγιώτη Κοσσιέρη, Πολιτικούς Μηχανικούς ΕΜΠ. Τον πρώτο για την κινητοποίηση μου και το κίνητρο που μου έδωσε για να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, αλλά και την κοινή μας πορεία στη σχολή. Τον δεύτερο για την απαραίτητη βοήθειά του στο σκέλος της στοχαστικής προσομοίωσης του ανέμου και τις πολύτιμες ιδέες του.

Για την συνεισφορά τους θέλω να ευχαριστήσω τους Νίκο Μαμάση, Γιώργο Καραβοκυρό και Αντώνη Κουκουβίνο για την κομβική τους συμβολή στα πρώτα στάδια της εργασίας και την εξοικείωση που μου προσέφεραν με βασικά εργαλεία και μεθοδολογίες σκέψης του Υδραυλικού Μηχανικού. Για τη 2^η αυτή έκδοση ευχαριστώ ιδιαίτερα το συνάδελφο Γιάννη Τσουκαλά για την πολύτιμη συνεισφορά του στη διόρθωση του κειμένου και τις μεθοδολογικές βελτιώσεις στις μοντελοποιήσεις.

Εκτός όλων των παραπάνω που συνέβαλαν στην εργασία υλικά, θέλω να ευχαριστήσω για την ηθική και συναισθηματική τους υποστήριξη τους καλούς μου φίλους Αιμίλιο, Άκη, Ανδριάννα, Γιάννη, Γιώργο, Θοδωρή, Νίκο, Παναγιώτη και Τόνια. Ευχαριστώ επίσης όλους τους συντρόφους (παλιούς και νέους) από τον Εγκέλαδο Πολιτικών Μηχανικών και τους φίλους από το www.mqn.gr γιατί αποτελούν δύο συλλογικότητες που μου έμαθαν την αξία του αγώνα και της συλλογικής δράσης.

Κλείνοντας, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους δικούς μου: τους γονείς μου Νίκο και Γεωργία, τη γιαγιά μου Μαρίνα, αλλά και την αδερφή μου Μίνα για την υπομονή τους και τη συνεχή τους στήριξη.

Παναγιώτης Δήμας

Νοέμβριος 2013, Φεβρουάριος 2014

Ευχαριστίες.....	iii
Περιεχόμενα	iv
Περίληψη (Abstract)	ix
1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Εισαγωγικό σημείωμα.....	1
1.2. Αντικείμενο της εργασίας.....	1
1.3. Σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.....	1
1.3. Διάρθρωση της εργασίας	2
2. Διαχείριση υδατικών πόρων και υδροηλεκτρική παραγωγή: Θεωρητικά στοιχεία	3
2.1. Περιγραφή θεμελιωδών εννοιών.....	3
2.1.1. Περιγραφή υδατικού ισοζυγίου	3
2.1.2. Γενικά στοιχεία σχετικά με την υδροηλεκτρική παραγωγή	5
2.2. Συστήματα υδατικών πόρων: σχηματοποίηση, ανάπτυξη πλαισίου προσομοίωσης-βελτιστοποίησης.....	7
2.2.1. Η εννοιολογική περιγραφή του συστήματος και η ανάλυση συστημάτων υδατικών πόρων	7
2.2.2. Περιγραφή της έννοιας της προσομοίωσης	7
2.2.3. Περιγραφή της έννοιας της βελτιστοποίησης.....	8
2.2.4. Εννοιολογική περιγραφή της αξιοπιστίας.....	10
2.2.5. Πρωτεύουσα & δευτερεύουσα ενέργεια.....	11
2.2.6. Το μεθοδολογικό πλαίσιο της παραμετροποίησης: η αναγκαιότητα υιοθέτησής του	15
2.3. Γενική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης: η μεγιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής	15
2.3.1. Επισκόπηση των εναλλακτικών μεθοδολογιών βελτιστοποίησης	15
2.3.2. Η περιγραφή και τα χαρακτηριστικά του προβλήματος βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής	17
2.4. Η τεχνολογία της άντλησης/ταμίευσης: θεωρητική περιγραφή	18
2.4.1. Η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας.....	18
2.4.2. Αποθήκευση πλεονάζουσας ενέργειας μέσω της αποθήκευσης σε ταμιευτήρα	19
2.5. Κύρια χαρακτηριστικά των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών έργων	20
2.5.1. Η φάση της άντλησης.....	20
2.5.2. Φάση επαναπρόσδοσης της υδραυλικής ενέργειας	21

2.5.3. Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός σε ένα αναστρέψιμο ΥΗΕ.....	22
3. Το πρόβλημα της συνδυασμένης διαχείρισης ΥΗΕ και ΑΠΕ: Θεωρητική περιγραφή, αναγκαιότητα, προκλήσεις.....	23
3.1. Η αναγκαιότητα υιοθέτησης νέων συστημάτων παραγωγής ενέργειας.....	23
3.2. Η έννοια της βιωσιμότητας και της αποανάπτυξης	25
3.3. Η εννοιολόγηση της αποανάπτυξης ενάντια στην πράσινη ανάπτυξη: το ζήτημα της ενεργειακής κατανάλωσης	26
3.4. Υβριδικά συστήματα ενέργειας: Μια εναλλακτική λύση στην κατεύθυνση της βιωσιμότητας	28
3.4.1. Θεωρητική περιγραφή υβριδικών συστημάτων.....	28
3.4.2. Εφαρμογές υβριδικών συστημάτων.....	28
3.4.3. Πλεονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων ενέργειας.....	29
3.4.4. Η περίπτωση της άντλησης/ταμείου με υβριδικό σύστημα ενέργειας.....	30
3.5. Το ζήτημα της κλίμακας στην υδροηλεκτρική παραγωγή. Η επίπτωση στα υβριδικά συστήματα	32
3.5.1. Εισαγωγή στην έννοια και τις προβληματικές της κλίμακας στον τομέα της ενέργειας....	32
3.5.2. Πεδία θεωρητικής πλάνης γύρω από την υδροηλεκτρική ενέργεια.....	35
3.6. Οι δυσκολίες και οι προβληματικές κατά τη μοντελοποίηση της συνδυασμένης διαχείρισης ΥΗΕ-ΑΠΕ: οι αυξημένες προκλήσεις του τριπτύχου παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση	40
3.6.1. Ο πολλαπλός ρόλος του νερού στο εσωτερικό ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας	40
3.6.2. Αναλογίες με τα συστήματα διαχείρισης υδατικών πόρων.....	40
3.6.3. Παράδειγμα συνδυασμένης διαχείρισης υδατικών και ενεργειακών πόρων: Υβριδικό σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας με συνδυασμό αιολικής, ηλιακής ενέργειας και άντλησης-ταμείου.....	45
3.7. Επιμέρους συμπεράσματα σχετικά με τη συνδιαχείριση υδατικών και ενεργειακών πόρων ..	47
4. Το υδροσύστημα Αλιάκμονα και το Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας.....	48
4.1. Η περιοχή του Αλιάκμονα: γενικά στοιχεία.....	48
4.2. Το Δέλτα του Αλιάκμονα.....	49
4.3. Το Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας.....	50
4.3.1. Γενικά χαρακτηριστικά.....	50
4.3.2. Γεωμορφολογικά – γεωλογικά χαρακτηριστικά	50
4.3.3. Κλιματικά χαρακτηριστικά.....	50
4.3.4. Κύριες υδρολογικές λεκάνες	52
4.3.5. Λεκάνη Αλιάκμονα	52
4.3.6. Ενεργειακή παραγωγή του υδατικού διαμερίσματος	52

4.4. Τα υδροηλεκτρικά έργα του Αλιάκμονα: Γενική περιγραφή και χαρακτηριστικά	53
4.4.1. Υδροηλεκτρικό έργο Πολυφύτου	55
4.4.2. Υδροηλεκτρικό έργο Σφηκιάς.....	56
4.4.3. Υδροηλεκτρικό έργο Ασωμάτων	58
4.4.4. Λίμνη αναρρύθμισης και ΜΥΗΕ Αγ. Βαρβάρας – ΜΥΗΕ Μακροχωρίου	59
4.4.5. Το φράγμα Ιλαρίωνα και το σχεδιαζόμενο φράγμα Ελαφίου	59
4.4. Αιολικό δυναμικό: Γενική περιγραφή και ανάλυση για την περιοχή μελέτης.....	62
4.4.1. Γενικά στοιχεία.....	62
4.4.2. Η περιοχή μελέτης	63
5. Η προσομοίωση του υδροσυστήματος Αλιάκμονα: Στοιχεία Στοχαστικής Υδρολογίας και το λογισμικό Υδρονομέας	69
5.1. Στοχαστική Υδρολογία	69
5.2. Δυναμική Hurst-Kolmogorov.....	71
5.3. Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών	73
5.3.1. Μοντέλο AR(1).....	74
5.3.2. Μοντέλο απλής ομοιοθεσίας	74
5.4. Το πρόγραμμα ΚΑΣΤΑΛΙΑ.....	76
5.5. Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ	79
5.5.1. Εισαγωγικά στοιχεία	79
5.5.2. Η αναπαράσταση του υδροσυστήματος: Επιμέρους συνιστώσες και σχηματοποίηση.....	82
5.5.3. Το σκέλος της παραμετροποίησης.....	85
5.5.4. Το σκέλος της προσομοίωσης.....	86
5.5.5. Η διαδικασία βελτιστοποίησης.....	87
5.5.6. Η ενεργειακή παραγωγή στο λογισμικό Υδρονομέας.....	89
5.6. Οι συναρτήσεις ενέργειας του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ	91
5.7. Η επιμερισμένη διαχείριση ενέργειας ενάντια στη συνολική.....	92
5.8. Υδρολογικά δεδομένα.....	95
5.9. Οι ζητήσεις νερού του υδροσυστήματος Αλιάκμονα και οι αντίστοιχοι περιορισμοί	98
5.9.1. Οι στόχοι κάλυψης του μοντέλου.....	98
5.9.2. Οι υδατικές ανάγκες της Θεσσαλονίκης και οι αρδευτικές ανάγκες του Υδατικού Διαμερίσματος.....	99
5.9.3. Υδατικές ανάγκες για την ψύξη του ατμοηλεκτρικού σταθμού Πτολεμαΐδας	100
5.9.4. Διατήρηση περιβαλλοντικής ροής	101
5.10. Τα σενάρια και οι αναλύσεις της προσομοίωσης του υδροσυστήματος Αλιάκμονα.....	101

5.11. Μοντελοποίηση υδροστροβίλων στον Υδρονομέα.....	102
5.12. Οι παραδοχές της διάταξης άντλησης.....	106
5.13. Υπολογισμός των συντελεστών μείωσης ψ και των παροχετευτικότητων.....	106
5.14. Αναλυτική μεθοδολογία και πλαίσιο παρουσίασης των σεναρίων.....	109
5.15. Αποτελέσματα αναλύσεων και επιμέρους σεναρίων.....	111
5.15.1. Σενάριο Σ1: Απουσία αντλητικής διάταξης.....	111
5.15.2. Σενάριο Σ2: Παρουσία αντλητικής διάταξης-απουσία στόχου/Sum of Generated Firm Power.....	114
5.15.3. Σενάριο Σ2: Παρουσία αντλητικής διάταξης-απουσία στόχου/Total Generated Firm Power.....	116
5.15.4. Σύγκριση σεναρίων Σ2-Σ3.....	118
5.15.5. Σενάριο Σ4: Παρουσία αντλητικής διάταξης και στόχου άντλησης/Total Generated Firm Power.....	120
5.16. Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίων και μεταξύ τους συγκρίσεις.....	123
5.16.1. Σύγκριση μεταξύ των Σ1-Σ4.....	123
5.16.2. Σύγκριση μεταξύ των Σ3-Σ4.....	125
5.16.3. Συνοπτικά αποτελέσματα του Σ1.....	127
5.16.4. Συνοπτικά αποτελέσματα του Σ2.....	128
5.16.5. Συνοπτικά αποτελέσματα του Σ3.....	129
5.16.6. Συνοπτικά αποτελέσματα του Σ4.....	130
5.17. Καμπύλη διάρκειας ζήτησης ενέργειας της εγκατάστασης άντλησης.....	131
6. Η προσομοίωση του αιολικού συστήματος: Αιολική ενέργεια και Στοχαστική Προσομοίωση της παραγωγής.....	132
6.1. Εισαγωγή στην αιολική ενέργεια.....	132
6.2. Χαρακτηριστικές καμπύλες ανεμογεννήτριας.....	134
6.3. Υπολογισμός ταχύτητας ανέμου στο ύψος τοποθέτησης.....	138
6.4. Διερεύνηση της επιρροής του χρονικού βήματος στην παραγόμενη ενέργεια.....	139
6.5. Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου: Το μοντέλο Bartlett-Lewis.....	140
6.5. Στατιστικά χαρακτηριστικά ιστορικής χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου.....	145
6.6. Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου.....	152
6.7. Προσομοίωση παραγωγής ενέργειας της ανεμογεννήτριας.....	157
7. Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος: Διατύπωση του προβλήματος και αποτελέσματα της ανάλυσης.....	161
7.1. Αρχική διατύπωση του προβλήματος σχεδιασμού.....	161
7.2. Θεώρηση-μεθοδολογία ανάλυσης και αποτελέσματα αρχικής θεώρησης.....	164

7.3. Τελική θεώρηση προβλήματος σχεδιασμού: Διατύπωση, λογικές υποθέσεις και αποτελέσματα	169
8. Συμπεράσματα & προτάσεις βελτίωσης ή μελλοντικά πεδία διερεύνησης.....	179
8.1. Συμπεράσματα από την προσομοίωση του υδροσυστήματος.....	179
8.2. Συμπεράσματα από το πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης της αιολικής παραγωγής.....	180
8.3. Συμπεράσματα από τη μεθοδολογία σχεδιασμού του υβριδικού συστήματος.....	181
8.4. Προτάσεις για περαιτέρω αναλύσεις: προτεινόμενα μεθοδολογικά πλαίσια και αναδυόμενες προβληματικές.....	181
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	183
Παράρτημα	188
Τεχνικά χαρακτηριστικά των ΥΗΕ/στοιχεία ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ	188
Πολύφυτο.....	189
Σφηκιά.....	190
Ασώματα.....	191
Στατιστικά χαρακτηριστικά χρονοσειρών.....	192
Βροχόπτωση.....	192
Απορροή	196
Εξάτμιση.....	198
Κώδικες (scripts) MATLAB™.....	200
Κώδικας (script) στην R (πρόγραμμα HYETOS-R) για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου.....	206
Υπολογιστές που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις και τις αναλύσεις της εργασίας.....	225

Η τεχνολογία άντλησης/ταμίευσης αποτελεί μια τεχνολογία με διαπιστωμένα υψηλή αποδοτικότητα που προσφέρει τη δυνατότητα ρύθμισης του ενεργειακού ισοζυγίου μέσω της αποθήκευσης ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Η αποθήκευση ενέργειας πραγματοποιείται μέσω της άντλησης νερού σε ταμειυτήρες που βρίσκονται σε υψηλότερο υψόμετρο αξιοποιώντας ενδεχόμενη περίσσεια στην παραγωγή (όπως για παράδειγμα την περίσσεια νυχτερινής παραγωγής λόγω της μειωμένης ζήτησης). Το νερό αυτό στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την κάλυψη αιχμών της ζήτησης. Η περίσσεια αυτή μπορεί να ληφθεί από άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα ενιαίο σύστημα υδροηλεκτρικών έργων-άλλων ΑΠΕ ώστε να σχηματίσουν αυτόνομα υβριδικά συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας. Ο βέλτιστος σχεδιασμός και η διαχείριση αυτών των συστημάτων απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση όπου θα αναπαρίσταται πιστά η αβεβαιότητα. Στα πλαίσια της εργασίας προτείνεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο βασισμένο στη στοχαστική προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση. Το πλαίσιο αυτό εξετάζεται σε ένα ήδη υπάρχον υδροσύστημα του ελληνικού χώρου (υδροσύστημα Αλιάκμονα), θεωρώντας συνδυασμένη λειτουργία με ένα υποθετικό αιολικό πάρκο. Για το σύνολο του συστήματος αναζητούμε το βέλτιστο σχεδιασμό ώστε να εξασφαλίσουμε την πλέον αποδοτική λειτουργία του ευρύτερου πλαισίου.

Abstract

Pumped storage is a proven technology with very high efficiency that offers a unique large-scale energy buffer. Energy storage is employed by pumping water upstream to take advantage of the excess of energy (e.g. during night) and next retrieving this water to generate hydro-power during demand peaks. This excess can be offered by other renewables, which can be integrated within hydroelectric systems with pumped storage facilities to formulate autonomous hybrid renewable energy systems (HRES). The optimal planning and management of HRES requires a holistic overview, where uncertainty is properly represented. In this context, a novel framework is proposed, based on stochastic simulation and optimization. This is tested in an existing hydrosystem of Greece, considering its combined operation with a hypothetical wind power system, for which we seek the optimal design to ensure the most beneficial performance of the overall scheme¹.

¹ Η εργασία παρουσιάστηκε υπό μορφή πόστερ στο συνέδριο της European Geosciences Union (EGU) « 5th EGU Leonardo Conference – Hydrofractals 2013 – STAHY '13, Kos Island, Greece, 17-19 October 2013»: <http://itia.ntua.gr/en/docinfo/1386/>

1. Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγικό σημείωμα

Με την ανάδυση των όψεων της οικονομικής κρίσης σε παγκόσμιο επίπεδο και ιδιαίτερα στον ελληνικό χώρο αναδεικνύεται η ανάγκη υιοθέτησης ενός μετα-εξορυκτικού μοντέλου παραγωγής ενέργειας. Η λογική αυτή προκύπτει ως ανάγκη στη βάση του μετασχηματισμού της οικονομίας με γνώμονα το σεβασμό στο περιβάλλον και τους φυσικούς πόρους. Πιο συγκεκριμένα, ο κυρίαρχος λόγος θεωρεί πως η ανθρώπινη παρέμβαση σε σχέση με το περιβάλλον δομείται με όρους εξωτερικότητας. Παραβλέπεται έτσι το γεγονός πως δεν μπορεί να υπάρξει αέναη μεγέθυνση της οικονομικής ανάπτυξης, δεδομένου ότι οι πόροι του πλανήτη είναι περιορισμένοι ενώ οι εξορυκτικές πολιτικές (ως βάση της πετρελαϊκή οικονομίας) εντείνουν το ζήτημα της εξάντλησης.

Μια εύλογη στροφή στα πλαίσια του αναγκαίου κοινωνικο-οικολογικού μετασχηματισμού είναι μια ενεργειακή πολιτική βασισμένη στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η αιολική. Για να επιτευχθεί όμως αυτή η στροφή πρέπει να διατίθεται ένα μέσο αποθήκευσης ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, ρόλο που μπορούν να αναλάβουν τα συστήματα άντλησης/ταμίευσης των υδροσυστημάτων που περιλαμβάνουν μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα. Επειδή, όμως, κάθε πολιτική διαχείρισης ενός υδροσυστήματος κρύβει πολλαπλές πολυπλοκότητες για να επιτευχθεί η ορθή μοντελοποίηση απαιτείται η χρήση ενός ολοκληρωμένου εργαλείου: τέτοιο αξιόπιστο εργαλείο είναι το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ.

1.2. Αντικείμενο της εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάδειξη του θεωρητικού πλαισίου και των προβληματικών που παρουσιάζει η συνδυασμένη διαχείριση υδροηλεκτρικής-αιολικής ενέργειας μέσω κατάλληλης υπολογιστικής μεθοδολογίας. Η μεθοδολογία εν συντομία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο επιμέρους ενότητες: την προσομοίωση του υδροσυστήματος και την ανάπτυξη του πλαισίου στοχαστικής προσομοίωσης της παραγωγής αιολικής ενέργειας. Στη συνέχεια αναζητείται μια μεθοδολογία σχεδιασμού του συνδυασμένου συστήματος που να απαντά στα ερωτήματα που τίθενται δεδομένων των εγγενών προκλήσεων που προκύπτουν από την ανάγκη περαιτέρω διείσδυσης των ΑΠΕ..

Η ουσιαστική πρόκληση της παρούσας εργασίας είναι επομένως η ακριβής αναπαράσταση των εγγενών αβεβαιοτήτων της υδροηλεκτρικής και της αιολικής παραγωγής καθώς και η κατάλληλη παραμετροποίηση της λογικής σχεδιασμού του υβριδικού συστήματος. Μέσα από την ανάπτυξη του πλαισίου προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα γύρω από τη δυνατότητα συγκρότησης και πλατιάς διείσδυσης τέτοιων συστημάτων.

1.3. Σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος

Σημεία όπου ο αναγνώστης της διπλωματικής εργασίας μπορεί να δώσει ιδιαίτερη προσοχή είναι:

- Η επιρροή του συστήματος άντλησης/ταμίευσης στην συνολική ενεργειακή παραγωγή του υδροσυστήματος του Αλιάκμονα.

- Οι προκλήσεις που εγείρονται κατά την ανάπτυξη του πλαισίου στοχαστικής προσομοίωσης του ανέμου και της αιολικής ενεργειακής παραγωγής.
- Η αναπαραγωγή της διαλείπουσας συμπεριφοράς του ανέμου μέσω κατάλληλου στοχαστικού μοντέλου και η αξιοποίηση της εμπειρίας από αντίστοιχα υδρολογικά μοντέλα.
- Το ζήτημα του ποσοστού λειτουργίας των αντλιών εντός της ημέρας καθώς και η επίπτωση που έχει η μεταβολή της ζήτησης τις νυχτερινές ώρες στο συνολικό σχεδιασμό.

Κάθε σενάριο διαχείρισης και σχεδιασμού υλοποιείται μέσω στοχαστικής προσομοίωσης, εφόσον όλα τα δεδομένα εισόδου είναι συνθετικές χρονοσειρές με μήκος 1000 έτη.

1.3. Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία αποτελείται από 8 κεφάλαια και το παράρτημα. Στη συνέχεια περιγράφεται το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί ουσιαστικά την εισαγωγή και περιγράφει τις προκλήσεις και τα ουσιαστικά ερωτήματα της εργασίας, καθώς και το αντίστοιχο μεθοδολογικό πλαίσιο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται στη διαχείριση υδατικών πόρων, ενώ παράλληλα αναλύονται οι διαδικασίες της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης. Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφεται η διαδικασία άντλησης-ταμίευσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται σε δύο παράλληλους άξονες το θεωρητικό πλαίσιο γύρω από την ανάγκη της στροφής προς τις ΑΠΕ και οι προβληματικές γύρω από την κοινή διαχείριση ΥΗΕ-ΑΠΕ με το ζήτημα της κλίμακας και της αποθήκευσης ενέργειας να παίζουν πρωτεύοντα ρόλο.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιέχει την αναλυτική περιγραφή της περιοχής μελέτης, δηλαδή τον ποταμό Αλιάκμονα και τα ΥΗΕ του, αλλά και του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας συνολικότερα. Επιπλέον, εξηγείται ο τρόπος επιλογής των δεδομένων σχετικά με τον άνεμο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται το συνολικό μεθοδολογικό πλαίσιο του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, ενώ αξιολογούνται και όλα τα δεδομένα: υδρολογικά αλλά και τεχνικά (όπως τα χαρακτηριστικά των ΥΗΕ). Τέλος, περιγράφονται όλα τα σενάρια προσομοίωσης του υδροσυστήματος ενώ αναλύονται και τα αποτελέσματά τους.

Το έκτο κεφάλαιο αφιερώνεται στην περιγραφή του πλαισίου στοχαστικής προσομοίωσης της αιολικής ενεργειακής παραγωγής αφού έχει προηγηθεί μια εισαγωγή στην αιολική ενέργεια.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύεται η λογική γύρω από το σχεδιασμό του υβριδικού συστήματος αιολικής-υδροηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της παρουσίασης των αποτελεσμάτων κάθε επιμέρους σεναρίου.

Στο παράρτημα δίνονται κάποια επιπλέον στοιχεία που παραλήφθηκαν για λόγους συντομίας από το κυρίως κείμενο: τεχνικά στοιχεία των ΥΗΕ, στατιστικά χαρακτηριστικά ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών και στοιχεία σχετικά με το υπολογιστικό σκέλος της προσομοίωσης.

2. Διαχείριση υδατικών πόρων και υδροηλεκτρική παραγωγή: Θεωρητικά στοιχεία

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα επιδιωχθεί η επεξήγηση κάποιων βασικών εννοιών γύρω από το γενικό πλαίσιο διαχείρισης των υδατικών πόρων. Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται και περιγράφονται οι σχέσεις που αφορούν το υδατικό ισοζύγιο, την υδροηλεκτρική παραγωγή, το μεθοδολογικό πλαίσιο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης, την παραμετροποίηση ενός υδροσυστήματος. Ως κομβικό σημείο αναδεικνύεται η στρατηγική αντιμετώπισης του προβλήματος βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής μέσα από τη λογική της βελτιστοποίησης. Έννοιες που βοηθούν την αντιμετώπιση προς αυτή την κατεύθυνση, όπως η αξιοπιστία των υδροσυστημάτων και η διάκριση της ενέργειας σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα, επίσης εξετάζονται στην παρούσα ενότητα.

2.1. Περιγραφή θεμελιωδών εννοιών

2.1.1. Περιγραφή υδατικού ισοζυγίου

Η αναφορά του υδατικού ισοζυγίου γίνεται σε επίπεδο ταμιευτήρα. Με τον όρο αυτό εννοείται η βασική σχέση περιγραφής του αποθέματός του και προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας (ισοζύγιο μάζας):

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (2.1)$$

όπου:

- $S(t)$: το απόθεμα του ταμιευτήρα σε κάθε χρονικό βήμα, t .
- $\frac{dS}{dt}$: ο ρυθμός μεταβολής του αποθέματος.
- $I(t)$: οι συνολικές εισροές στον ταμιευτήρα.
- $O(t)$: οι συνολικές εκροές του ταμιευτήρα.

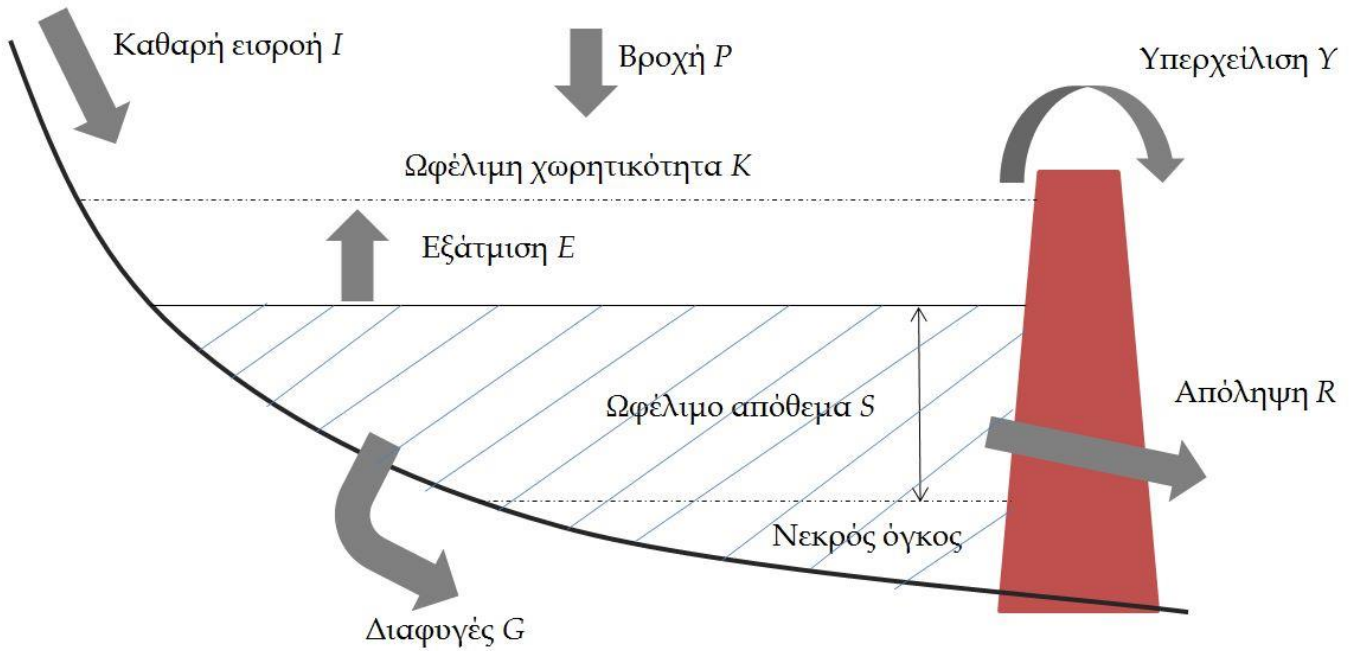
Οι εισροές και οι εκροές στο συγκεκριμένο ισοζύγιο εκφράζονται σε μονάδες παροχής, όπως και ο ρυθμός μεταβολής του αποθέματος.

Οι εισροές αποτελούνται από:

- i. Την απορροή I της ανάντη λεκάνης, οι συνιστώσες της οποίας μπορούν να είναι επιφανειακές (ρέματα, ποταμοί) ή υπόγειες (υδροφορείς). Η ανάντη λεκάνη αναφέρεται στον συγκεκριμένο ταμιευτήρα.
- ii. Την κατακρήμνιση P στην επιφάνεια του ταμιευτήρα (βροχόπτωση, χιονόπτωση).

Οι εκροές αποτελούνται από:

- i. Την εξάτμιση E από την υδάτινη επιφάνεια του ταμιευτήρα.
- ii. Τις ενδεχόμενες υπόγειες διαφυγές G , οι οποίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφή των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής (υδροφορέας με μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα ή εξαιρετική υδατοπερατότητα, όπως οι καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι).
- iii. Τις κατάντη απορροές: υπερχειλίσεις του ταμιευτήρα $Υ$, απολήψεις από τον ταμιευτήρα R .



Εικόνα 2-1: Διάγραμμα των συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου για ένα μεμονωμένο ταμιευτήρα (Πηγή: Κουτσογιάννης 2000, τροποποίηση Μπουζιώτας, 2012)

Όλες οι συνιστώσες που περιγράφηκαν παραπάνω φαίνονται σχηματικά στην Εικόνα 2-1. Μετά από διακριτοποίηση της εξίσωσης (2.1) προκύπτει η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου όπως συνηθίζεται να χρησιμοποιείται στα προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων, στη γενική της μορφή:

$$S_{t+1} = S_t + I_t + P_t - G_t - E_t - O_t \quad (2.2)$$

όπου:

- S_{t+1} : το απόθεμα στη χρονική στιγμή t+1.
- S_t : το απόθεμα στη χρονική στιγμή t.
- I_t, P_t, G_t, E_t, O_t : ο αντίστοιχος όγκος νερού (ανά αναφερόμενο μέγεθος) που διήλθε από τον ταμιευτήρα στο χρόνο t.

Η χρήση της εξίσωσης (2.2) προϋποθέτει τον παράλληλο συνυπολογισμό λειτουργικών και φυσικών περιορισμών:

- Περιορισμός χωρητικότητας του ταμιευτήρα:

$$S_{\min} \leq S_t \leq K \quad (2.3)$$

όπου S_{\min} ο νεκρός όγκος του ταμιευτήρα και K η ωφέλιμη χωρητικότητα.

- Περιορισμός που προκύπτει από την παροχευτικότητα των αγωγών προσαγωγής:

$$0 \leq R_t \leq R_{\max} \quad (2.4)$$

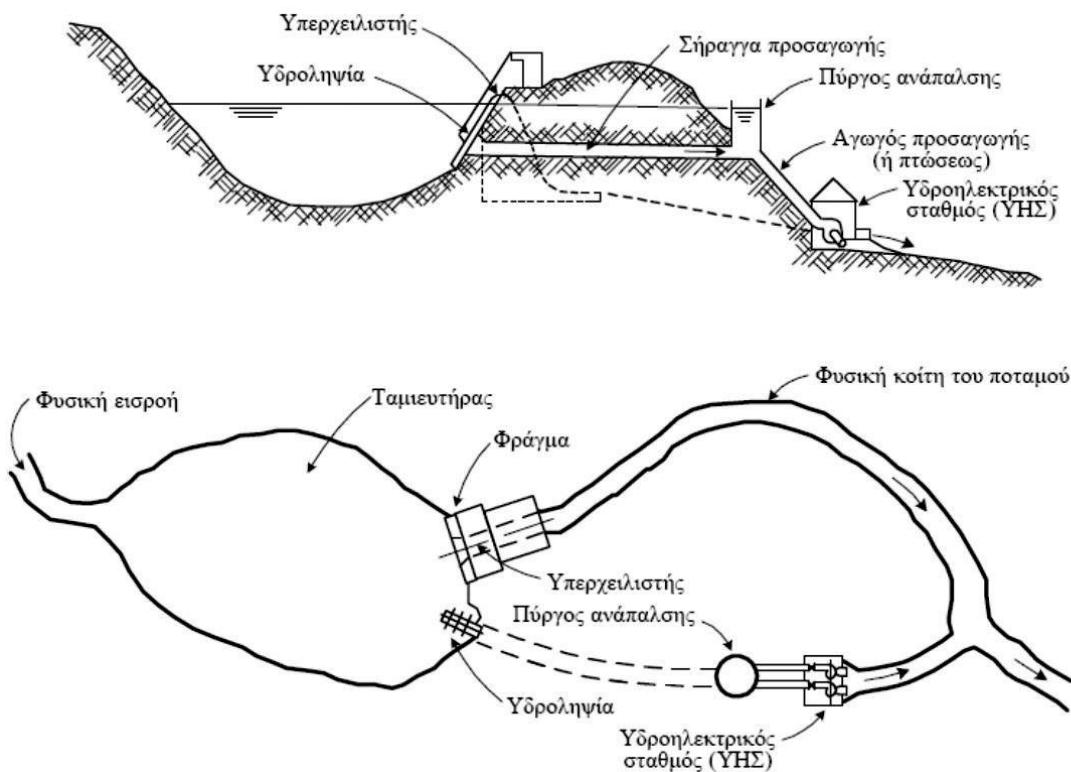
όπου R_{\max} η εν λόγω παροχευτικότητα.

Στην περίπτωση ενός υδροσυστήματος το οποίο συναποτελείται από πολλούς επιμέρους ταμιευτήρες, παρά την φαινομενική πολυπλοκότητα, η αλληλεπίδρασή τους ανάγεται σε συνδυασμούς της απλής εξίσωσης (2.2).

2.1.2. Γενικά στοιχεία σχετικά με την υδροηλεκτρική παραγωγή

Υδροηλεκτρική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια του νερού το οποίο, μέσω υδατοπτώσεων κινεί υδροστροβίλους για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Μαμάσης, 2012). Η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας πραγματοποιούνταν από την αρχαιότητα μέσω των υδρόμυλων για το άλεσμα των δημητριακών και την κοπή ξυλείας (υδροπρίονα).

Στην περίπτωση ενός ταμιευτήρα η εκμετάλλευση αφορά το μεγάλο διαθέσιμο όγκο νερού που βρίσκεται αποθηκευμένος σε ένα μεγάλο ύψος. Η δυναμική ενέργεια του νερού δηλαδή μετατρέπεται σε κινητική και κατόπιν σε ηλεκτρική μέσω του (ή των) υδροστροβίλου (-ων). Για τη μεταφορά του νερού από τον ταμιευτήρα στη μονάδα υδροστροβίλων υπεύθυνος είναι ο αγωγός προσαγωγής. Η προσαγωγή αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί από έναν ή και περισσότερους αγωγούς, ωστόσο στα υπολογιστικά μοντέλα όλοι αυτοί αντικαθίστανται με έναν ισοδύναμη παροχετευτικότητας. Η σχηματοποίηση της περιγραφόμενης διάταξης εικονίζεται στο ακόλουθο σκαρίφημα (Εικόνα 2-2).



Εικόνα 2-2: Σχηματοποίηση διάταξης υδροηλεκτρικού έργου. Διακρίνονται οι βασικές μονάδες που το συναποτελούν: έργα ΠΜ και ΗΜ (Παπαντώνης, 2008)

Η βασική σχέση της υδροηλεκτρικής παραγωγής είναι η ακόλουθη:

$$E_t = \psi \cdot V_t \cdot H_t \quad (2.5)$$

όπου:

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

Οι συνήθεις μονάδες των προαναφερθέντων μεγεθών στο μηνιαίο χρονικό βήμα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2-1: Συνήθεις μονάδες μεγεθών που υπεισέρχονται στη βασική σχέση υδροηλεκτρικής παραγωγής (Καραβοκυρός-Ευστρατιάδης-Βαζίμας, 2007)

E_t	V_t	H_t	ψ
GWh	hm ³	m	GWh/hm ⁴

Η εξίσωση (2.5) προκύπτει από μετασχηματισμό της σχέσης παροχής-ισχύος ενός στρόβιλου:

$$I = \gamma \cdot Q \cdot H \cdot n \quad (2.6)$$

$$H_n \quad (2.7)$$

όπου $\gamma = \rho \cdot g$ το ειδικό βάρος του νερού, ρ η πυκνότητά του και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η ειδική ενέργεια ψ εκφράζεται ως συνάρτηση του συντελεστή ισχύος του υδροστροβίλου n και των ολικού και καθαρού υψών πτώσης H , H_n αντίστοιχα:

$$\psi = 0.2725 \cdot n \cdot \frac{H_n}{H} \quad (2.8)$$

$$H_n = H \quad (2.9)$$

Το καθαρό ύψος πτώσης προκύπτει μέσω της αφαίρεσης γραμμικών και τοπικών απωλειών (h_f, h_t αντίστοιχα) του αγωγού προσαγωγής από το ολικό ύψος πτώσης.

Στην περίπτωση άντλησης νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (2.5), με διαφοροποιημένες τις εκφράσεις ειδικής ενέργειας ψ και καθαρού ύψους H_n ως ακολούθως:

$$\psi = \frac{0.2725}{n} \cdot \frac{H_n}{H} \quad (2.10)$$

$$H_n = H + h_f + h_t \quad (2.11)$$

Τελικά, μετά το σύνολο των ανωτέρω επεξεργασιών καταλήγουμε σε μία σχέση της ειδικής ενέργειας ως συνάρτηση του ύψους πτώσης, $\psi = f(H)$, θεωρώντας μια μονοσήμαντη σύνδεση παροχής-ύψους πτώσης. Η εκτίμηση της εν λόγω συνάρτησης γίνεται μέσω κατάλληλων υδραυλικών υπολογισμών και αποτελεί ταυτοτικό χαρακτηριστικό του συστήματος αγωγός προσαγωγής-μονάδα παραγωγής ενέργειας (υδροστρόβιλοι). Η τιμή 0.2725 που εμφανίζεται στις σχέσεις (2.8) & (2.10) αποτελεί την οριακή τιμή της ειδικής ενέργειας όπως εμφανίζεται σε ένα υποθετικό σύστημα μηδενικών απωλειών και μέγιστης απόδοσης ($n = 1, H_n = H$).

2.2. Συστήματα υδατικών πόρων: σχηματοποίηση, ανάπτυξη πλαισίου προσομοίωσης-βελτιστοποίησης

2.2.1. Η εννοιολογική περιγραφή του συστήματος και η ανάλυση συστημάτων υδατικών πόρων

Σύμφωνα με τον ορισμό των Mays and Tung (1992, σ. 8) σύστημα καλείται ένα σύνολο ανεξάρτητων μεταξύ τους στοιχείων, το οποίο χαρακτηρίζεται από: (α.) ένα σύνορο που καθορίζει αν το στοιχείο ανήκει στο σύστημα ή το περιβάλλον, (β.) αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον (είσοδοι και έξοδοι), και (γ.) σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του και των εισόδων και εξόδων. Ως υδροσύστημα (hydrosystem) νοείται ένα σύστημα αποτελούμενο από φυσικά υδάτινα σώματα και τεχνικά έργα, που συνεργαζόμενα εξυπηρετούν έναν ή περισσότερους σκοπούς, με την παράλληλη τήρηση μιας σειράς περιορισμών (Ευστρατιάδης et al., 2007). Η μελέτη που σχετίζεται με την επεξεργασία και την μοντελοποίηση ενός υδροσυστήματος αφορά τον κύκλο φυσική προσφορά, αποθήκευση, μεταφορά και κατανάλωση νερού, που περιλαμβάνει τις συνιστώσες του φυσικού περιβάλλοντος (λεκάνες απορροής, ποτάμια, υδροφορείς, κλπ.) και τα σχετιζόμενα υδραυλικά έργα (ταμιευτήρες, υδραγωγεία, αντλιοστάσια, γεωτρήσεις, κλπ.), χωρίς ωστόσο να εκτείνεται στη λεπτομέρεια των υδρευτικών ή αρδευτικών δικτύων διανομής.

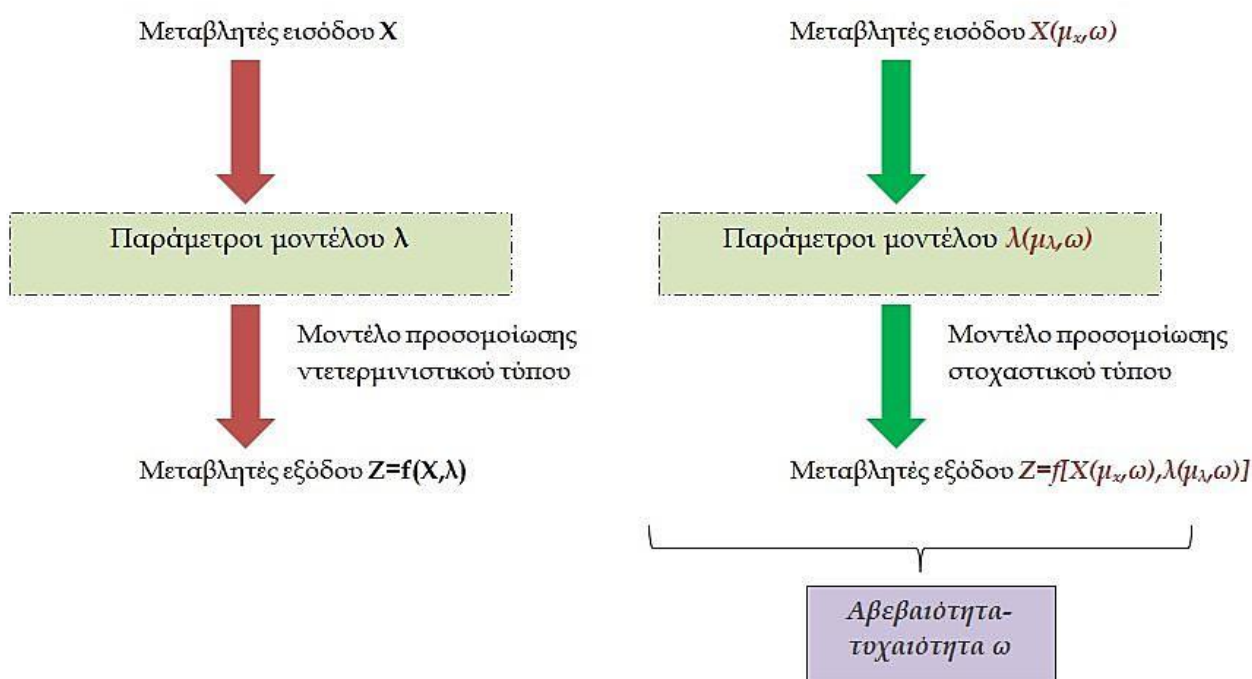
Η προαναφερθείσα διαδικασία και αφαιρετική μεθοδολογία συνήθως είναι αρκετά πολύπλοκη και σύνθετη. Η συνθετότητα των διαχειριστικών προβλημάτων οφείλεται σε μια πληθώρα παραγόντων, όπως η μη γραμμική δυναμική των φυσικών διεργασιών, η ανάγκη ταυτόχρονης ικανοποίησης πολλαπλών και, συχνά, αντικρουόμενων στόχων και περιορισμών, που επιβάλλονται από ομάδες με διαφορετικά συμφέροντα, η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη των υδρολογικών εισροών και, σε μικρότερο βαθμό, της ζήτησης, καθώς και η ανάγκη συγκερασμού της οικονομικότητας και του ρίσκου, και μάλιστα σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Τα παραπάνω επιβάλλουν μια συστημική προσέγγιση στη λήψη των αποφάσεων (Grigg, 1996), που επιτυγχάνεται με τη χρήση εξελιγμένων εργαλείων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης.

2.2.2. Περιγραφή της έννοιας της προσομοίωσης

Ως προσομοίωση (simulation) ορίζεται η τεχνική μίμησης της λειτουργίας ενός πραγματικού συστήματος, όπως αυτό εξελίσσεται στον χρόνο (Winston, 1994). Η εν λόγω μίμηση πραγματοποιείται μέσω ενός μοντέλου προσομοίωσης (simulation model) το οποίο είναι εν γένει αφαιρετικό, εφόσον λαμβάνει υπόψη μόνο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συστήματος, ενώ παράλληλα η σχηματοποίησή του είναι αντιπροσωπευτική. Η έκφραση του μοντέλου συνήθως γίνεται μέσω ενός συνόλου υποθέσεων σχετικά με την δυναμική λειτουργία ενός συστήματος, εκφρασμένων με τη μορφή μαθηματικών ή λογικών σχέσεων και κωδικοποιημένων, συνήθως, σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού (Κουτσογιάννης, 2000).

Με βάση τα παραπάνω, ένα μοντέλο θα έπρεπε να αναπαράγει πιστά τα χαρακτηριστικά της απόκρισης του πραγματικού συστήματος. Ωστόσο, στην πράξη το μοντέλο διαφοροποιείται ή αποκλίνει από την πραγματικότητα λόγω των σφαλμάτων και των αβεβαιοτήτων που εξ ορισμού υπεισέρχονται στις μαθηματικές εκφράσεις των παραμέτρων του. Αν ένα μοντέλο χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της απόκρισης ενός πραγματικού συστήματος στο μέλλον, τότε έχουμε τη λειτουργία ενός εργαλείου πρόγνωσης (forecast).

Τα μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες: τα (α.) ντετερμινιστικά και τα (β.) στοχαστικά. Όπως εικονίζεται και στο ακόλουθο σχήμα (Εικόνα 3) η διαφοροποίηση αυτή βασίζεται στο χαρακτήρα των παραμέτρων του μοντέλου, αλλά και των μεγεθών εισόδου ή απόκρισης. Στα μεν ντετερμινιστικά οι παράμετροι και οι εισοδοί (inputs) του μοντέλου είναι συγκεκριμένες, αυστηρά ορισμένες τιμές. Στα δε στοχαστικά, όλα τα μεγέθη που υπεισέρχονται στην ανάλυση είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν ένα φάσμα κατανομών πιθανοτήτων. Ένα πρόβλημα διαχείρισης υδατικών πόρων (όπως η υδροηλεκτρική παραγωγή ενός υδροσυστήματος) είναι εξ ορισμού μη ντετερμινιστικό. Αβεβαιότητες υπεισέρχονται τόσο στο σκέλος των χαρακτηριστικών των δεδομένων τεχνικών έργων (για παράδειγμα η ειδική ενέργεια ψ του υδροτροβίλου στον ταμιευτήρα του Πολυφύτου), όσο και στο σκέλος των μεγεθών υδρολογικού χαρακτήρα (όπως είναι η βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα ή η απορροή της ανάντη λεκάνης). Στη συγκεκριμένη περίπτωση η στοχαστική προσομοίωση είναι συγκριτικά περισσότερο ασφαλής μιας και μας κατευθύνει στην αντιπαράθεση με ζητήματα όπως η διαχείριση της αβεβαιότητας και η αποτίμηση του ρίσκου (ως μη δυνατότητα κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης). Αυτή η μεθοδολογία καλείται στοχαστική προσομοίωση (stochastic simulation) και συναντάται σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, ενώ είναι γνωστή και ως μέθοδος Monte Carlo (Κουτσογιάννης, 2000).



Εικόνα 2-3: Σύγκριση ντετερμινιστικού-στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης. Στο στοχαστικό μοντέλο οι παράμετροι εισόδου είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κάποια στατιστική κατανομή. Επομένως και οι παράμετροι εξόδου είναι τυχαίες με ανάλογη συμπεριφορά, ως συναρτήσεις των αντίστοιχων μεταβλητών εισόδου.

2.2.3. Περιγραφή της έννοιας της βελτιστοποίησης

Όπως σε όλα τα προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων, έτσι και στο πρόβλημα ορθολογικής διαχείρισης της υδροηλεκτρικής παραγωγής ενός υδροσυστήματος απαιτείται μια διαδικασία βελτιστοποίησης. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει διαδοχή από εναλλακτικές

αποφάσεις (decisions) και αξιολογήσεις (evaluations) των επιπτώσεων κάθε απόφασης (Ευστρατιάδης et al., 2007). Κάθε τέτοιου τύπου προσέγγιση απαιτεί αλγορίθμους και τεχνικές αναζήτησης των βέλτιστων (optimal) λύσεων σε συνδυασμό με ένα μέτρο επίδοσης (performance measure) που να τις αξιολογεί.

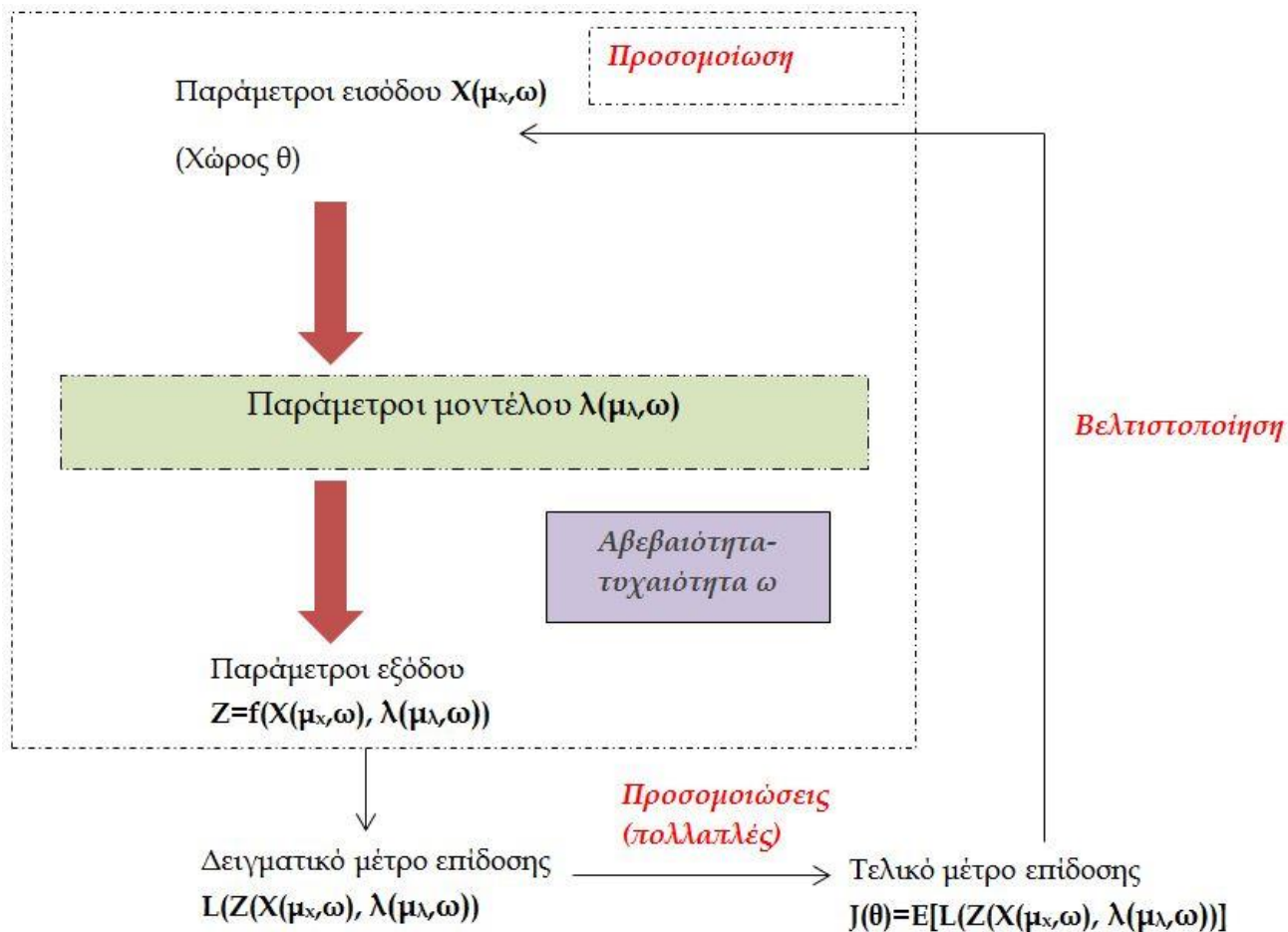
Η συστηματοποίηση των προαναφερθεισών τεχνικών ονομάζεται βελτιστοποίηση (optimisation). Για το λόγο αυτό, η ανάλυση συστημάτων έχει πρακτικά ταυτιστεί με τον γενικότερο όρο βελτιστοποίηση (optimisation), που χρησιμοποιείται τόσο σε πραγματικές εφαρμογές όσο και σε μαθηματικά προβλήματα, για να υποδηλώσει μια διαδικασία συστηματικής αναζήτησης της μέγιστης ή, ανάλογα με τη διατύπωση του προβλήματος, ελάχιστης τιμής μιας στοχικής συνάρτησης¹ (objective function) ως προς τις μεταβλητές ελέγχου της (control variables). Η εν λόγω διαδικασία εικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 2-4.



Εικόνα 2-4: Σχηματοποίηση της βελτιστοποίησης και των επιμέρους συνιστωσών της (Μπουζιώτας 2012, μετά από τροποποίηση)

Η προσέγγιση που ακολουθούσαν μέχρι πρότινος αρκετά εγχειρίδια γύρω από τη διαχείριση υδατικών πόρων και την ανάλυση συστημάτων θεωρούσαν την προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση ως δύο διακριτές διαδικασίες με τις δικές τους ιδιαιτερότητες και ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Στην προσομοίωση επιδιώκεται η πιστή αναπαράσταση των διεργασιών του συστήματος, κάτι που μεταφράζεται σε μεγάλο υπολογιστικό φόρτο και αδυναμία εύρεσης της βέλτιστης διαχειριστικής πολιτικής. Αντίθετα, η βελτιστοποίηση τείνει να απλοποιεί τη σχηματοποίηση του προβλήματος υιοθετώντας απλοποιητικές μεθοδολογίες και προσεγγίσεις (Ευστρατιάδης et al., 2007).

Η μεθοδολογία του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ αίρει αυτό το διαχωρισμό μιας και βασίζεται στη διαδικασία της στοχαστικής βελτιστοποίησης (stochastic optimization). Επιτυγχάνει δηλαδή τη σύζευξη της προσομοίωσης με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης: τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βοηθούν στην αποτίμηση της στοχικής συνάρτησης, ενώ μερικές εκ των παραμέτρων της προσομοίωσης αξιοποιούνται από το σύστημα ως μεταβλητές ελέγχου της βελτιστοποίησης (Μπουζιώτας, 2012). Η εν λόγω σύζευξη που διαμορφώνει το πλαίσιο προσομοίωση-βελτιστοποίηση (simulation-optimisation) διακρίνεται σχηματικά στην εικόνα 2-5.



Εικόνα 2-5: Σύζευξη μεθοδολογίας προσομοίωσης και βελτιστοποίησης (Fu and Hu, 1997. Τροποποίηση Μπουζιώτας, 2012)

2.2.4. Εννοιολογική περιγραφή της αξιοπιστίας

Ένα εξαιρετικά κρίσιμο χαρακτηριστικό ενός συστήματος υδατικών πόρων είναι η αξιοπιστία (reliability), ορίζεται ως η πιθανότητα επίτευξης μιας συγκεκριμένης επίδοσης για καθορισμένο χρονικό διάστημα και καθορισμένες συνθήκες (Chow et al., 1988, σ. 434). Συμπληρωματική της έννοιας της αξιοπιστίας είναι η πιθανότητα αστοχίας που ορίζεται ως:

$$\alpha = P(X < x^*) \quad (2.12)$$

όπου X τυχαία μεταβλητή που εκφράζει ένα ποσοτικό μέτρο επίδοσης του συστήματος (π.χ. απόληψη, παραγωγή ενέργειας) και x^* η επιθυμητή τιμή (τιμή-στόχος) της εν λόγω επίδοσης. Τονίζεται ότι η επίδοση του συστήματος θεωρείται τυχαία μεταβλητή, καθώς είναι συνάρτηση των υδρολογικών εισροών, που είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές (Koutsoyiannis, 2004).

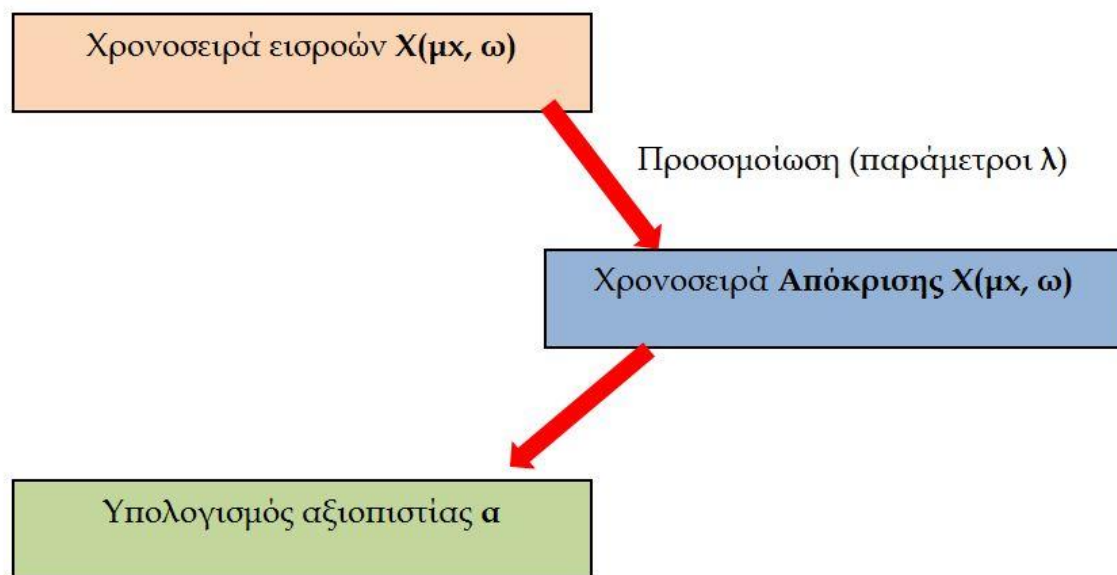
Στα πλαίσια της εν λόγω εργασίας η αξιοπιστία αφορά τη δυνατότητα κάλυψης ενός στόχου παραγωγής ενέργειας (και σε μεταγενέστερο στάδιο τη δυνατότητα κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης) και όχι την ασφαλή απόληψη (safe yield). Ειδικότερα, η έννοια της αξιοπιστίας διευρύνεται για να συμπεριλάβει την αξιόπιστη επίδοση του συστήματος: είναι η τιμή στόχος x^* που το σύστημα δύναται να αποδώσει για ένα συγκεκριμένο επίπεδο (π.χ. 99%, 97%, 95%):

$$\alpha^* = P(X \geq x^*) \quad (2.13)$$

Αν η χρονοσειρά απόκρισης του συστήματος παράγει n' πλήθος τιμών που ικανοποιούν την κάλυψη ενός ενεργειακού στόχου και n το μήκος της χρονοσειράς, τότε η αξιοπιστία μπορεί να εκφραστεί ως η σχετική συχνότητα:

$$a = \frac{n'}{n} \quad (2.14)$$

Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η έννοια της αξιοπιστίας όπως ερμηνεύεται στα πλαίσια της εν λόγω εργασίας πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω οι έννοιες της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας, μιας και το βασικό μεθοδολογικό πλαίσιο αφορά την κάλυψη μηνιαίων ενεργειακών στόχων και ζητήσεων ενέργειας.



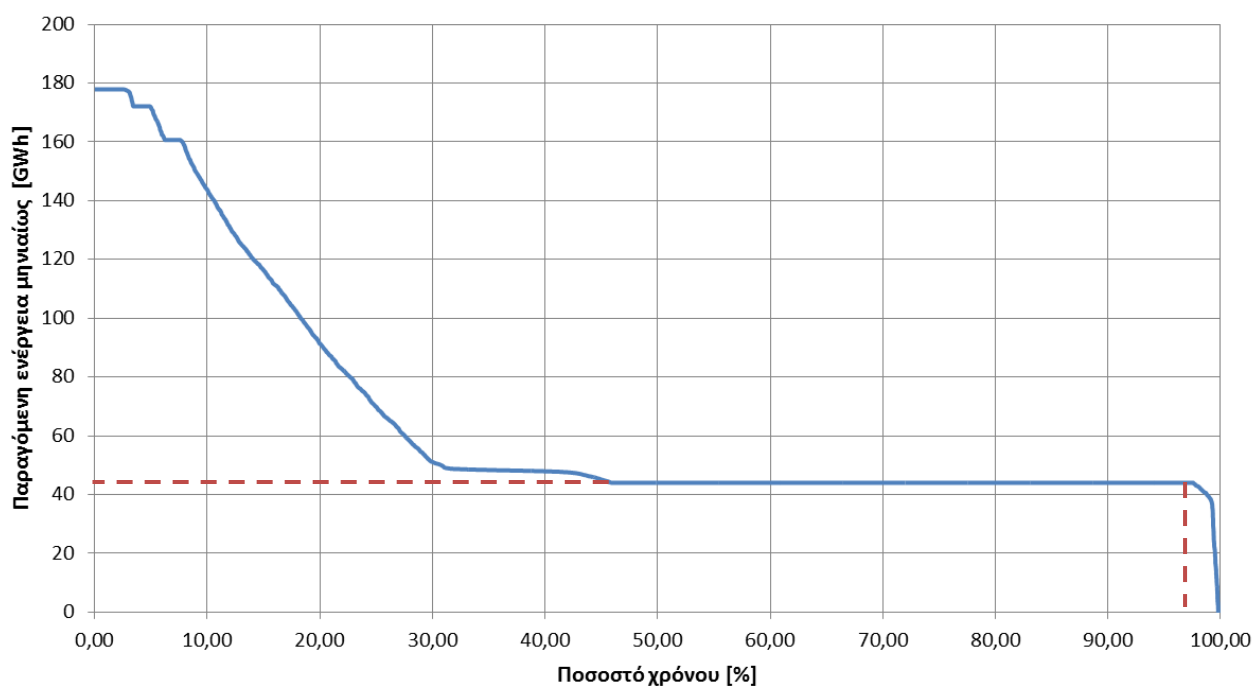
Εικόνα 2-6: Σχηματοποίηση διαδικασίας υπολογισμού αξιοπιστίας. Στο εν λόγω πρόβλημα χρονοσειρά απόκρισης είναι η παραγόμενη ενέργεια του συστήματος (ανά ταμειωτήρα και συνολικά).

2.2.5. Πρωτεύουσα & δευτερεύουσα ενέργεια

Πρωτεύουσα ενέργεια (*firm energy*) λέγεται η εξασφαλισμένη υδροηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί με τις δυσμενέστερες υδρολογικές συνθήκες για την κάλυψη των αναγκών της κατανάλωσης. Κάθε παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια επιπλέον της πρωτεύουσας καλείται δευτερεύουσα (Μακρόπουλος, 2012). Η πρωτεύουσα ενέργεια, επομένως, εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι:

- Η στοχαστική φύση των εισροών στους ταμειωτήρες και η αβεβαιότητα των υδρολογικών φαινομένων εν γένει.
- Η ρυθμιστική ικανότητα του συστήματος.
- Το αποδεκτό (από πλευράς διαχειριστή του συστήματος) επίπεδο διακινδύνευσης στην παραγωγή ενέργειας.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζεται η πρωτεύουσα ενέργεια που παράγει το υδροσύστημα για ένα δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας. Η έννοια της πρωτεύουσας ενέργειας διακρίνεται σχηματικά στην εικόνα 2-7.



Εικόνα 2-7: Η καμπύλη διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας ενός ΥΗΕ. Η πρωτεύουσα ενέργεια είναι 44 GWh και το επίπεδο αξιοπιστίας 96% (το χρονικό επίπεδο αναφοράς είναι μηνιαίο).

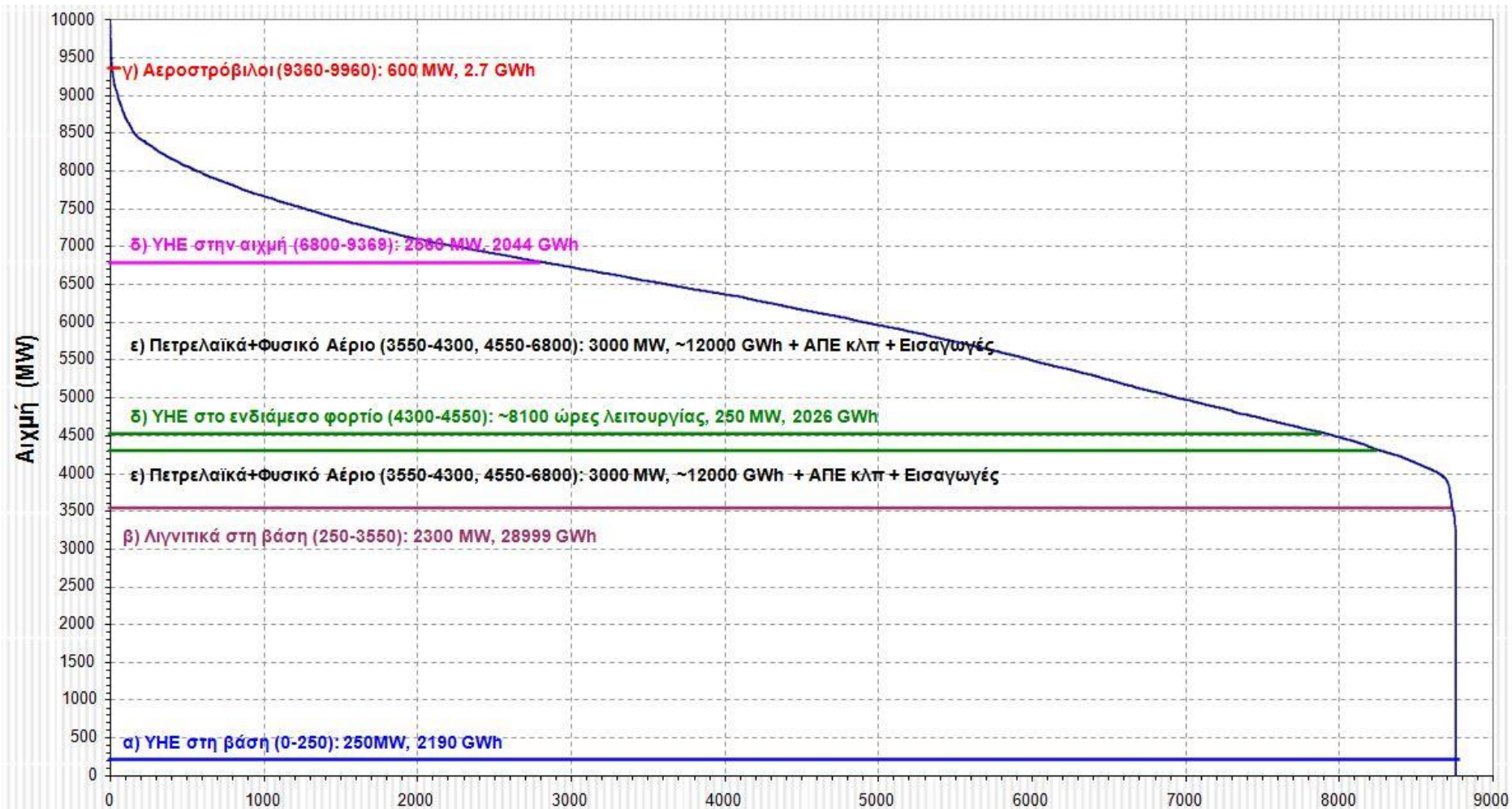
Μια επιπλέον διάκριση βαρύνουσας σημασίας είναι αυτή ανάμεσα σε ενέργεια βάσης και ενέργεια αιχμής. Ενέργεια αιχμής θεωρείται αυτή που ζητείται σε περιόδους έντονης ζήτησης ενέργειας, ενώ ενέργεια βάσης είναι αυτή που καλύπτει την ελάχιστη, συνεχή ζήτηση. Η ελληνική πρακτική θέλει τις θερμοηλεκτρικές μονάδες (που χρειάζονται μεγάλους χρόνους για να εκκινήσουν) να λειτουργούν ως έργα βάσης και τα ΥΗΕ να λειτουργούν στις αιχμές της ζήτησης: η πρωτεύουσα υδροηλεκτρική ενέργεια καλύπτει αιχμές (ή μέρος των αιχμών) της ζήτησης. Στην εικόνα 2-8 διακρίνεται η καμπύλη διάρκειας φορτίου για το 2006 με τα αντίστοιχα επιμέρους έργα που λειτουργούν στην αιχμή και τη βάση (Στεφανάκος, 2012).

Η προαναφερθείσα παραδοχή δεν βλάπτει τη γενικότητα, εφόσον η διάκριση ανάμεσα σε αιχμή και βάση γίνεται σε λεπτότερες κλίμακες (ωριαία, ημερήσια) απ' ό,τι η διερεύνηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής ενός υδροσυστήματος (ετήσια ή μηνιαία κλίμακα). Επομένως, η διάκριση σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ενέργεια δεν σχετίζεται με την πολιτική διαχείρισης των υδροηλεκτρικών έργων από πλευράς παρόχου (έργο αιχμής ή βάσης). Σε άλλες χώρες, όπου υπάρχει πολύ μεγαλύτερο υδροδυναμικό προς αξιοποίηση τα υδροηλεκτρικά μπορούν να λειτουργήσουν ως έργα βάσης. Στον πίνακα 2-2 διακρίνεται συνοπτικά το ενεργειακό ισοζύγιο για το 1998 με τις ανάλογες διαφοροποιήσεις στην κατανάλωση των διαφόρων μορφών ενέργειας.

Η συμβολή του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ στη δυνατότητα συνολικής διαχείρισης της παραγωγής ενέργειας ενός υδροσυστήματος είναι καθοριστική μιας και μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων σχετικά με τη δυνατότητα κάλυψης των αιχμών της ενεργειακής ζήτησης. Δεδομένης της πολυπλοκότητας των εν λόγω συστημάτων, αλλά και της απαίτησης αυξανόμενης διείσδυσης των ΑΠΕ στο σύστημα, η ενίσχυση του ρόλου τέτοιων εργαλείων είναι σίγουρα επιβεβλημένη.

Πίνακας 2-2: Συνοπτικό Ενεργειακό Ισοζύγιο, 1998 (Πηγή: Κορωνάιος, 2012)

Ισοζύγιο (τόνοι ισοδύναμοι του πετρελαίου)	Λιγνίτης, Λιθάνθρακας	Πετρέλαιο και προϊόντα του	Φυσικό αέριο	Υδροηλεκτρική ενέργεια	Βιομάζα, Ηλιακή, Αιολική ενέργεια, κτλ.	Ηλεκτρική ενέργεια	Σύνολο
Πρωτογενής παραγωγή	8353	316	40	320	1035	0	10064
Καθαρές εισαγωγές	849	19428	690	0	0	138	21105
Ακαθάριστη εγχώρια κατανάλωση	9156	15525	725	320	1035	138	26900
Εισροές προς μετατροπή	8207	23139	352	0	0	0	31698
Εκροές από μετατροπή	37	21129	0	0	0	3645	24811
Κατανάλωση του ενεργειακού τομέα	0	920	29	0	0	456	1405
Απώλειες μεταφοράς	0	0	1	0	0	273	274
Τελική κατανάλωση	985	12667	344	0	1029	3380	18406
Τελική μη ενεργειακή κατανάλωση	0	379	201	0	0	0	580
Τελική ενεργειακή κατανάλωση	964	12669	142	0	1029	3380	18184
Βιομηχανία	917	2060	129	0	205	1110	4421
Μεταφορές	0	7277	0	0	0	15	7292
Οικιακός, Πρωτογενής, Τριτογενής τομέας	48	3332	13	0	824	2255	6472
Στατιστική διαφορά	21	-380	0	0	0	0	-359



Εικόνα 2-8: Καμπύλη διάρκειας φορτίου διασυνδεδεμένου συστήματος για το έτος 2006 (Πηγή: Στεφανάκος, 2012). Διακρίνονται τα επιμέρους έργα που λειτουργούν στην αιχμή και στη βάση της παραγωγής ενέργειας καθώς και το συντριπτικό ποσοστό της συμμετοχής των λιγνιτικών.

2.2.6. Το μεθοδολογικό πλαίσιο της παραμετροποίησης: η αναγκαιότητα υιοθέτησής του

Μια από τις βασικές προβληματικές που εισάγονται σε ένα σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησής του είναι η λεγόμενη «κατάρρα της διαστατικότητας» (curse of dimensionality): η εκθετική αύξηση του χώρου αναζήτησης λύσεων όσο αυξάνεται το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου. Για παράδειγμα, σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με δυναμικό προγραμματισμό μπορούμε να έχουμε n μεταβλητές απόφασης και m διακριτές τιμές των μεταβλητών (λόγου χάρη σε ένα πρόβλημα επέκτασης ενός ταμιευτήρα όπου εξετάζονται εναλλακτικές διαδρομές με διαφορετικό κάθε φορά κόστος), δηλαδή m^n (Μακρόπουλος, 2012).

Με βάση το παραπάνω απλό παράδειγμα καταδεικνύεται η ανάγκη υιοθέτησης ενός πλαισίου παραμετροποίησης του προβλήματος όπου θα εκλέγονται μεταβλητές απόφασης πεπερασμένες και οπωσδήποτε μικρές σε πλήθος ώστε να επιτυγχάνεται και ανάλογη μείωση του υπολογιστικού φόρτου. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά τη διαδικασία σταχυολόγησης, ώστε να μην προκύψουν μοντέλα της πραγματικότητας με υπεράριθμες απλουστεύσεις και μη ρεαλιστικές αναπαραστάσεις. Σε ένα πρόβλημα διαχείρισης ταμιευτήρων το πλαίσιο παραμετροποίησης εκτός από αναγκαίο είναι και θεμιτό μιας και μπορεί να αντιπροσωπεύσει επαρκέστερα τις εναλλακτικές πολιτικές διαχείρισης. Σε τέτοιες περιπτώσεις (π.χ. διαχείριση πολλαπλών ταμιευτήρων με στόχο την κάλυψη της ζήτησης μέσω αντίστοιχων απολήψεων) μια αποτελεσματική μέθοδος παραμετροποίησης είναι η χρήση παραμετρικών κανόνων λειτουργίας για τους ταμιευτήρες (Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997), η οποία συνίσταται στην κατανομή του συνολικού αποθέματος ανά ταμιευτήρα μέσω δεδομένων παραμετρικών σχέσεων. Οι μεταβλητές απόφασης της βελτιστοποίησης είναι σε αυτό το παράδειγμα οι παράμετροι κατανομής του αποθέματος.

Μερικά σημεία ιδιαίτερης προσοχής κατά τη διαδικασία παραμετροποίησης είναι τα ακόλουθα:

- Ως διαδικασία οφείλει να είναι φειδωλή (principle of parsimony): Πρέπει να χρησιμοποιούμε τον ελάχιστο αριθμό παραμέτρων. Η προσθήκη επιπλέον παραμέτρων σε αρκετά προβλήματα που περιλαμβάνουν μη-γραμμικές στοχαστικές συναρτήσεις δεν προκαλεί βελτίωση των κριτηρίων επίδοσης ενώ αυξάνει τρομερά τις υπολογιστικές απαιτήσεις (Ευστρατιάδης, 2008).
- Με την εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστών γίνεται πλέον δυνατή η βελτιστοποίηση προβλημάτων μη παραμετροποιημένων. Ωστόσο, η εν λόγω προσέγγιση είναι «επικίνδυνη» μιας και δεν οδηγεί στη σχηματοποίηση και την αντανάκλαση στους υπολογισμούς συγκεκριμένων εναλλακτικών διαχειριστικών πλάνων. Με άλλα λόγια προσφέρει περισσότερο ακριβείς λύσεις οι οποίες δεν είναι κατανοητές από μεριάς διαχειριστή, συνεπώς είναι άχρηστες.

2.3. Γενική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης: η μεγιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής

2.3.1. Επισκόπηση των εναλλακτικών μεθοδολογιών βελτιστοποίησης

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια προσπάθεια επισκόπησης των μεθόδων βελτιστοποίησης ενός υδροσυστήματος από άποψη μεγιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής. Εισαγωγικά παρατίθεται η περιγραφή του προβλήματος με αναφορά σε έναν ταμιευτήρα ώστε να αναδειχθεί η πολυπλοκότητα της γενίκευσής του, ενώ στη συνέχεια επιχειρείται μια συνοπτική αναφορά των κυριότερων μεθόδων απλοποίησης.

Στην προσπάθεια ανάπτυξης ενός πλαισίου βελτιστοποίησης σχετικό με τη διαχείριση υδροσυστημάτων επιχειρήθηκαν πολλές (διαφορετικές μεταξύ τους) εναλλακτικές διαδρομές. Η διαφορετικότητά τους έγκειται αφενός στις τομές που συντελέστηκαν ως προς την αναμέτρηση με το πρόβλημα και την κατανόησή του, αφετέρου στην εξέλιξη της επιστήμης των υπολογιστών και την μεγέθυνση των διαθέσιμων πόρων. Μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου υδροσυστημάτων είναι η χρήση κλασικών μεθόδων ανάλυσης συστημάτων, όπως τεχνικές γραμμικού (ReVelle, 2000), δυναμικού ή στοχαστικού δυναμικού προγραμματισμού (Wasimi and Kitanidis, 1983 · Loaiciga and Marino, 1985 · Georgakakos and Marks, 1987 · Faber and Stedinger, 2001). Πρόκειται για ειδικές δομές μοντέλων βελτιστοποίησης, που επειδή επλύνονται αναλυτικά, εγγυώνται τον εντοπισμό της ολικά βέλτιστης λύσης, σε αντίθεση με μια μη γραμμική προσέγγιση, όπου υπάρχει ισχυρός κίνδυνος εγκλωβισμού σε τοπικά ακρότατα (τόσο μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου). Ωστόσο, η εφαρμογή τους προϋποθέτει σημαντικές απλοποιήσεις στη μαθηματική περιγραφή του προβλήματος, όπως γραμμικοποίηση των εξισώσεων δυναμικής ή διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού των μεταβλητών, με αποτέλεσμα οι λύσεις που προκύπτουν να μη ανταποκρίνονται στην πραγματική κατάσταση του συστήματος.

Μια ενδιαφέρουσα κατηγορία μοντέλων είναι αυτά που βασίζονται στον δικτυακό προγραμματισμό. Στην πλειονότητά τους, πρόκειται για μοντέλα προσομοίωσης, που σε κάθε χρονικό βήμα εκτιμούν την πλέον πρόσφορη κατανομή των υδατικών πόρων, ελαχιστοποιώντας το κόστος μεταφοράς σε υδροσυστήματα δικτυακής μορφής (Graham et al., 1986 · Labadie, 1995 · Fredericks et al., 1998 · Israel and Lund, 1999 · Dai and Labadie, 2001). Η βελτιστοποίηση βασίζεται είτε σε πραγματικά οικονομικά κριτήρια είτε σε ιδεατά κόστη, τα οποία ορίζονται ώστε να εξασφαλίζεται συμβατότητα με τους περιορισμούς του συστήματος. Άλλα μοντέλα, όπως αυτό που ανέπτυξε ο Kuczera (1989), είναι καθαρά μοντέλα βελτιστοποίησης, όπου ο χειρισμός των οριακών συνθηκών μεταξύ των διαδοχικών χρονικών βημάτων γίνεται μέσω εικονικών κλάδων μεταφοράς νερού. Επισημαίνεται ότι η δικτυακή βελτιστοποίηση χρησιμοποιείται και στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, σε ένα διαφορετικό ωστόσο πλαίσιο, ως βοηθητική διαδικασία της βελτιστοποίησης του καθολικού μέτρου επίδοσης του συστήματος (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός & Κουτσογιάννης, 2007).

Τέλος, τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται πλαίσια βελτιστοποίησης τα οποία βασίζονται σε προσεγγίσεις εξελικτικών γενετικών αλγορίθμων (genetic algorithms) και σύγχρονων μαθηματικών εργαλείων όπως η θολή λογική (fuzzy logic) και τα νευρωνικά δίκτυα (neural networks). Οι μέθοδοι αυτοί συνήθως δεν συγκροτούν πλαίσια με μια ξεχωριστή αυτονομία, αλλά έχουν το ρόλο των συμπληρωματικών επεκτάσεων ή των πιλοτικών καινοτομιών σε ήδη υπάρχοντες αλγόριθμους (Loucks et al, 2005).

Μάλιστα, πολλές φορές υιοθετούνται μοντέλα που αξιοποιούν συνδυασμούς διαφορετικών μεθόδων ώστε να διαμορφώσουν ένα υβριδικό σχήμα βελτιστοποίησης:

- *Γενετικοί αλγόριθμοι με πραγματική κωδικοποίηση.*
- *Υβριδικοί εξελικτικοί αλγόριθμοι.*
- *Εξελικτικοί αλγόριθμοι με έλεγχο διασποράς.*
- *Εξελικτικοί αλγόριθμοι με ανόπτηση.*

Η «ολικά βέλτιστη» μέθοδος βελτιστοποίησης θα πρέπει να συνδυάζει τα δύο ακόλουθα θεμελιώδη χαρακτηριστικά επίδοσης (Duan et al., 1992):

- **Αποτελεσματικότητα** (effectiveness), δηλαδή υψηλή αξιοπιστία εντοπισμού (ή προσέγγισης) του ολικού ακροτάτου της συνάρτησης.
- **Αποδοτικότητα** (efficiency), δηλαδή υψηλή ταχύτητα σύγκλισης (εγγυημένος εντοπισμός του ολικού ακροτάτου, με εύλογο πλήθος δοκιμών).

Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι αντικρουόμενα (Μακρόπουλος, 2012). Συνεπώς, δεν υπάρχει μεθοδολογία αποτίμησης της «ολικά βέλτιστης» μεθόδου βελτιστοποίησης και κάθε αλγόριθμος θα πρέπει να αποτιμάται πειραματικά. Έχουμε δηλαδή το φιλοσοφικό σχήμα της πρωτοκαθεδρίας της πρακτικής απέναντι στη θεωρία (Althusser, 1984 – μετάφραση Άγγελος Ελεφάντης, 1991).²

2.3.2. Η περιγραφή και τα χαρακτηριστικά του προβλήματος βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής

Για να γίνει περισσότερο διακριτός και κατανοητός ο ιδιάζων χαρακτήρας του προβλήματος μεγιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής, θα χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα ένα μεμονωμένο ταμιευτήρα στον οποίο είναι εγκατεστημένος υδροηλεκτρικός σταθμός παραγωγής ενέργειας. Η συγκεκριμένη επιλογή γίνεται για να φανεί η διαφοροποίηση των συνθηκών του προβλήματος σε σχέση με ένα γενικό πρόβλημα διαχείρισης υδατικών πόρων όπου αναζητείται η ορθή πολιτική διανομής. Η γενική σχέση που διέπει τον ταμιευτήρα είναι αυτή του υδατικού ισοζυγίου (2) με μια τροποποιημένη μορφή:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t \quad (2.15)$$

όπου απλοποιητικά θεωρήθηκαν μηδενικές διαφυγές και κατακρημνίσεις ίσες με την εξάτμιση. Οι εκροές O_t μπορούν να αναλυθούν σε τρεις συνιστώσες:

$$O_t = R_t - Y_t - Q_t \quad (2.16)$$

όπου:

- R_t : η ποσότητα νερού που διέρχεται μέσα από τον αγωγό (ή τους αγωγούς) προσαγωγής και αξιοποιείται για την υδροηλεκτρική παραγωγή.
- Y_t : οι υπερχειλίσεις στο χρονικό βήμα t .
- Q_t : οι απολήψεις από τον ταμιευτήρα για άλλες χρήσεις, οι οποίες θεωρούνται γνωστές στο κάθε χρονικό βήμα t .

Αφού έχουν οριστεί τα παραπάνω σε συνδυασμό με τους φυσικούς περιορισμούς του προβλήματος, όπως τα χαρακτηριστικά χωρητικότητας του ταμιευτήρα (S_{\min}, K) και την παροχετευτικότητα του αγωγού προσαγωγής (R_{\max}), μπορούμε να ορίσουμε το πρόβλημα ως αναζήτηση της μέγιστης εγγυημένης ενέργειας Z που δύναται να αποδώσει το υδροσύστημα δεδομένων των εισροών:

² «Η πρώτη ρωγή στην ιδεολογία εμφανίζεται λόγω της πρωτοκαθεδρίας της κάθε πρακτικής έναντι του τυπικού, λόγω δηλαδή του γεγονότος ότι μια πρακτική μπορεί να έχει μια στοιχειώδη αυτοτέλεια. Το νέο που κομίζει μια πρακτική δεν είναι παρά η φαινομενική ασυμβατότητα της πρακτικής με το τυπικό στο οποίο επιχειρείται να ενταχθεί. Η απόπειρα αυτή δεν είναι πάντα επιτυχής – κατά κανόνα δεν είναι. Θα είναι μια πρακτική η οποία έρχεται σε μερική ρήξη με την κυρίαρχη ιδεολογία, αφού θα έχει εντοπιστεί μέσω υλικής αλληλεπίδρασης με τον κόσμο ένας νέος συνδυασμός πρακτικών.», περισσότερα και στο παρακάτω link: http://www.theseis.com/index.php?option=com_content&task=view&id=1195&Itemid=29, «Μια ανάγνωση της θεωρίας της ιδεολογίας του Λουί Αλτουσέρ», *Θέσεις*, Τεύχος 120, περίοδος: Ιούλιος - Σεπτέμβριος 2012

$$\begin{aligned}
& \text{Maximize : } z = d \\
& \text{st :} \\
& S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - Y_t - Q_t, t = 1, 2, \dots, n \\
& S_{\min} \leq S_t \leq K \\
& 0 \leq R_t \leq R_{\max} \\
& f(R_t, S_t, S_{t+1}) \geq d \\
& S_t, Y_t \geq 0 \\
& d \geq 0
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Η συνάρτηση f που τίθεται στην ανωτέρω έκφραση είναι η σχέση παραγωγής ενέργειας σε κάθε χρονικό βήμα t . Είναι δηλαδή, η (2.5) (ή και η (2.6)) σε διακριτοποιημένη μορφή (στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ θεωρείται ότι η διακύμανση του αποθέματος είναι αμελητέα):

$$E = \int_{t_1}^{t_2} I dt = \rho \cdot g \cdot \int_{t_1}^{t_2} n(Q) \cdot Q(t) \cdot H(t) dt \tag{2.18}$$

$$E = \rho \cdot g \cdot \int_{t_1}^{t_2} n(Q) \cdot Q(t) \cdot H(t) dt \approx \psi \cdot H \cdot \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt = \psi \cdot H \cdot V \tag{2.19}$$

Η σχέση (2.19) είναι η τελική μορφή της (2.18) όπως χρησιμοποιείται στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.

- V : ο διερχόμενος όγκος στο χρονικό διάστημα αναφοράς.
- H : το ύψος πτώσης στην έναρξη του χρονικού βήματος.

Με την παραπάνω ακολουθία απλοποιήσεων δεν νοείται πλέον εξάρτηση της ενέργειας από τη στάθμη (επομένως και το απόθεμα) του επόμενου χρονικού βήματος, επομένως:

$$E = f(R_t, S_t) \tag{2.20}$$

Η παραδοχή αυτή μπορεί να υιοθετηθεί χωρίς βλάβη της γενικότητας σε έργα και ταμιευτήρες με μικρή διακύμανση της στάθμης, δηλαδή σε έργα μεγάλης κλίμακας (συνήθως).

Η προσέγγιση που περιγράφεται παραπάνω έχει παρθεί από τους (Revelle, 2000) και (Μπουζιώτας, 2012) μετά από μικρές τροποποιήσεις. Το πλαίσιο βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής με την αντίστοιχη εννοιολογική περιγραφή από τους (Ευστρατιάδης et al. 2007, Τσουκαλάς 2012).

2.4. Η τεχνολογία της άντλησης/ταμίευσης: θεωρητική περιγραφή

2.4.1. Η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας

Σε κάθε ηλεκτρικό δίκτυο, είτε πρόκειται για το διασυνδεδεμένο δίκτυο της ηπειρωτικής χώρας είτε για αυτόνομο, όπως αυτό των μη διασυνδεδεμένων νήσων, πρέπει να ικανοποιείται κάθε στιγμή το ισοζύγιο ενέργειας. Πρέπει δηλαδή η προς κατανάλωση ενέργεια να είναι ίση με την παραγόμενη. Ο διαχειριστής του ηλεκτρικού δικτύου (ΑΔΜΗΕ) έχει τη δυνατότητα μέσω στατιστικών μεθόδων να προβλέψει με ακρίβεια την διακύμανση του φορτίου για κάθε ημέρα του ημερολογιακού έτους.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τους σταθμούς παραγωγής (θερμικούς, ηλεκτρικούς κλπ.) προσαρμόζεται σύμφωνα με τη προβλέψιμη χρονική διακύμανση του φορτίου. Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης όμως οι μεγάλοι θερμικοί σταθμοί λόγω της τεχνικής τους φύσης δεν έχουν τη

δυνατότητα μείωσης της παραγωγής κάτω από ένα τεχνικό ελάχιστο όριο. Η αδυναμία αυτή των θερμικών σταθμών δημιουργεί περίσσεια ισχύος άρα αστάθεια στο δίκτυο.

Η αστάθεια αυτή επιδεινώνεται από την αυξημένη συμμετοχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο. Ο άνεμος και ο ήλιος είναι μεγέθη στοχαστικά συνεπώς η παραγωγή ενέργειας από αυτά είναι χρονικά μεταβαλλόμενη και ανακόλουθη της καμπύλης ζήτησης φορτίου ενός δικτύου. Προκειμένου να εξασφαλισθεί η εύρυθμη και ασφαλής λειτουργία του δικτύου περιορίζεται η διείσδυση των ΑΠΕ ώστε να επιτυγχάνεται το ενεργειακό ισοζύγιο. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται τόσο στο δίκτυο των Μη Διασυνδεδεμένων Νήσων όπου παρά το ισχυρό αιολικό δυναμικό η απορρόφηση της ενέργειας ποικίλει λόγω της εποχιακής ζήτησης αλλά και της ανυπαρξίας παρακείμενης βιομηχανίας όσο και στο διασυνδεδεμένο δίκτυο. Σε μερικές χώρες δεν μπορεί να γίνει περαιτέρω ανάπτυξη αιολικών πάρκων καθώς το δίκτυο έχει φτάσει σε σημείο να απειλείται η βιωσιμότητά του (Ρεντζής, 2013).

Στο ηπειρωτικό διασυνδεδεμένο δίκτυο της χώρας έχουμε εγκατεστημένη ισχύ περί τα 13800 MW, η ισχύς των ΑΠΕ ανέρχεται στα 3100 MW ενώ η ισχύς των αιολικών πάρκων ανέρχεται στα 1466 MW. (www.admie.gr)

Η ανισορροπία αυτή σταθμίζεται με την αποθήκευση μέρους της ενέργειας που προέρχεται από τους θερμικούς σταθμούς και από τα αιολικά πάρκα. Δίνεται με αυτόν τον τρόπο η δυνατότητα στο διαχειριστή του δικτύου να διαχειρίζεται ευχερέστερα την παραγόμενη ενέργεια. Επιτυγχάνεται η αποθήκευση της κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης και η επαναπρόσδοση της στο δίκτυο σε σύντομο χρόνο τις περιόδους αιχμής (Παπαντώνης, 2009).

2.4.2. Αποθήκευση πλεονάζουσας ενέργειας μέσω της αποθήκευσης σε ταμιευτήρα

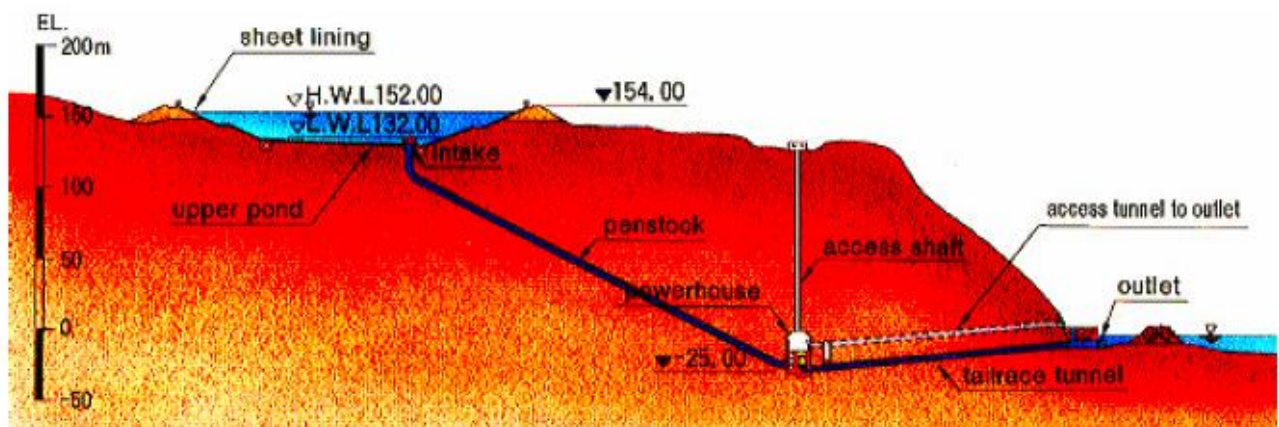
Για να αρθεί η προαναφερθείσα ανισορροπία υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης της μεθόδου άντλησης/ταμίευσης. Η μέθοδος αυτή, απαιτεί την ύπαρξη δύο ταμιευτήρων, αποθηκεύει ενέργεια στην υδάτινη μορφή αντλώντας νερό από τον κατάντη στον ανάντη ταμιευτήρα. Όταν είναι απαραίτητο το αντλημένο νερό χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μέσω στροβίλων (Ιωάννου, 2012). Εκτιμάται πως μέχρι το 2009 η εγκατεστημένη ισχύς άντλησης/ταμίευσης ήταν 104 GW (U.S. Energy Information Administration).

Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης (άρα και χαμηλής αξίας) ώστε να αξιοποιείται τις περιόδους υψηλής ζήτησης αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την πρόσοδο. Ένα έργο που κατασκευάστηκε για το σκοπό αυτό είναι ο σταθμός άντλησης/ταμίευσης Kazunogawa. Ολοκληρώθηκε το 2001 στην περιοχή Yamnashi-Ken της Ιαπωνίας, έχει ισχύ 1600 MW και αποτελείται από δύο ταμιευτήρες χωρητικότητας 19,2 και 18,4 hm³ με υψομετρική διαφορά 685 m (Μαμάσης, 2011). Ένα άλλο αξιοσημείωτο έργο είναι ο σταθμός της Okinawa που λειτούργησε το 1999 στο ομώνυμο Ιαπωνικό νησί. Είναι το πρώτο έργο άντλησης/ταμίευσης που λειτουργεί με θαλασσινό νερό, με ισχύ 30 MW και μέγιστο ύψος πτώσης 140 m (Μαμάσης, 2011).

Η λειτουργία ενός έργου άντλησης/ταμίευσης εικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 2-9. Το προαναφερθέν έργο στην Okinawa εικονίζεται στην 2-10, ενώ η αντίστοιχη εγκατάσταση του σταθμού Kazunogawa διακρίνεται στην 2-11.



Εικόνα 2-9: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας ενός έργου άντλησης/ταμιεύσης. Εικονίζονται οι δύο ταμιευτήρες και τα αντίστοιχα έργα προσαγωγής-άντλησης-παραγωγής (Ρεντζής, 2013).



Εικόνα 2-10: Απεικόνιση του έργου άντλησης/ταμιεύσης στην Okinawa της Ιαπωνίας. Διακρίνονται το έργο αποθήκευσης του θαλασσινού νερού (upper pond) καθώς και τα αντίστοιχα τεχνικά έργα (προσαγωγή-penstock, σταθμός ΥΗΕ-powerhouse). (Μαμάσης, 2011)

2.5. Κύρια χαρακτηριστικά των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών έργων

2.5.1. Η φάση της άντλησης

Η αντλία της εγκατάστασης θα πρέπει να μπορεί να διαθέτει ενέργεια H , τέτοια ώστε:

$$H = h + \Delta h_f \quad (2.21)$$

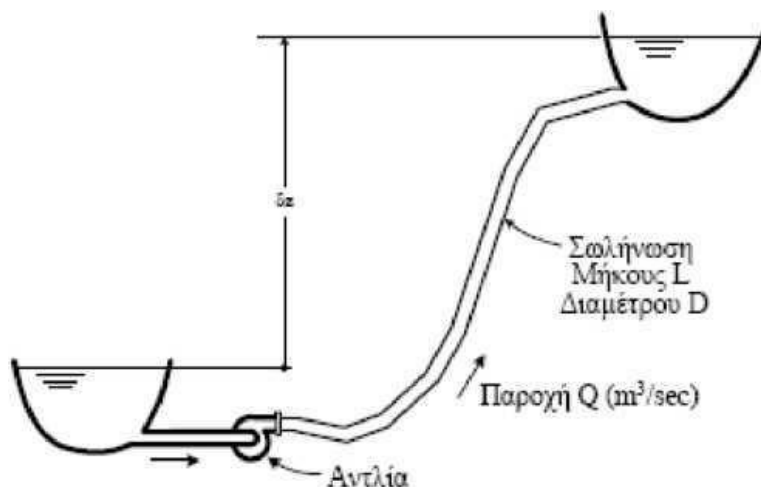
όπου:

- h : η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στους δύο ταμιευτήρες.
- Δh_f : οι υδραυλικές απώλειες που αναπτύσσονται στον αγωγό που συνδέει τους δύο ταμιευτήρες.

Επόμενος, η ισχύς:

$$\Delta N_f = (\rho \cdot g) \cdot \Delta h_f \cdot Q \quad (2.22)$$

αποτελεί την απώλεια ισχύος που αντιστοιχεί στην ισχύ που χάνεται στις υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης.



Εικόνα 2-11: Φάση άντλησης σε ένα σύστημα άντλησης/ταμίευσης (Ρεντζής, 2013)

Εάν ληφθούν υπόψη οι ενεργειακές απώλειες του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που παρεμβαίνει (αντλία, ηλεκτροκινητήρας, μετασχηματιστές) μέσω του βαθμού απόδοσης τους, προκύπτει ο συνολικός βαθμός απόδοσης:

$$n = n_p \cdot n_M \cdot n_{Tr} \quad (2.23)$$

Άρα εάν υπάρχει ηλεκτρική ισχύς N αυτή μπορεί μέσω άντλησης να μετατραπεί σε υδραυλική ισχύ N_h , προφανώς $N_h < N$ καθώς η διαφορά $(N - N_h)$ αντιστοιχεί στις απώλειες ΔN_f που αναπτύσσονται και αντιστοιχούν σε ενέργεια που δεν αποθηκεύεται.

2.5.2. Φάση επαναπόδοσης της υδραυλικής ενέργειας

Στην φάση αυτή η φορά της ενέργειας και της ροής του νερού αντιστρέφεται. Την λειτουργία αυτή εξασφαλίζει ο υδροστρόβιλος και η ηλεκτρική γεννήτρια που στρέφεται από αυτόν. Η ενέργεια που διατίθεται στον υδροστρόβιλο για να την μετατρέψει σε μηχανική και στην συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση προς:

$$H = h - \Delta h_f \quad (2.24)$$

όπου τα υπεισερχόμενα μεγέθη είναι αντίστοιχα αυτών της (2.21).

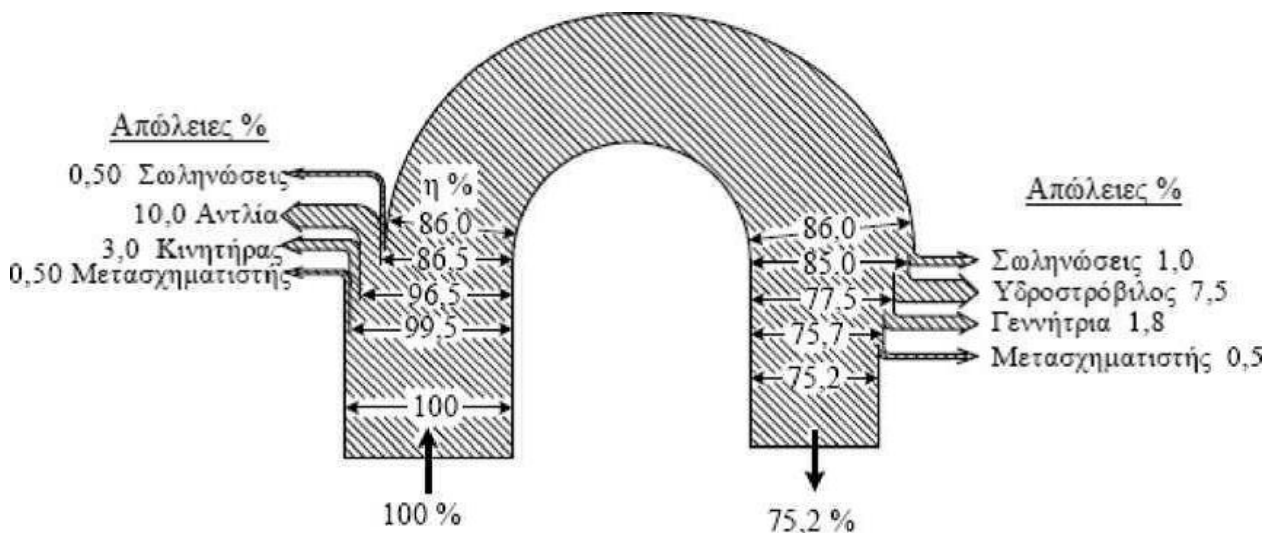
Η ισχύς που εκφράζεται ξανά από τη σχέση (2.22) αντιστοιχεί στην ισχύ που χάνεται στις υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης.

Εάν ληφθούν υπόψη οι ενεργειακές απώλειες του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που παρεμβαίνει (υδροστρόβιλος, ηλεκτρική γεννήτρια, μετασχηματιστές) μέσω του βαθμού απόδοσης τους, προκύπτει ο συνολικός βαθμός απόδοσης:

$$n = n_T \cdot n_G \cdot n_{Tr} \quad (2.25)$$

Άρα από την υδραυλική ισχύ N_h αυτή που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ N_e και τροφοδοτεί το ηλεκτρικό δίκτυο είναι μικρότερη κατά τις ολικές απώλειες (σωληνώσεις και ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός), δηλ. $N_e < N_h$.

Συνολικά σε ένα πλήρη κύκλο, και ανάλογα με τον εξοπλισμό (αντλίες, υδροστρόβιλοι κλπ) ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι της τάξεως του 65-85% (το υπόλοιπο 35-15% της ενέργειας χάνεται σε απώλειες) ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας, την επιλογή του εξοπλισμού της κ.α. Οι απώλειες σε ένα πλήρη κύκλο εικονίζονται στην εικόνα 2-12.



Εικόνα 2-12: Απώλειες ενέργειας σε ένα πλήρη κύκλο (Ρεντζής, 2013)

2.5.3. Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός σε ένα αναστρέψιμο ΥΗΕ

Οι μονάδες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- **Σύνθετες:** αποτελούνται από υδροστρόβιλο, φυγόκεντρη αντλία και ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί ως κινητήρας ή ως γεννήτρια. Οι μηχανές βρίσκονται σε κοινή άτρακτο. Σε αυτές τις μονάδες η φορά περιστροφής είναι ίδια και για τις δύο λειτουργίες.
- **Με στροβιλοαντλία και ηλεκτρική μηχανή:** Η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας ή ως γεννήτρια όπως και στην πρώτη κατηγορία. Η αναστρεψίμη μηχανή λειτουργεί είτε ως αντλία είτε ως υδροστρόβιλος με αντιστροφή της φοράς περιστροφής της περρωτής και της φοράς της ροής.

Η εκκίνηση των μεγάλων αντλιών στα αναστρέψιμα ΥΗΕ είναι σημαντικό πρόβλημα, λόγω του μεγάλου μεγέθους και για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές: η εκκίνηση με την περρωτή γεμάτη ή κενή.

Πολύ σημαντικό μειονέκτημα των αναστρέψιμων ΥΗΕ είναι η αδυναμία λειτουργίας αντλίας και υδροστροβίλου σε ταυτόχρονες φάσεις (Βαμβουρέλλης, 2009). Στο εν λόγω πρόβλημα θα επανέλθουμε σε επόμενο κεφάλαιο όπου και μελετάται η μοντελοποίηση και προσομοίωση του υδροσυστήματος του Αλιάκμονα.

3. Το πρόβλημα της συνδυασμένης διαχείρισης ΥΗΕ και ΑΠΕ: Θεωρητική περιγραφή, αναγκαιότητα, προκλήσεις.

Στο παρόν κεφάλαιο αναδεικνύεται η ανάγκη ανάπτυξης ενός πλαισίου διαχείρισης των υδροηλεκτρικών έργων και των ΑΠΕ από κοινού. Πιο συγκεκριμένα, σκιαγραφείται το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα, περιγράφονται οι ιδιαιτερότητες του θεσμικού πλαισίου των ΑΠΕ στον ελληνικό χώρο, ενώ η έννοια του πλαισίου παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση γενικεύεται για να συμπεριλάβει την καθολική πλέον διαχείριση ΥΗΕ-ΑΠΕ σε ένα ενιαίο μεθοδολογικό πλαίσιο. Για να καταστεί περισσότερο ευκρινές το εν λόγω πρόβλημα, παρατίθενται αντίστοιχα παραδείγματα από έργα που επεξεργάζονται αυτή τη μεθοδολογία.

3.1. Η αναγκαιότητα υιοθέτησης νέων συστημάτων παραγωγής ενέργειας

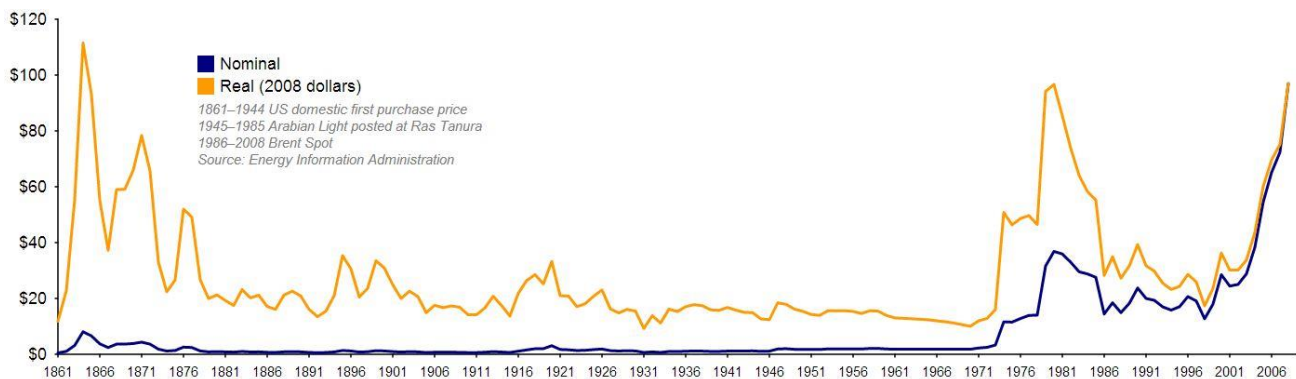
Τα τελευταία χρόνια και ιδιαίτερα μετά την κρίση πετρελαίου του 1973 αναδεικνύεται μια έντονη αμφισβήτηση ως προς το πρότυπο αναπαραγωγής του καπιταλιστικού τρόπου παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, ενώ διανύουμε μια χαρακτηριστική περίοδο όπου αναδεικνύονται με emphaticό τρόπο τα χαρακτηριστικά μιας κρίσης υπερσυσσώρευσης (το πλεονάζον κεφάλαιο όπως έχει διαμορφωθεί από την αυξημένη συγκέντρωση υπεραξίας πασχίζει να βρει νέα πεδία κερδοφορίας) παρατηρούμε ότι οι αντιστάσεις και οι αμφισβητήσεις των υπαρχόντων μοντέλων παραγωγής και κατανάλωσης είναι ισχνές.

Η αντανάκλαση της προαναφερθείσας αμηχανίας απέναντι στα χαρακτηριστικά της κρίσης γίνεται ακόμα εντονότερη και ευκρινέστερη στο πεδίο του πετρελαίου και των ορυκτών καυσίμων εν γένει. Πολλές προσεγγίσεις συγκλίνουν σε μια θεώρηση που περιγράφει την παρούσα κατάσταση σαν ένα τρίτο κύμα πετρελαϊκής κρίσης (οι άλλες δύο τον Οκτώβριο 1973 και το 1980-1981). Οι σημερινές τιμές πετρελαίου σε σταθερά δολάρια έχουν υπερβεί κατά 45% το ιστορικό μέγιστο που σημειώθηκε το 1980-81. Όμως, χάρις στην ενίσχυση του ευρώ έναντι του δολαρίου οι σημερινές τιμές του πετρελαίου σε σταθερά Ευρώ είναι λίγο χαμηλότερες από το μέγιστο του 1980-81.

Το 1986 οι τιμές του πετρελαίου μειώθηκαν κατά τρεις φορές από τα επίπεδα του 1980-81 και στη συνέχεια έμειναν σταθερές σε επίπεδα μεταξύ 25 και 40 δολαρίων (του 2008) για περίπου 18 χρόνια. Οι τιμές του πετρελαίου άρχισαν να αυξάνουν το 2004 και τριπλασιάστηκαν μέσα σε τρία χρόνια.

Οι αναπτυσσόμενες χώρες έχουν περιορίσει τη χρήση πετρελαίου ουσιαστικά μόνο στον τομέα των μεταφορών και στην πετροχημεία. Επομένως, η τρίτη πετρελαϊκή κρίση έχει μικρότερες αρνητικές συνέπειες στην οικονομία συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες. Όμως, οι τιμές του πετρελαίου συμπαρασύρουν τις τιμές του φυσικού αερίου προς τα πάνω, το οποίο έχει αποκτήσει σημαντικό μερίδιο στο ενεργειακό ισοζύγιο των αναπτυσσόμενων χωρών τόσο στην ηλεκτροπαραγωγή όσο και στην τελική κατανάλωση. Έτσι, οι τιμές όλων των ενεργειακών μορφών αυξάνουν ασκώντας πίεση στον πληθωρισμό (Κάπρος, 2008)³. Η καμπύλη μεταβολής της τιμής του πετρελαίου φαίνεται στην εικόνα 3-1.

³ Ολόκληρο το άρθρο με μια πιο εκτεταμένη εκδοχή της εν λόγω ανάλυσης μπορεί να βρεθεί στο παρακάτω link: <http://www.ananeotiki.gr/el/readAuthors.asp?authorID=564&page=1&textID=2739>



Εικόνα 3-1: Μακροπρόθεσμες τιμές του πετρελαίου, 1861-2007 (η πορτοκαλί γραμμή προσαρμοσμένη με τον πληθωρισμό, η μπλε χωρίς τον πληθωρισμό). Πηγή: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/87/Oil_Prices_1861_2007.svg

Πέραν του πληθωριστικού προβλήματος με τα ορυκτά καύσιμα εγείρονται ζητήματα σχετικά με την καύση τους και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες σχετίζονται άμεσα με το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής και του φαινομένου του θερμοκηπίου. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος της κλιματικής αλλαγής έχουν παρθεί συγκεκριμένες πρωτοβουλίες, όπως το πρωτόκολλο του Κιότο. Αποτελεί έναν «οδικό χάρτη», στον οποίο περιλαμβάνονται τα απαραίτητα βήματα για τη μακροπρόθεσμη αντιμετώπιση της αλλαγής του κλίματος που προκαλείται λόγω της αύξησης των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με αυτό, τα κράτη που το έχουν συνυπογράψει δεσμεύονται να ελαττώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου την πρώτη περίοδο ανάληψης υποχρεώσεων (2008-2012) κατά ένα συγκεκριμένο στόχο σε σχέση με τις εκπομπές του 1990 (ή του 1995 για ορισμένα αέρια).

Αυτό επιχειρείται να γίνει με τον πιο οικονομικά αποδοτικό τρόπο, ώστε να μην επιβαρυνθεί η παγκόσμια οικονομία. Έτσι, το Πρωτόκολλο του Κιότο περιλαμβάνει τρεις ευέλικτους μηχανισμούς:

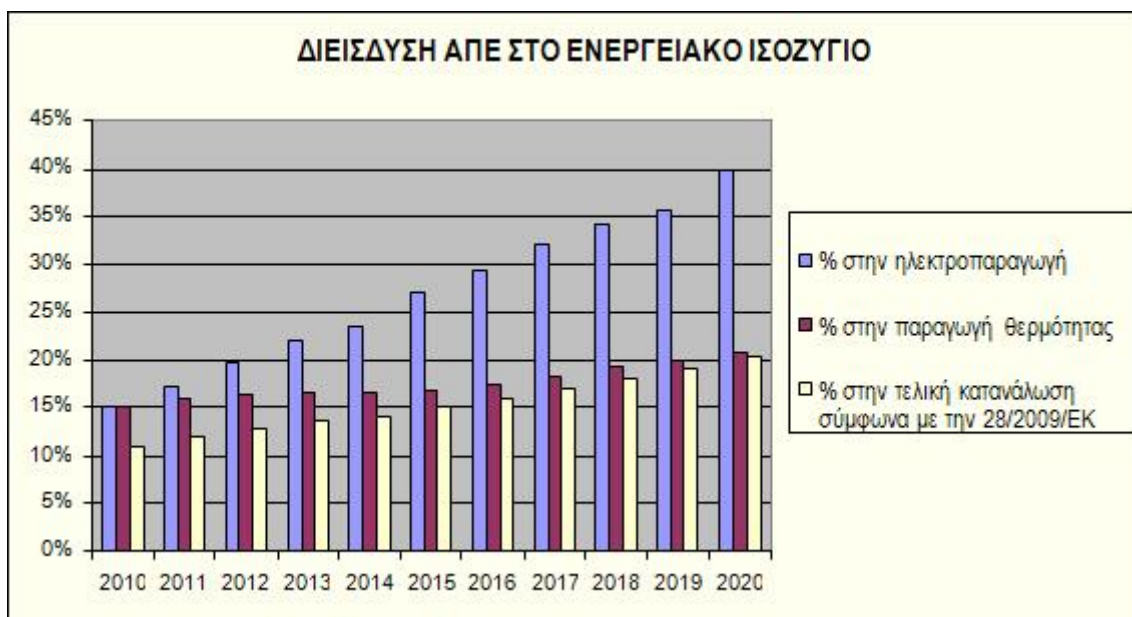
- την εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών.
- την κοινή εφαρμογή.
- το μηχανισμό καθαρής ανάπτυξης.

Το παραπάνω θεσμικό πλαίσιο παρότι θέλει να αντιμετωπίσει το πρόβλημα χωρίς να επιδράσει στη δομή του (μιας και αντί να περιορίσει τις εκπομπές τις εντάσσει σε ένα χρηματιστήριο ρύπων με αποτέλεσμα οι πλουσιότερες χώρες να εξακολουθούν να ρυπαίνουν αρκεί να πληρώνουν το αντίστοιχο -δυσανάλογο σε σχέση με την καταστροφή που προκαλούν- τίμημα), θέτει την αναγκαιότητα υιοθέτησης ενός άλλου προτύπου παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας⁴. Το πρότυπο αυτό, αν και δεν θίγει τον πυρήνα του καπιταλιστικού τρόπου παραγωγής, ενθαρρύνει την διεύδυση των ΑΠΕ. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, ο πλέον ένθερμος υποστηρικτής του Πρωτοκόλλου του Κιότο, έθεσε ως βάση το «σχέδιο 20-20-20». Θέτει στόχους για το έτος 2020 τη μείωση κατά 20% των αερίων θερμοκηπίου, τη βελτίωση κατά 20% της προσφοράς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη βελτίωση κατά 20% της ενεργειακής αποδοτικότητας. Η οδηγία θεσπίζει υποχρεωτικούς στόχους σύμφωνα με τους οποίους το μερίδιο των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας της ΕΕ

⁴ Για μια εκτενέστερη μαρξιστική κριτική στις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, βλ. «Εξωτερικές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, νεοκλασική και μαρξιστική ανάλυση: μια θεώρηση», Γ. Οικονομάκης & Γ. Παπαλεξίου, *Θέσεις, Τεύχος 120*, περίοδος: Ιούλιος - Σεπτέμβριος 2012: http://www.theseis.com/index.php?option=com_content&task=view&id=1196&Itemid=29

θα ανέλθει τουλάχιστον στο 20% έως το 2020 και καθορίζει εθνικούς συνολικούς στόχους για κάθε κράτος μέλος.

Η Έκθεση του Εθνικού Σχεδίου Δράσης για την επίτευξη της συμβολής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% έως το 2020, απορρέει από την Οδηγία 2009/28/ΕΚ (η παραπάνω οδηγία), και περιλαμβάνει εκτιμήσεις για την εξέλιξη του ενεργειακού τομέα και τη διείσδυση των τεχνολογιών των ΑΠΕ έως το 2020. Οι εκτιμήσεις αυτές εξειδικεύονται στη συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και ψύξης κυρίως για τον οικιακό τομέα, αλλά και στη χρήση βιοκαυσίμων στις μεταφορές. Αναφέρονται επίσης μέτρα για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την αύξηση της αξιοποίησης των ΑΠΕ, καθώς και στοιχεία για τις βασικές διοικητικές δομές που θα επιταχύνουν τη διείσδυση αυτή. Η σχεδιαζόμενη διείσδυση των ΑΠΕ εικονίζεται στην 3-2.



Εικόνα 3-2: Διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο (ηλεκτροπαραγωγή, παραγωγή θερμότητας, τελική κατανάλωση). Πηγή: ΥΠΕΚΑ, <http://www.ypeka.gr/?tabid=285>

3.2. Η έννοια της βιωσιμότητας και της αποανάπτυξης

Από την παραπάνω ανάλυση καταδεικνύεται η ανάγκη για την εισαγωγή νέων (και αξιόπιστων) μορφών ενέργειας που θα προτείνουν ταυτόχρονα και ένα πλαίσιο βιωσιμότητας. Η βιωσιμότητα (sustainability) ως αρχή έχει προωθηθεί πολύ τις τελευταίες δύο δεκαετίες (Brundtland & World Commission on Environment and Development, 1987), ενώ παράλληλα έχει καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια για την ενσωμάτωσή της σε διαφορετικές όψεις των επιστημών διαχείρισης του φυσικού πλούτου και του περιβάλλοντος. Ωστόσο, αρκετά στρεβλά, η έννοια της βιωσιμότητας ενσωματώθηκε στη ρητορική αρκετών οργανισμών και ρυθμιστικών αρχών παραβλέποντας το γεγονός ότι οικονομική ανάπτυξη και βιωσιμότητα είναι δύο έννοιες μεταξύ τους ασύμβατες. Με την ένταση της οικονομικής κρίσης καταδεικνύεται πως η ανάπτυξη είναι εν γένει ένας στόχος ασύνδετος με τη βιωσιμότητα. Με άλλα λόγια, μια εκθετική οικονομική ανάπτυξη συνοδευόμενη από μια αντίστοιχη αυξανόμενη κατανάλωση είναι μακροπρόθεσμα μη εφικτή καθώς αναζητά επιπλέον πόρους σε ένα πλανήτη με πεπερασμένη δυναμική, πόρους και διαθεσιμότητα σε φυσικό πλούτο (Koutsoyiannis et al., 2009).

Πιο συγκεκριμένα, λόγω και της προαναφερθείσας επικινδυνότητας μιας οικονομίας που βασίζεται στους ορυκτούς πόρους ανακύπτει ως σχέδιο και μεθοδολογικό πλαίσιο μια στροφή προς ένα διπλό στόχο:

- Την ουσιαστική εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω και της μείωσης της κατανάλωσης.
- Την ανάπτυξη συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (Ediger et al., 2007).

Σαν απάντηση στο δόγμα της οικονομίας της ανάπτυξης, ανακύπτει τα τελευταία χρόνια μια εναλλακτική οικονομική πρόταση που συμπυκνώνεται στον όρο αποανάπτυξη (degrowth). Η αποανάπτυξη δεν αποτελεί το αντίθετο της ανάπτυξης ούτε ταυτίζεται με την οικονομική ύφεση, μια κατάσταση κατά την οποία δεν υπάρχει ανάπτυξη μέσα σε μια κοινωνία και ένα σύστημα χτισμένο πάνω στο πρότυπο της ανάπτυξης, μα μιλά για έξοδο από μια τέτοια κοινωνία, για αλλαγή προτύπου. Η αποανάπτυξη λοιπόν είναι ένα κάλεσμα να «απο-αποικιοποιήσουμε το φαντασιακό μας» από τη λογική του καταναλωτισμού και της διαρκούς οικονομικής ανάπτυξης, ως άτομα και ως σύνολο, και να προτείνουμε μια κοινωνία πιο περιβαλλοντικά βιώσιμη και κοινωνικά δίκαιη, που θα βασίζεται σε ένα διαφορετικό σύστημα αξιών.⁵

Ο όρος αποανάπτυξη αρχικά προτάθηκε στα γαλλικά ως «décroissance» και τείνει να καθιερωθεί με το αγγλικό «degrowth». Ακόμα, έχει προταθεί και το «a-growth» σε μια προσπάθεια να τονιστεί το γεγονός ότι η ριζική αντίθεση δεν έγκειται στην αυξομείωση κάποιων δεικτών, αλλά στη αντιμετώπιση της οικονομικής ανάπτυξης ως μια σύγχρονη θρησκεία. Θα πρέπει εδώ να προσέξουμε ότι στα ελληνικά χρησιμοποιείται ο ίδιος όρος (“ανάπτυξη”) για να περιγράψει τις έννοιες «economic growth» (ποσοτική μεγέθυνση της οικονομίας, συνδεδεμένη με τη χρήση ενέργειας και υλικών) και «development» (όρος που σχετίζεται περισσότερο με ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως η παροχή σίτισης και στέγης, η παιδεία, κλπ.). Το κίνημα της αποανάπτυξης αναφέρεται βασικά στη μείωση της υπερκατανάλωσης ενέργειας και υλικών και άρα υποστηρίζει ότι η οικονομική αποανάπτυξη είναι ένα απαραίτητο βήμα για τη μετάβαση σε μια πιο βιώσιμη κοινωνία (Πετρίδης, 2012).

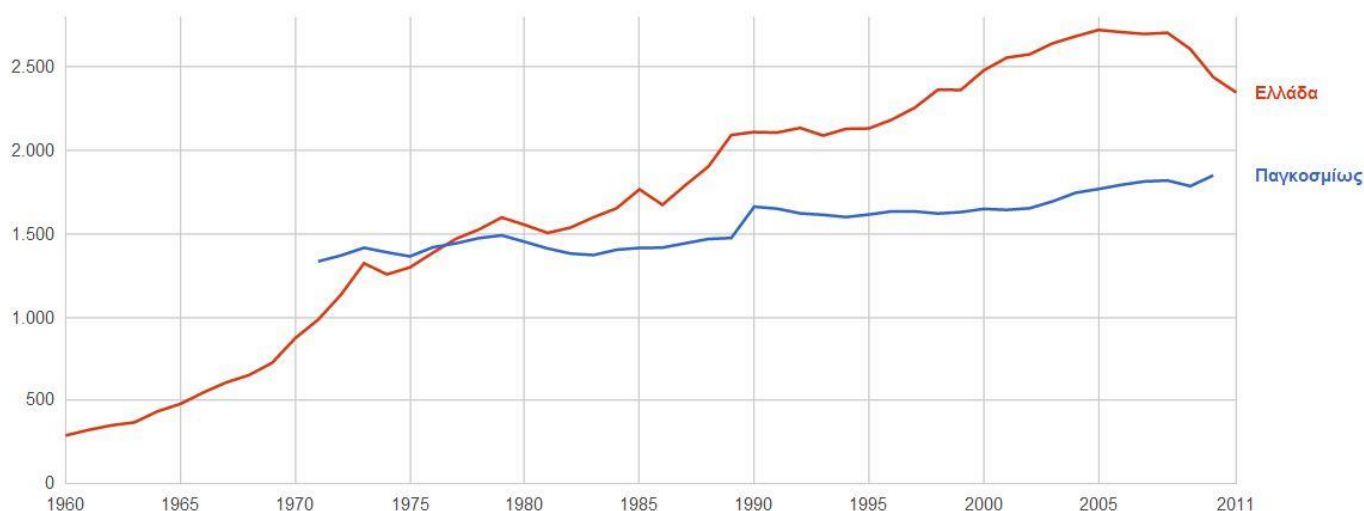
3.3. Η εννοιολόγηση της αποανάπτυξης ενάντια στην πράσινη ανάπτυξη: το ζήτημα της ενεργειακής κατανάλωσης

Οι υποστηρικτές της αποανάπτυξης στέκονται εξίσου κριτικά απέναντι στη λεγόμενη πράσινη ανάπτυξη, αφού κάθε είδους ανάπτυξη χωρίς όρια αποτελεί σχήμα οξύμωρο. Η αύξηση της αποδοτικότητας, που ουσιαστικά προτείνουν οι πράσινες τεχνολογικές καινοτομίες είναι φυσικά κάτι ευπρόσδεκτο αλλά αποδεδειγμένα όχι αρκετό. Ένα από τα βασικά επιχειρήματα για αυτό είναι πως οι πράσινες τεχνολογίες να μην μπορεί να μειώνουν τη χρήση ενέργειας και υλικών ανά προϊόν, όμως μέσα σε ένα νεοφιλελεύθερο καπιταλιστικό σύστημα όπως το σημερινό, η αυξημένη αποδοτικότητα αυτών των προϊόντων οδηγεί στην πτώση των τιμών τους και άρα στην υπερκατανάλωση τους (rebound effect), με αποτέλεσμα οι απόλυτοι αριθμοί κατανάλωσης ενέργειας και πρώτων υλών παγκοσμίως σήμερα να είναι οι μεγαλύτεροι στην ανθρώπινη ιστορία, και οι τάσεις να παραμένουν αυξητικές. Εξίσου ωφέλιμη για το περιβάλλον θα μπορούσε να είναι και η μετάβαση σε μια οικονομία υπηρεσιών. Η πρόσφατη ιστορία όμως δεν είναι καθόλου ενθαρρυντική ότι μια τέτοια μετάβαση είναι εφικτή, στο βαθμό τουλάχιστον που απαιτείται και

⁵ Latouche, S. (2003). «*Décoloniser l'imaginaire: La Pensée créative contre l'économie de l'absurde, Parangon*», Lyon.

ιδιαίτερα μέσα σε ένα σύστημα που απαιτεί την διαρκή οικονομική ανάπτυξη για να μην καταρρεύσει.

Η στροφή προς την πράσινη ρητορική λοιπόν δεν προσφέρει κάποια ουσιαστική προοπτική. Η ουσία δεν είναι η ανακόκλωση μιας παραπάνω συσκευασίας μιας χρήσης, αλλά η προώθηση ενός διαφορετικού μοντέλου παραγωγής όπου το προϊόν θα είναι ανθεκτικό, θα πουλιέται χωρίς συσκευασία, ή ίσως δεν θα πουλιέται καν, αν δεν εκπληρώνει κάποια ουσιαστική ανάγκη. Το στοιχείο δεν είναι η δημιουργία 1000 νέων "πράσινων" θέσεων εργασίας για την καταπολέμηση της ρύπανσης (που θα οφείλουν την ύπαρξη τους στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος!) μα η συγκρότηση κοινωνικών δομών και η επένδυση σε τεχνολογίες που θα σταματήσουν να ρυπαίνουν εξαρχής.



Εικόνα 3-3: Χρήση πρωτογενούς ενέργειας (πριν τη μετατροπή σε καύσιμα άλλης χρήσης) σε χιλιόγραμμα αντιστοιχίου του πετρελαίου, κατά κεφαλήν από το 1960 έως και το 2011. Σύγκριση της ελληνικής και της παγκόσμιας κατανάλωσης. Η Πτώση στην ελληνική κατανάλωση μετά το 2008 οφείλεται στην έναρξη της οικονομικής κρίσης. Πηγή: Παγκόσμια τράπεζα (<http://data.worldbank.org>)

Το ζήτημα λοιπόν έχει δύο αλληλοσυμπληρούμενες όψεις, μια οικολογική και μια κοινωνική. Γι αυτό και μιλάμε σωστότερα για μια βιώσιμη αποανάπτυξη, δηλαδή αποανάπτυξη η οποία θα είναι κοινωνικά αποδεκτή, με βασικό στόχο τη δραστική μείωση της χρήσης υλικών και ενέργειας και άρα έως έναν βαθμό και του ρυθμού της οικονομικής ανάπτυξης, αυξάνοντας παράλληλα το βιοτικό επίπεδο της κοινωνίας. Η αποσύνδεση της (υλικής, ενεργειακής και οικονομικής) ανάπτυξης από την ποιότητα της ζωής και την ευημερία αποτελεί λοιπόν ένα από τα βασικότερα στοιχεία της αποανάπτυξης (Πετρίδης, 2012). Σε συνδυασμό με τα οικονομικά προτάγματα, η έννοια της αποανάπτυξης μπορεί να συνδεθεί και με ένα ευρύτερο αίτημα μετασχηματισμού της κοινωνίας στον πυρήνα της δημοκρατίας, εφόσον διαθέτει το πλαίσιο για μια κατεύθυνση αυτοδιάθεσης στην παραγωγή και την κοινωνική ζωή συνολικότερα⁶. Η συνεχής μεγέθυνση της οικονομίας όπως αντανάκλαται στην ενεργειακή κατανάλωση διακρίνεται στην εικόνα 3-3.

⁶ Για μια βαθύτερη εισαγωγή στην έννοια της αποανάπτυξης, βλ. «Πέρα από το δίλλημα λιτότητα ή ανάπτυξη: 11 κείμενα για την αποανάπτυξη», Ηλιόσποροι (δίκτυο για την κοινωνική και πολιτική οικολογία), 2013.

3.4. Υβριδικά συστήματα ενέργειας: Μια εναλλακτική λύση στην κατεύθυνση της βιωσιμότητας

3.4.1. Θεωρητική περιγραφή υβριδικών συστημάτων

Ένα υβριδικό σύστημα ισχύος είναι ένα δυναμικό σύστημα ισχύος το οποίο χρησιμοποιεί πάνω από μία μεθόδους παραγωγής ενέργειας για να καλύπτει την απαιτούμενη ενέργεια. Συνήθως, εκτός από τα φωτοβολταϊκά, συνδυάζονται και άλλες πηγές ενέργειας, (κυρίως τοπικές και ανανεώσιμες) όπως ανεμογεννήτριες, μικρουδροηλεκτρική ισχύ, υδροηλεκτρική ισχύ ποταμών, βιομάζα. Συχνό φαινόμενο, όμως, είναι να συνδυάζεται μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και μία συμβατική πηγή όπως η τροφοδοσία από το τοπικό δίκτυο ή από ηλεκτρογεννήτριες πετρελαίου (ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος - H/Z), μπαταρίες και γεννήτριες μετατροπής. Γενικά τα υβριδικά συστήματα συνδυάζουν τις μορφές ενέργειας για να τροφοδοτούν το σύστημα συνεχώς με σταθερή τάση, ελαχιστοποιώντας τους κινδύνους διακοπής της τροφοδοσίας. Χαρακτηρίζονται ως δυναμικά συστήματα, καθώς είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να εναλλάσσονται ανάμεσα στις διαθέσιμες πηγές ενέργειας ή και να τις συνδυάζουν ταυτόχρονα με αποτέλεσμα να εξαρτώνται κατά το ελάχιστο από τις μεταβολές των εξωγενών παραγόντων, όπως το τοπικό δίκτυο, η ηλιοφάνεια, η ένταση του ανέμου, η ροή του νερού κ.ά.

3.4.2. Εφαρμογές υβριδικών συστημάτων

Τα υβριδικά συστήματα κατά κύριο λόγο εφαρμόζονται για την αδιάλειπτη λειτουργία σημαντικών οικιακών, επαγγελματικών εφαρμογών ή εφαρμογών πρώτης ανάγκης όπως στρατιωτικές μονάδες, αεροδρόμια, νοσοκομεία ηλεκτρικών φορτίων ή ευαίσθητων φορτίων, σε περιοχές όπου το κεντρικό δίκτυο παρουσιάζει προβλήματα (διακοπές ή μεταβολές τάσης). Ο πιο συνηθισμένος συνδυασμός είναι αυτός μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών και μιας ανεμογεννήτριας. Τα φωτοβολταϊκά είναι πιο ισχυρά για μικρά φορτία, ενώ οι ανεμογεννήτριες, συνήθως, βοηθούν για μεγαλύτερα φορτία. Ένα τέτοιο σύστημα διακρίνεται στην εικόνα 3-4.



Εικόνα 3-4: Αυτόνομο υβριδικό σύστημα ισχύος.

Σε εφαρμογές που η ανάγκη για συνεχή παροχή ενέργειας είναι επιτακτική μπορεί να εφαρμοστεί ο συνδυασμός μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών με μια ανεμογεννήτρια και μία ηλεκτρογεννήτρια

πετρελαίου. Έτσι, επιτυγχάνεται η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος όλο το χρόνο (και το χειμώνα όπου η ανεμογεννήτρια παίζει ένα σημαντικό ρόλο ενίσχυσης όλου του φωτοβολταϊκού συστήματος). Παράλληλα η ηλεκτρογεννήτρια πετρελαίου, συνήθως ενεργοποιείται αυτόματα σε έκτακτες περιπτώσεις για να υποβοηθήσει το φωτοβολταϊκό σύστημα. Εφόσον το υβριδικό σύστημα αποτελείται μόνο από ηλεκτρογεννήτρια και είναι εγκατεστημένο σε συνδυασμό με το κεντρικό δίκτυο, τότε το κεντρικό δίκτυο χρησιμοποιείται ως εφεδρική πηγή σε περίπτωση ανάγκης.

Γενικότερα, ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει μία συμβατική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με μία τουλάχιστον μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα εποπτείας και ελέγχου, καθώς και σύστημα διαχείρισης φορτίου. Με αυτήν την έννοια, τα υβριδικά συστήματα αποτελούν μία εναλλακτική επιλογή αντί των συμβατικών συστημάτων, τα οποία τυπικά βασίζονται στην παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα (Βρεττός, 2010· Ρίπη, 2013). Σύμφωνα με τον Ν.3468/2006,ΦΕΚ.Α'129, αρθ.2, §25⁷:

Υβριδικός λέγεται κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που:

- i. Χρησιμοποιεί μία τουλάχιστον μορφή ΑΠΕ.
- ii. Η συνολική ενέργεια που απορροφά από το Δίκτυο σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού.
- iii. Η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων του σταθμού ΑΠΕ δεν μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού αυτού προσαυξημένη κατά 20%.

3.4.3. Πλεονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων ενέργειας

Τα υβριδικά συστήματα αποσκοπούν στην βέλτιστη αξιοποίηση της κάθε τεχνολογίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά κ.ά.) και παρέχουν ενέργεια ικανοποιητικής ποιότητας προς απορρόφηση από το δίκτυο. Έτσι μπορούν να αναπτυχθούν σαν αυτόνομα, καινούργια και ανεξάρτητα συστήματα μέσα σε μικρά συστήματα διανομής ενέργειας ή να ενταχθούν σε υπάρχουσες θερμικές μονάδες βασιζόμενες στο πετρέλαιο, μετά από τις απαραίτητες επεμβάσεις στο υπάρχον σύστημα (Ρίπη, 2013).

Τα υβριδικά συστήματα που περιέχουν τεχνολογία με καύσιμο λειτουργούν με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση καυσίμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καθιστά τέτοια συστήματα πιο οικονομικά σε περιοχές απομακρυσμένες από το δίκτυο (αγροτικές περιοχές) ή σε ΜΔΝ (Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά: ελληνικά νησιά που δεν συνδέονται με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της ηπειρωτικής χώρας), όπου η σύνδεσή τους με το ηλεκτρικό δίκτυο, η εγκατάσταση γραμμών διάθεσης ενέργειας ή η μεταφορά καυσίμου θεωρούνται αντιοικονομικές επιλογές. Επιπλέον, λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς τους και της αξιοπιστίας τους, τέτοιου τύπου συστήματα μπορούν να φανούν χρήσιμα σαν μία αποτελεσματική λύση παροχής ισχύος σε περιπτώσεις διακοπών παροχής ή ακόμη και σε εξειδικευμένους καταναλωτές, όπως οι τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί και οι νοσοκομειακές μονάδες (Σαραφινός και Σειραγάκης,2009).

⁷ <http://www.desmie.gr/ape-sithya/adeiodotiki-diadikasia-kodikopoiisi-nomothesis-ape/periexomena/diadikasia-adeiodotisis/ybridikoi-stathmoi-ilektroparagogis-apo-ape/>

Φυσικά, δεν θα μπορούσε να παραληφθεί το πλεονέκτημα που εμφανίζουν τα υβριδικά έργα ως προς την ταχύτητα εγκατάστασης των τεχνολογιών, την σχετική σταθερότητα του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που εμφανίζουν, καθώς και την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας φιλικών προς το περιβάλλον.

3.4.4. Η περίπτωση της άντλησης/ταμίευσης με υβριδικό σύστημα ενέργειας

Στην περίπτωση αυτή συνδυάζεται η υδροηλεκτρική παραγωγή ενός συστήματος ταμιευτήρων (όπου χρησιμοποιείται η τεχνολογία της άντλησης/ταμίευσης) σε συνδυασμένη λειτουργία με δύο ή περισσότερες ΑΠΕ (π.χ. φωτοβολταϊκά πάνελ και αιολικές μηχανές). Ο συνδυασμός αυτός αξιοποιείται με στόχο την αντιμετώπιση της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής και ζήτησης ενέργειας σε ΑΠΕ. Λόγω της εγγενούς στοχαστικότητας στην παραγωγή ενέργειας των ΑΠΕ, η ποσότητα της ενέργειας καθώς και ο χρόνος που αυτή παράγεται δεν μπορούν να προσδιοριστούν εκ των προτέρων (Ιωάννου, 2012). Έτσι, όταν υπάρχει περίσσεια είναι η αναγκαία η αποθήκευσή της ώστε να διατεθεί όταν η παραγωγή υπολείπεται της ζήτησης. Η ζητούμενη αποθήκευση επιτυγχάνεται μέσω της τεχνολογίας της άντλησης/ταμίευσης.

Ένας τέτοιος τύπος υβριδικού ενεργειακού συστήματος κατασκευάζεται στην Ικαρία. Μαζί με ένα αντίστοιχο σύστημα στο νησί El Hierro (ένα από τα Κανάρια νησιά κοντά στις βορειοδυτικές ακτές της Αφρικής) αποτελούν τα πρώτα εγχειρήματα αναλογικών υβριδικών συστημάτων στην Ευρώπη.

Το έργο στην Ικαρία εκμεταλλεύεται το συνδυασμό αιολική και υδροηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελείται από:

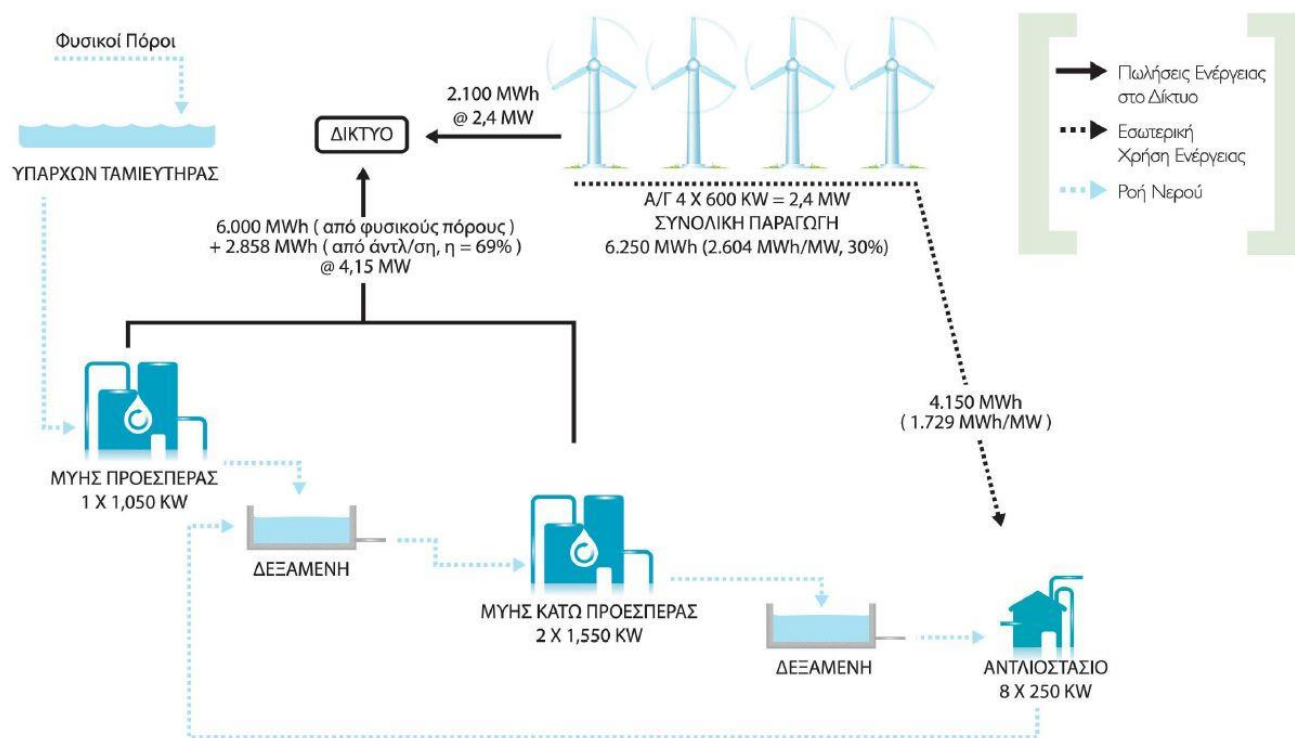
- Δύο μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΜΥΗΣ) στις θέσεις Προεσπέρα και Κάτω Προεσπέρα.
- Ένα αιολικό πάρκο (Α/Π) στη θέση Στραβοκουντούρα.
- Δύο δεξαμενές νερού.
- Ένα αντλιοστάσιο.
- Το Κέντρο Ελέγχου και Κατανομής Φορτίου Αγίου Κηρύκου.

Τα επτά επί μέρους στοιχεία του έργου συνδυάζονται μεταξύ τους για την παραγωγή και μερική αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας ως εξής:

- Υδροηλεκτρική ενέργεια:*** Ο ΜΥΗΣ Προεσπέρας, ισχύος 1,05 MW, εκμεταλλεύεται τις υπερχειλίσεις του υπάρχοντος ταμιευτήρα (θέση Πέζι) για την παραγωγή ενέργειας. Το νερό, εξερχόμενο από τον πρώτο ΜΥΗΣ φορτίζει την παρακείμενη δεξαμενή. Στη συνέχεια, κατευθύνεται στον ΜΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας, ισχύος 3,1 MW, όπου χρησιμοποιείται για την παραγωγή πρόσθετης ενέργειας και καταλήγει στη δεύτερη κατά σειρά δεξαμενή.
- Αιολική ενέργεια:*** Το αιολικό πάρκο, συνολικής ισχύος 2,4 MW, παράγει ενέργεια η οποία διοχετεύεται στο Δίκτυο ηλεκτροδότησης και στο Αντλιοστάσιο, όπου χρησιμοποιείται για τη μεταφορά νερού από την κάτω στην επάνω δεξαμενή και την εκ νέου παραγωγή ενέργειας από τον ΜΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας.

Ο έλεγχος και η βελτιστοποίηση λειτουργίας της παραπάνω διαδικασίας γίνονται πλήρως αυτοματοποιημένα, μέσα από το Κέντρο Ελέγχου και Κατανομής Φορτίου Αγίου Κηρύκου. Η

Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας του Υβριδικού Ενεργειακού Έργου Ικαρίας φτάνει τις 10,96 GWh. Η ενέργεια αυτή επαρκεί για την κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους των ενεργειακών αναγκών του νησιού για όλο το έτος, περιορίζοντας σημαντικά την ανάγκη λειτουργίας του Θερμικού Τοπικού Σταθμού Παραγωγής στον Άγιο Κήρυκο. Η διαδικασία λειτουργίας του εν λόγω συστήματος διακρίνεται σχηματικά στην εικόνα 3-5.

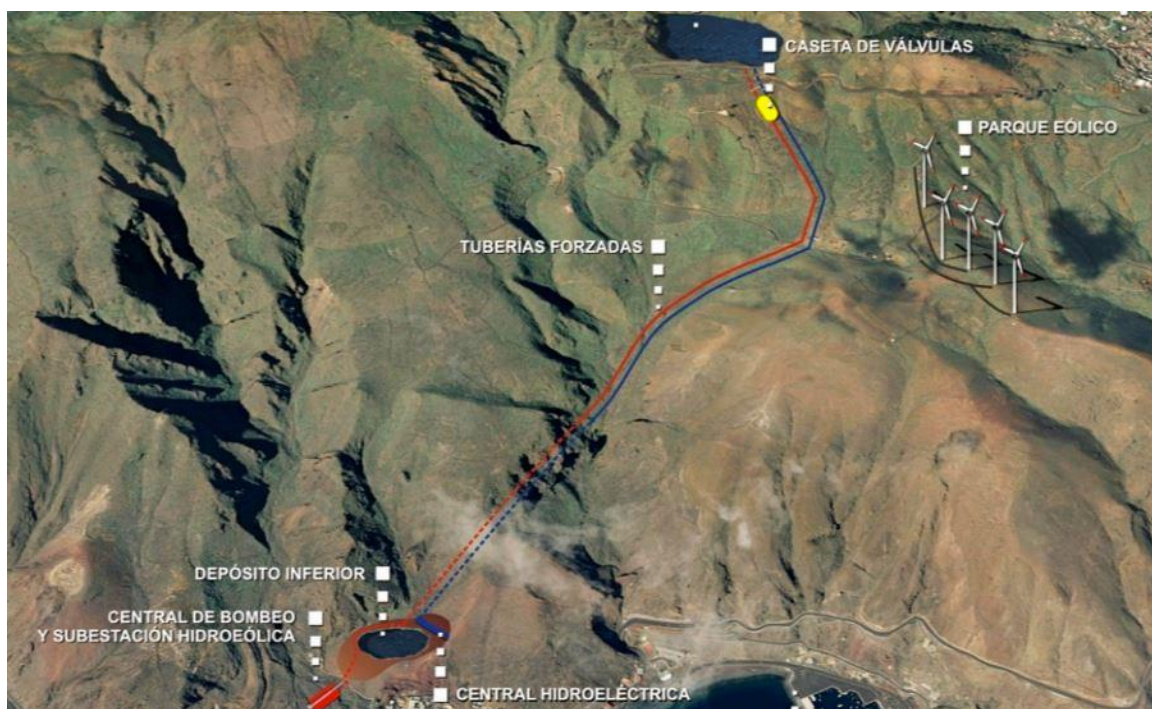


Εικόνα 3-5: Λειτουργία υβριδικού συστήματος Ικαρίας.

Πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες (<http://www.ppcr.gr/Energy.aspx?C=29>)

Η λειτουργία του συστήματος στο El Hierro έχει ως εξής: πέντε ανεμογεννήτριες συνολικής παραγωγής 11,5 MW θα φροντίζουν για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπου 11.000 κατοίκους, που είναι και ο συνολικός πληθυσμός του νησιού, σε έναν επιπρόσθετο αριθμό τουριστών καθώς και σε τρεις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης που λειτουργούν. Το υδροηλεκτρικό έργο άντλησης-ταμίευσης θα αποθηκεύει την περίσσεια αιολικής ενέργειας, αντλώντας νερό σε ύψος 700 m, γεμίζοντας τον κρατήρα ενός αδρανοποιημένου ηφαιστείου. Σε περίπτωση αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης από το αιολικό πάρκο, το νερό θα απελευθερώνεται από τον κρατήρα παράγοντας έως και 11,3 MW ηλεκτρικής ενέργειας και γεμίζοντας κατά την απόθεσή του την τεχνητή δεξαμενή που έχει κατασκευαστεί στον πόδα του ηφαιστείου. Στη συνέχεια, το νερό αντλείται από τη κάτω στην πάνω δεξαμενή όταν υπάρχει πλεονάζουσα αιολική ενέργεια. Το σύστημα αυτό αναμένεται να καλύπτει το 80% των ενεργειακών αναγκών του νησιού, ενώ το υπόλοιπο 20% προβλέπεται να καλύπτεται από ηλιακούς συλλέκτες και φωτοβολταϊκά, καθιστώντας έτσι το νησί ενεργειακά ανεξάρτητο από συμβατικές μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Φυσικά, οι υπάρχουσες νηξελογεννήτριες θα συνεχίσουν την λειτουργία τους καλύπτοντας το υπολειπόμενο φορτίο ζήτησης σε περίπτωση αδυναμίας κάλυψης του συνολικού από τον συνδυασμό των παραπάνω τεχνολογιών (Ρίππη, 2013).

Η λειτουργία του υβριδικού συστήματος στο νησί El Hierro εικονίζεται στην 3-6.



Εικόνα 3-6: Αναπαράσταση του υβριδικού συστήματος ενέργειας στο νησί El Hierro. Πηγή: Clean Energy / Action Project

3.5. Το ζήτημα της κλίμακας στην υδροηλεκτρική παραγωγή. Η επίπτωση στα υβριδικά συστήματα

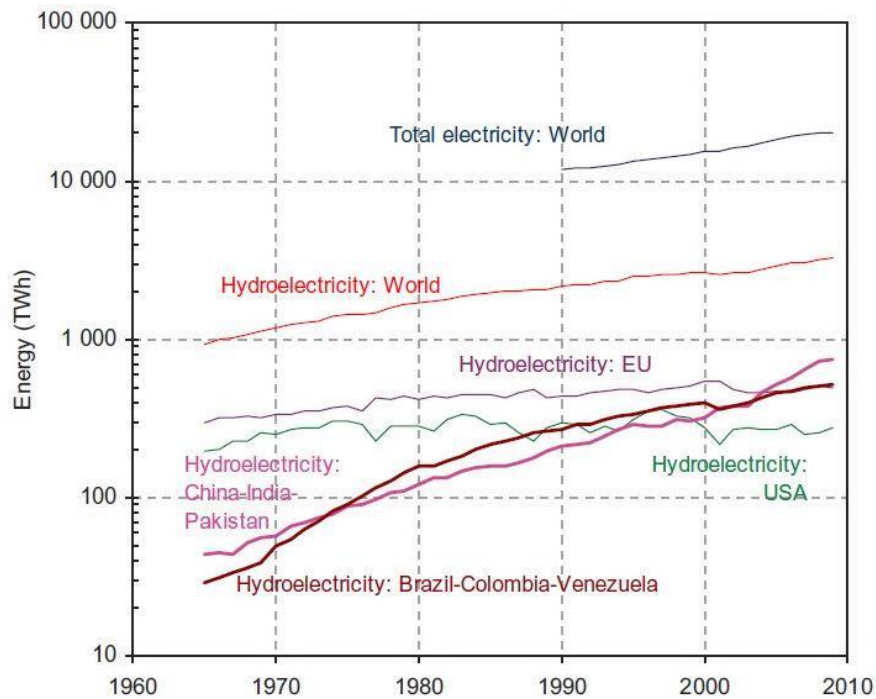
3.5.1. Εισαγωγή στην έννοια και τις προβληματικές της κλίμακας στον τομέα της ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια λειτουργεί στο σύγχρονο κόσμο ως θεμέλιο της κοινωνικής δόμησης και της πολιτισμικής παραγωγής. Η υδροηλεκτρική ενέργεια, ειδικότερα, αντιπροσωπεύει κατά προσέγγιση το 16% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως διακρίνεται στο γράφημα της εικόνας 3-7, η ηλεκτρική παραγωγή (αλλά και η υδροηλεκτρική) τα τελευταία χρόνια αυξάνονται εκθετικά με ρυθμό κοντά στο 3% (2,6% για την υδροηλεκτρική παραγωγή) ετησίως. Με άλλα λόγια διπλασιάζονται κάθε 25 χρόνια.

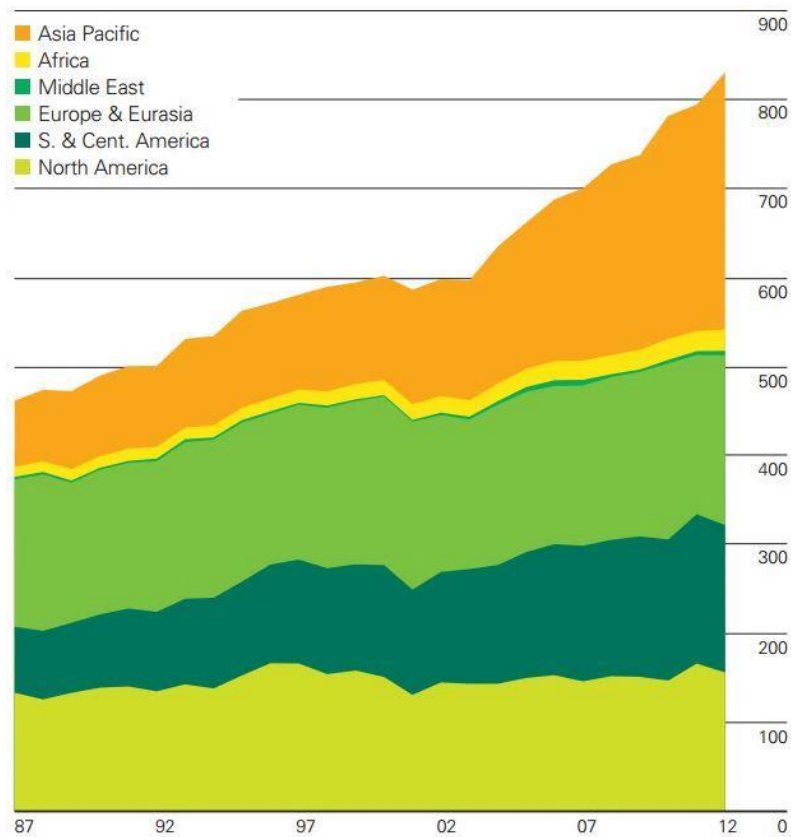
Στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής η υδροηλεκτρική παραγωγή παραμένει στάσιμη, αλλά στις χώρες της Ασίας και της Νότιας Αμερικής έχουμε θεαματικές αυξήσεις (με ρυθμό μεγαλύτερο του 6 % το χρόνο). Αντίστοιχα αυξάνεται και η κατανάλωση όπως εικονίζεται στην 3-8.

Ανακόπτει λοιπόν το ερώτημα σχετικά με τα αίτια της σταθερότητας της υδροηλεκτρικής παραγωγής στον ευρωπαϊκό χώρο. Οι περισσότεροι «ανεπτυγμένες» ευρωπαϊκές χώρες (Γερμανία, Γαλλία, Ιταλία, Ελβετία, Ισπανία) έχουν αξιοποιήσει το σύνολο σχεδόν του οικονομικά εκμεταλλεύσιμου υδροδυναμικού τους (80-100%), οπότε δεν υπάρχει η δυνατότητα περαιτέρω αύξησης. Η Νορβηγία έχει εκμεταλλευτεί τα 2/3 του υδροδυναμικού της, ωστόσο αυτό το κλάσμα αποτελεί το 99% της συνολικής ηλεκτρικής παραγωγής της (Koutsoyiannis, 2011).

Στην Ελλάδα, ωστόσο, το υδροδυναμικό που βρίσκεται υπό εκμετάλλευση δεσμεύει ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού (31%). Υπάρχει, δηλαδή, η δυνατότητα περαιτέρω εκμετάλλευσής του ώστε το μερίδιο της υδροηλεκτρικής ενέργειας στη συνολική παραγωγή να αυξηθεί, ενώ ταυτόχρονα οι



Εικόνα 3-7: Εξέλιξη της ηλεκτρικής και της υδροηλεκτρικής παραγωγής στον κόσμο και σε συγκεκριμένες ομαδοποιήσεις χωρών τα τελευταία 45 χρόνια (Πηγή: Koutsoyiannis, 2011).



Εικόνα 3-8: Κατανάλωση υδροηλεκτρικής ενέργειας ανά ήπειρο από το 1987 έως το 2012.

(Πηγή: BP Statistical Review of World Energy 2013, http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf)

επιβλαβείς μορφές ενέργειας (όπως η θερμική και η πυρηνική) να μειωθούν ή να αποφευχθούν. Η ανάπτυξη όμως των νέων υδροηλεκτρικών πρέπει να θεμελιώνεται σε ένα σχέδιο συνολικότερου σχεδιασμού γύρω από την ενέργεια σε εθνικό επίπεδο, όπου οι τοπικές κοινωνίες και οι συλλογικότητες θα λαμβάνουν ισότιμο μέρος σε ένα πλάνο συμμετοχικού σχεδιασμού. Έτσι θα αποφευχθούν στο μέλλον περιπτώσεις όπως η μη λειτουργία του ΥΗΕ στη Μεσοχώρα (170 MW, 340 GWh/χρόνο, επένδυση 500 εκ. €).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα που αποδεικνύει την έλλειψη συνολικότερου σχεδιασμού είναι το ιστορικό της εκτροπής του Αχελώου και της κατασκευής των συναφών φραγμάτων και ΥΗΕ. Ο αρχικός σχεδιασμός περιελάμβανε την εκτροπή 1.200.000 m³ νερού ανά έτος για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών του Θεσσαλικού κάμπου. Ωστόσο, παρά την μηδαμινή ανάπτυξη εγγειοβελτιωτικών έργων στον Θεσσαλικό κάμπο που θα εξυπηρετούσαν την εκμετάλλευση του εκτρεπόμενου νερού, τα φράγματα Μεσοχώρας και Συκιάς κατασκευάστηκαν κανονικά. Ο κυβερνητικός σχεδιασμός, δηλαδή, αναζητούσε μια περιοχή ως επενδυτικό στόχο συσσωρευμένων κεφαλαίων (εν προκειμένω μέσω της κατασκευής φραγμάτων) αντί για ένα συνολικό διαχειριστικό πλάνο σε εθνικό επίπεδο που θα βασιζόταν στην κάλυψη των πολλαπλών στόχων (παραγωγή ενέργειας και αρδευτικές ανάγκες). Αυτό αποδεικνύεται πρώτον, από το γεγονός ότι ακόμα και αν γινόταν σήμερα η εκτροπή του Αχελώου, δεν θα υπήρχε πρακτικό αποτέλεσμα γιατί δεν έχουν γίνει τα απαραίτητα εγγειοβελτιωτικά έργα για την υποδοχή και διάχυση των ποσοτήτων νερού που θα εκτραπούν. Δεύτερον, γιατί δεν υπάρχει ούτε στον κυβερνητικό ούτε στον περιφερειακό προγραμματισμό ένταξη και χρηματοδότηση τέτοιου τύπου έργων από ευρωπαϊκά προγράμματα. Τρίτον, από το γεγονός ότι το μεν φράγμα της Μεσοχώρας κατασκευάστηκε ώστε να υποδεχθεί 1.200.000 m³ νερού, η σήραγγα εκτροπής κατασκευάστηκε για να εκτρέψει 600.000 m³, και με την τελευταία απόφαση του υπουργείου Περιβάλλοντος μόνο 250.000 m³ νερού, τα οποία δεν φτάνουν ούτε για την εξασφάλιση της ομαλής ροής του Πηνειού κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Αντιπαραθετικά, η επιτροπή κατοίκων ενάντια στην εκτροπή πρότεινε ένα σχέδιο ως ισοδύναμο, το οποίο περιελάμβανε την κατασκευή 18 φραγμάτων σε υπάρχουσες λεκάνες απορροής της περιοχής Θεσσαλίας και την ανασύσταση της λίμνης Κάρλας. Με τα χρήματα που έχουν δοθεί μέχρι σήμερα για το έργο της εκτροπής του Αχελώου θα είχαν ήδη κατασκευασθεί αυτά τα φράγματα και θα είχαν ήδη εξασφαλισθεί 250.000 m³ νερού χωρίς να διαταραχθεί η περιβαλλοντική ισορροπία. Να σημειώσουμε εδώ ότι η κατασκευή έξι μόνο από τα 18 προτεινόμενα φράγματα, θα εξασφάλιζε 200.000 m³ νερού (Γκόγκος⁸, 2013).

Στον πίνακα 3-1 παρατίθενται στοιχεία για το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο υδροδυναμικό των Ευρωπαϊκών χωρών, αλλά και ποιο ποσοστό αυτού βρίσκεται ήδη υπό εκμετάλλευση.

Αντίστοιχα, στον πίνακα 3-2 διακρίνουμε στοιχεία για το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο υδροδυναμικό σε παγκόσμιο επίπεδο.

Και οι δύο πίνακες προέρχονται από το «Scale of water resources development and sustainability: small is beautiful, large is great» (Koutsoyiannis, 2011).

⁸ «Η εκτροπή του Αχελώου δεν λύνει τα προβλήματα νερού στη Θεσσαλία», Οικοτριβές, Μάιος 2013.
Πηγή: <http://oikotrives.wordpress.com/2013/06/02/acheloos-thessalia/>

Πίνακας 3-1: Ποσοστό εκμετάλλευσης υδροδυναμικού σε 8 ευρωπαϊκές χώρες.

Χώρα	Οικονομικά εκμεταλλεύσιμο υδροδυναμικό (TWh/έτος)	Υδροηλεκτρική παραγωγή (TWh/έτος)	Ποσοστό εκμετάλλευσης (%)
Γερμανία	25	25	100
Γαλλία	72	70	97
Ιταλία	55	52	95
Ελβετία	36	34	94
Ισπανία	40	35	88
Σουηδία	85	68	80
Νορβηγία	180	120	67
Ελλάδα	15	4,7	31

Πίνακας 3-2: Ποσοστό εκμετάλλευσης υδροδυναμικού σε παγκόσμια κλίμακα.

Ηπειρος	Οικονομικά εκμεταλλεύσιμο υδροδυναμικό (% του παγκόσμιου)	Ποσοστό εκμετάλλευσης (%)
Ευρώπη	10	75
Βόρεια και Κεντρική Αμερική	13	75
Νότια Αμερική	20	30
Ασία	45	25
Αφρική	12	8

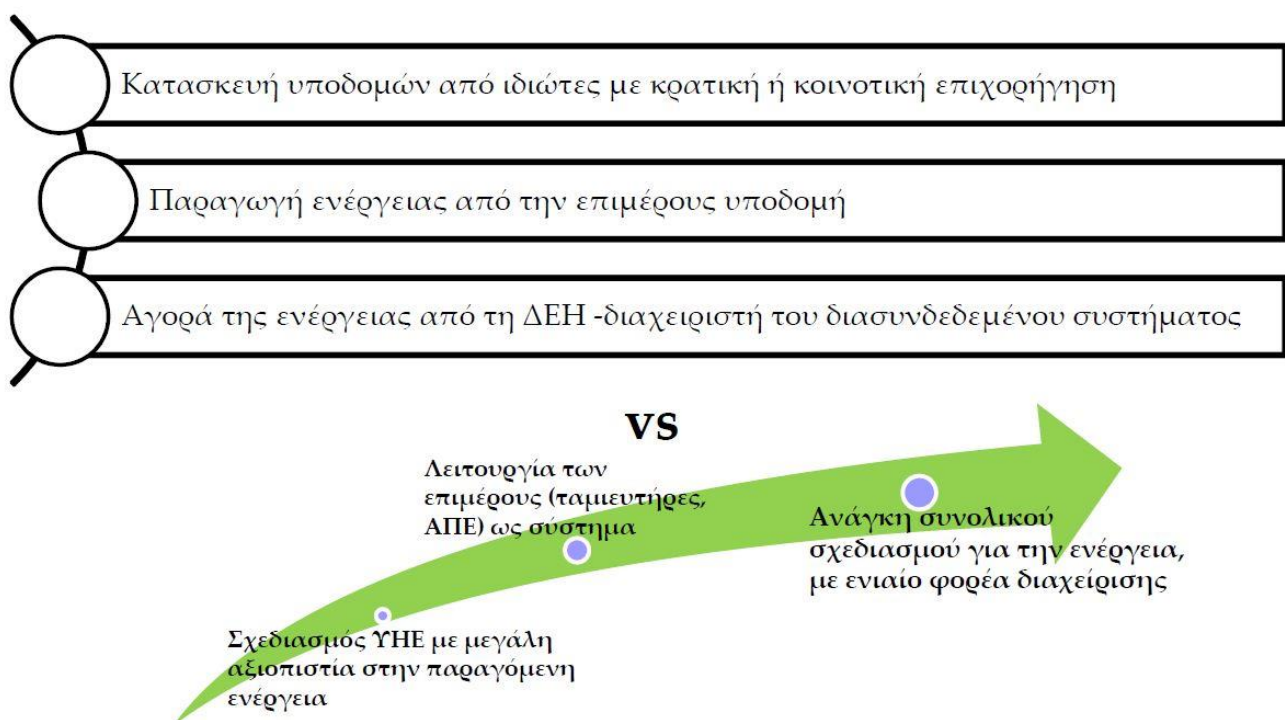
3.5.2. Πεδία θεωρητικής πλάνης γύρω από την υδροηλεκτρική ενέργεια

1. Η υδροηλεκτρική ενέργεια δεν αποτελεί ανανεώσιμη μορφή, ενώ παράλληλα είναι μη βιώσιμη

Η υδροηλεκτρική παραγωγή οφείλεται στην ανανέωση των υδατικών πόρων ως αποτέλεσμα του υδρολογικού κύκλου (εικόνα 3-12). Επομένως, είναι μια μορφή ενέργειας που έχει μηδαμινές πιθανότητες μελλοντικής εξάντλησης. Ωστόσο, αρκετά συχνά «πράσινες» αναπτυξιακές λογικές και ιδεολογικές επιρροές συχνά αντανακλώνται σε νομοθετικά πλαίσια που κατατάσσουν τα Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα στις ΑΠΕ, ενώ τα μεγάλα όχι. Ενώ δεν υπάρχει κάποια επιστημονική τεκμηρίωση σχετικά με τη διάκριση ενός υδροηλεκτρικού σε μεγάλο ή μικρό, η διάκριση αυτή γίνεται μέσω της εγκατεστημένης ισχύος. Το όριο παλιότερα ήταν 5 MW, κατόπιν έγινε 10 MW, ενώ σήμερα είναι 15 MW. Κάτω από αυτό το όριο η ενέργεια απορροφάται κατά προτεραιότητα και πληρώνεται με διοικητικά ρυθμιζόμενη τιμή, ενώ πάνω από αυτό αποφασίζει η «ελεύθερη» αγορά. Χαρακτηριστικό του παραλογισμού αυτού είναι το γεγονός ότι το εν λόγω κριτήριο (κριτήριο ισχύος) δεν εφαρμόζεται σε άλλες μορφές ΑΠΕ όπως η αιολική. Ο διαχωρισμός αυτός μπορεί να προσφέρει διαδικαστικές ευκολίες (ως προς το νομικό σκέλος), αλλά αδυνατεί να αντιμετωπίσει τις τεχνικές δυσκολίες του προβλήματος μαζί με τα φυσικά μεγέθη που υπεισέρχονται σε αυτό. Για παράδειγμα ένα έργο 10 MW με πτώση 15 m και παροχή 80 m³/s κατατάσσεται στα ΜΥΗΕ, ενώ ένα δεύτερο με εγκατεστημένη ισχύ 16 MW, 30 m πτώση και 60 m³/s στα μεγάλα. Το πρώτο απαιτεί, ωστόσο, πολύ μεγαλύτερες μονάδες (Δήμας και Μπουζιώτας, 2013). Το ίδιο νομοθετικό πλαίσιο εφαρμόζεται και σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, αλλά και στις ΗΠΑ. Τίθενται λοιπόν κάποια προφανή ερωτήματα σχετικά με την κατάταξη των υδροηλεκτρικών έργων μεγάλης κλίμακας στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Koutsoyiannis, 2011):

- Ποιος παράγοντας καθιστά την παραγόμενη ενέργεια μη ανανεώσιμη όταν η εγκατεστημένη ισχύς υπερβαίνει τα νομοθετικά όρια;
- Το επίπεδο της αξιοπιστίας αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με την κλίμακα του έργου;
- Η υδροηλεκτρική ενέργεια καθίσταται μη ανανεώσιμη αν έχουμε έντονο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από την κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού φράγματος;
- Τα φωτοβολταϊκά πάνελ και οι αιολικές μηχανές δεν έχουν επίσης περιορισμένη διάρκεια ζωής, όπως ένα φράγμα;

Η διαφοροποίηση ενός ΥΗΕ σε ΑΠΕ ή μη ΑΠΕ στις περισσότερες των περιπτώσεων σχετίζεται με τη λειτουργία που επιτελούν ως «πλότος» της εισαγωγής ιδιωτών επενδυτών στο χώρο της ενέργειας. Μια λειτουργία που δεν είναι άγνωστη, καθώς εφαρμόζεται και στις υπόλοιπες ΑΠΕ (αιολικά, φωτοβολταϊκά). Η σχηματοποίηση της λειτουργίας του εν λόγω μηχανισμού εικονίζεται στην 3-9.



Εικόνα 3-9: Παραγωγή ενέργειας από ιδιώτες επενδυτές σε αντιπαράθεση με έναν ενιαίο, δημόσιο και κοινωνικοποιημένο σχεδιασμό (Πηγή: Δήμας και Μπουζιώτας, 2013).

II. Η αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα υπερβαίνει την υπάρχουσα τεχνολογία

Ενώ γίνεται συνεχής αναφορά στην ανάγκη προώθησης εναλλακτικών και ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, η ανάδειξη των ουσιαστικών διαφοροποιήσεών τους σε σχέση με τις μη ανανεώσιμες πηγές συχνά παραλείπεται. Η αιολική και η ηλιακή ενέργεια (καθώς και η παραγωγή από τα ΜΥΗΕ) εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, είναι ιδιαίτερα ευμετάβλητη και απρόβλεπτη. Έτσι δε μπορεί να υπάρξει συγχρονισμός με τη ζήτηση και τη διακόμισή της. Επομένως, τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που θα δίνουν τη δυνατότητα αντιμετώπισης του εν λόγω προβλήματος είναι αναγκαίες, από τη στιγμή που η παραγωγή αιολικής και ηλιακής ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί. Η τεχνολογία της άντλησης/ταμίευσης όπως περιγράφηκε προηγουμένως είναι μια τέτοια περίπτωση με αποδεδειγμένα αυξημένη αποδοτικότητα (όπως διακρίνουμε και στον πίνακα 3-3).

Πίνακας 3-3: Αποδοτικότητα της ενεργειακής παραγωγής χαρακτηριστικών ανανεώσιμων και μη ανανεώσιμων τεχνολογιών (Πηγή: Koutsoyiannis, 2011).

Μορφή ενέργειας	Παρατηρήσεις	Αποδοτικότητα
Υδροηλεκτρική	Μεγάλης Κλίμακας	90-95%
Αιολικές μηχανές	Όριο Betz (θεωρητικό άνω όριο)	59%
	Στην πράξη	10-30%
Ηλιακά πάνελ	Three junction concentrators (τρέχουσα έρευνα)	41,6%
	Διαθέσιμα στην αγορά	~14-19%
Μη ανανεώσιμες μορφές	Συνδυασμένου κύκλου (καύση αερίου και ατμοηλεκτρικά)	~60%
	Μηχανές εσωτερικής καύσης	10-50%

Το εν λόγω χαρακτηριστικό της υδροηλεκτρικής ενέργειας την καθιστά μοναδική ανάμεσα σε όλες τις ανανεώσιμες μορφές. Παρότι μπορεί να εφαρμοστεί και σε μικρά αυτόνομα υβριδικά συστήματα, το ουσιαστικό της πλεονέκτημα αναδεικνύεται σε έργα μεγάλης κλίμακας (όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια). Ένας μικρός αριθμός υδατοπτώσεων ΥΗΕ έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί ως αναστρέψιμες μονάδες. Ωστόσο, επειδή συνήθως τα ΥΗΕ αξιοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας σε αιχμές της ζήτησης, οπότε λειτουργούν λίγες ώρες της ημέρας, υπάρχει δυνατότητα μετατροπής των σταθμών παραγωγής σε νέους με αμφίδρομη λειτουργία. Ο σχεδιασμός αυτός συνήθως απαιτεί δαπανηρές επενδύσεις, οπότε η συνήθης τακτική είναι ο σχεδιασμός ενός έργου ως αναστρέψιμο εξ αρχής.

III. Η υδροηλεκτρική ενέργεια έχει χειρότερα χαρακτηριστικά αντιπαρατιθέμενη με την αιολική ή την ηλιακή

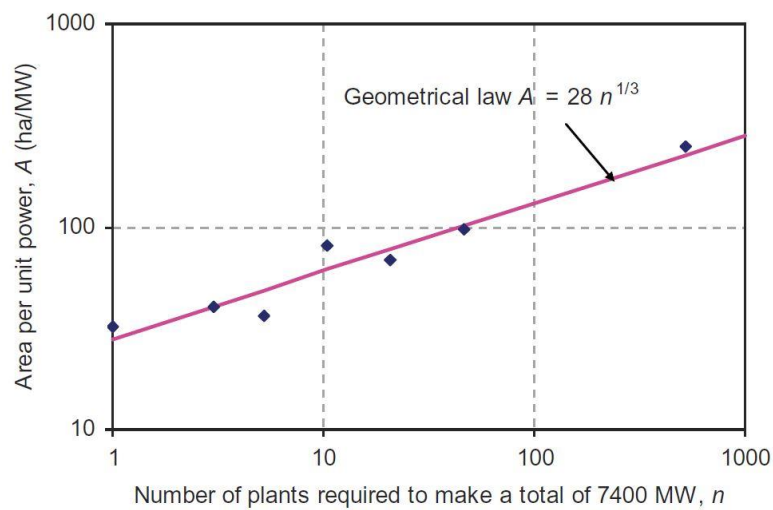
Τα μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα έχουν μοναδικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Ως μορφή ενέργειας είναι πλήρως ελέγξιμη αν τη συγκρίνουμε με τις (υψηλής αβεβαιότητας) μορφές της αιολικής και της ηλιακής. Το διακριτό στοιχείο διαφοροποίησης και δυνατότητας ελέγχου είναι η αποθήκευση σε επαρκούς μεγέθους ταμιευτήρες.

Αυτή τους η ικανότητα μαζί με τη μεγάλη ταχύτητα ενεργοποίησης των υδροστροβίλων (ενεργοποιούνται σε μερικά λεπτά) προσφέρουν αξιόπιστη πρωτεύουσα ενέργεια στις αιχμές της ζήτησης με την παράλληλη δυνατότητα ενεργειακής αποθήκευσης. Τέλος, η αποδοτικότητά τους αγγίζει το 95%, τη στιγμή που άλλες μορφές μετά βίας πλησιάζουν στο μισό αυτής της τιμής.

IV. Οι μικρές εγκαταστάσεις είναι προτιμότερες σε σχέση με τις μεγάλες

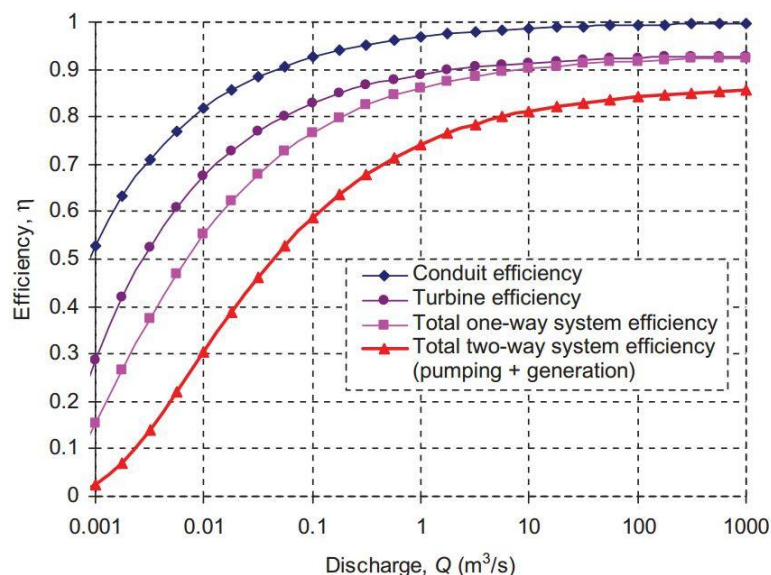
Η αντιπαράθεση ανάμεσα στα έργα μεγάλης και μικρής κλίμακας φαίνεται να έχει κερδηθεί από τα δεύτερα. Την δεκαετία 2000-2010 στην Ελλάδα, παρότι δεν υπήρξε αξιοσημείωτη πρόοδος στα έργα μεγάλης κλίμακας, ένα σύνολο 250 ΜΥΗΕ έχουν αδιοδοτηθεί, με αθροιστική εγκατεστημένη ισχύ 437 MW. Ανακύπτει λοιπόν το ερώτημα: Τι προκαλεί τις μικρότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον: ένα φράγμα σε ένα συγκεκριμένο ποτάμι (π.χ. Αχελώος) με εγκατεστημένη ισχύ 437 MW ή 250 ΜΥΗΕ σε διαφορετικούς ποταμούς και υδατορεύματα με την ίδια εγκατεστημένη ισχύ;

Για να απαντηθεί το ερώτημα με περισσότερο γενικούς όρους, διακρίνουμε ότι η στατιστική ανάλυση υπαρχόντων ΥΗΕ αποδεικνύει ότι η μέση έκταση των ταμιευτήρων ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος είναι μεγαλύτερη σε μικρά έργα (εικόνα 3-10).

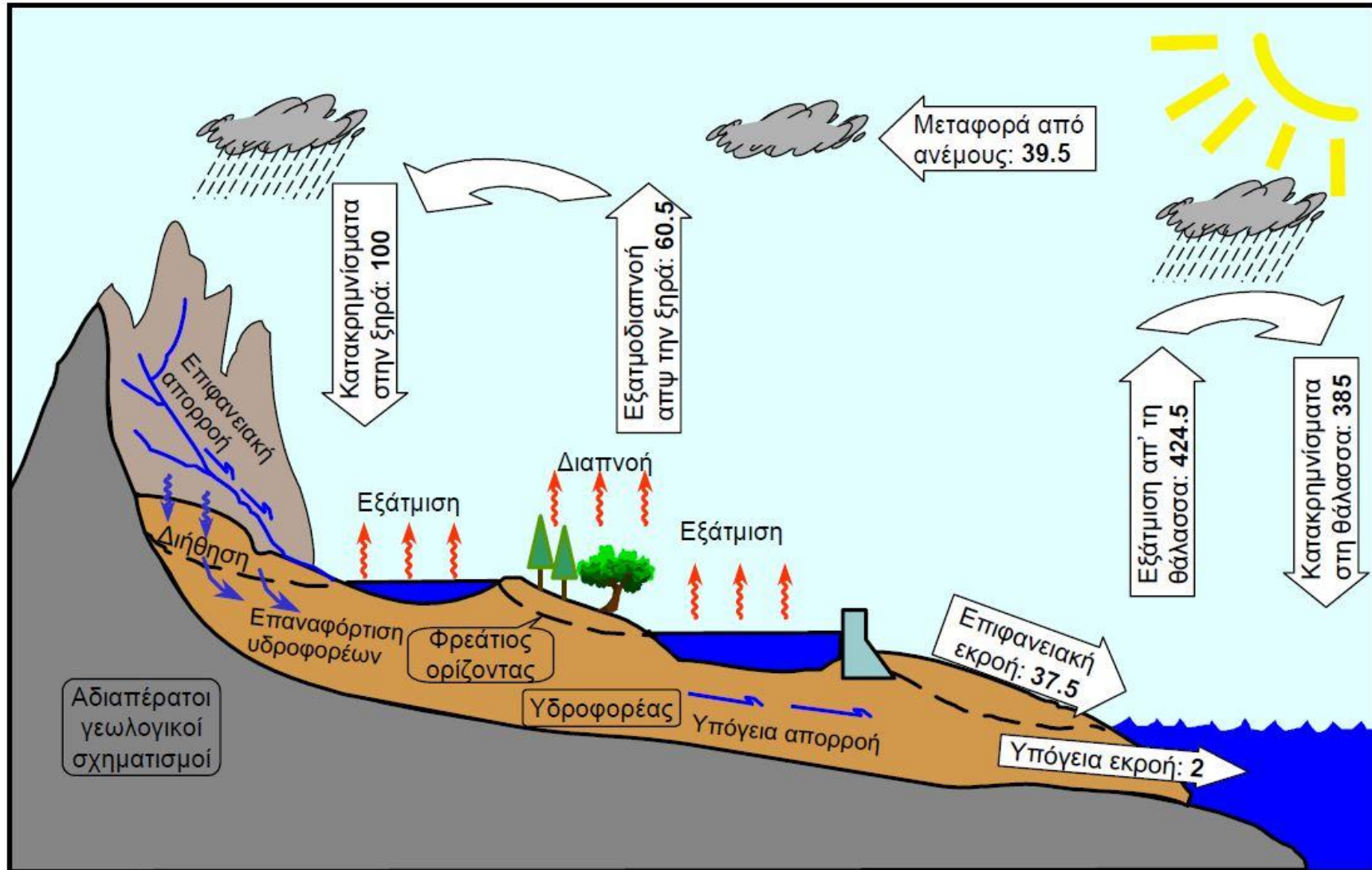


Εικόνα 3-10: Γραφική αναπαράσταση της έκτασης του ταμιευτήρα ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε συνάρτηση με τον αριθμό των εγκαταστάσεων που δίνουν συνολική εγκατεστημένη ισχύ 7400 MW (Πηγή: Koutsoyiannis, 2011).

Κατ' αντιστοιχία, η αποδοτικότητα ενός αναστρέψιμου ΥΗΕ, εκφρασμένη ως συνάρτηση της παροχής σχεδιασμού Q , διακρίνεται στο γράφημα της εικόνας 3-11. Η αύξηση της αποδοτικότητας όσο αυξάνεται η κλίμακα (δηλαδή η παροχή σχεδιασμού στο εν λόγω παράδειγμα) είναι εντοπωσιακή. Αναδεικνύεται δηλαδή το συγκριτικό πλεονέκτημα των έργων μεγάλης κλίμακας στην αποθήκευση ενέργειας σε σχέση με της μικρής κλίμακας, όταν αποφασιστικό κριτήριο είναι η αποδοτικότητα.



Εικόνα 3-11: Αύξηση της αποδοτικότητας αναστρέψιμου ΥΗΕ με αύξηση της παροχής σχεδιασμού (Πηγή: Koutsoyiannis, 2011).



Εικόνα 3-12: Σχηματική παράσταση του υδρολογικού κύκλου και του μέσου ετήσιου υδατικού ισοζυγίου της Γης. Οι μέσες ετήσιες διακινήσεις νερού έχουν εκφραστεί ως ποσοστό (%) επί της ετήσιας ποσότητας των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο χερσαίο τμήμα της Γης. Μία ποσοστιαία μονάδα αντιστοιχεί σε 1190 km³/έτος (Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

3.6. Οι δυσκολίες και οι προβληματικές κατά τη μοντελοποίηση της συνδυασμένης διαχείρισης ΥΗΕ-ΑΠΕ: οι αυξημένες προκλήσεις του τριπτύχου παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση

3.6.1. Ο πολλαπλός ρόλος του νερού στο εσωτερικό ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας

Στα υβριδικά συστήματα ενέργειας όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου (3.4) το νερό και οι υδατικοί πόροι εν γένει κατέχουν ρόλους πολλαπλούς και αλληλοεμπλεκόμενους. Ο πλέον κλασικός ρόλος του νερού είναι αυτός του μετασχηματιστή ενέργειας, με διττή λειτουργία: ενίοτε ως παραγωγός και ενίοτε ως καταναλωτής ενέργειας. Σε ένα υδροσύστημα όπου βασική στοχοθεσία αποτελεί η υδροηλεκτρική παραγωγή το νερό είναι ο άμεσος παραγωγός ενέργειας. Ωστόσο, έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί και ως έμμεσος παραγωγός (ή ως μέσο παραγωγής ή συντήρησης) κατά το «προτσές παραγωγής» ενός άλλου καυσίμου (π.χ. βιοκαύσιμα). Πολύ συνηθισμένη, βέβαια, είναι και η λειτουργία τους ως καταναλωτή ενέργειας στα αντλητικά συγκροτήματα.

Με την τεχνολογία της άντλησης/ταμείου, παράλληλα, το νερό είναι και το μόνο μέσο αποθήκευσης ενέργειας σε μεγάλες κλίμακες. Γι αυτό ακριβώς το λόγο αποτελεί και το «σημείο κλειδί» στα υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπου ο συνδυασμός των επιμέρους τεχνολογιών βοηθά στο να υπερκεράσουμε τους μεμονωμένους, εγγενείς περιορισμούς τους. Η λειτουργία τους είναι δοκιμασμένη σε μικρές κλίμακες (π.χ. κάλυψη ενεργειακών ζητήσεων νησιωτικών δικτύων), αλλά η εφαρμογή τους στη μεγάλη κλίμακα είναι ένα διαρκές διακύβευμα. Στην παρούσα εργασία, από εδώ και στο εξής, ως Υβριδικό Σύστημα Ανανεώσιμης Ενέργειας (ΥΣΑΕ) αναφέρεται αυτό που συνδυάζει την υδροηλεκτρική με την αιολική/ηλιακή ενέργεια.

3.6.2. Αναλογίες με τα συστήματα διαχείρισης υδατικών πόρων

3.6.2.1. Το ζήτημα της βιωσιμότητας

Όπως περιγράψαμε και προηγουμένως, μια τακτική διαχείρισης των υδατικών πόρων χαρακτηρίζεται βιώσιμη όταν δίνει τη δυνατότητα κάλυψης των αναγκών και της ζήτησης μέσω αντίστοιχης παροχής σε έναν ορίζοντα μακροπρόθεσμο. Παρότι, όμως, το νερό είναι βιώσιμο από τη φύση του (λόγω του υδρολογικού κύκλου: εικόνα 3-12), μια πολιτική διαχείρισής του μπορεί να είναι ισχυρά επιβλαβής και μη βιώσιμη.

Με αυτό το σκεπτικό, το πλαίσιο της βιωσιμότητας εμπεριέχει από τη φύση του δύο βασικούς άξονες, οι οποίοι είναι εξίσου βαρύνουσας σημασίας:

- Τη *διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων (availability of resources)*, η οποία ελέγχεται από τη φύση και τις πολιτικές κατανάλωσης.
- Τη *διαχείριση των φυσικών πόρων (management of resources)*, η οποία είναι καθαρά ελεγχόμενη από τον ανθρώπινο παράγοντα.

Εν γένει, όλες οι ΑΠΕ (υδροηλεκτρική ενέργεια, αιολική, κυματική, παλιρροϊκή, βιοκαύσιμα) βασίζουν την παραγωγή τους στην ηλιακή ενέργεια και είναι εγγενώς βιώσιμες. Η μη βιωσιμότητά τους έγκειται στην απουσία ενός μηχανισμού που θα δίνει τη δυνατότητα ρύθμισης από άποψη διαχείρισης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Ο ρόλος αυτός μπορεί να ανατεθεί σε μεγάλης

κλίμακας συγκροτήματα άντλησης-ταμίευσης, τα οποία λειτουργούν κατ' αναλογία όπως οι μεγάλοι ταμιευτήρες σε ένα σύστημα υδατικών πόρων.

3.6.2.2. Το ζήτημα της αβεβαιότητας

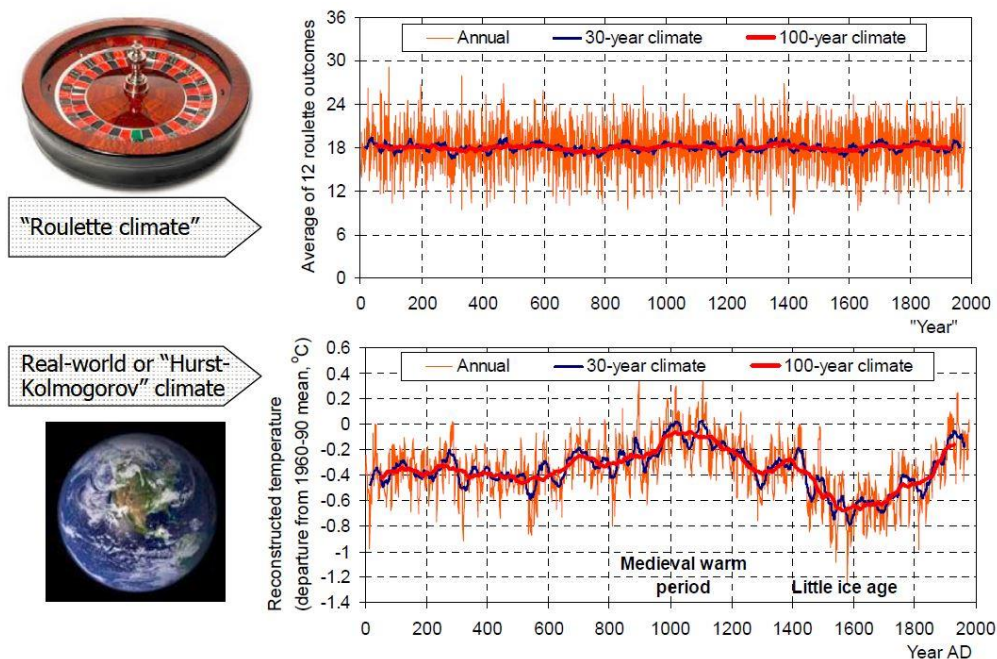
Η αβεβαιότητα είναι εγγενές χαρακτηριστικό τόσο στη διαχείριση υδατικών πόρων όσο και στη διαχείριση των ΥΣΑΕ εφόσον οποιαδήποτε πρόβλεψη της διαθεσιμότητας υδατικών πόρων (βροχή, απορροή, κ.ά.) και της παραγωγής ενέργειας μέσω ενός ντετερμινιστικού μοντέλου είναι αδύνατη. Οι υδρομετεωρολογικές διεργασίες εμπεριέχουν από τη φύση τους τη στοχαστικότητα ως βασική τους ορίζουσα. Στις επιστήμες του μηχανικού και (όπως είναι φυσικό και) στην υδρολογία η αβεβαιότητα είναι βασικός παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των κατασκευών. Όλες οι υδραυλικές κατασκευές σχεδιάζονται για ένα δεδομένο επίπεδο διακινδύνευσης (risk), όπως εκφράζεται στον ακόλουθο τύπο:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (3.1)$$

όπου:

- n : ο αριθμός των ετών.
- R : η πιθανότητα υπέρβασης στα n έτη.

Ένα σημείο-κλειδί στη διαχείριση υδατικών πόρων είναι η ελαχιστοποίηση του ρίσκου (ως αδυναμία κάλυψης των υδατικών αναγκών) σε ένα υδροσύστημα. Μια στοχαστική θεώρηση των διαδικασιών δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης ενός ισχυρού πλαισίου για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας σε ένα ΥΣΑΕ. Ένα πεδίο όπου απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την μοντελοποίηση είναι η διατήρηση των στατιστικών συμπεριφορών των επιμέρους φυσικών διεργασιών σε όλες τις χρονικές κλίμακες.



Εικόνα 3-13: Σύγκριση ανάμεσα σε μια τυχαία κλιματική προσομοίωση και την πραγματική εικόνα. Διακρίνεται η επίδραση της δυναμικής Hurst-Kolmogorov (Πηγή: Koutsoyiannis et al., 2009).

Ειδικότερα, επισημαίνεται η διατήρηση της εμμονής σε μεγάλες κλίμακες (ετήσια, υπερετήσια) όπου κυριαρχεί η δυναμική Hurst-Kolmogorov. Στο εν λόγω ζήτημα θα επανέλθουμε σε επόμενο κεφάλαιο. Στην εικόνα 3-13 εικονίζεται η διαφορά ανάμεσα σε μια τυχαία προσομοίωση κλίματος (σε κλίμακα έτους, τριακονταετίας, αιώνα) και στα πραγματικά δεδομένα τα οποία αναπαριστούν τη δυναμική Hurst-Kolmogorov.

3.6.2.3. Το ζήτημα της αξιοπιστίας

Η εννοιολογική περιγραφή της αξιοπιστίας έχει γίνει με αναλυτικό τρόπο στην υποενότητα 2.2.4. Αβεβαιότητα και αξιοπιστία είναι δύο έννοιες που συνδέονται πολύ στενά στη διαχείριση υδατικών πόρων και στη διαχείριση της ενεργειακής παραγωγής. Η πρώτη αναφέρεται στην τυχαία διακύμανση της παραγωγής, ενώ η δεύτερη στην διακύμανση της ενεργειακής ζήτησης.

Η αξιοπιστία τοπικά εκφράζεται είτε σαν εξωτερικός περιορισμός (external constraint) που επιλέγεται από το διαχειριστή του συστήματος, είτε σαν στόχος προς μεγιστοποίηση (objective to maximize). Η αξιοπιστία στη διαχείριση υδατικών πόρων εκφράζεται μέσω της «ασφαλούς απόληψης» (safe yield), ενώ στη διαχείριση της ενέργειας μέσω της «πρωτεύουσας ενέργειας» (firm energy). Και οι δύο έννοιες περιγράφηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 2. Η ίδια λογική μπορεί να γενικευτεί για να συμπεριλάβει τη διαχείριση των ΥΣΑΕ, δεδομένου ότι ο σχεδιασμός τους εξαρτάται από την αβεβαιότητα των εισροών και ένα δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας ως προς την κάλυψη της ζήτησης ενέργειας. Σε τελευταία ανάλυση, αν αναζητούμε ένα πλάνο πλήρους αυτονομίας μέσω των ΑΠΕ στα πλαίσια μιας αποαναπτυξιακής λογικής, πρέπει να υποθέσουμε ένα επίπεδο αξιοπιστίας ίσο με 100% (ένα ενδεχόμενο ακατόρθωτο ή οικονομικά μη αποδοτικό).

3.6.2.4. Το ζήτημα της βελτιστοποίησης

Σε ένα σύστημα υδατικών πόρων μπορούν να ανακύψουν πολλά προβλήματα σχετικά με την εύρεση ενός βέλτιστου διαχειριστικού πλάνου, με ένα δεδομένο υδρομετεωρολογικό καθεστώς και ένα δεδομένο σύνολο περιορισμών:

- Βελτιστοποίηση της διάταξης και του μεγέθους του συστήματος, ώστε να εξασφαλισθεί η επιθυμητή αξιοπιστία με το μικρότερο δυνατό κόστος.
- Μεγιστοποίηση της μακροπρόθεσμης απόδοσης ενός υπάρχοντος υδροσυστήματος (σε όρους ασφαλούς απόληψης, μέσου κέρδους, πρωτεύουσας ενέργειας, κ.ά.).
- Βελτιστοποίηση της βραχυπρόθεσμης λειτουργίας και διαχειριστικής πολιτικής του, ώστε να καλυφθούν δεδομένες χρήσεις με χαμηλό ρίσκο.

Ανάλογα ερωτήματα μπορούν να διατυπωθούν και σε ένα ΥΣΑΕ, ο σχεδιασμός και η διαχείριση του οποίου απαιτούν μια λογική βασισμένη στην ανάλυση συστημάτων όπως αναπτύχθηκε στην ενότητα 2.2. Στην εικόνα 3-14 διακρίνεται η σχηματοποίηση ενός ΥΣΑΕ, με την πολυπλοκότητα να αναδύεται και από την τοπολογία του.

3.6.2.5. Το πλαίσιο παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση

Η διαχείριση των υδροσυστημάτων και των ΥΣΑΕ χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο κοινών μειονεκτημάτων στα πλαίσια της μοντελοποίησης:

- i. Μεγάλο πλήθος *μεταβλητών απόφασης* (π.χ. άγνωστες χρονοσειρές εισροών) και περιορισμών.
- ii. Μη γραμμικότητα στη *δυναμική του συστήματος*.

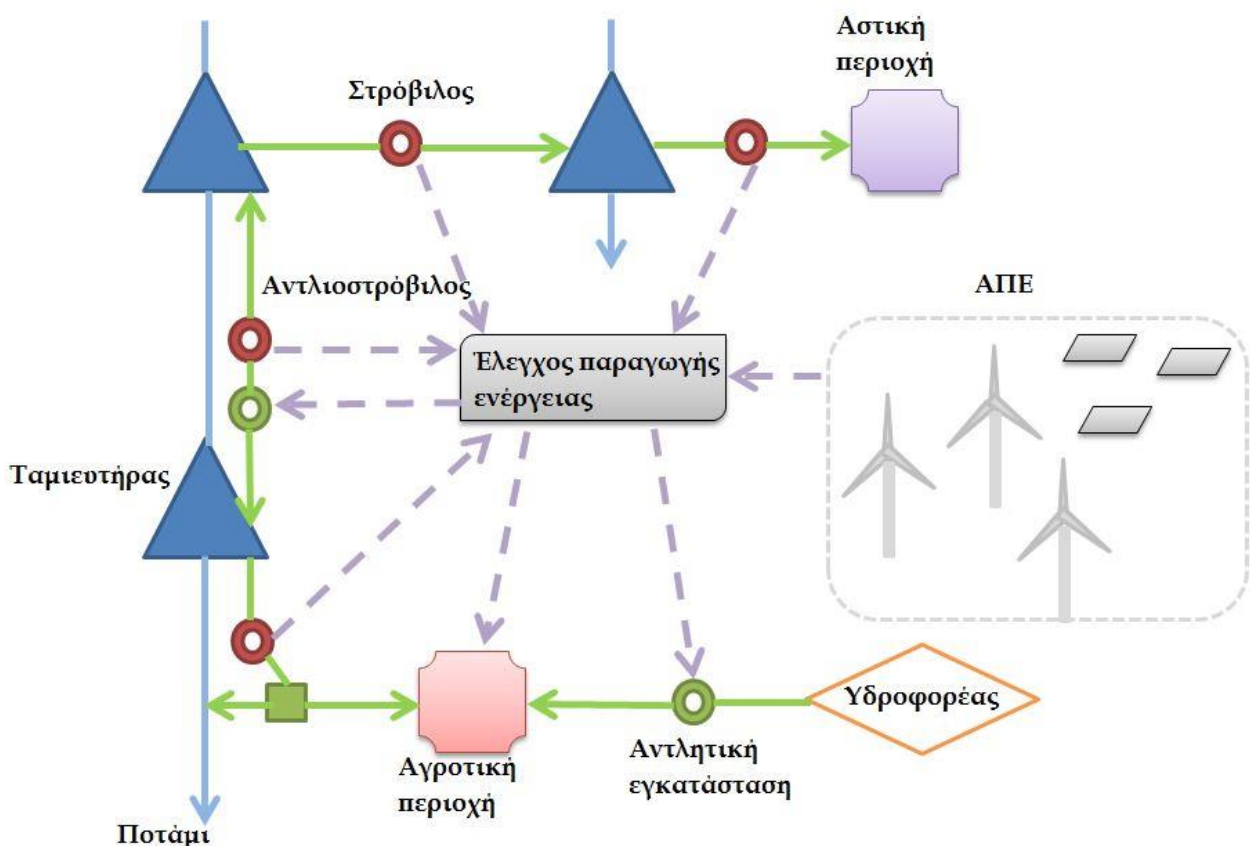
- iii. Αβεβαιότητα στις μελλοντικές *ζητήσεις και εισροές*.
- iv. Ανταγωνιστικοί ή αντίθετοι *στόχοι*.

Σημεία-κλειδιά εντός του τριπτύχου παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση που είναι κοινά στη διαχείριση υδροσυστημάτων και ΥΣΑΕ:

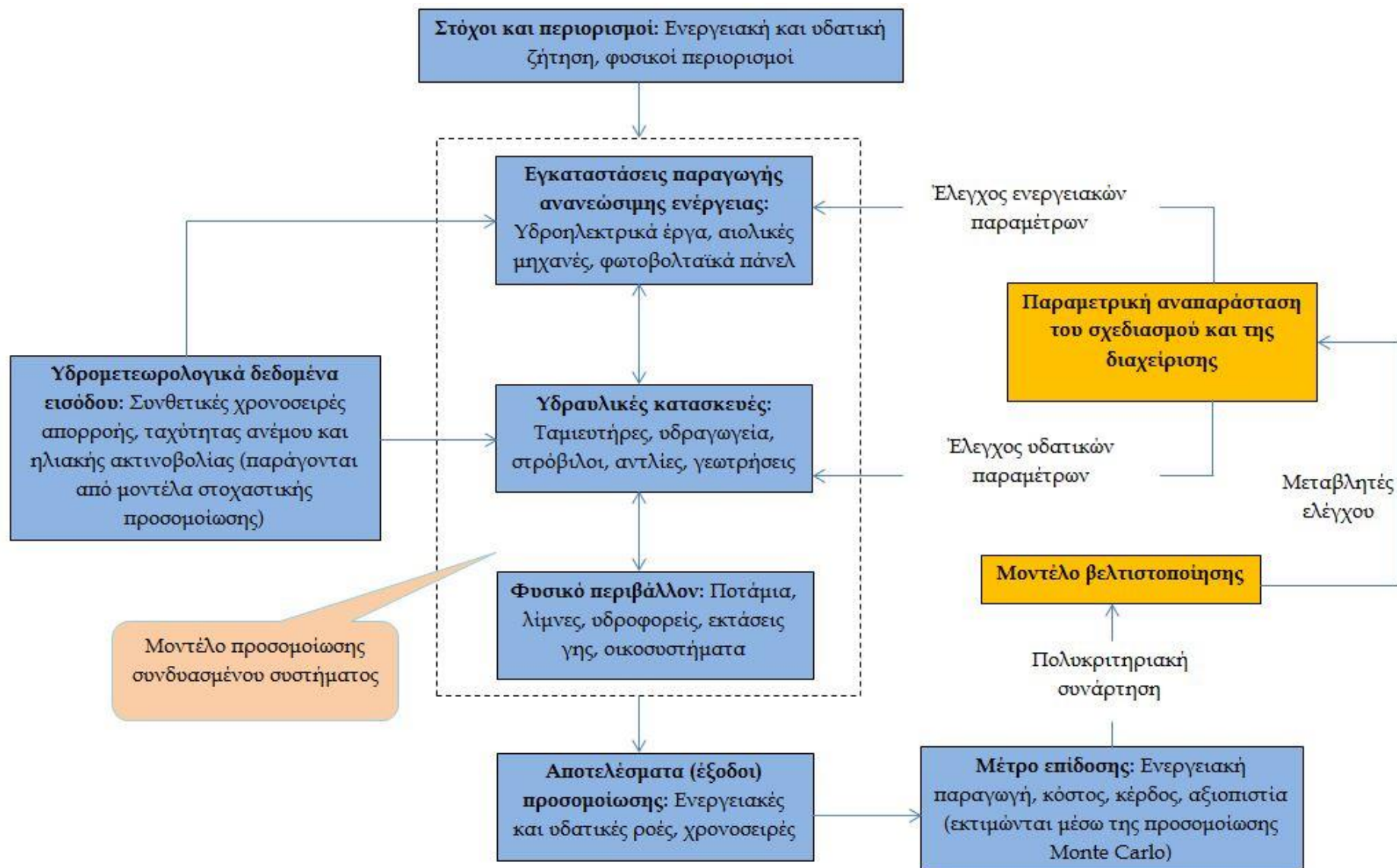
- i. Η κατασκευή συνθετικών χρονοσειρών εισόδου μέσω *πολυμεταβλητών στοχαστικών μοντέλων*.
- ii. Χαμηλή διαστατικότητα στην αναπαράσταση των βασικών στοιχείων του συστήματος, διαμέσου «*φειδωλών*» *παραμετροποιήσεων*.
- iii. Πιστή αναπαράσταση της δυναμικής του συστήματος, συνυπολογίζοντας τους *φυσικούς περιορισμούς*, τις *προτεραιότητες στην κάλυψη της ζήτησης* και τα *λειτουργικά κόστη*.
- iv. Πιθανοτική εκτίμηση όλων των υδατικών και ενεργειακών εισροών και ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων μέσω της *προσομοίωσης Monte-Carlo*.
- v. Χρήση *πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης* ώστε να εξαχθούν λογικά αποτελέσματα.

Το συνδυασμένο πλαίσιο μοντελοποίησης υδατικών και ενεργειακών πόρων εικονίζεται σχηματικά στην 3-15.

Η ανάλυση της παρούσας ενότητας έχει βασιστεί στο (Efstratiadis, 2012).



Εικόνα 3-14: Σχηματοποίηση της τοπολογίας ενός συστήματος διαχείρισης ΥΣΑΕ (Υβριδικού Συστήματος Ανανεώσιμης Ενέργειας). Διακρίνεται η πολυπλοκότητα της διάταξης καθώς και η πολλαπλότητα των στόχων (Πηγή: Efstratiadis, 2012).



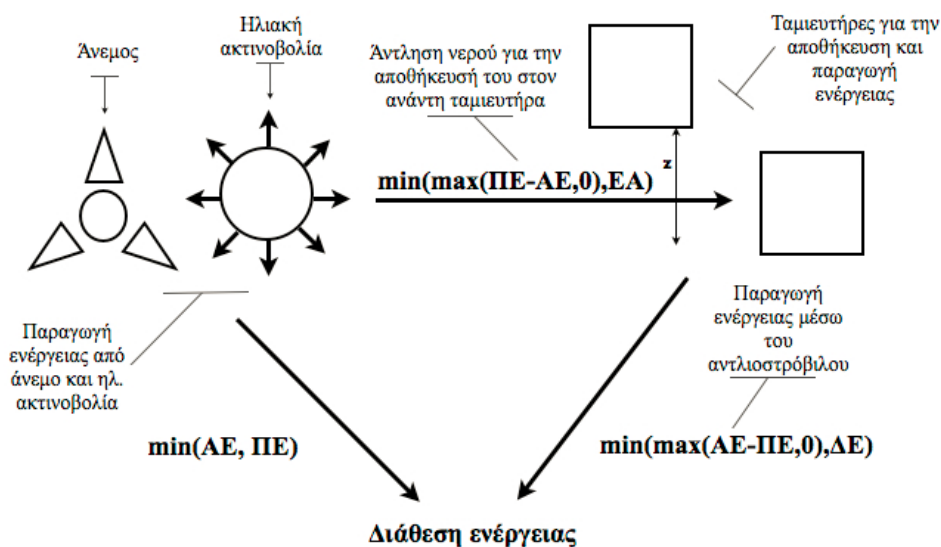
Εικόνα 3-15: Σχηματοποίηση του πλαισίου συνδυασμένης μοντελοποίησης υδατικών και ενεργειακών πόρων (Πηγή: Efstratiadis, 2012)

3.6.3. Παράδειγμα συνδυασμένης διαχείρισης υδατικών και ενεργειακών πόρων: Υβριδικό σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας με συνδυασμό αιολικής, ηλιακής ενέργειας και άντλησης-ταμίευσης

Σαν παράδειγμα συνδυασμένης διαχείρισης υδατικών και ενεργειακών πόρων μπορούμε να φέρουμε ένα υποθετικό σύστημα ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος μεγάλης κλίμακας (ώστε να εκμεταλλευτούμε όλα τα πλεονεκτήματα της μεγάλης κλίμακας που περιγράψαμε παραπάνω) που αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία, αιολικές μηχανές, δύο ταμιευτήρες με κατάλληλη υψομετρική διαφορά και έναν αντλιοστρόβιλο. Η ενέργεια παράγεται από τις αιολικές μηχανές και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ο αντλιοστρόβιλος χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και την αξιοποίηση της ενέργειας με αποκλειστική πηγή τον άνεμο και την ηλιακή ακτινοβολία. Γίνεται η παραδοχή πως δεν υπάρχουν εισροές και απώλειες στους ταμιευτήρες. Το εν λόγω σύστημα μελετήθηκε στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας από τον Ιωάννου (2012).

Ζητούμενο του σχεδιασμού ήταν η κατάλληλη εκτίμηση των μεγεθών του συστήματος ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση ενέργειας αξιόπιστα και με το μικρότερο κόστος. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε ο αριθμός πλήθους ανεμογεννητριών, πλήθους ηλιακών πάνελ, όγκου των ταμιευτήρων και η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του κόστους και η απόδοση της απαιτούμενης ποσότητας ενέργειας.

Σκαρίφημα περιγραφής της λειτουργίας του συστήματος εικονίζεται στην 3-16.



Εικόνα 3-16: Σκαρίφημα περιγραφής της λειτουργίας αυτόνομου υβριδικού συστήματος όπου AE είναι η απαιτούμενη ενέργεια, ΠΕ η παραγόμενη ενέργεια από τις αιολικές μηχανές και τα φωτοβολταϊκά, EA η ενέργεια που απαιτείται ώστε να αντληθεί όλη η διαθέσιμη ποσότητα νερού του κατάντη ταμιευτήρα, ΔΕ είναι η διαθέσιμη υδροηλεκτρική ενέργεια του ανάντη ταμιευτήρα (Πηγή: Ιωάννου, 2012).

Η προσέγγιση που επιλέγεται για την αντιμετώπιση του προβλήματος σχεδιασμού είναι μέσω ενός στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος. Η επιλογή στοχαστικού μοντέλου γίνεται γιατί για να υπολογιστεί με αξιοπιστία η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος θα πρέπει η προσομοίωση να έχει επαρκές μήκος. Για να γίνει εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας β

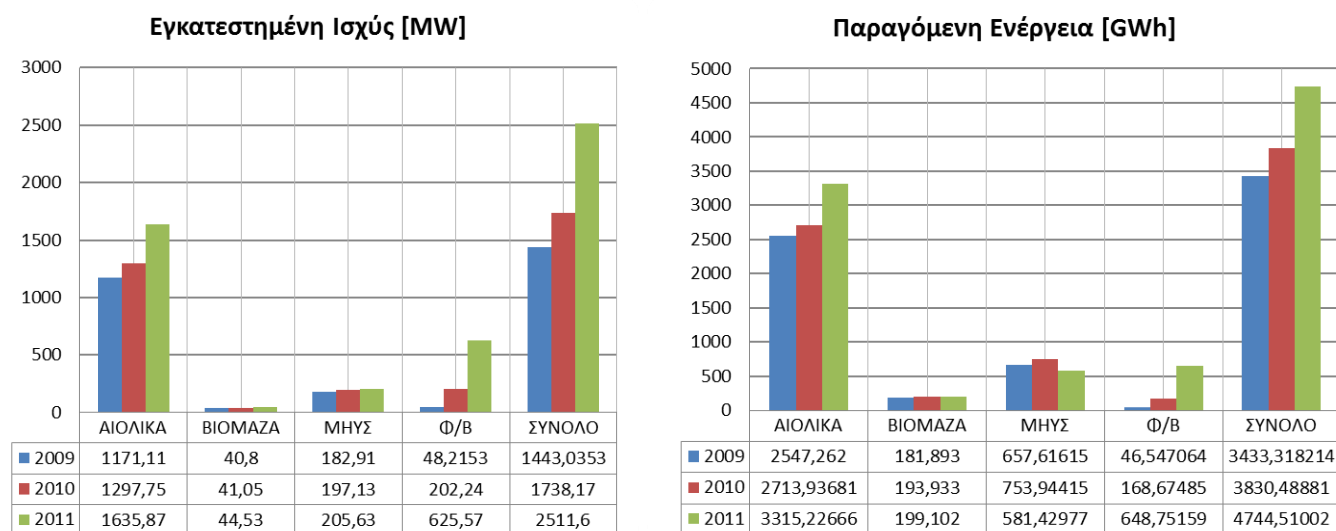
σε ετήσια βάση με ένα αποδεκτό λάθος $\pm \varepsilon \beta$ και συντελεστή εμπιστοσύνης γ απαιτούνται m χρόνια:

$$m = \left(z_{(1+\gamma)/2} / \varepsilon \right)^2 (1/\beta - 1) \quad (3.2)$$

όπου z_p είναι το p ποσοστημόριο της τυποποιημένης κανονικής κατανομής. Υποθέτοντας $\beta = 6\%$, $\varepsilon = 10\%$ και $\gamma = 95\%$ προκύπτουν περίπου $m = 6000$ χρόνια (Koutsoyiannis and Economou, 2003). Το μήκος δηλαδή είναι της τάξης των χιλιάδων χρόνων, οπότε επιλέχθηκαν συνθετικές χρονοσειρές των μεταβλητών εισόδου, με κατάλληλη αναπαραγωγή της στοχαστικής δομής και των κύριων χαρακτηριστικών των ιστορικών χρονοσειρών.

Στα πλαίσια της εν λόγω εργασίας προέκυψε πως για τα συγκεκριμένα μετεωρολογικά δεδομένα και εξοπλισμό δεν είναι συμφέρουσα η χρήση ηλιακών πάνελ. Στα σενάρια που αναπτύχθηκαν παρατηρείται πως ενώ η εγκατεστημένη ισχύς των ηλιακών πάνελ αποτελεί το 60% της συνολικής, η παραγόμενη ηλιακή ενέργεια αποτελεί μόλις το 43%. Τα αποτελέσματα αυτά δικαιολογούνται αν συνυπολογίσουμε ότι το κόστος ανά MW εγκατεστημένης ισχύος της ηλιακής ενέργειας είναι υψηλότερο από της αιολικής και (όπως είναι λογικό) το κόστος ανά MWh είναι ακόμα υψηλότερο.

Φυσικά, τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης εξαρτώνται από τις παραδοχές του δεδομένου προβλήματος (πιλοτική εφαρμογή σε ταμειυτήρες ίδιων χαρακτηριστικών, μεγάλη εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννήτριας, κ.ά.). Ωστόσο, δεδομένης της μειωμένης αποδοτικότητας των ηλιακών πάνελ και του αυξημένου κόστους εγκατάστασής τους, προτιμήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η διερεύνηση ενός υβριδικού συστήματος υδροηλεκτρικής-αιολικής ενέργειας.



Εικόνα 3-17: Εγκατεστημένη ισχύς και παραγόμενη ενέργεια ΑΠΕ από το 2009 έως και το 2011 (Πηγή: ΥΠΕΚΑ).

Επιπλέον, από την αδειοδοτική εξέλιξη των έργων ΑΠΕ για το 2011 (<http://government.gov.gr/2012/04/09/29058/>), διακρίνουμε ότι τα αιολικά παραμένουν και για το 2011 η κυρίαρχη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 1636MW, από 1300MW που ήταν το προηγούμενο έτος (ενίσχυση κατά 26%). Παράλληλα, το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην προώθηση του προγράμματος για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών συστημάτων στις κτιριακές εγκαταστάσεις, που

απευθύνεται στους καταναλωτές και στις επιχειρήσεις και όχι σε μεγάλης κλίμακας υβριδικά συστήματα που συμπεριλαμβάνουν ηλιακά πάνελ.

Στα γραφήματα της εικόνας 3-17 διακρίνουμε την εγκατεστημένη ισχύ και την παραγόμενη ενέργεια των επιμέρους ΑΠΕ για τρία έτη (2009, 2010, 2011). Τα αιολικά σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν πολύ περισσότερο εγκαθιδρυμένη θέση στην αγορά ενέργειας, ενώ η διείσδυσή τους είναι περισσότερο εκτεταμένη. Μάλιστα, με τις νέες εγγυημένες τιμές κιλοβατώρας για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (γνωμοδότηση υπ' αριθ. 2/2013 της ΡΑΕ) διακρίνεται μια τάση μείωσης της δυνατότητας ανάπτυξης νέων εγκαταστάσεων τέτοιου τύπου καθώς προβλέπεται σταθερή μείωση των τιμών πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας καθιστώντας τέτοιες επενδύσεις μη συμφέρουσες.

3.7. Επιμέρους συμπεράσματα σχετικά με τη συνδιαχείριση υδατικών και ενεργειακών πόρων

Συνοψίζοντας την ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου, μπορούμε με βεβαιότητα να πούμε πως ο βέλτιστος σχεδιασμός σε συνδυασμό με την ορθολογική διαχείριση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μια αναγκαιότητα αν θέλουμε να εξασφαλίσουμε ένα βιώσιμο μέλλον σε μια κατεύθυνση αντιπαρατιθέμενη με το κυρίαρχο πρότυπο παραγωγής ενέργειας. Το σημείο κλειδί και η πραγματική πρόκληση είναι ο μετασχηματισμός των φυσικών πηγών ενέργειας, που από τη φύση τους παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις λόγω της εγγενούς στοχαστικότητας των υδρομετεωρολογικών διεργασιών, σε ρυθμισμένες εκροές παραγόμενης ενέργειας που θα ικανοποιούν τις αναμενόμενες ζητήσεις σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες.

Σε ένα βραχυπρόθεσμο χρονικό διάστημα, το νερό και οι υδατικοί πόροι εν γένει θα κληθούν να παίξουν πολλαπλούς ρόλους ως το μέσο παραγωγής, κατανάλωσης και αποθήκευσης ενέργειας εντός του πλαισίου κατασκευής υβριδικών ανανεώσιμων συστημάτων ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Η υδροηλεκτρική παραγωγή και η άντληση/ταμίευση θα αποτελέσουν τα κοινά συστατικά μέρη συστημάτων συνδιασμένης διαχείρισης νερού-ενέργειας, οπότε θα απαιτηθούν προχωρημένες μέθοδοι και εργαλεία μοντελοποίησης που θα εκμεταλλεύονται την πλούσια εμπειρία των συστημάτων διαχείρισης υδατικών πόρων.

Το πλαίσιο παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση αποτελεί μια ισχυρή προσέγγιση του εν λόγω ζητήματος μιας και προτείνει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο πλατιάς και γενικής εφαρμογής που εμπλέκει και ποσοτικοποιεί έννοιες κλειδιά όπως η αβεβαιότητα, η αξιοπιστία και η βέλτιστη πολιτική διαχείρισης. Με λογικό υπολογιστικό φόρτο δίνεται η δυνατότητα παροχής εφαρμόσιμων και βιώσιμων λύσεων σχεδιασμού και διαχείρισης.

4. Το υδροσύστημα Αλιάκμονα και το Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας

Μέχρι τώρα αναφερθήκαμε στο σκέλος των κρίσιμων ζητημάτων που ανακόπτουν κατά την μοντελοποίηση ενός συστήματος συνδιαχείρισης ενέργειας-υδατικών πόρων, αναλύοντας θεωρητικά τα επιμέρους τεχνικά μέρη. Το παρόν κεφάλαιο λειτουργεί σαν «γέφυρα» ανάμεσα στη θεωρητική περιγραφή και την ποσοτικοποιημένη ανάλυση, περιγράφοντας την περιοχή μελέτης από υδρολογική και ανεμολογική άποψη. Στα πλαίσια αυτής της περιγραφής και για λόγους πληρότητας αναλύονται περαιτέρω κάποια επιμέρους στοιχεία του υδατικού διαμερίσματος Δυτικής Μακεδονίας.

4.1. Η περιοχή του Αλιάκμονα: γενικά στοιχεία

Ο Αλιάκμονας (Αλιάκμων) είναι ποταμός στη Δυτική Μακεδονία. Είναι ο μεγαλύτερος σε μήκος ποταμός της Ελλάδας που πηγάζει σε ελληνικό έδαφος· οι άλλοι μεγάλοι ποταμοί (Εβρος, Νέστος και Αξιός) πηγάζουν σε ξένα εδάφη. Το όνομα Αλιάκμων είναι σύνθετο και προέρχεται από το άλς (άλας, θάλασσα) και από το άκμων (αμόνι). Σύμφωνα με την Ελληνική Μυθολογία ο Αλιάκμων ήταν ένας από τους ποτάμιους θεούς, παιδί του Ωκεανού και της Τηθύος, κατά την προσφιλή αλληγορική ιδεο-ανθρωπόμορφη αντίληψη των αρχαίων Ελλήνων επί των γεωλογικών ανακατατάξεων μετά τον κατακλυσμό του Δευκαλίωνα.

Ο Αλιάκμονας είναι το μακρύτερο ποτάμι της Ελλάδας και βρίσκεται εξ'ολοκλήρου σε Ελληνικό έδαφος με συνολικό μήκος 297 km. Σχηματίζεται από τη συμβολή δύο μικρότερων ποταμών, του Βέλιτσα ή Μπελίτσα και του Ζέλοβα ή Ζάλοβο. Ο Αλιάκμονας, πριν γίνει το φράγμα της εκτροπής του κοντά στο χωριό Αγία Βαρβάρα στα μέσα της δεκαετίας του 1950, δεν είχε σταθερή (πεδινή) κοίτη. Συχνά πλημμύριζε και σχημάτιζε εκτεταμένα έλη.

Ο ποταμός πηγάζει από τα βουνά Βέρνο, Γράμμο και Βόιο, στα σύνορα της χώρας με την Αλβανία, και εκβάλλει στο Αιγαίο Πέλαγος μεταξύ της Θεσσαλονίκης και της Κατερίνης. Περνάει από τους νομούς Καστοριάς, Γρεβενών, Κοζάνης, Ημαθίας, Πιερίας και χύνεται στο Θερμαϊκό κόλπο. Χείμαροι και παραπόταμοι του Αλιάκμονα είναι ο Γράμμος, ο Στραβοπόταμος, η Πραμόριτσα, ο Γρεβενίτικος, ο Βενέτικος, ο Σαραντάπορος, ο Τριπόταμος και άλλοι. Σχεδόν σε όλο το μήκος του επί του νομού Κοζάνης σχηματίζει την τεχνητή λίμνη του Πολυφύτου η οποία δημιουργήθηκε μετά την κατασκευή του ομώνυμου φράγματος. Πάνω από τη λίμνη βρίσκεται η γέφυρα των Σερβίων, τμήμα της εθνικής οδού Αθηνών-Κοζάνης.

Ο Αλιάκμονας έχει μέση ετήσια απορροή $2,03 \cdot 10^9$ m³. Η λεκάνη απορροής του φθάνει τα 6.016 km². Δαμασμένος πλέον, εδώ και δεκαετίες, με φράγματα και με διάφορα εγγειοβελτιωτικά έργα, αρδεύει, με τα καθαρά νερά του, το σύνολο σχεδόν του ημαθιώτικου κάμπου. Ακόμα, μετά υδροηλεκτρικά έργα που έγιναν στις κοίτες του, έχει καταστεί ένας οικονομικός συντελεστής της χώρας μας. Υπολογίζεται, ότι με την ολοκλήρωση και των τελευταίων προγραμματισμένων έργων, τα νερά του Αλιάκμονα θα αρδεύουν 1.300.000 στρέμματα.

4.2. Το Δέλτα του Αλιάκμονα

Εκεί που ο ποταμός ενώνεται με τη θάλασσα, έχει σχηματιστεί με τα χρόνια ένα εκτεταμένο Δέλτα που φτάνει τα 40000 στρέμματα, έκταση κατά πολύ μικρότερη σε σύγκριση με το Δέλτα του Αξιού (220000 στρέμματα). Αιτία η κατακράτηση των φερτών από το σύστημα των φραγμάτων του, που έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των προσχώσεων. Την θερινή περίοδο, λόγω της μειωμένης απορροής, η θάλασσα εισχωρεί και κατακλύζει ένα μεγάλο μέρος της κοίτης του ποταμού.

Το Εθνικό Πάρκο Αξιού - Λουδία - Αλιάκμονα περιλαμβάνει τη θαλάσσια περιοχή των εκβολών τεσσάρων ποταμών, τις όχθες αυτών των ποταμών και την Αλυκή Κίτρους. Η προστασία που παρέχεται ως σήμερα στην περιοχή οφείλεται στην ένταξη του το 1971 στην Σύμβαση Ραμσάρ ως Υγροτόπου Διεθνούς Σημασίας και στη ένταξή της στο δίκτυο περιοχών Natura 2000. Επίσης έχει περιληφθεί στον κατάλογο των σημαντικών περιοχών για τα πουλιά IBA (Important Bird Areas-Σημαντική περιοχή για πουλιά).



Εικόνα 4-1: Ο ποταμός Αλιάκμονας σε εικόνα από δορυφόρο.



Εικόνα 4-2: Ο Θερμαϊκός και η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης όπου εκβάλλουν δύο μεγάλα ποτάμια: ο Αλιάκμονας και ο Αξιός και δύο μικρά: ο Γαλλικός και ο Λουδίας σχηματίζοντας ένα εκτεταμένο Δέλτα (Πηγή: http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Thessaloniki_Satellite_View.jpg).

4.3. Το Υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας

4.3.1. Γενικά χαρακτηριστικά

Το Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας περιλαμβάνει το δυτικό τμήμα του γεωγραφικού διαμερίσματος Μακεδονίας και η συνολική του έκταση είναι 13 441 km². Ο πληθυσμός του, με βάση τα απογραφικά στοιχεία της ΕΣΥΕ, το 1991 ήταν 569 684 κάτοικοι και το 2001 ήταν 596 891 κάτοικοι, παρουσιάζοντας αύξηση 4,8% (ο πληθυσμός του 2001 έχει υπολογιστεί κατ' εκτίμηση, από τον πληθυσμό των νομών του 2001 και σύμφωνα με τα ποσοστά συμμετοχής του κάθε νομού στο διαμέρισμα το 1991). Το μεγαλύτερο μέρος του υδατικού διαμερίσματος βρίσκεται στην Περιφέρεια Μακεδονίας και μικρότερα τμήματα στις Περιφέρειες Θεσσαλίας και Ηπείρου. Το διαμέρισμα περιλαμβάνει ολόκληρους τους Νομούς Φλώρινας και Κοζάνης, μεγάλα τμήματα των Νομών Γρεβενών, Ημαθίας, Καστοριάς, Πέλλας και Πιερίας και μικρά τμήματα των Νομών Ιωαννίνων, Λάρισας και Τρικάλων.

Αρμόδιες για τη διαχείριση και προστασία των υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του διαμερίσματος είναι οι Διευθύνσεις Υδάτων των περιφερειών Δυτικής Μακεδονίας (με έδρα την Κοζάνη), Θεσσαλίας (με έδρα τη Λάρισα), Κεντρικής Μακεδονίας (με έδρα τη Θεσσαλονίκη) και Ηπείρου (με έδρα τα Ιωάννινα). Υπεύθυνη για την παραγωγή και διαχείριση της ενέργειας στο εν λόγω διαμέρισμα είναι η ΔΕΗ (ΑΗΣ Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου, ΥΗΣ Πολύφυτου, Σφηκιάς, Ασωμάτων).

4.3.2. Γεωμορφολογικά - γεωλογικά χαρακτηριστικά

Το υδατικό διαμέρισμα συνολικά έχει τα μεγαλύτερα υψόμετρα της χώρας και περιλαμβάνει εννέα βουνά με ύψος μεγαλύτερο από 2 000 μέτρα. Δύο ορεινά συγκροτήματα με διεύθυνση βορρά-νότου διαπερνούν το διαμέρισμα διαχωρίζοντας τρεις μεγάλες πεδινές εκτάσεις. Το πρώτο ορεινό συγκρότημα αποτελείται από τα Όρη Βέρνον (2 128 μέτρα), Άσκιον (2 111 μέτρα) και Βούρινος (1688 μέτρα), ενώ το δεύτερο από τα όρη Βόρρας (2524 μέτρα), Βέρμιο (2052 μέτρα) και Πιέρια (2 180). Στα δυτικά του διαμερίσματος διακρίνονται οι πεδινές εκτάσεις της Καστοριάς και των Γρεβενών, στο κέντρο οι πεδινές εκτάσεις της Πτολεμαΐδας, και στα ανατολικά οι πεδιάδες Έδεσσας, Νάουσας, Βέροιας και Πιερίας. Ακόμη στα βόρεια υπάρχει η πεδιάδα της Φλώρινας, η οποία εκτείνεται και εκτός της ελληνικής επικράτειας.

Η γεωτεκτονική δομή του υδατικού διαμερίσματος είναι πολυσύνθετη. Από δύση προς ανατολή συναντώνται οι ζώνες της Πίνδου, Πελαγονική, Αλμωπίας και Πάικου και οι γεωλογικές ενότητες Καστοριάς, Βόρειων Κυκλάδων και Ολύμπου. Από λιθολογική άποψη η περιοχή δομείται από μεσοζωικά ανθρακικά πετρώματα, γενέσιους, φυλλίτες, σχιστόλιθους, οφιόλιθους, φλύσχη, γρανίτες, μολασσικά κλαστικά ιζήματα της μεσοελληνικής αύλακας, νεογενείς σχηματισμούς, και πλειστοκαινικές και αλλουβιακές αποθέσεις στις χαμηλότερες τοπογραφικά περιοχές.

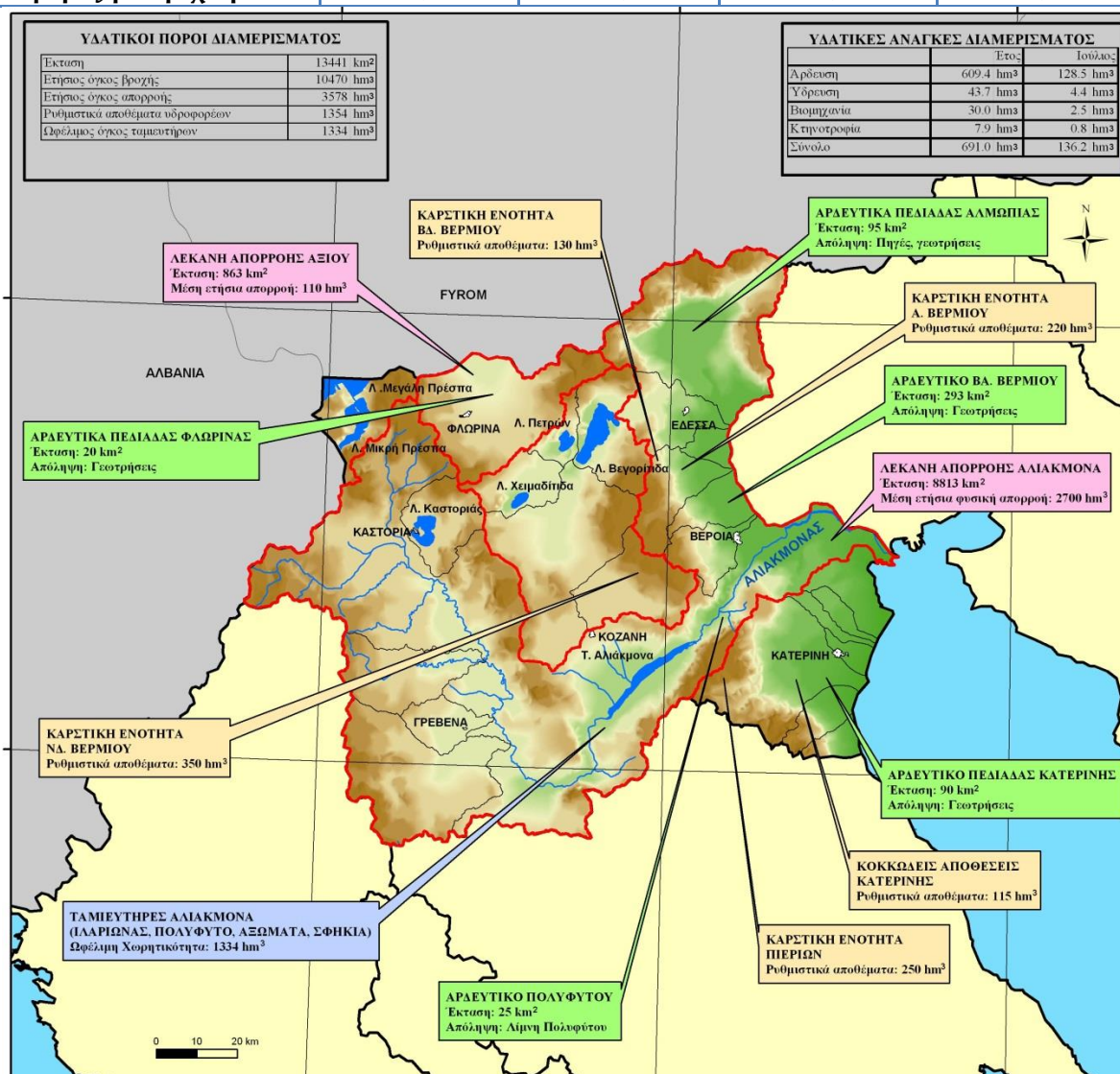
4.3.3. Κλιματικά χαρακτηριστικά

Το μεγαλύτερο μέρος του διαμερίσματος έχει ηπειρωτικό κλίμα, ενώ τα παράκτια και τα ορεινά τμήματα έχουν θαλάσσιο και ορεινό κλίμα αντίστοιχα. Η γεωγραφική θέση και το ανάγλυφο του διαμερίσματος συμβάλλουν στη μεγάλη κλιματική ποικιλία του. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από 600 μέχρι 1 000 mm, ενώ στα ορεινά τμήματα ξεπερνάει και τα 1200 mm. Οι χιονοπτώσεις είναι αρκετά συνηθισμένες κατά το διάστημα Σεπτεμβρίου-Απριλίου. Η μέση

ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 14,5 και 17°C, με ψυχρότερο μήνα τον Ιανουάριο και θερμότερο τον Ιούλιο.

Πίνακας 4-1: Μέσες ετήσιες τιμές μετεωρολογικών μεταβλητών (Πηγή: Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, <http://itia.ntua.gr/el/docinfo/782/>)

	Φλώρινα	Κοζάνη	Καστοριά	Έδεσσα
Θερμοκρασία (°C)	12,1	12,9	12,5	14,8
Ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	-21,4	-16,8	-22,4	-9,0
Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	40,8	42,2	41,6	37,8
Βροχόπτωση (mm)	645,7	507,6	555,5	540,0
Σχετική υγρασία (%)	69,2	63,8	65,0	64,3
Νέφωση (όγδοα)	3,9	3,8	3,8	3,7
Ημέρες με βροχή	85,3	91,2	93,4	59,8
Ημέρες με χιόνι	27,2	18,7	19,6	5
Ημέρες με χαλάζι	0,4	0,4	0,9	0,1
Ημέρες με ομίχλη	16,3	22,4	13,0	5,6



Εικόνα 4-3: Υδατικοί πόροι και ζήτηση νερού στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας (Πηγή: Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, <http://itia.ntua.gr/el/docinfo/782/>)

4.3.4. Κύριες υδρολογικές λεκάνες

Οι κύριες υδρολογικές λεκάνες του διαμερίσματος είναι αυτές του Αλιάκμονα (8813 km²), της κλειστής λεκάνης Πτολεμαΐδας (2133 km²), της λεκάνης του Αξιού στο Νομό Φλώρινας (863 km²) και της λεκάνης του ποταμού Αίσωνα ή Μαυρονερίου (815 km²). Άλλες αξιόλογες λεκάνες, με έκταση μικρότερη των 600 km², είναι αυτές των λιμνών Καστοριάς (περιλαμβάνεται στη λεκάνη του Αλιάκμονα), Βεγορίτιδας, Χειμαδίτιδας και Πετρών (που περιλαμβάνονται στη λεκάνη της Πτολεμαΐδας), καθώς και οι λεκάνες Πρεσπών και του ποταμού Χελοποτάμου. Από αυτές εξετάζουμε εδώ μόνο τα χαρακτηριστικά αυτής του Αλιάκμονα που είναι και η περιοχή μελέτης και ενδιαφέροντος της εν λόγω διπλωματικής. Στην εικόνα 4-3 διακρίνονται σχηματικά οι υδατικοί πόροι και οι ανάγκες του διαμερίσματος. Η περιγραφή και αναλύσεις αυτού του κεφαλαίου έχουν αντληθεί κατά κύριο λόγο από Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων (Κουτσογιάννης κ.ά., 2008).

4.3.5. Λεκάνη Αλιάκμονα

Η λεκάνη του Αλιάκμονα εκτείνεται στο δυτικό και νότιο τμήμα του υδατικού διαμερίσματος και ορίζεται βόρεια από τα Όρη Βέρνον και Βέρμιο, δυτικά από τη Βόρεια Πίνδο, νότια από τα Χάσια και τα Καμβούνια, και ανατολικά από τα Πιέρια Όρη. Οι κυριότερες υπολεκάνες είναι αυτές της Περιφερειακής Τάφρου (1443 km²), Βενέτικου (871 km²), Προμόρτσα (386 km²), της κλειστής λίμνης Καστοριάς (353 km²), Εδεσσαίου (292 km²), Τριπόταμου (252 km²), Αραπίτσα (178 km²) και του Γρεβενίτικου (117 km²).

Στον Αλιάκμονα έχουν κατασκευαστεί τεχνητοί ταμιευτήρες, των οποίων τα κυριότερα χαρακτηριστικά θα δούμε σε επόμενη υποενότητα του παρόντος κεφαλαίου.

4.3.6. Ενεργειακή παραγωγή του υδατικού διαμερίσματος

Στο διαμέρισμα παράγονται σημαντικά ποσά ενέργειας (τα μεγαλύτερα από όλα τα διαμερίσματα της χώρας) από τους τεχνητούς ταμιευτήρες της ΔΕΗ, που έχουν εγκατεστημένη ισχύ σχεδόν 1 000 MW.

Οι ταμιευτήρες Αλιάκμονα (Πολύφυτο, Σφηκιά, Ασώματα), με ωφέλιμη χωρητικότητα 1334 hm³ (ΔΕΗ, 2002), κάλυψαν το 2001, με 400–600 hm³, τις αρδευτικές ανάγκες της πεδιάδας Θεσσαλονίκης, ενώ πολύ σύντομα θα καλύψουν και τις ανάγκες ύδρευσης της πόλης.

Οι 12 λιγνιτικές μονάδες της περιοχής Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου καταναλώνουν περίπου 80–90 hm³ νερού το χρόνο, κυρίως για ψύξη. Όλο σχεδόν το νερό προέρχεται από τον Αλιάκμονα (ταμιευτήρας Πολυφύτου), ενώ ένα μικρό ποσοστό από γεωτρήσεις της περιοχής Πτολεμαΐδας. Τέλος, το νερό ψύξης των νέων λιγνιτικών μονάδων Φλώρινας θα εξασφαλιστεί με την ολοκλήρωση του φράγματος της Παπαδιάς, που θα ρυθμίζει την απορροή του ρέματος Αχλάδας.

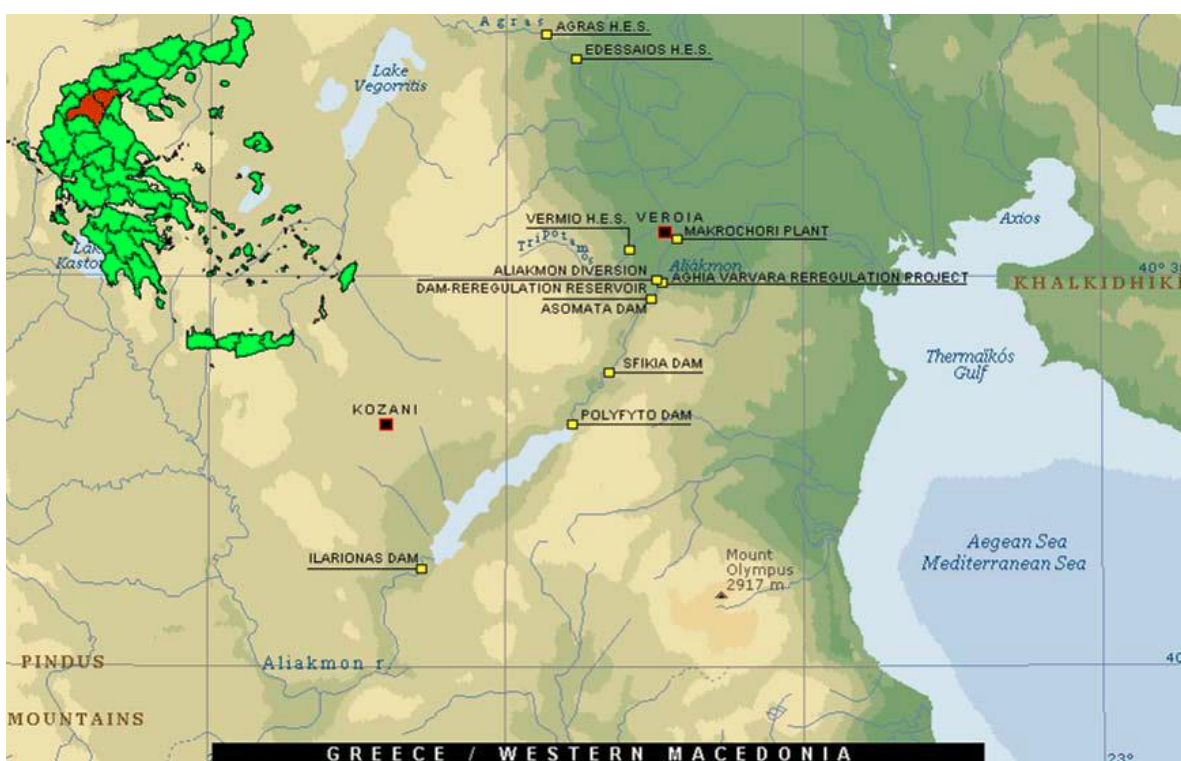
Ειδικότερα, στο διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας έμφαση θα δοθεί στην αύξηση της προστιθέμενης αξίας του τομέα της ενέργειας, ενώ εξαιρετικής σημασίας θεωρείται και η δημιουργία μόνιμης δομής Περιφερειακού Πόλου Καινοτομίας για την Ενέργεια. Οι πόλεις Κοζάνη και Πτολεμαΐδα αντιμετωπίζονται από κοινού ως πόλος ανάπτυξης και ενεργειακό κέντρο της χώρας (ΕΣΠΑ 2007–2013). Το διάστημα αυτό βρίσκονται σε φάση μετασχηματισμού του παραγωγικού τους προτύπου,

όπου ειδικά στον τομέα της ενέργειας προσανατολίζονται προς διαφοροποίηση των πηγών παραγωγής της.

4.4. Τα υδροηλεκτρικά έργα του Αλιάκμονα: Γενική περιγραφή και χαρακτηριστικά

Στον Αλιάκμονα έχουν κατασκευαστεί τεχνητοί ταμιευτήρες, των οποίων τα κυριότερα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στη συνέχεια. Οι ταμιευτήρες αυτοί είναι του Πολυφύτου, της Σφηκιάς, των Ασωμάτων και της Αγ. Βαρβάρας. Ανάντη του φράγματος στο Πολύφυτο κατασκευάζεται ήδη άλλο ένα, αυτό του Ιλαρίωνα. Παράλληλα διερευνάται η κατασκευή ενός ακόμη φράγματος ανάντη του Ιλαρίωνα, αναπτύσσοντας το ΥΗΕ Ελαφίου. Κατάντη του αναρρυθμιστικού της Αγ. Βαρβάρας λειτουργεί και μικρό υδροηλεκτρικό έργο (χωρίς ταμιευτήρα) στο Μακροχώρι.

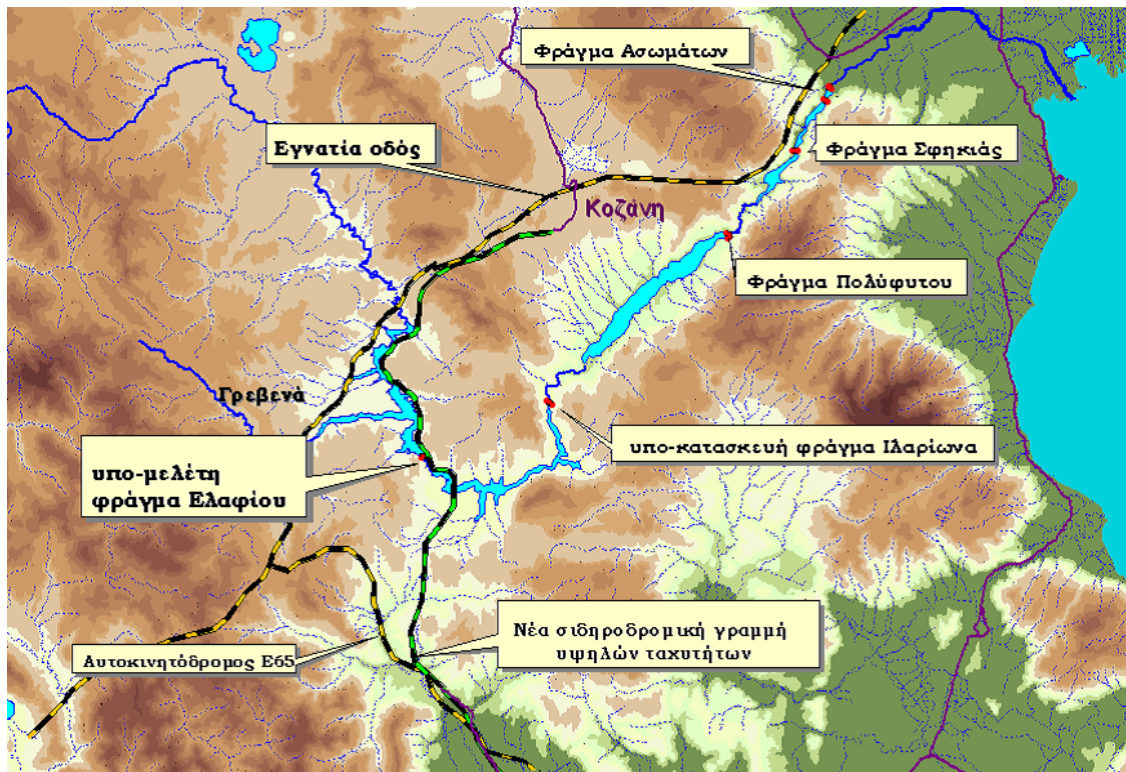
Στην εικόνα 4-4 διακρίνονται οι θέσεις των ΥΗΕ της ΔΕΗ στον Αλιάκμονα, ενώ στην εικόνα 4-5 η θέση του υπό μελέτη φράγματος Ελαφίου.



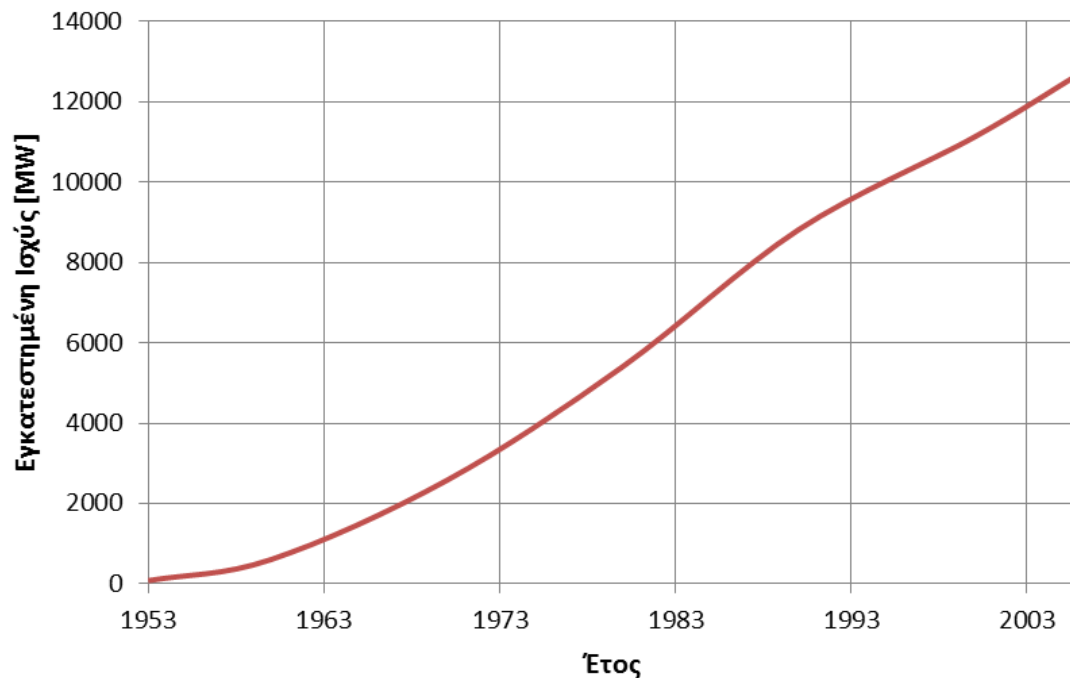
Εικόνα 4-4: Οι θέσεις των ΥΗΕ της ΔΕΗ στον ποταμό Αλιάκμονα. Διακρίνονται οι θέσεις των ήδη κατασκευασμένων και υπό λειτουργία ΥΗΕ Πολυφύτου, Σφηκιάς, Ασωμάτων, Αγ. Βαρβάρας καθώς και το υπό κατασκευή ΥΗΕ Ιλαρίωνα (Πηγή: Καραγιαννίδης και Παπαϊωάννου, 2008).

Για συγκριτικούς λόγους αξίζει να σημειωθεί ότι η εγκατεστημένη ισχύς της ΔΕΗ το 2006 είχε διαμορφωθεί στα 12695 MW. Το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των Υδροηλεκτρικών Σταθμών σε πανελλαδικό επίπεδο είναι 3.060 MW, αντιπροσωπεύουν το 24% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της ΔΕΗ και παράγουν σε μέση ετήσια βάση το 13% της συνολικής Παραγόμενης Ενέργειας.

Στο γράφημα της εικόνας 4-6 διακρίνουμε την εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος της ΔΕΗ από το 1953 έως και το 2006, η οποία σε ένα βαθμό αντανάκλα και τη βιομηχανική ανάπτυξη της χώρας ανά δεκαετία.



Εικόνα 4-5: Χάρτης όπου εικονίζεται η θέση του υπό μελέτη φράγματος Ελαφίου σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα έργα του Αλιάκμονα (Πηγή: Ενημερωτικό σημείωμα περιβαλλοντικής οργάνωσης «Καλλιστώ», «Κατασκευή mega-φραγμάτων στον ποταμό Αλιάκμονα»).



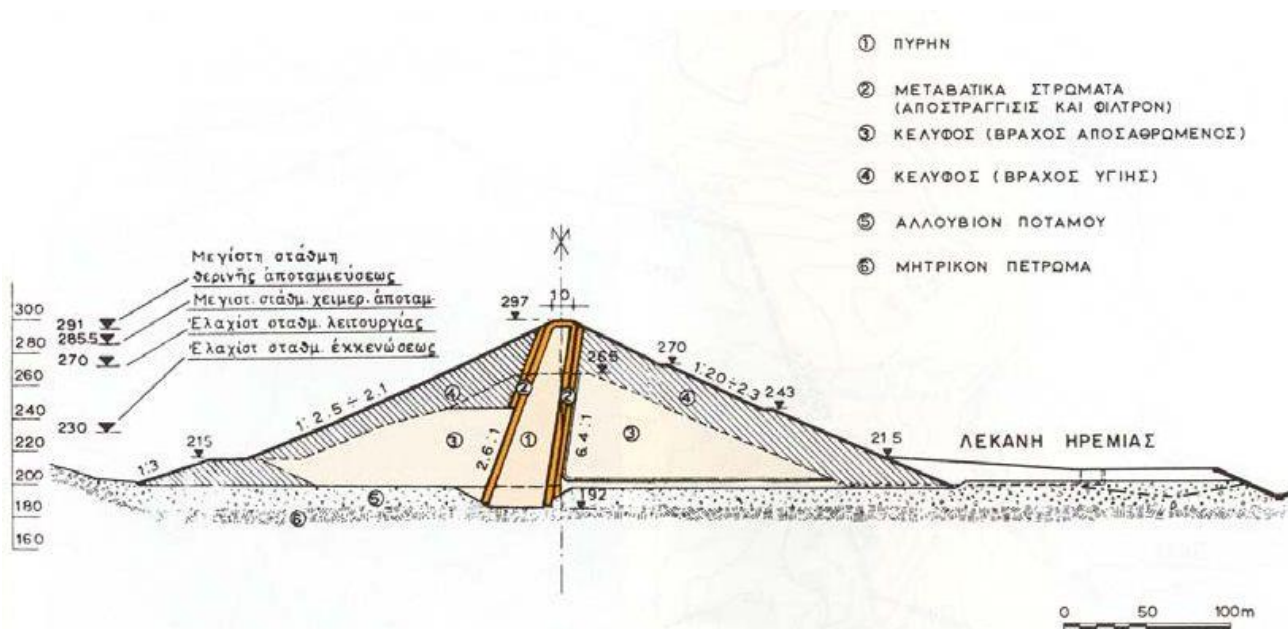
Εικόνα 4-6: Εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος της ΔΕΗ από το 1953 μέχρι το 2006 (Πηγή: Καραγιαννίδης και Παπαϊωάννου, 2008).

4.4.1. Υδροηλεκτρικό έργο Πολυφύτου

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός του Πολυφύτου βρίσκεται 45 km νοτιοανατολικά της Κοζάνης. Τα επιμέρους στοιχεία του είναι ο ταμιευτήρας, η σήραγγα εκτροπής, το φράγμα, ο υπερχειλιστής, η υδροληψία, η σήραγγα προσαγωγής, ο υδροηλεκτρικός σταθμός, η δεξαμενή ανάπαυσης και το φρέαρ υπό πίεση.

Ο Ταμιευτήρας του Πολυφύτου είναι υπερετήσιας ρύθμισης με χωρητικότητα 2244 hm³, ενώ ο ωφέλιμος όγκος είναι 1220 hm³. Η μέση ετήσια απορροή της δεκαετίας 1998-2007 είναι 1373 hm³ που αποτελεί το 18% της συνολικής μέσης απορροής 10ετίας όλων των ταμιευτήρων της ΔΕΗ. Η επιφάνεια απορροής είναι 5800 km² ενώ η κατακλυζόμενη επιφάνεια 74 km². Η ανώτατη στάθμη λειτουργίας είναι το 291,0 m και στάθμη πλημμύρας 293,0 m.

Το μήκος της σήραγγας εκτροπής είναι 634 m, η διάμετρος 9,7 m και η παροχή 1600 m³/s. Το φράγμα είναι λιθόρριπτο με κεκλιμένο πυρήνα προς τα ανάντη. Η διατομή διακρίνεται στην 4-7.



Εικόνα 4-7: Διατομή φράγματος Πολυφύτου.

Το ύψος του φράγματος από τη θεμελίωση είναι 112 m. Το μήκος στη στέψη είναι 300 m, το πλάτος 10 m και το υψόμετρο στη στέψη 297 m. Ο υπερχειλιστής αποτελείται από θυροφράγματα 3 θυρών, διαστάσεων 12,9 x 5,5 m με ικανότητα παροχής εκροής 1.375 m³/sec και τη διώρυγα απαγωγής. Υπάρχει μια Υδροληψία με κεκλιμένες εσχάρες και η Σήραγγα Προσαγωγής έχει συνολικό μήκος από το φράγμα έως το σταθμό παραγωγής 4,6 km, διάμετρο η οποία ξεκινά από 8,5 m και καταλήγει πριν από το Σταθμό σε 7,5 m και ικανότητα παροχής 345 m³/sec. Ο σταθμός παραγωγής, που αποτελείται από τρεις μονάδες, έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Ονομαστική Ισχύς	: 3 x 125 MW η κάθε μία, κατακόρυφου άξονα
Ονομαστική Τάση	: 15750 V
Τύπος Στροβίλων	: Francis
Ύψος πτώσης	: 146,5 m
Αριθμός στροφών	: 125 στρ/min
Ειδική κατανάλωση για παραγωγή	: 3,2 m ³ /kWh

Η σήραγγα προσαγωγής κατά την είσοδό της στο σταθμό παραγωγής διακλαδίζεται σε τρεις, μία για κάθε στρόβιλο. Η Δεξαμενή Αναπάσεως είναι κατασκευασμένη με δύο άνω οριζόντιους θαλάμους, έχει ύψος 84 m και διάμετρο 28 m, ενώ το ύψος του φρέατος υπό πίεση είναι 86 m και η διάμετρος 7 m.



Εικόνα 4-8: Φράγμα ΥΗΕ Πολυφύτου.

4.4.2. Υδροηλεκτρικό έργο Σφηκιάς

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός και το φράγμα Σφηκιάς βρίσκονται 20 km περίπου Νότια της Βέροιας. Το έργο στο σύνολό του αποτελείται από τον Ταμιευτήρα, την Σήραγγα Εκτροπής, το Φράγμα, τον Εκχειλιστή, τις Υδροληψίες, τις Σήραγγες Προσαγωγής, τον Υδροηλεκτρικό Σταθμό και τον Εκκενωτή Πυθμένα.

Ο Ταμιευτήρας της Σφηκιάς είναι ημερήσιας ρύθμισης με χωρητικότητα 99 hm³ και ωφέλιμο όγκο 18 hm³. Η κατακλυζόμενη επιφάνεια είναι 4,3 km². Η ανώτατη στάθμη λειτουργίας είναι το 146,0 m, η ελάχιστη 141,8 m και στάθμη πλημμύρας 147,0 m.

Ο τύπος της σήραγγας εκτροπής είναι με πίεση από σκυρόδεμα, το μήκος της 490 m, η εσωτερική διάμετρος 7,5 m και η παροχή της 620 m³/s. Το υψόμετρο πυθμένα στην είσοδο είναι 88,0 m και στην έξοδο 84,0 m. Για την προσωρινή έμφραξη της σήραγγας χρησιμοποιήθηκαν δοκοί έμφραξης, ενώ για την οριστική πώμα από σκυρόδεμα. Το φράγμα είναι λιθόρριπτο με κεντρικό αργιλικό πυρήνα και όγκο 1.620.000 m³.

Το ύψος του φράγματος από τη θεμελίωση είναι 82 m, το μήκος στη στέψη 220 m και το ελάχιστο πλάτος 12 m. Υπάρχουν δύο εκχειλιστές με δύο τοξωτά θυροφράγματα διαστάσεων 7,2 m x 9,0 m ο καθένας και μηχανισμό ανύψωσης, σήραγγα απαγωγής από σκυρόδεμα και έργο εκτόξευσης. Το

υψόμετρο στη στέψη είναι 137,0 m και η παροχή εκροής 1600 m³/s. Υπάρχουν τρεις Υδροληψίες (μία για κάθε μονάδα) με κεκλιμένες εσχάρες, με διαστάσεις ανοίγματος στην είσοδο της σήραγγας 5,6 m x 10,9 m και απόσταση μεταξύ των αξόνων 22,0 m. Τα μέσα έμφραξης είναι κυλιόμενα θυροφράγματα και χαλύβδινοι δοκοί έμφραξης. Το υψόμετρο του πυθμένα είναι 126,0 m. Αντίστοιχα με τις υδροληψίες, υπάρχουν τρεις Σήραγγες Προσαγωγής (μία για κάθε μονάδα). Το συνολικό μήκος της κάθε σήραγγας είναι 160,80 m και η εσωτερική διάμετρος 7,0 m. Το υψόμετρο άξονα στην υδροληψία 134,05 m και στο σταθμό παραγωγής 73,0 m. Η επένδυση ανάντη του διαφράγματος είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα ενώ κατόντη είναι χαλύβδινη με σκυρόδεμα. Ο Σταθμός Παραγωγής βρίσκεται στο αριστερό αντέρεισμα του φράγματος, είναι υπόγειος και αποτελείται από τρεις μονάδες αναστρέψιμες κατακόρυφου άξονα, τα χαρακτηριστικά των οποίων είναι:

Λειτουργία σαν Γεννήτριες	: 3 x 105 MW
Λειτουργία σαν Αντλίες	: 3 x 108 MW
Ονομαστική Τάση	: 15750 V
Τύπος Στροβίλων	: Francis
Ισχύς Στροβίλων	: 143000 HP
Μέσο Ύψος πτώσης	: 62 m
Αριθμός στροφών	: 125 στρ/min
Ειδική κατανάλωση για παραγωγή	: 7,2 m ³ /kWh
Ειδική κατανάλωση για άντληση	: 5,3 m ³ /kWh

Ο Εκκενωτής Πυθμένα βρίσκεται στο αριστερό αντέρεισμα του φράγματος και ο τύπος του είναι σήραγγα από σκυρόδεμα. Η εσωτερική διάμετρος της σήραγγας είναι 3,50 / 3,00 m, το μήκος της 309 m και η μέγιστη παροχευτικότητα 100 m³/sec. Οι Μονάδες Παραγωγής του ΥΗΣ Σφηκιάς τέθηκαν σε εμπορική λειτουργία:

- Μονάδα ΝοI: Αύγουστος 1985.
- Μονάδα ΝοII: Σεπτέμβριος 1986.
- Μονάδα ΝοIII: Νοέμβριος 1985.



Εικόνα 4-9: Φράγμα ΥΗΕ Σφηκιάς.

4.4.3. Υδροηλεκτρικό έργο Ασωμάτων

Το υδροηλεκτρικό έργο βρίσκεται 8 km περίπου Νότια της Βέροιας. Το έργο στο σύνολό του αποτελείται από τον Ταμιευτήρα, την Σήραγγα Εκτροπής, το Φράγμα, τον Εκχειλιστή, τις Υδροληψίες, τις Σήραγγες Προσαγωγής, τον Υδροηλεκτρικό Σταθμό και τον Εκκενωτή Πυθμένα.

Ο Ταμιευτήρας των Ασωμάτων, όπως και αυτός της Σφηκιάς, είναι ημερήσιας ρύθμισης με χωρητικότητα 53 εκατ. m³ και ωφέλιμο όγκο 10 hm³. Η κατακλυζόμενη επιφάνεια 2,6 km². Η ανώτατη στάθμη λειτουργίας είναι το 85,5 m, η ελάχιστη 81,0 m και στάθμη πλημμύρας 89,0 m.

Ο τύπος της σήραγγας εκτροπής είναι με πίεση από σκυρόδεμα, το μήκος της 496 m, η εσωτερική διάμετρος είναι πεταλειδούς μορφής 7,2 m / 8,5 m και η παροχή της 600 m³/s. Το υψόμετρο πυθμένα στην είσοδο είναι 42,5 m και στην έξοδο 37,6 m. Για την προσωρινή έμφραξη της σήραγγας χρησιμοποιήθηκαν δοκοί έμφραξης, ενώ για την οριστική πώμα από σκυρόδεμα με αγωγό και θυροφράγματα εκκένωσης. Το φράγμα είναι χωμάτινο με εξωτερικές ζώνες από αμμοχάλικο ποταμού, κεντρικό αργιλικό πυρήνα και όγκο 1.450.000 m³.

Το ύψος του φράγματος από τη θεμελίωση είναι 52 m, το μήκος στη στέψη 205 m και το ελάχιστο πλάτος 15 m. Ο εκχειλιστής αποτελείται από τρία τοξωτά θυροφράγματα διαστάσεων 7,0 m x 8,0 m ο καθένας και μηχανισμό ανύψωσης, σήραγγα απαγωγής από σκυρόδεμα και έργο εκτόξευσης. Το υψόμετρο στη στέψη είναι 77,0 m και η παροχή εκροής 1600 m³/s. Υπάρχουν δύο Υδροληψίες (μία για κάθε μονάδα) με κεκλιμένες εσχάρες, με διαστάσεις ανοιγματος στην είσοδο της σήραγγας 4,8 m x 9,3 m και απόσταση μεταξύ των αξόνων 17,9 m. Τα μέσα έμφραξης είναι κυλιόμενα θυροφράγματα και χαλύβδινοι δοκοί έμφραξης. Το υψόμετρο του πυθμένα είναι 69,5 m. Αντίστοιχα με τις υδροληψίες, υπάρχουν δύο Σήραγγες Προσαγωγής (μία για κάθε μονάδα). Το συνολικό μήκος της κάθε σήραγγας είναι 59,0 m και η εσωτερική διάμετρος 6,0 m. Το υψόμετρο άξονα στην υδροληψία 74,4 m και στο σταθμό παραγωγής 42,5 m. Η επένδυση είναι χαλύβδινη με σκυρόδεμα. Ο Σταθμός Παραγωγής βρίσκεται στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος, είναι υπόγειος και αποτελείται από δύο μονάδες κατακόρυφου άξονα, τα χαρακτηριστικά των οποίων είναι:

Ονομαστική Ισχύς	: 3 x 55 MW
Ονομαστική Τάση	: 15750 V
Τύπος Στροβίλων	: Francis
Ισχύς Στροβίλων	: 75700 HP
Μέσο Ύψος πτώσης	: 42 m
Αριθμός στροφών	: 125 στρ/min
Ειδική κατανάλωση για παραγωγή	: 10,0 m ³ /kWh

Ο Εκκενωτής πυθμένα βρίσκεται μέσα στη σήραγγα εκτροπής, στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος και ο τύπος του είναι σήραγγα από σκυρόδεμα. Το υψόμετρο στην είσοδο είναι 53,0 m, στην έξοδο 37,6 m και η μέγιστη παροχетеυτικότητα 90 m³/s. Οι Μονάδες Παραγωγής του ΥΗΣ Σφηκιάς τέθηκαν σε εμπορική λειτουργία:

- Μονάδα ΝοI: Μάρτιος 1985.
- Μονάδα ΝοII: Αύγουστος 1985.



Εικόνα 4-10: Φράγμα ΥΗΕ Ασωμάτων.

4.4.4. Λίμνη αναρρύθμισης και ΜΥΗΕ Αγ. Βαρβάρας – ΜΥΗΕ Μακροχωρίου

Λόγω της μικρής εγκατεστημένης ισχύος (920 kW για την Αγ. Βαρβάρα, 3 x 3,6 MW για το Μακροχώρι) και του χαρακτήρα τους (μικρά υδροηλεκτρικά) τα εν λόγω έργα επιλέχθηκε να μην ληφθούν υπόψη κατά την προσομοίωση του υδροσυστήματος του Αλιάκμονα στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.



Εικόνα 4-11: Αναρρυθμιστικό Αγ. Βαρβάρας & ΜΥΗΕ Μακροχωρίου.

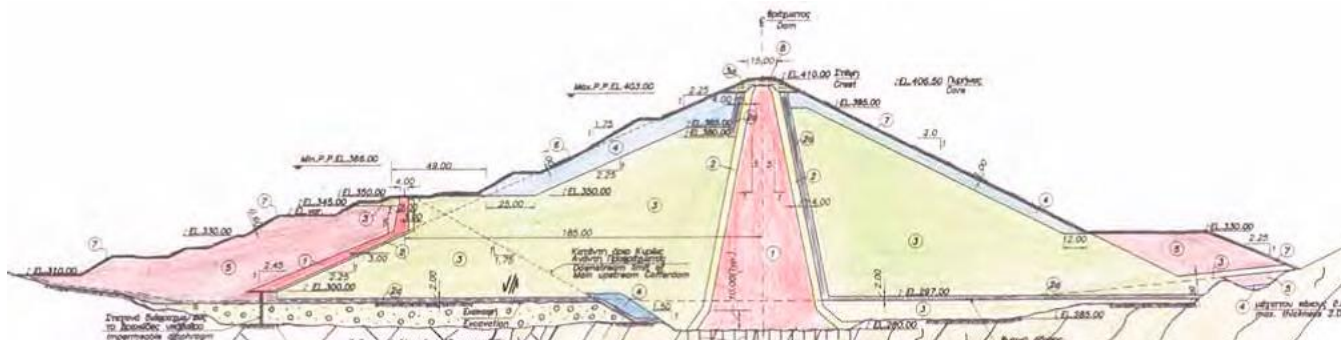
4.4.5. Το φράγμα Ιλαρίωνα και το σχεδιαζόμενο φράγμα Ελαφίου

Ανάντη του ταμιευτήρα Πολυφύτου κατασκευάζεται το υδροηλεκτρικό έργο Ιλαρίωνα. Αποτελεί έργο πολλαπλού σκοπού (όπως οι περισσότεροι ταμιευτήρες εν γένει) μιας και στοχεύει στην:

- Παραγωγή 330 GWh ηλεκτρικής ενέργειας το χρόνο.
- Ύδρευση της πόλης της Θεσσαλονίκης.
- Αναρρύθμιση των κατάντη ΥΗΕ.
- Σταθεροποίηση της στάθμης του ταμιευτήρα Πολυφύτου.
- Περιβαλλοντική αναβάθμιση του Δέλτα του Αλιάκμονα.

- Άρδευση της περιοχής της βόρειας ζώνης της λίμνης Πολυφύτου.

Ο ταμιευτήρας θα έχει επιφάνεια 21,9 km², ενώ ο ωφέλιμος όγκος του θα είναι 412 hm³. Η ανώτατη στάθμη λειτουργίας θα είναι στα 403 m και η ανώτατη στάθμη πλημμύρας στα 403,5 m. Η τυπική διατομή του διακρίνεται στην εικόνα 4-12.



Εικόνα 4-12: Διατομή φράγματος Ιλαρίωνα (Πηγή: Παπαϊωάννου, 2009).

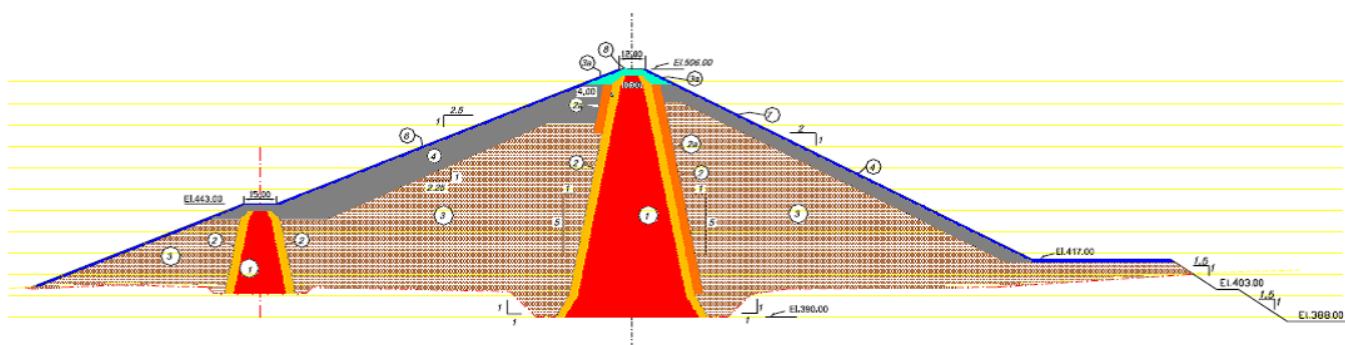
Παράλληλα, σχεδιάζεται ανάντη του Ιλαρίωνα η κατασκευή του φράγματος Ελαφίου. Ο στόχος του συγκεκριμένου σχεδιασμού επιδιώκει την κάλυψη των αυξημένων αναγκών ύδρευσης του πολεοδομικού διαμερίσματος της Θεσσαλονίκης, την άρδευση των εκτάσεων στην αριστερή όχθη του π. Αλιάκμονα από το Αναρρυθμιστικό έργο Αγίας Βαρβάρας μέσω προσαγωγού διώρυγας, την άρδευση των εκτάσεων στη δεξιά όχθη του Αλιάκμονα (περιοχή Βεργίνας-Αιγινίου και Κατερίνης) και την εξασφάλιση οικολογικής παροχής ίσης με 140 εκ. m³ νερού ετησίως, με αποτέλεσμα την περιβαλλοντική αναβάθμιση του υγροβιότοπου του Δέλτα του ποταμού Αλιάκμονα.

Η κατασκευή του ΥΗΕ Ελαφίου θα έχει σαν αποτέλεσμα το σύνολο των έργων επί του π. Αλιάκμονα να αποτελεί ένα από τα πιο πλήρη σχήματα αξιοποίησης ποταμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η μεγιστοποίηση και αναβάθμιση της παραγόμενης ενέργειας από τον υπό κατασκευή ΥΗ Σταθμό του ΥΗΕ Ιλαρίωνα και των υπό λειτουργία ΥΗ Σταθμών των ΥΗΕ Πολυφύτου, ΥΗΕ Συκιάς και ΥΗΕ Ασωμάτων που θα εξασφαλιστεί, υπολογίζεται σε 30 GWh ετησίως. Η υποβάθμιση της παραγόμενης ενέργειας των υφιστάμενων ΥΗ Σταθμών οφείλεται σήμερα στην αναγκαστική λειτουργία τους κατά σημαντικό ποσοστό, για την ικανοποίηση αναγκών ύδρευσης και άρδευσης και όχι αποκλειστικά για την εξυπηρέτηση των αναγκών παραγωγής ενέργειας (Γεωργιόπουλος, 2008). Η κατασκευή του ΥΗΕ Ελαφίου θα εξασφαλίσει τη διάθεση ισχύος 152 MW στο ηλεκτρικό σύστημα της χώρας αφενός και αφετέρου την παραγωγή μέσης, ετήσιας, ποιοτικής, ηλεκτρικής ενέργειας, ίση προς 430 GWh. Ιδιαίτερα, κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, όπου και οι απαιτήσεις ενέργειας αιχμής είναι αυξημένες, το ΥΗΕ Ελαφίου λόγω της απαίτησης ικανοποίησης κατάντη αναγκών, θα εισφέρει περίπου 200 GWh στο ηλεκτρικό σύστημα της χώρας.

Η θέση του Φράγματος του ΥΗΕ Ελαφίου βρίσκεται στον π. Αλιάκμονα, στο Νομό Γρεβενών της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας, 8,0 Km βορειοδυτικά του χωριού Καρπερό και περίπου 45 km ανάντη του ΥΗΕ Ιλαρίωνα. Το έργο περιλαμβάνει χωμάτινο Φράγμα με αργιλικό πυρήνα (εικόνα 4-13). Προβλέπονται Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας στα 504,0 m, Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας στα 500,0 m και Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας στα 450,0 m.

Ο Σταθμός Παραγωγής θα διαθέτει δυο μονάδες ανάστροφης ροής, εγκατεστημένης ισχύος 75 MW η κάθε μία, και μία μικρή μονάδα εγκατεστημένης ισχύος 2,0 MW, για την εξασφάλιση της

απαιτούμενης οικολογικής παροχής. Το σχήμα άντλησης/ταμίευσης επιλέχθηκε ως η βέλτιστη επιλογή λόγω της υφιστάμενης περίσσειας ενέργειας από τους θερμικούς σταθμούς και του υψηλού επιπέδου αξιοπιστίας του.



Εικόνα 4-13: Διατομή φράγματος Ελαφίου (Πηγή: Γεωργιόπουλος, 2008).

Παράλληλα, το υδροηλεκτρικό έργο Ελαφίου αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα προβληματισμού γύρω από το ζήτημα της κλίμακας στη συνδιαχείριση ενέργειας και υδατικών πόρων, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το γενικό πλαίσιο αντιπαράθεσης ΜΥΗΕ και ΥΗΕ αναλύεται στη συνέχεια (Στεφανάκος και Ράμπιας, 2008):

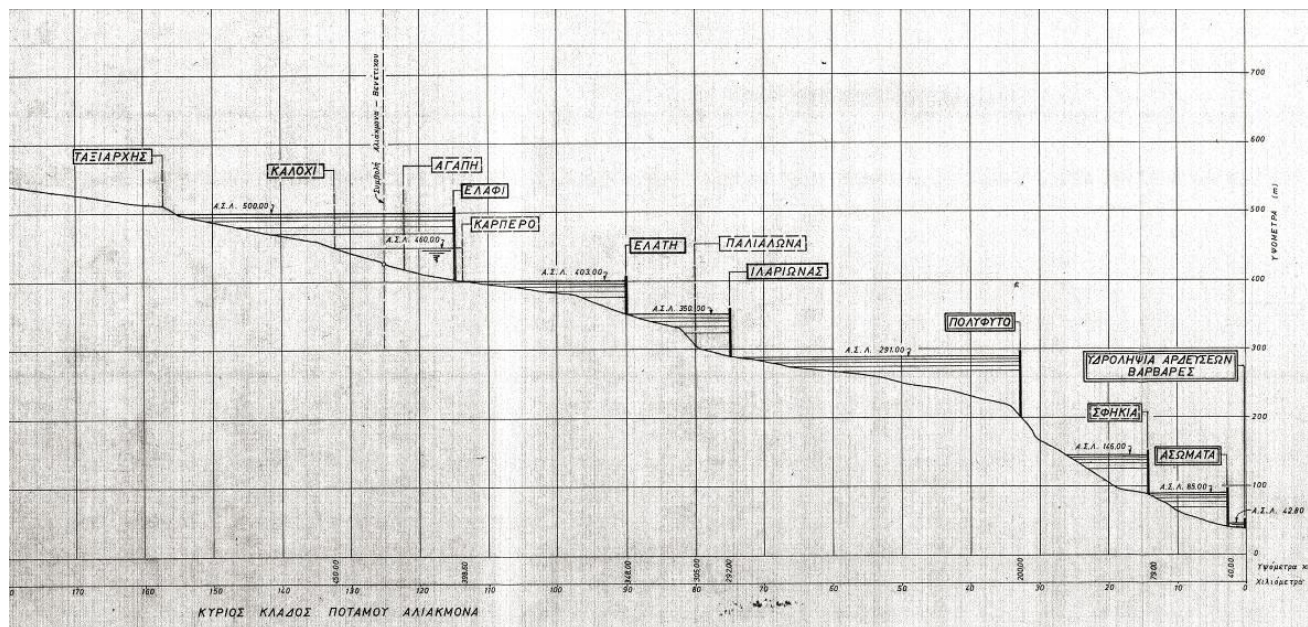
«Το γενικό σχέδιο αξιοποίησης του μέσου και άνω ρου του ποταμού Αλιάκμονα από τη ΔΕΗ (1985), προέβλεπε μεταξύ άλλων και το μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο (ΥΗΕ) Ελάφι, με φράγμα ύψους 115.00 m περίπου. Τα τελευταία χρόνια όμως έχουν κατατεθεί στην Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας προτάσεις από ιδιώτες επενδυτές για κατασκευή στην ίδια περιοχή του ταμιευτήρα του παραπάνω μεγάλου έργου, πέντε (5) συνολικά μικρών υδροηλεκτρικών έργων (ΜΥΗΕ), Φελλί, Μεσόλακκος-Πιστικό, Ταξιάρχης, Ασπρόκαμπος, Πολύδενδρο, μερικά από τα οποία έχουν ήδη αδειοδοτηθεί. Τα πέντε ΜΥΗΕ με το 35% της ισχύος του μεγάλου υδροηλεκτρικού θα παράγουν το 50% της συμβατικής υδροηλεκτρικής του ενέργειας, ενώ θα κατακλύζουν το 16% μόνο των εκτάσεων εκείνου (κυρίως κοιτή του ποταμού) και θα αφήνουν ανέπαφη την κοιτή του Βενέτικου. Το κόστος κατασκευή τους εκτιμάται στο 40% περίπου του κόστους του μεγάλου ΥΗΕ. Ο Αλιάκμονας μετά και την λειτουργία του ΥΗΕ Ιλαρίωνα θα έχει 1660.00 hm³ διαθέσιμες αποθήκες νερού (όσος είναι περίπου και ο όγκος των μέσων ετήσιων παροχών του), άρα το κύριο κριτήριο για την επιλογή της μιας ή της άλλης μορφής ανάπτυξης του ποταμού θα είναι το περιβαλλοντικό μάλλον, ιδιαίτερα λόγω της ιδιαίτερης περιβαλλοντικής ευαισθησίας που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για τον ποταμό Βενέτικο.»

Σε αντίθετη κατεύθυνση η ΔΕΗ επιχειρηματολογεί για την ανάγκη ενός μεγάλου ταμιευτήρα με τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: Πέραν των αναμφισβήτητων ενεργειακών ωφελημάτων θα δημιουργηθεί και σημαντική αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας των ταμιευτήρων του ποταμού Αλιάκμονα κατά 820.00 hm³, όσος δηλαδή θα είναι ο ωφέλιμος όγκος του υπόψη ταμιευτήρα, ενώ οποιαδήποτε αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας με νέους μεγάλους ταμιευτήρες, θα βελτιώσει σημαντικά τη δυνατότητα υπερετήσιας ρύθμισης των παροχών του ποταμού και θα αναβαθμίσει την ποιότητα της παραγόμενης ενέργειας στα υπάρχοντα υδροηλεκτρικά έργα.

Διακρίνουμε επομένως την άμεση αντιπαράθεση ανάμεσα σε ένα πλάνο συνολικής διαχείρισης της ενέργειας από ένα κεντρικοποιημένο φορέα όπως είναι η ΔΕΗ και σε ένα άθροισμα επιμέρους

επενδυτικών προσπαθειών από ιδιώτες που επιδιώκουν την αυξημένη επιρροή τους στον επικερδή τομέα της ενέργειας.

Στην εικόνα 4-14 διακρίνουμε τη μηκοτομή του Αλιάκμονα σύμφωνα με το σχέδιο αξιοποίησής του από τη ΔΕΗ (1985).



Εικόνα 4-14: Μηκοτομή του ποταμού Αλιάκμονα με τα κατάντη λειτουργούντα έργα (Βαρβάρες, Ασώματα, Σφηκιά, Πολύφυτο) μέχρι και ανάντη της συμβολής του Αλιάκμονα με το Βενέτικο, μετά από το γενικό σχέδιο αξιοποίησής του ποταμού (Πηγή: Στεφανάκος και Ράμπιας, 2008).

4.4. Αιολικό δυναμικό: Γενική περιγραφή και ανάλυση για την περιοχή μελέτης

4.4.1. Γενικά στοιχεία

Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό, σε αρκετές περιοχές της Κρήτης, της Πελοποννήσου, της Ευβοίας και φυσικά στα νησιά του Αιγαίου. Σε αυτές τις περιοχές θα συναντήσουμε και τα περισσότερα αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών σε βέλτιστη διάταξη για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.

Η αιολική ενέργεια είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η εκμετάλλευση του υψηλού της δυναμικού στη χώρα μας, σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών που ενσωματώνεται στις σύγχρονες αποδοτικές ανεμογεννήτριες, έχει τεράστια σημασία για τη βιώσιμη ανάπτυξη, την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων και την προστασία του περιβάλλοντος.

Το αιολικό δυναμικό διακρίνεται στο κατάλληλο αιολικό δυναμικό και στο εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό. Το κατάλληλο είναι το τεχνικά αξιοποιήσιμο, ενώ το εκμεταλλεύσιμο αυτό του οποίου η παραγωγή είναι συμφέρουσα, δηλαδή το ανηγμένο κόστος της kWh είναι μικρότερο από την τιμή αγοράς της από τη ΔΕΗ.

Τα σημαντικότερα μεγέθη που χαρακτηρίζουν το κατάλληλο αιολικό δυναμικό είναι:

- Μέση τιμή της ετήσιας ταχύτητας του ανέμου: Προσδιορίζει το ενεργειακό περιεχόμενο.
- Επίπεδο τύρβης: Για τον υπολογισμό των μεταβαλλόμενων φορτίων που μπορούν να οδηγήσουν σε γήρανση το υλικό.
- Μέγιστη τιμή της εμφανιζόμενης ταχύτητας ανέμου: Για εκτίμηση της μηχανολογικής αποτυχίας.
- Καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας: Για τον υπολογισμό του ενεργειακού οφέλους.
- Κατεύθυνση του ανέμου: Απεικονίζεται μέσω ροδογράμματος.

Τα σημαντικότερα μεγέθη που χαρακτηρίζουν το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό είναι:

- Μέση ταχύτητα στα 10 m πάνω από το έδαφος μεγαλύτερη από τα 4 m/s. Στην Ελλάδα το όριο είναι 5,5-6 m/s.
- Χαμηλά επίπεδα τύρβης.
- Χαμηλή συχνότητα εμφάνισης ριπών.
- Χαμηλή μέγιστη ταχύτητα ανέμου.
- Η θέση εγκατάστασης να βρίσκεται κάτω από τα 1000 m υψόμετρο, ενώ να μην πέφτει κάτω από τα -10 m.
- Να απέχει απόσταση μεγαλύτερη από 500 m από μεγάλο αστικό συγκρότημα.

Γενικότερα, ως κριτήριο επιλογής του σταθμού άντλησης των ανεμολογικών δεδομένων (χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου) λήφθηκε οι ταχύτητες να είναι πάνω από τα 6 m/s. Για την επιλογή της θέσης, έγινε σύγκριση ανάμεσα στις περιοχές όπου υπάρχουν μετρητικοί σταθμοί του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (<http://penteli.meteo.gr/meteosearch/map.asp>) και στο χάρτη αιολικού δυναμικού της Ελλάδας της ΠΑΕ⁹ (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας) (<http://aims.cres.gr/grwind150/viewer.htm> μια παλαιότερη έκδοση και <http://www.cres.gr/kape/datainfo/maps.htm> η νεότερη και πλέον ανανεωμένη).

4.4.2. Η περιοχή μελέτης

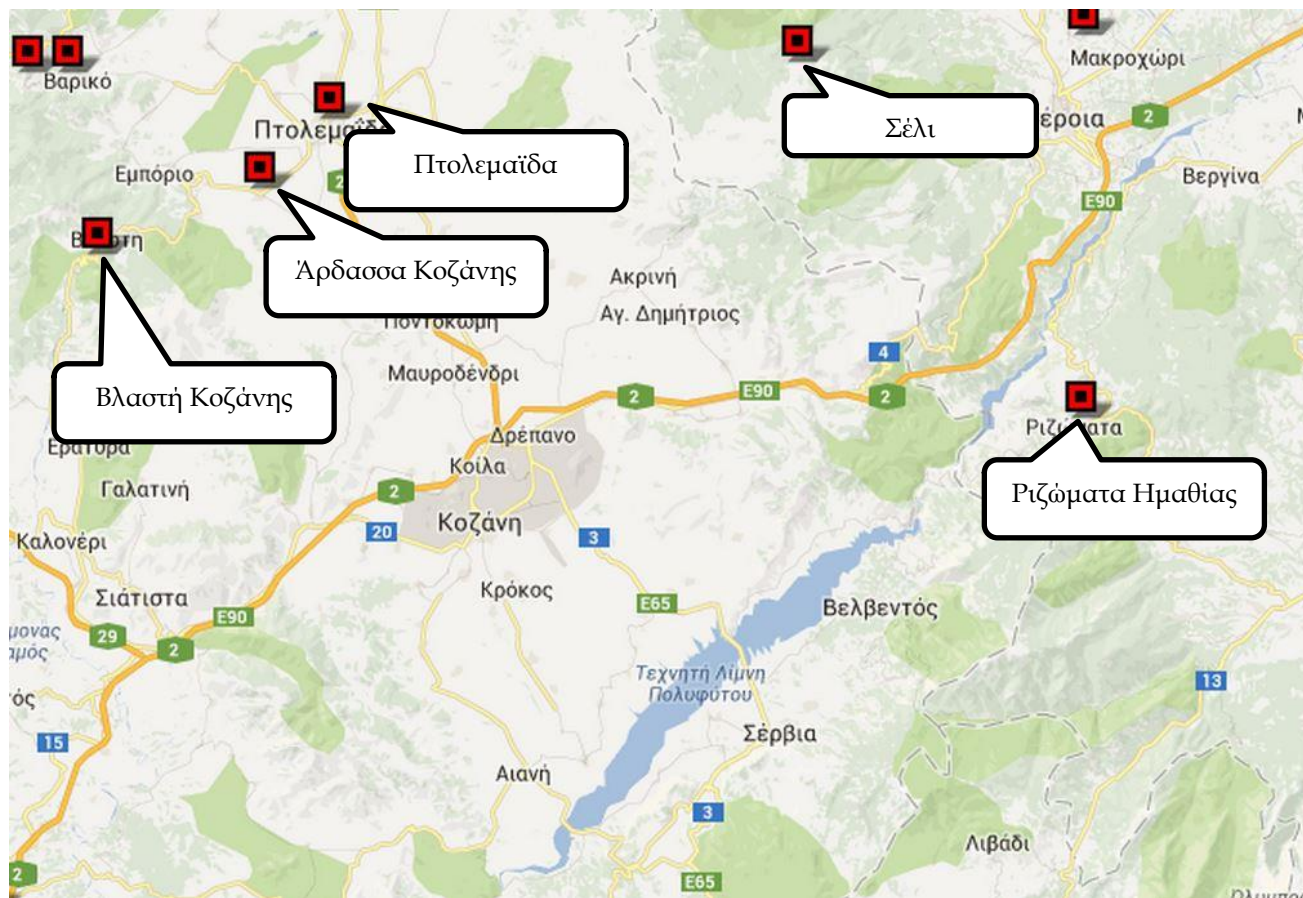
Στην περιοχή του υδροσυστήματος Αλιάκμονα παρότι υπάρχουν εγκατεστημένα αιολικά πάρκα και συγκροτήματα ανεμογεννητριών, δεν υπάρχει κοντινός σταθμός με επαρκείς ταχύτητες δεδομένων.

Πιο συγκεκριμένα, οι κοντινοί σταθμοί στο υδροσύστημα Αλιάκμονα είναι:

- i. «Άρδασσα Κοζάνης».
- ii. «Πτολεμαΐδα».
- iii. «Σέλι».
- iv. «Βλαστή Κοζάνης».
- v. «Ριζώματα Ημαθίας».

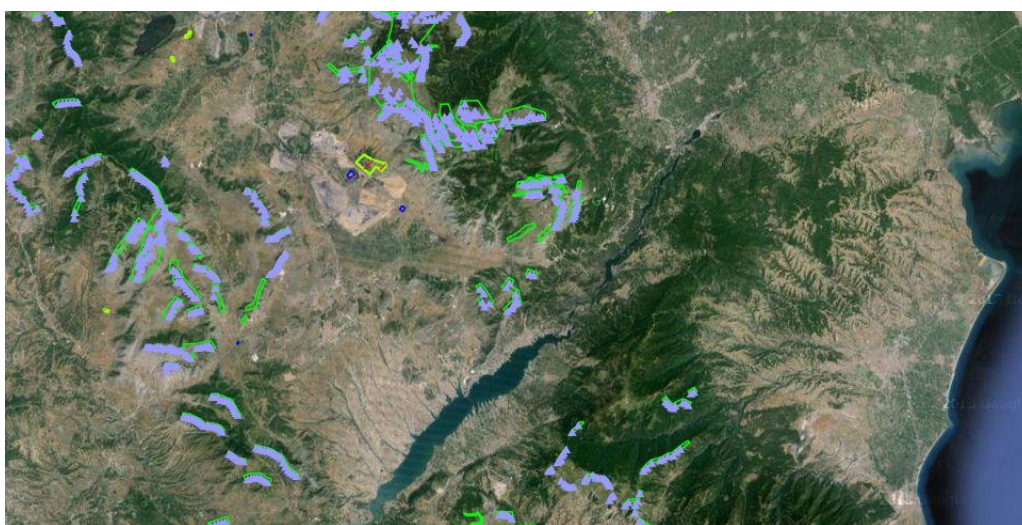
⁹ Πληροφορίες για την ίδρυση και το ρόλο της ΠΑΕ εδώ:
http://www.rae.gr/site/categories_new/about_rae/intro.csp

Οι θέσεις των σταθμών διακρίνονται στην εικόνα 4-15. Στην εν λόγω εικόνα διακρίνεται και η θέση τους σε σχέση με τον ταμιευτήρα Πολυφύτου.

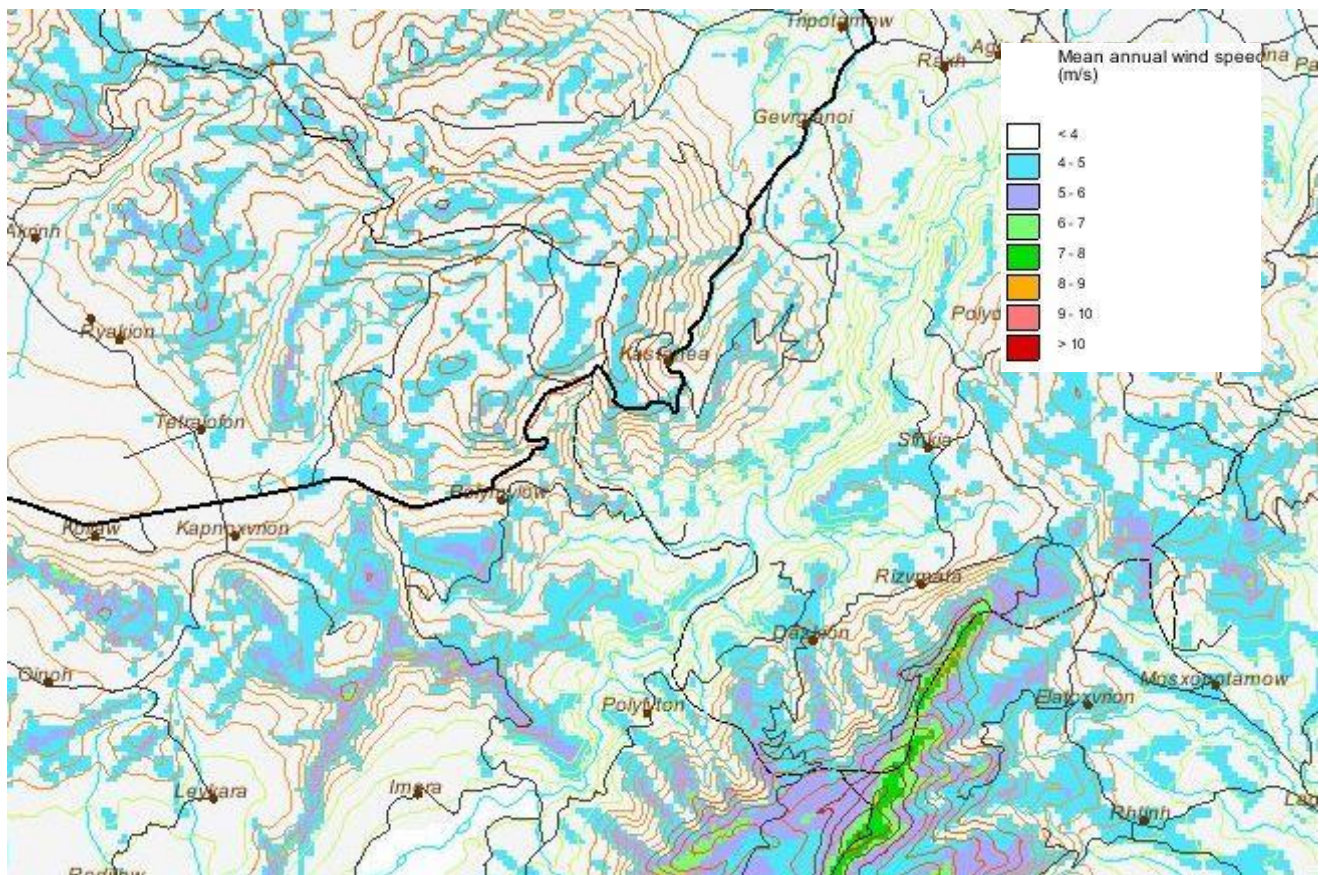


Εικόνα 4-15: Χάρτης με τη θέση των μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών κοντά στο υδροσύστημα Αλιάκμονα.

Η αντίστοιχη εικόνα του αιολικού δυναμικού διακρίνεται στην εικόνα 4-17. Στη συγκεκριμένη εικόνα διακρίνουμε πως δεν υπάρχει επαρκές αιολικό δυναμικό στις περιοχές των προαναφερθέντων σταθμών. Στην 4-16 διακρίνεται το πλήθος αιολικών πάρκων στην περιοχή.



Εικόνα 4-16: Αιολικά πάρκα στην περιοχή του υδροσυστήματος Αλιάκμονα.



Εικόνα 4-17: Χάρτης αιολικού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής υδροσυστήματος Αλιάκμονα.

Αναζητώντας έναν σταθμό στην ευρύτερη περιοχή της Μακεδονίας, καταλήξαμε στον σταθμό του Κιλκίς, όπου από το χάρτη αιολικού δυναμικού διακρίνουμε πως παρατηρούνται επαρκείς ταχύτητες ανέμου.

Η περιοχή του Κιλκίς απέχει 160 km από τον ταμιευτήρα Πολυφύτου και 60 km από την πόλη της Θεσσαλονίκης, οπότε σε ένα συνδυασμένο σύστημα διαχείρισης αιολικής - υδροηλεκτρικής ενέργειας ένα αιολικό πάρκο εγκατεστημένο στην εν λόγω περιοχή έχει τη δυνατότητα συλλειτουργίας με το σύστημα των υδροηλεκτρικών έργων του Αλιάκμονα υπό ένα ενιαίο μεθοδολογικό πλαίσιο με στόχο την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης μιας πόλης με αρκετά ανεπτυγμένο πληθυσμό.

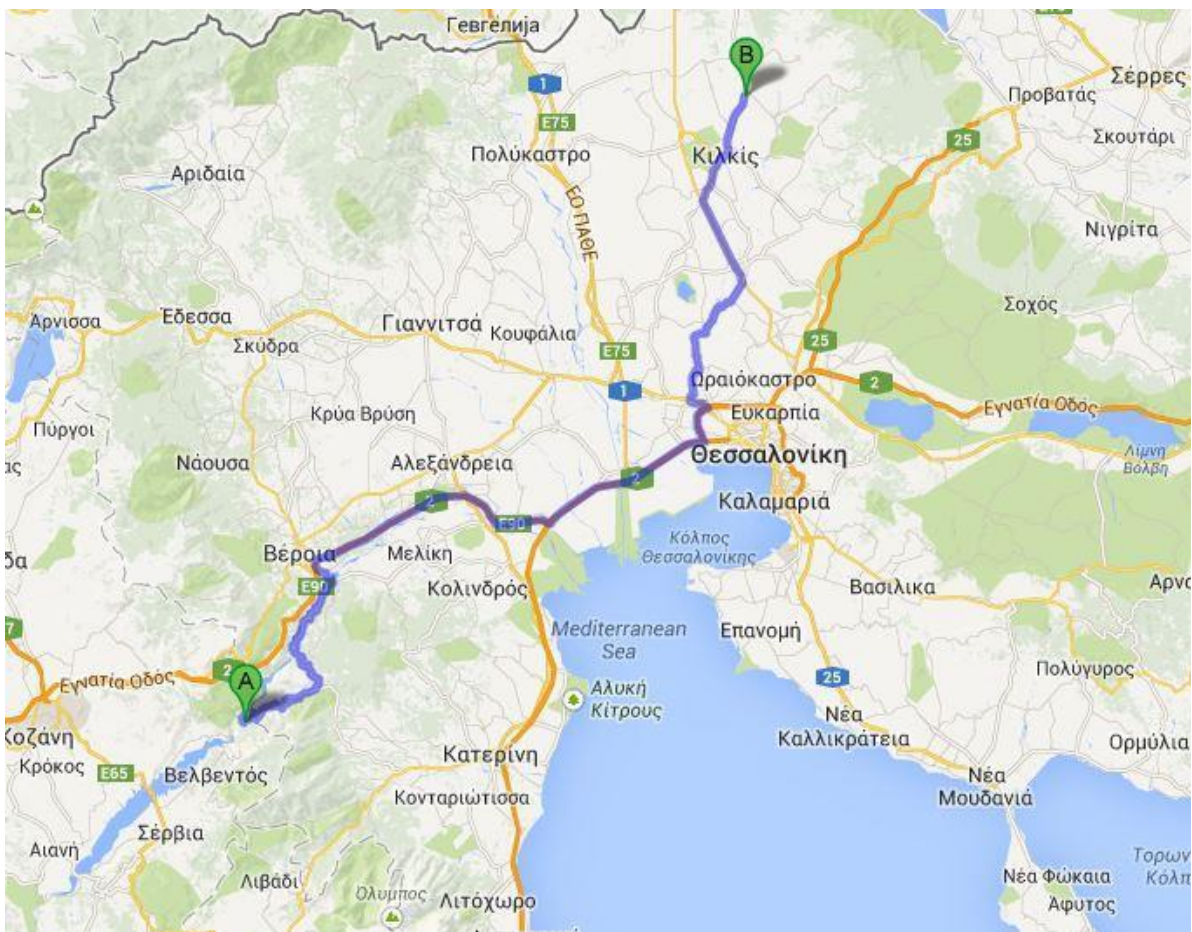
Το μορφολογικό ανάγλυφο του νομού Κιλκίς διαμορφώνεται από τους ορεινούς όγκους που υψώνονται στο ανατολικό και στο δυτικό τμήμα του. Στα δυτικά υψώνεται η οροσειρά του Πάικου, του οποίου οι ψηλότερες κορυφές (Πολέτι 1650 m· Τσούμα 1219 m· Πύργος 1494 m· Βερτόπια 1490 m· Ασπρόχωμα 831 m) καθορίζουν τα όρια του νομού Κιλκίς με τον νομό Πέλλης. Στο έδαφος του νομού βρίσκεται μόνο η ανατολική προέκταση του Πάικου, Κοντάσι (1607 m). Στα βορειανατολικά του νομού δεσπόζουν οι δυτικές κορυφές της Κερκίνης (Μπέλες), που καθορίζουν στο τμήμα αυτό τα σύνορα με την ΠΓΔΜ. Στα ανατολικά υψώνεται το Δύσωρον ή Κρούσια (860 m) και το Μαυροβούνι (1197 m), το οποίο προχωρεί στα νότια με χαμηλότερες κορυφές (Λυκοράχη 713 m, Πασχαλιά 745 m, κ.ά.) μέχρι τον νομό Θεσσαλονίκης. Μεταξύ των ορεινών αυτών όγκων στα ανατολικά και δυτικά του νομού, απλώνεται η μεγάλη προσχωσιγενής πεδιάδα του Κιλκίς, η οποία αποτελεί το βόρειο τμήμα της μεγάλης πεδιάδας της κεντρικής Μακεδονίας.

Δύο μεγάλοι ποταμοί διαρρέουν και αποστραγγίζουν το έδαφος του νομού Κιλκίς, ο Αξιός και ο Γαλλικός. Ο Αξιός εισέρχεται στο έδαφος του νομού από την ΠΓΔΜ, μεταξύ Ειδομένης και Ευζώνων, τον διασχίζει ολόκληρο από τα βόρεια προς τα νότια και συνεχίζει την πορεία του στον νομό Θεσσαλονίκης. Ο Γαλλικός αποστραγγίζει την ορεινή περιοχή των Κρουσίων. Στα βορειοανατολικά βρίσκεται η λίμνη Δοϊράνη, η οποία ανήκει στην Ελλάδα κατά το ήμισυ και της οποίας τα νερά εκχέονται στον Αξιό σε περίπτωση υπερχειλίσης. Στα νότια βρίσκεται η Πικρολίμνη. Παλαιότερα, στην πεδιάδα του Κιλκίς σχηματιζόνταν αβαθείς λίμνες και τέλματα, που αποξηράνθηκαν με αποστραγγιστικά έργα.

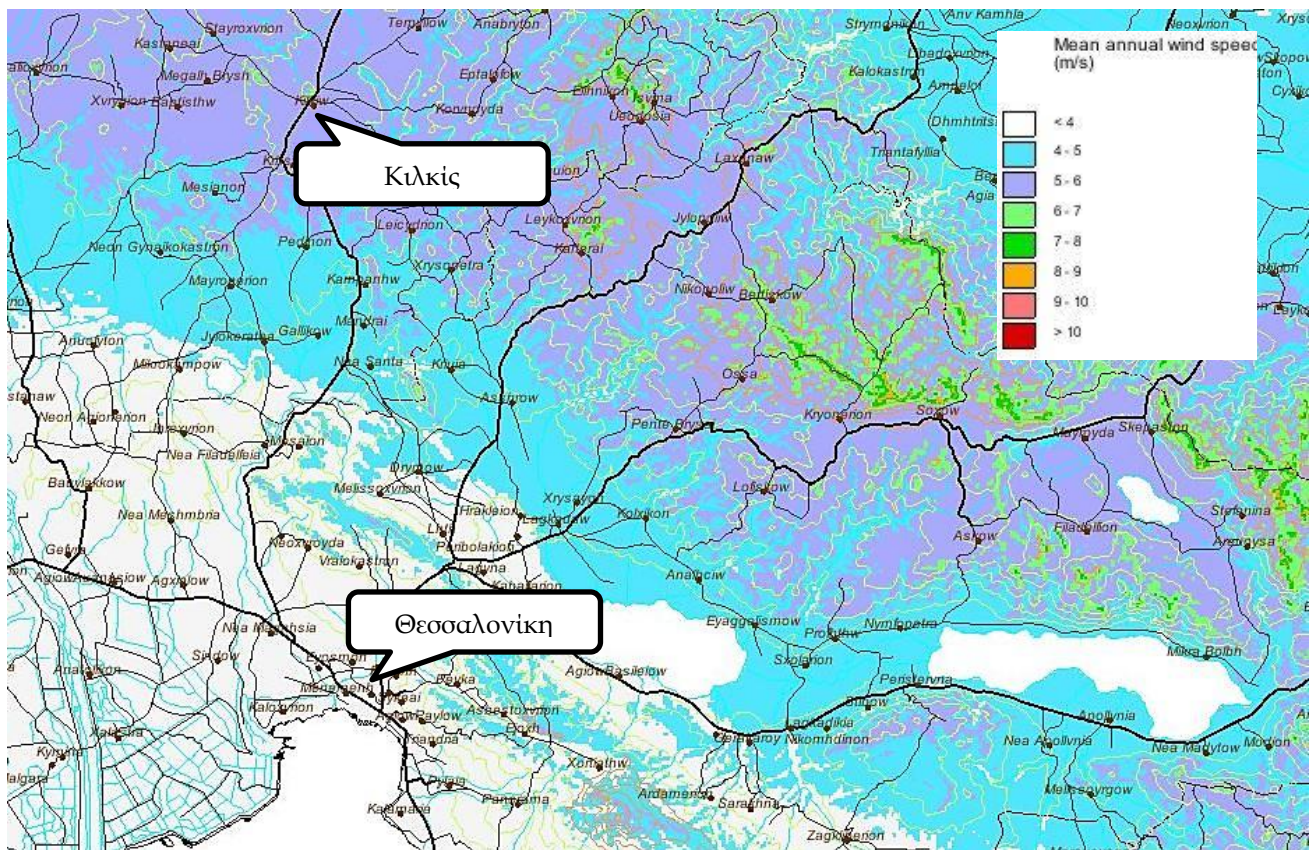
Το κλίμα του νομού Κιλκίς είναι ηπιότερο στα νότια (εκεί που συνορεύει με τον νομό Θεσσαλονίκης). Προς τα βόρεια γίνεται δριμύτερο και έχει τα χαρακτηριστικά του ηπειρωτικού, ιδιαίτερα στις ορεινές περιοχές. Εκεί το χιόνι αποτελεί συχνό φαινόμενο, το ύψος των βροχοπτώσεων είναι μεγάλο και επικρατούν οι βόρειοι άνεμοι.

Στην εικόνα 4-18 διακρίνεται η θέση της περιοχής του Κιλκίς σε σχέση με το υδροσύστημα του Αλιάκμονα.

Στην εικόνα 4-19 παρατίθεται ο χάρτης αιολικού δυναμικού της περιοχής του Κιλκίς.



Εικόνα 4-18: Θέση Κιλκίς σε σχέση με το υδροσύστημα Αλιάκμονα.

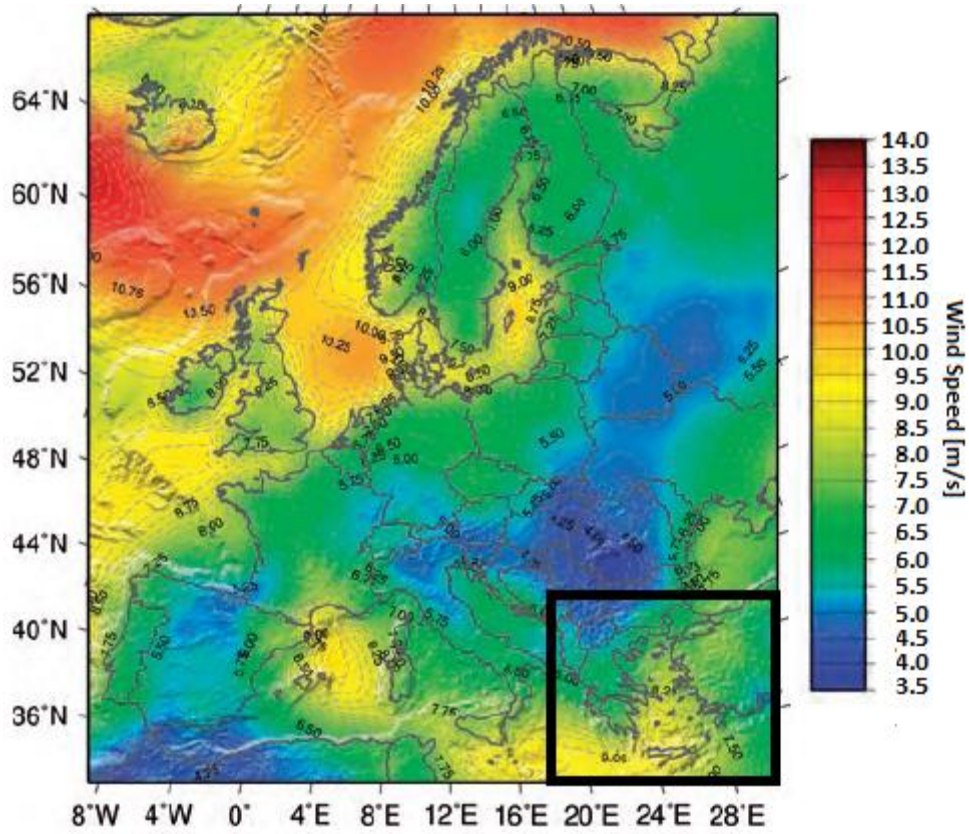


Εικόνα 4-19: Χάρτης αιολικού δυναμικού της ευρύτερης περιοχής του Κιλκίς. Διακρίνεται και η θέση του ως προς τη Θεσσαλονίκη.

Για λόγους πληρότητας παρατίθεται και ο χάρτης αιολικού δυναμικού του ευρωπαϊκού χώρου (στην εικόνα 4-20). Παρατηρούμε ότι στην κεντρική και ηπειρωτική Ευρώπη επικρατούν σχετικά χαμηλές ταχύτητες ανέμου (5-8 m/s). Αντίθετα, στην υπεράκτια περιοχή της βόρειας Θάλασσας και ειδικότερα στις θαλάσσιες περιοχές ανάμεσα στην Ισλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο και στα βόρεια της Σκανδιναβικής χερσονήσου επικρατούν μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Αυτό το γεγονός ευνοεί την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Παρόλα τα παραπάνω στην Ελλάδα είναι εγκατεστημένο το 1,4 % του αιολικού δυναμικού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ, είναι εγκατεστημένο στην Ελλάδα (σύμφωνα με την έκθεση για την επίδραση της Αιολικής Ενέργειας στην απασχόληση και την οικονομία που παρουσίασε η Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας EWEA).

Στην κορυφή της κατάταξης (με στοιχεία 2010) βρίσκεται η Γερμανία, όπου είναι εγκατεστημένο το 32,3% των ανεμογεννητριών και ακολουθεί η Ισπανία με 24,5%, η Ιταλία με 6,9%, η Μ. Βρετανία με 6,2% και η Δανία με 4,5%. Συνολικά στην ΕΕ είναι εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες ισχύος 84323 MW.

Σύμφωνα με την έκθεση, η Αιολική Ενέργεια αύξησε τη συμμετοχή της στο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατά 33% ανάμεσα στο 2007 και το 2010 ενώ μέσα στο 2010, η ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας ήταν διπλάσια από αυτή του ευρωπαϊκού ΑΕΠ, συνεισφέροντας 32 δισ. Ευρώ στην Ευρωπαϊκή οικονομία εν μέσω κρίσης.



Εικόνα 4-20: Χάρτης αιολικού δυναμικού του Ευρωπαϊκού χώρου (Πηγή: http://www.westenergy.gr/?page_id=238)

5. Η προσομοίωση του υδροσυστήματος Αλιάκμονα: Στοιχεία Στοχαστικής Υδρολογίας και το λογισμικό Υδρονομέας

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε η θεωρητική περιγραφή των επιμέρους εννοιών που συνθέτουν το πλαίσιο συνδιαχείρισης υδατικών πόρων και ενέργειας. Στο παρόν κεφάλαιο περνάμε στην προσομοίωση του υδροσυστήματος του Αλιάκμονα. Εισαγωγικά περιγράφουμε βασικές έννοιες της Στοχαστικής Υδρολογίας και τη διαδικασία γέννησης συνθετικών χρονοσειρών, ενώ στη συνέχεια σκιαγραφούμε τα βασικά στοιχεία του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ καθώς και τις βασικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται κατά την μοντελοποίηση. Τέλος, αναλύονται όλα τα επιμέρους στοιχεία της διαδικασίας προσομοίωσης: από το στήσιμο των σεναρίων έως το σύνολο του φάσματος των αποτελεσμάτων και την παρουσίασή τους.

5.1. Στοχαστική προσέγγιση στην Υδρολογία

Με το χαρακτηρισμό «Στοχαστική» αναφερόμαστε στην προσέγγιση με έμφαση στην αβεβαιότητα που είναι εγγενής στα υδρομετεωρολογικά φαινόμενα και συνεπώς στην Υδρολογία. Ο εν λόγω κλάδος αναπτύχθηκε ώστε να συμπεριληφθεί η προαναφερθείσα αβεβαιότητα στο μεθοδολογικό πλαίσιο ανάλυσης των υδρολογικών φαινομένων. Στην συγκεκριμένη θεώρηση οι μεταβλητές αντιμετωπίζονται ως στοχαστικές ανελίξεις. Στοχαστική ανέλιξη $X(t)$ ονομάζεται μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών σε ακολουθία $\{X_1, X_2, \dots, X_t\}$, όπου ο δείκτης t αναφέρεται στο εκάστοτε χρονικό βήμα (π.χ. αύξων αριθμός ώρας σε μια χρονοσειρά ωριαίων ταχυτήτων ανέμου ή αύξων αριθμός μήνα σε μια μηνιαία χρονοσειρά τιμών βροχόπτωσης).

Τα κυριότερα στατιστικά μεγέθη μιας χρονοσειράς είναι:

- i. Η μέση τιμή:

$$\mu(t) = E[X(t)] \quad (5.1)$$

- ii. Η τυπική απόκλιση (ή τετραγωνική ρίζα της διασποράς):

$$\sigma(t) = \sqrt{\text{Var}[X(t)]} \quad (5.2)$$

$$\text{Var}[X(t)] = E[(X(t) - \mu(t))^2] \quad (5.3)$$

- iii. Η αυτοσυνδιασπορά της ανελίξης, με χρονική υστέρηση (lag) τ :

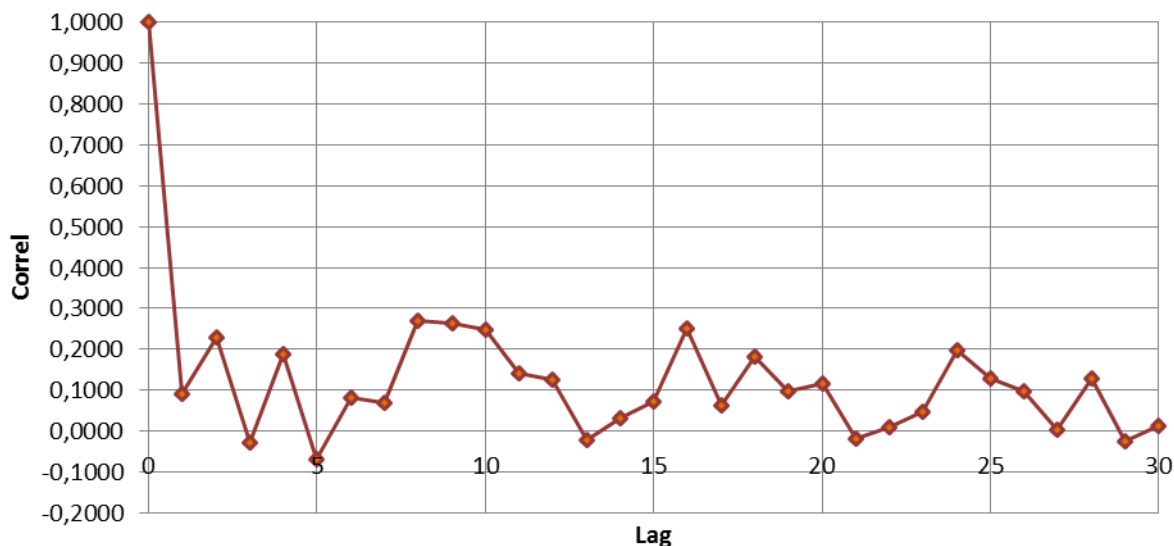
$$\gamma(t; \tau) = \text{cov}[X(t), X(t + \tau)] \quad (5.4)$$

$$\text{cov}[X(t), X(t + \tau)] = E[(X(t) - \mu(t))(X(t + \tau) - \mu(t + \tau))] \quad (5.5)$$

- iv. Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης:

$$\rho(t; \tau) = \frac{\text{cov}[X(t), X(t + \tau)]}{\sqrt{\text{Var}[X(t)] \cdot \text{Var}[X(t + \tau)]}} \quad (5.6)$$

Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης λαμβάνει τιμές από το -1 έως το +1 . Οι δύο ακραίες τιμές δηλώνουν απόλυτη αρνητική ή θετική συσχέτιση αντίστοιχα. Στις εφαρμογές υδρολογικής φύσεως συνήθως επιλέγονται μικρές υστερήσεις τ ώστε να διερευνηθεί η επιρροή των τιμών που ακολουθούν από τις αμέσως προηγούμενες τους. Ουσιαστική σημασία παρουσιάζει το αυτοσυσχετόγραμμα: ένα διάγραμμα που στον οριζόντιο άξονα έχει την υστέρηση τ και στον κατακόρυφο άξονα την τιμή του συντελεστή αυτοσυσχέτισης. Στην εικόνα 5-1 διακρίνουμε ως παράδειγμα το αυτοσυσχετόγραμμα της ετήσιας χρονοσειράς βροχής στον Αλιάρτο (Πηγή: Ασκήσεις μαθήματος «Στοχαστικές Μέθοδοι στους Υδατικούς Πόρους», Κουτσογιάννης, 2012).



Εικόνα 5-1: Αυτοσυσχετόγραμμα ετήσιας χρονοσειράς βροχής στη θέση Αλιάρτος.

Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις επιδιώκουμε να εντοπίσουμε την ετεροσυσχέτιση ανάμεσα σε δύο μεταβλητές. Για παράδειγμα: συσχέτιση βροχής-απορροής, χωρική συσχέτιση των βροχοπτώσεων σε δύο διαφορετικές θέσεις μιας λεκάνης. Τα κυριότερα μεγέθη σε αυτή την περίπτωση είναι:

- i. Η ετεροσυνδιασπορά των δύο ανελιξεων $X(t), Y(t)$:

$$C_{XY}(\tau) = \text{cov}[X(t), Y(t + \tau)] \quad (5.7)$$

- ii. Ο συντελεστής ετεροσυσχέτισης:

$$r_{XY}(\tau) = \frac{\text{cov}[X(t), Y(t + \tau)]}{\sqrt{\text{Var}[X(t)] \cdot \text{Var}[Y(t + \tau)]}} \quad (5.8)$$

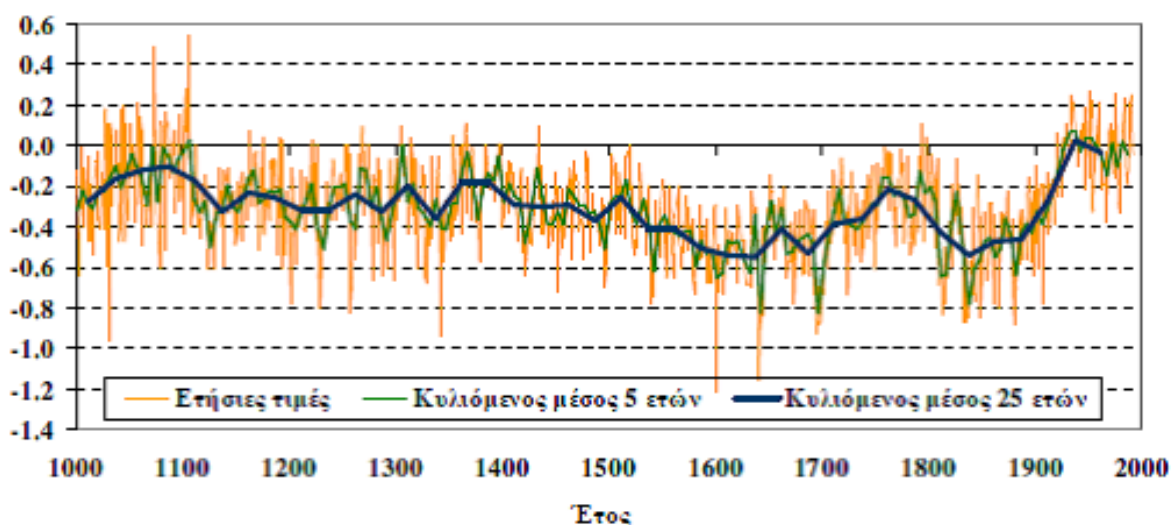
Στις περισσότερες των περιπτώσεων η σύγκριση γίνεται σε ταυτόχρονες στιγμές, επομένως μας ενδιαφέρει ο συντελεστής μηδενικής τάξης $r_{XY}(0)$.

Περισσότερες εισαγωγικές και αναλυτικές αναλύσεις στις προαναφερθείσες έννοιες μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία του μαθήματος «Στοχαστικές Μέθοδοι στους Υδατικούς Πόρους»¹⁰.

5.2. Δυναμική Hurst-Kolmogorov

Η πλειονότητα των υδρομετεωρολογικών φαινομένων χαρακτηρίζεται από την δυναμική Hurst-Kolmogorov. Την δυναμική αυτή επισήμανε πρώτος ο Βρετανός μηχανικός Hurst (1951) κατά την διάρκεια της μελέτης του φράγματος Ασουάν μέσω της παρατήρησης των χρονοσειρών των απορροών του ποταμού Νείλου. Ο Hurst διαπίστωσε την τάση που έχουν τα έτη με μεγάλες απορροές να ομαδοποιούνται όπως αντίστοιχα και τα έτη με μικρές απορροές. Δέκα χρόνια νωρίτερα ο Kolmogorov (1940) είχε διαπιστώσει την ίδια συμπεριφορά μελετώντας την τύρβη και εισήγαγε ένα μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή, γνωστό ως στοχαστικό μοντέλο αυτοομοιοθετίας (Simple Scaling Stochastic model) ή κλασματικός Γκαουσιανός θόρυβος (Fractal Gaussian Noise).

Η εν λόγω δυναμική όταν είναι παρούσα σε μια χρονοσειρά οδηγεί σε υψηλές αυτοσυσχετίσεις στις μεγάλες κλίμακες υστέρησης τ , επομένως και σε ομαδοποιήσεις των υψηλών και χαμηλών τιμών. Τα αυτοσυσχετογράμματα σε αυτές τις περιπτώσεις διατηρούν θετικές τιμές καθ' όλο το φάσμα των υστερήσεων. Η ομαδοποίηση των υψηλών και των χαμηλών τιμών διακρίνεται στο γράφημα της εικόνας 5-2 όπου έχουμε τις μέσες ετήσιες θερμοκρασίες του βόρειου ημισφαιρίου. Στην 5-3 φαίνεται το αυτοσυσχετογράμματα της παραπάνω χρονοσειράς, όπου είναι εμφανής η διατήρηση υψηλής αυτοσυσχέτισης στις μεγάλες χρονικές κλίμακες.

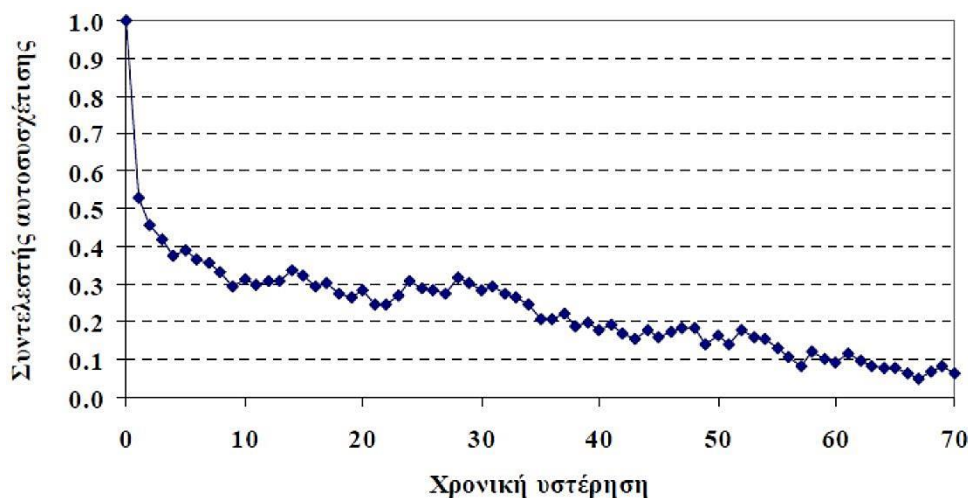


Εικόνα 5-2: Γραφική παράσταση χρονοσειράς μέσων ετήσιων θερμοκρασιών Βορείου Ημισφαιρίου και κυλιόμενων μέσων 5 και 25 ετών (Πηγή: Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2004).

Μέτρο της εμμονής αποτελεί ο συντελεστής Hurst H ο οποίος παίρνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$. Τιμή του Hurst στο διάστημα $[0,0.5]$ αποδεικνύει την ύπαρξη αντι-εμμονής η οποία δηλώνει ότι μία αύξηση των τιμών της χρονοσειράς ακολουθείται από μείωση των τιμών της. Τιμή του Hurst στο διάστημα $[0.5,1]$ αποδεικνύει την ύπαρξη εμμονής η οποία δηλώνει ότι μία αύξηση των τιμών της χρονοσειράς ακολουθείται από περαιτέρω αύξηση των τιμών της. Τέλος τιμή του Hurst ίση με 0.5

¹⁰ <http://itia.ntua.gr/courses/stochwatres/index.html>

συνεπάγεται την τυχαία αύξηση ή μείωση των τιμών της χρονοσειράς γνωστή και ως λευκός θόρυβος.



Εικόνα 5-3: Αυτοσυσχετιόγραμμα χρονοσειράς μέσων ετήσιων θερμοκρασιών για το Βόρειο Ημισφαίριο (Πηγή: Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2004).

Οι ιστορικές χρονοσειρές με τέτοια συμπεριφορά παρουσιάζουν διακυμάνσεις σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, σε αντίθεση με τις χρονοσειρές τυχαίων μεταβλητών. Η ύπαρξη αυτής της μακροχρόνιας μνήμης ή εμμονής στις ιστορικές χρονοσειρές διερευνάται μέσω του υπολογισμού του συντελεστή Hurst. Σε χρονοσειρές με υψηλό συντελεστή Hurst η αβεβαιότητα αυξάνεται. Είναι λοιπόν σαφές ότι η ποσοτικοποίηση της μεταβλητότητας κρίνεται ιδιαίτερως σημαντική για τα έργα πολιτικού μηχανικού.

Η σημαντικότερη μεταβλητή από πλευράς δυναμικής Hurst-Kolmogorov στα έργα πολιτικού μηχανικού είναι χωρίς αμφιβολία η απορροή. Κατά τη διαχείριση υδροσυστημάτων, η ομαδοποίηση των ετών υψηλής και χαμηλής υδροφορίας παίζει σπουδαίο ρόλο καθώς οδηγεί σε δυσμενέστερες επιλογές (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2004). Στις επιστήμες των Υδατικών Πόρων, η επιρροή είναι εμφανής: τα υγρά έτη ομαδοποιούμενα οδηγούν σε επίμονα φαινόμενα πλημμυρών (Μπουζιώτας, 2012) αυξάνοντας τις πιθανότητες υπερχειλίσσης των ταμιευτήρων, ενώ τα ξηρά έτη οδηγούν σε μειωμένες δυνατότητες κάλυψης υδατικών και ενεργειακών αναγκών.

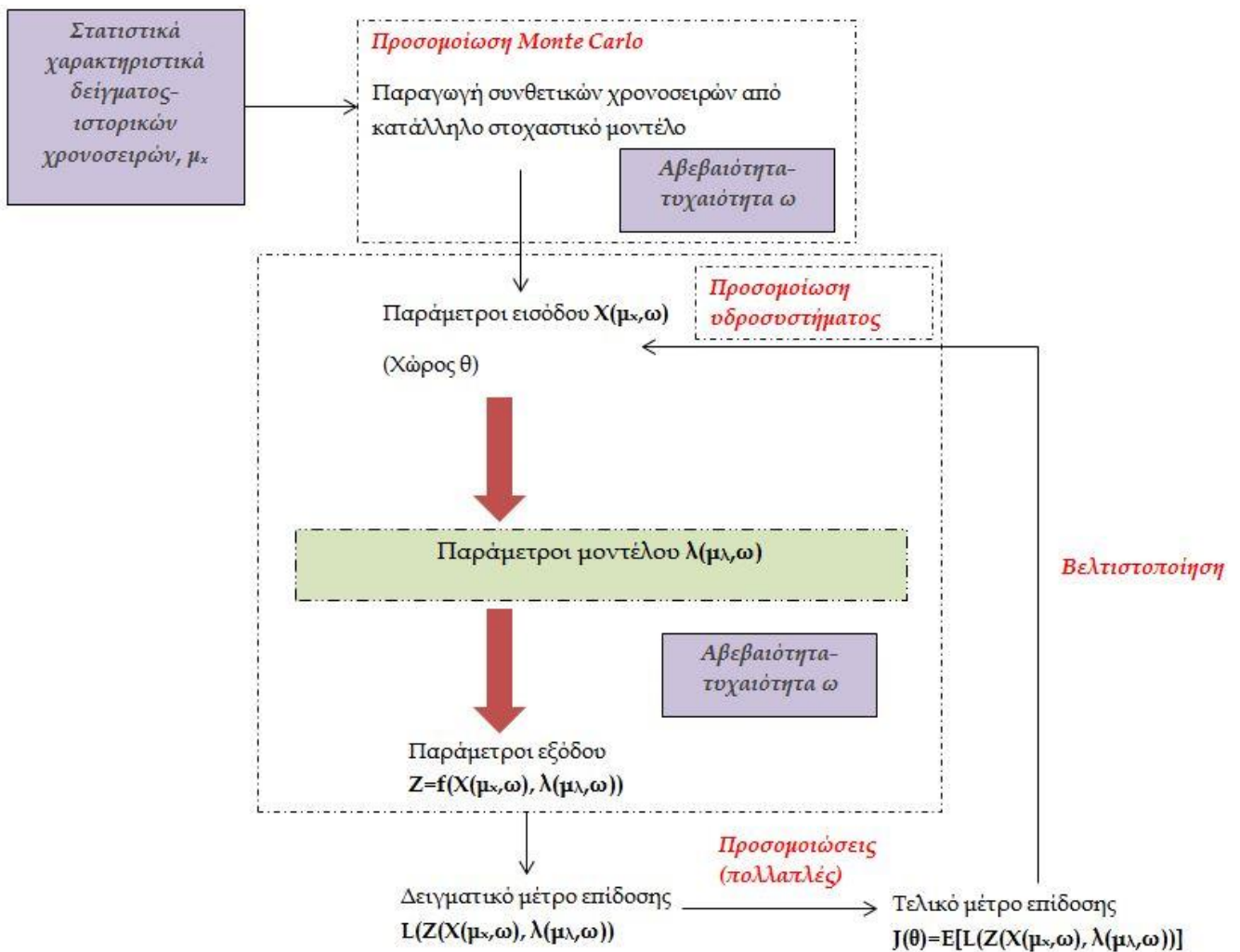
Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας δε γίνεται εκτενής περιγραφή των μεθόδων εκτίμησης του συντελεστή Hurst καθώς ξεφεύγουν από τα πλαίσια επιμερισμού του ενδιαφέροντος του δεδομένου αντικείμενου. Ωστόσο, μια αναλυτική περιγραφή των εν λόγω μεθοδολογιών έχει κάνει ο Τσεκούρας¹¹ (2012). Συνήθως, η εκτίμηση του συντελεστή Hurst μέσω των διαθέσιμων δεδομένων είναι μια δυσχερής διαδικασία, εφόσον απαιτείται χρονοσειρά μεγάλου μήκους (εκατοντάδες έτη) ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια για μεγάλες υστερήσεις τ . Στον ελληνικό χώρο οι διαθέσιμες χρονοσειρές δεδομένων έχουν μήκος δεκαετιών, οπότε η δειγματική εκτίμηση της εμμονής είναι αρκετά αβέβαιη.

¹¹ «Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση υδρομετεωρολογικών διεργασιών σχετικών με την αιολική και ηλιακή ενέργεια»: <http://itia.ntua.gr/el/docinfo/1300/>

5.3. Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναδείχθηκαν τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της στοχαστικής προσομοίωσης, ώστε να διερευνούνται με ευκολία τα ζητήματα της αξιοπιστίας και της αβεβαιότητας στη διαχείριση υδατικών πόρων και ενέργειας. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών οι οποίες έχουν μήκος αρκετά μεγαλύτερο των ιστορικών, ενώ δεν προσθέτουν επιπλέον πληροφορίες σε σχέση με τις ιστορικές μετρήσεις (Κουτσογιάννης, 2013).

Για τους παραπάνω λόγους το μεθοδολογικό πλαίσιο σύζευξης προσομοίωσης-βελτιστοποίησης πρέπει να γενικευτεί ώστε να συμπεριλάβει και το στοχαστικό μοντέλο εισροών (δηλαδή το μοντέλο που παράγει τις συνθετικές χρονοσειρές εισόδου του μοντέλου προσομοίωσης). Η εν λόγω γενίκευση διακρίνεται στην εικόνα 5-4.



Εικόνα 5-4: Γενικευμένο μεθοδολογικό πλαίσιο σύζευξης προσομοίωσης-βελτιστοποίησης (Πηγή: Μπουζιώτας, 2012, μετά από τροποποίηση).

Στη συνέχεια περιγράφονται τα δύο βασικά μοντέλα γέννησης συνθετικών χρονοσειρών:

- i. Τα μοντέλα AR(1) ή απλές ανεξίτητες Markov, που δεν προσφέρουν δυνατότητα αναπαραγωγής της εμμονής.
- ii. Το μοντέλο απλής ομοιοθεσίας, που αναπαράγει την εμμονή.

5.3.1. Μοντέλο AR(1)

Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην εκτίμηση της κατάστασης μιας μεταβλητής την στιγμή (i) μέσω της κατάστασής της την αμέσως προηγούμενη στιγμή ($i-1$). Εκφράζεται από τη σχέση:

$$X_i = a \cdot X_{i-1} + V_i \quad (5.9)$$

όπου V_i είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους τιμές που ακολουθούν την ίδια κατανομή σε διακριτό χρόνο (αποτελεί δηλαδή λευκό θόρυβο). Συμβολικά ονομάζεται μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης (autoregression) ή αλυσίδα Markov ή απλώς AR(1).

Κάθε μελλοντικό στάδιο στο μοντέλο AR(1) εξαρτάται από το προηγούμενό του, επομένως η διατήρηση της εμμονής δεν είναι εφικτή. Για να ο εφαρμόσουμε πρέπει να υπολογίσουμε την παράμετρο a , αλλά και τα χαρακτηριστικά του λευκού θορύβου $[E(V_i), Var(V_i)]$:

$$E(V_i) = (1-a) \cdot \hat{\mu}_x \quad (5.10)$$

$$Var(V_i) = (1-a^2) \cdot \hat{\sigma}_x^2 \quad (5.11)$$

$$a = \hat{\rho}_1 \quad (5.12)$$

όπου:

- $\hat{\mu}_x$: Η δειγματική μέση τιμή.
- $\hat{\sigma}_x^2$: Η δειγματική διασπορά.
- $\hat{\rho}_1$: Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης.

Όπως είναι λογικό, με την αύξηση της υστέρησης μειώνεται δραματικά και ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης μιας και κάθε τιμή εξαρτάται μόνο από την προηγούμενή της. Μάλιστα, μειώνεται εκθετικά, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, όπου τ είναι η υστέρηση:

$$\rho(\tau) = e^{-k\tau} \quad (5.13)$$

5.3.2. Μοντέλο απλής ομοιοθεσίας

Όπως περιγράψαμε προηγουμένως είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενός μοντέλου που να αναπαράγει την εμμονή, δηλαδή να σέβεται τη δυναμική Hurst-Kolmogorov. Η λογική αυτή απαιτεί εξελιγμένα στοχαστικά σχήματα, όπως το μοντέλο του κλασματικού Γκαουσιανού θορύβου (Fractional Gaussian Noise, FGN) (Mandelbrot, 1965).

Θεωρούμε την στοχαστική ανάλιξη X_i , με $i = 1, 2, \dots$ σε διακριτό χρόνο. Η μέση τιμή της ανάλιξης είναι $\mu = E[X_i]$, η αυτοσυνδιασπορά της $\gamma_j = \text{cov}[X_i, X_{i+j}]$, ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης της $\rho_j = \text{corr}[X_i, X_{i+j}] = \gamma_j / \gamma_0$ ($j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) και η τυπική απόκλιση της $\sigma = \sqrt{\gamma_0}$ (Κουτσογιάννης, 2013).

Εστω k θετικός ακέραιος ο οποίος αναπαριστά την χρονική κλίμακα (η οποία είναι μεγαλύτερη από 1) της ανάλιξης X_i . Η μέση συναθροισμένη ανάλιξη είναι:

$$X_i^{(k)} = \frac{1}{k} \sum_{l=(i-1)k+1}^{ik} X_l \quad (5.14)$$

με μέση τιμή $E[X_i^{(k)}] = \mu$. Η διασπορά και αυτοσυνδιασπορά της ανέλιξης εξαρτώνται από τη δομή της γ_j . Η ανέλιξη απλής ομοιοθεσίας ορίζεται από την εξίσωση:

$$(X_i^{(k)} - \mu) =_d \left(\frac{k}{l}\right)^H (X_j^{(l)} - \mu), \quad 0 < H < 1 \quad (5.15)$$

όπου το σύμβολο $=_d$ δηλώνει την ισότητα στην από κοινού κατανομή, i, j, k και l είναι οποιοδήποτε ακέραιοι και H ο συντελεστής Hurst. Θέτοντας $i = j = l = 1$ λαμβάνουμε την διασπορά:

$$\gamma_0^{(k)} = k^{2H-2} \gamma_0 \quad (5.16)$$

Επιπλέον, ορίζουμε τη συναθροισμένη ανέλιξη για κάθε χρονική κλίμακα:

$$Z_i^{(k)} = \sum_{l=(i-1)k+1}^{ik} X_l = k X_i^{(k)} \quad (5.17)$$

για την οποία ισχύουν:

$$E[Z_i^{(k)}] = k \cdot \mu \quad (5.18)$$

$$\gamma_0^{(k)} = \text{Var}[Z_i^{(k)}] = k^{2H} \gamma_0 \quad (5.19)$$

$$\sigma^{(k)} = (\gamma_0^{(k)})^{1/2} \quad (5.20)$$

Η συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς της ανέλιξης, τόσο της $X_i^{(k)}$ όσο και της $Z_i^{(k)}$ είναι ανεξάρτητη της κλίμακας k και δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_j^{(k)} = \rho_j = |j+1|^{2H} / 2 + |j-1|^{2H} / 2 - |j|^{2H} \quad (5.21)$$

ή προσεγγιστικά:

$$\rho_j^{(k)} = \rho_j = H(2H-1)j^{2H-2} \quad (5.22)$$

Η αβεβαιότητα μίας μεταβλητής με τυχαία ανέλιξη εκφράζεται από την διακύμανση της εκτιμήτριας της μέσης τιμής σύμφωνα με την σχέση:

$$\text{Var}[X] = \frac{\sigma^2}{n} \quad (5.23)$$

ωστόσο για χρονοσειρές που χαρακτηρίζονται από την δυναμική Hurst-Kolmogorov λαμβάνεται:

$$\text{Var}[X] = \frac{\sigma^2}{n^{2-2H}} \quad (5.24)$$

Η παραπάνω σχέση φανερώνει ότι για μία χρονοσειρά που χαρακτηρίζεται από εμμονή η εκτίμηση του τυπικού σφάλματος είναι αρκετά χειρότερη.

5.4. Το πρόγραμμα ΚΑΣΤΑΛΙΑ

Η Κασταλία πραγματοποιεί στοχαστική ανάλυση πολλαπλών δειγμάτων μεταβλητών (στην παρούσα έκδοση είναι δυνατή η ανάλυση μέχρι 10 μεταβλητών), οι οποίες αναφέρονται σε διαφορετικές διεργασίες στην ίδια θέση ή σε διαφορετικές θέσεις. Οι διεργασίες αυτές έχουν συσχέτιση μεταξύ τους και ανήκουν σε συστήματα με κοινή υδρολογική διαίτα, όπως για παράδειγμα μια λεκάνη απορροής. Πρόκειται δηλαδή για ένα πολυμεταβλητό στοχαστικό μοντέλο, που αρχικά αναπτύχθηκε για τη μελέτη μηνιαίων υδρολογικών μεταβλητών, όπως η βροχή και η απορροή (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάνης, 2004, Ευστρατιάδης κ.ά., 2005). Πρόσφατα, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του Διαλυνά (2011), έγινε επέκταση του μοντέλου, ώστε να υποστηρίζει την γέννηση βροχοπτώσεων σε ημερήσιο χρονικό βήμα.

Η ανάλυση των ιστορικών δειγμάτων και η γέννηση των συνθετικών χρονοσειρών πραγματοποιείται σε τρία βασικά βήματα: στο πρώτο πραγματοποιείται η γέννηση συνθετικών χρονοσειρών ετήσιας χρονικής κλίμακας, στο δεύτερο πραγματοποιείται η γέννηση των χρονοσειρών μηνιαίας χρονικής κλίμακας και, τέλος, στο τρίτο βήμα πραγματοποιείται η γέννηση των χρονοσειρών ημερήσιας χρονικής κλίμακας. Οι συνθετικές χρονοσειρές στις διάφορες χρονικές κλίμακες παράγονται με διαφορετικά στοχαστικά μοντέλα. Στην ετήσια κλίμακα χρησιμοποιούνται στοχαστικά μοντέλα που αναπαράγουν την μακροπρόθεσμη εμμονή των υδρολογικών διεργασιών, γνωστή ως φαινόμενο Hurst, ενώ σε μηνιαία και ημερήσια κλίμακα χρησιμοποιούνται μοντέλα που αναπαράγουν την περιοδικότητα και άλλα χαρακτηριστικά των διεργασιών λεπτής χρονικής κλίμακας.

Και στις δύο περιπτώσεις, τα μοντέλα αναπαράγουν το ελάχιστο σύνολο των ουσιωδών στατιστικών παραμέτρων δηλαδή:

- α) τις παραμέτρους των περιθωρίων συναρτήσεων κατανομής κάθε μεταβλητής, και συγκεκριμένα την μέση τιμή, την διασπορά και τον συντελεστή ασυμμετρίας, και
- β) τις παραμέτρους των από κοινού συναρτήσεων κατανομής των μεταβλητών, και συγκεκριμένα τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης και τους συντελεστές ετεροσυσχέτισης μηδενικής τάξης.

Με τον τρόπο αυτό παράγονται χρονοσειρές στατιστικά ισοδύναμες με τις ιστορικές, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η χωρική (ετεροσυσχέτιση) και χρονική εξάρτηση (βραχυπρόθεσμη εμμονή), καθώς και η στοχαστική δομή των ιστορικών χρονοσειρών. Για την γέννηση των συνθετικών χρονοσειρών γίνεται η χρήση της κατανομής γάμα τριών παραμέτρων. Η κατανομή αυτή θεωρείται κατάλληλη για την περιγραφή υδρολογικών μεταβλητών στις εξεταζόμενες χρονικές κλίμακες (ετήσια, μηνιαία και ημερήσια), αφού ορίζεται μόνο για θετικές τιμές της μεταβλητής και είναι σε θέση να αναπαράγει την ασυμμετρία των ιστορικών δειγμάτων, η οποία είναι αρκετά μεγάλη, ιδιαίτερα στην ημερήσια κλίμακα.

Οι παραγόμενες συνθετικές χρονοσειρές πρέπει να χαρακτηρίζονται από συνέπεια στις διαφορετικές κλίμακες, δηλαδή η μηνιαία κλίμακα πρέπει να είναι συνεπής με την ετήσια και η ημερήσια με την μηνιαία. Στο μοντέλο, οι μηνιαίες μεταβλητές παράγονται ανεξάρτητα από τις ετήσιες και με διαφορετικό σχήμα προσομοίωσης όπως επίσης και οι ημερήσιες παράγονται χωρίς αναφορά στις μηνιαίες. Για τον λόγο αυτό, μετά την αρχική γέννηση των χρονοσειρών,

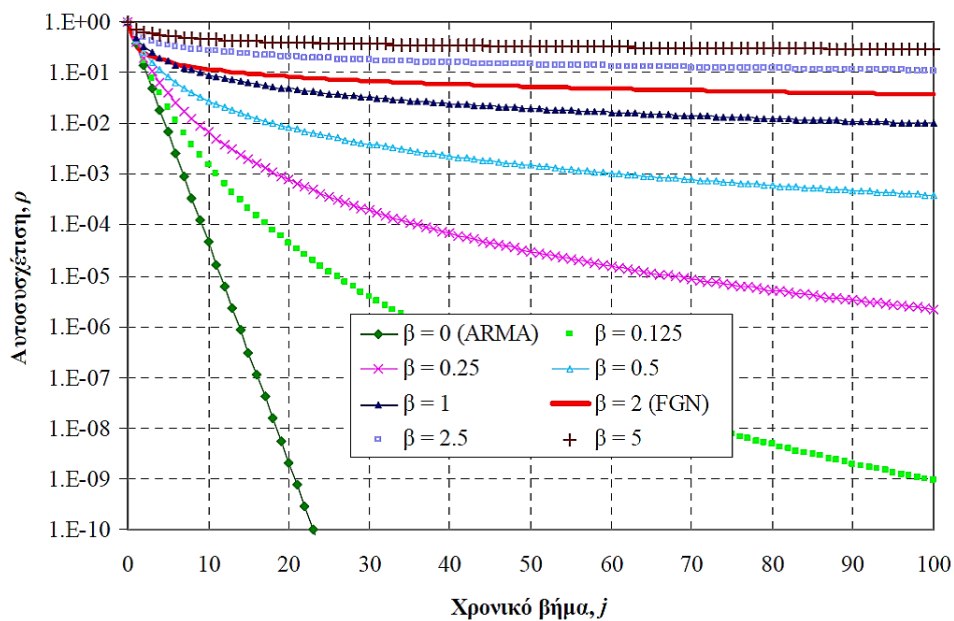
πραγματοποιείται αναγωγή τους μέσω μιας μεθοδολογίας επιμερισμού. Ο επιμερισμός εφαρμόζεται αρχικά για τις μηνιαίες τιμές, ώστε το άθροισμα τους να ισούται με την αντίστοιχη ετήσια συνθετική τιμή, και στη συνέχεια για τις ημερήσιες τιμές, ώστε το άθροισμα τους να ισούται με την αντίστοιχη μηνιαία συνθετική τιμή. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι τελικές ημερήσιες και μηνιαίες τιμές εξόδου του συστήματος (Τσεκούρας, 2012).

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δηλαδή στη μελέτη του υδροσυστήματος του Αλιάκμονα, εισαγάγαμε ταυτόχρονα τις χρονοσειρές βροχής και απορροής ώστε να διατηρήσουμε την ετεροσυσχέτισή τους.

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

$$\gamma_j = \gamma_0 [1 + \kappa \cdot \beta \cdot j]^{-1/\beta} \quad (5.25)$$

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



Εικόνα 5-5: Παραδείγματα εφαρμογής της γενικευμένης συνάρτησης αυτοσυνδιασποράς για παράμετρο σχήματος $\kappa=1$ και διάφορες τιμές της παραμέτρου εμμονής, β .

Για $\beta = 0$, με εφαρμογή του κανόνα de l' Hospital, η σχέση (5.25) γίνεται:

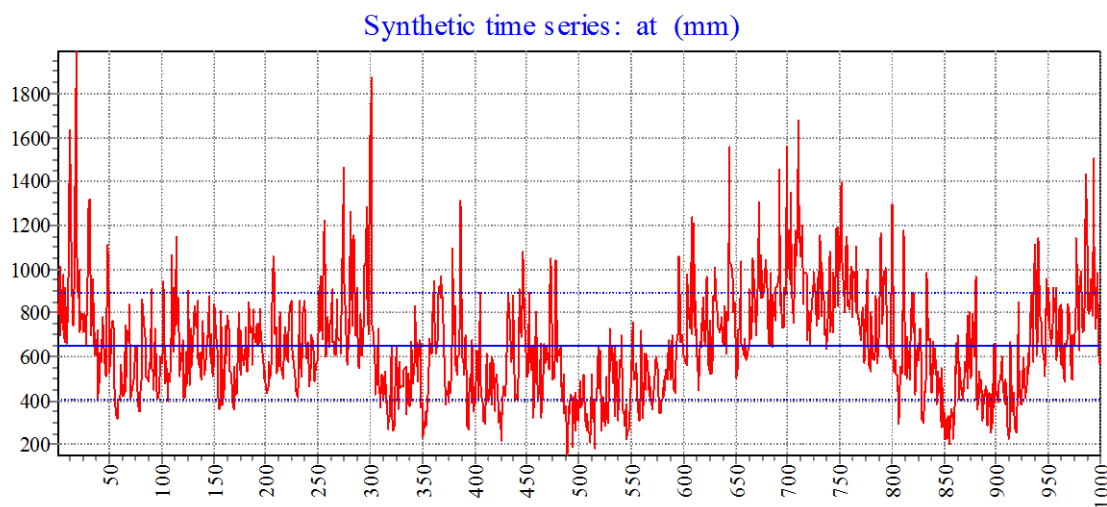
$$\gamma_j = \gamma_0 \exp(-\kappa j) \quad (5.26)$$

Για $\beta > 1$, η (5.25) προσεγγίζει τη συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς του μοντέλου FGN, εφόσον θέσουμε:

$$\kappa = \frac{1}{\beta(1-1/\beta)(1-1/2\beta)^\beta} =: \kappa_0 \quad (5.27)$$

Για $\kappa \neq \kappa_0$ ή για τιμές της παραμέτρου εμμονής β στο διάστημα $[0, 1]$ η σχέση (5.25) εξακολουθεί να αποτελεί μια εφικτή δομή αυτοσυνδιασποράς για στοχαστικές ανελίξεις διαφορετικού τύπου από τις ARMA και FGN. Στην εικόνα 5-5 απεικονίζεται η (5.25) για διάφορες τιμές της παραμέτρου β , θεωρώντας σταθερή τιμή $\kappa=1$. Για $\beta=0$, η (5.25) ταυτίζεται με μια ανέλιξη τύπου ARMA, η αυτοσυνδιασπορά της οποίας φθίνει μετά από ελάχιστα βήματα και σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα παρίσταται με μια ευθεία γραμμή. Με συμπαγή γραμμή απεικονίζεται η εξίσωση για την ειδική περίπτωση $\kappa = \kappa_0$ και $\beta=2$, οπότε ταυτίζεται με μια μακράς μνήμης FGN ανέλιξη. Είναι προφανές ότι όσο αυξάνει η τιμή της παραμέτρου β , τόσο αυξάνει η μνήμη της στοχαστικής ανελίξης. Κατά συνέπεια, η παράμετρος β είναι αντίστοιχη του συντελεστή Hurst της μεθόδου FGN (Ευστρατιάδης, Κουτσογιάννης και Κοζάνης, 2005).

Το πρόγραμμα ΚΑΣΤΑΛΙΑ δίνει την επιλογή μεταξύ της εκτίμησης του β απ'ευθείας από το δείγμα ή της εισαγωγής του από το χρήστη. Στην παρούσα μελέτη, λόγω του μικρού μήκους της ιστορικής πληροφορίας (μερικές δεκαετίες) επιλέχθηκε η εισαγωγή από το χρήστη μιας και κάθε εκτίμηση της εμμονής θα ήταν βεβαιωμένη. Στην εικόνα 5-6 διακρίνουμε την εικόνα της συνθετικής χρονοσειράς της βροχής στο Πολύφυτο όπου είναι εμφανής η διατήρηση της εμμονής.



Εικόνα 5-6: Συνθετική χρονοσειρά βροχής στο Πολύφυτο. Διακρίνεται η διατήρηση της εμμονής.

Η εν λόγω μεθοδολογία ακολουθήθηκε για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών βροχής και απορροής. Για την παραγωγή της συνθετικής χρονοσειράς εξάτμισης βασιστήκαμε στα ιστορικά δεδομένα του ύψους εξάτμισης στον ταμιευτήρα Πολυφύτου. Η συνθετική χρονοσειρά εξάτμισης παρήχθη με το πρόγραμμα ΚΑΣΤΑΛΙΑ.

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών που παρήχθησαν καθώς και οι αντίστοιχες ιστορικές χρονοσειρές παρατίθενται στο Παράρτημα.

5.5. Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ

5.5.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο-υπολογιστικό σύστημα που υποβοηθά τη διαχείριση υδροσυστημάτων πολύπλοκης τοπολογίας και πολλαπλών (διαφορετικών μεταξύ τους) στόχων. Συγκροτεί ένα ισχυρό Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων (Σ.Υ.Α.). Σύμφωνα με έναν γενικό ορισμό, τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support Systems, DSS) είναι εφαρμογές λογισμικού που υποστηρίζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, βοηθώντας τους αρμόδιους χρήστες να κατανοήσουν τις επιπτώσεις των δράσεών τους. Σημειώνεται ότι ο όρος «σύστημα υποστήριξης αποφάσεων» αντικατέστησε σχεδόν ολοκληρωτικά τις πρακτικά ισοδύναμες έννοιες «έμπειρο σύστημα» και «τεχνητή νοημοσύνη», οι οποίες ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένες στην επιστήμη της πληροφορικής μέχρι πριν μία δεκαετία. Η διαφοροποίηση αυτή σηματοδοτεί μια σημαντική στροφή στην προτεραιότητα των στόχων ανάπτυξης των υπολογιστικών συστημάτων, δηλαδή από την υποκατάσταση στην υποβοήθηση της κρίσης του χρήστη-εμπειρογνώμονα (Dreyfus and Dreyfus, 1986 · Watkins and McKinney, 1995).

Μερικές από τις τυπικές εφαρμογές των ΣΥΑ στην ευρύτερη περιοχή των υδατικών πόρων είναι (βλ. και Watkins and McKinney, 1995):

- Διαχείριση λιμνών και ταμιευτήρων (για την εξυπηρέτηση στόχων υδροδότησης, παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, ελέγχου ρύπανσης) ·
- Έλεγχος πλημμυρών και διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου (σε λεκάνες ποταμών αλλά και αστικές λεκάνες) ·
- Διαχείριση υδροφορέων - συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων πόρων ·
- Διαχείριση συστημάτων διανομής νερού (δίκτυα ανοιχτών και κλειστών αγωγών, αντλιοστάσια, κλπ.) ·
- Έλεγχος βλαβών ή διαρροών σε δίκτυα ύδρευσης ·
- Έλεγχος ρύπανσης σε λεκάνες απορροής και Δέλτα ποταμών ·
- Διαχείριση μη σημειακών πηγών ρύπανσης σε γεωργικές περιοχές.

Από τα παραπάνω, η έρευνα εστιάζεται στη διαχείριση υδροσυστημάτων μεγάλης κλίμακας, που περιλαμβάνουν μεγάλα υδραυλικά έργα συλλογής, αξιοποίησης και μεταφοράς νερού (ταμιευτήρες, υδροηλεκτρικοί σταθμοί, γεωτρήσεις, υδραγωγεία, αντλιοστάσια), τα οποία μπορούν να εκτείνονται σε περισσότερες από μία λεκάνες απορροής. Εκτός των τεχνικών έργων, στα εν λόγω υδροσυστήματα περιλαμβάνονται ακόμη το φυσικό περιβάλλον και τα σχετιζόμενα οικοσυστήματα. Οι βασικοί στόχοι του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ είναι:

- Ευελιξία ως προς την σχηματοποίηση.
- Ρεαλιστική αναπαράσταση λειτουργιών υδροσυστήματος.
- Ολιστική προσέγγιση.
- Πρακτικότητα κανόνων διαχείρισης.
- Ποσοτικοποίηση αβεβαιότητας και ρίσκου.
- Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.
- Περιορισμός υπολογιστικού φόρτου.

Η θεμελιώδης αρχή του Υδρονομέα είναι ότι συνδυάζει τις τεχνικές της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης σε ένα ενιαίο πλαίσιο. Κατά τον τρόπο αυτό αποφεύγει αφενός τις υπεραπλουστεύσεις του υδροσυστήματος, καθώς χρησιμοποιεί λεπτομερειακό μοντέλο προσομοίωσης, και αφετέρου τις αυθαίρετες επιλογές του χρήστη, καθώς η λειτουργία του συστήματος προκύπτει μέσα από διαδικασίες συστηματικής αναζήτησης βέλτιστων λύσεων. Επιπλέον, δεν απαιτεί αυθαίρετες επιλογές υδρολογικών σεναρίων από το χρήστη, αλλά αντίθετα χρησιμοποιεί πολυπληθείς συνθετικές χρονοσειρές, μέσω των οποίων προσομοιώνει ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων του υδροσυστήματος, επιτυγχάνοντας έτσι να ποσοτικοποιήσει την αβεβαιότητα της διαχείρισης υδατικών πόρων με όρους πιθανοτήτων.

Ο Υδρονομέας υποστηρίζει δύο μορφές προσομοίωσης, μόνιμης κατάστασης και καταληκτική. Η προσομοίωση μόνιμης κατάστασης επιλέγεται για τη διερεύνηση της λειτουργίας του υδροσυστήματος ανεξαρτήτως αρχικών συνθηκών, με χρήση συνθετικών χρονοσειρών μεγάλου μήκους. Αντίθετα, η καταληκτική προσομοίωση εφαρμόζεται εφόσον εξετάζεται η μελλοντική συμπεριφορά του υδροσυστήματος σε ορίζοντα λίγων ετών. Στην περίπτωση αυτή προσομοιώνονται πολλαπλά σενάρια εξέλιξης των υδρολογικών εισροών, τα οποία προκύπτουν μέσω στοχαστικής πρόγνωσης (Καραβοκυρός, Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2002).

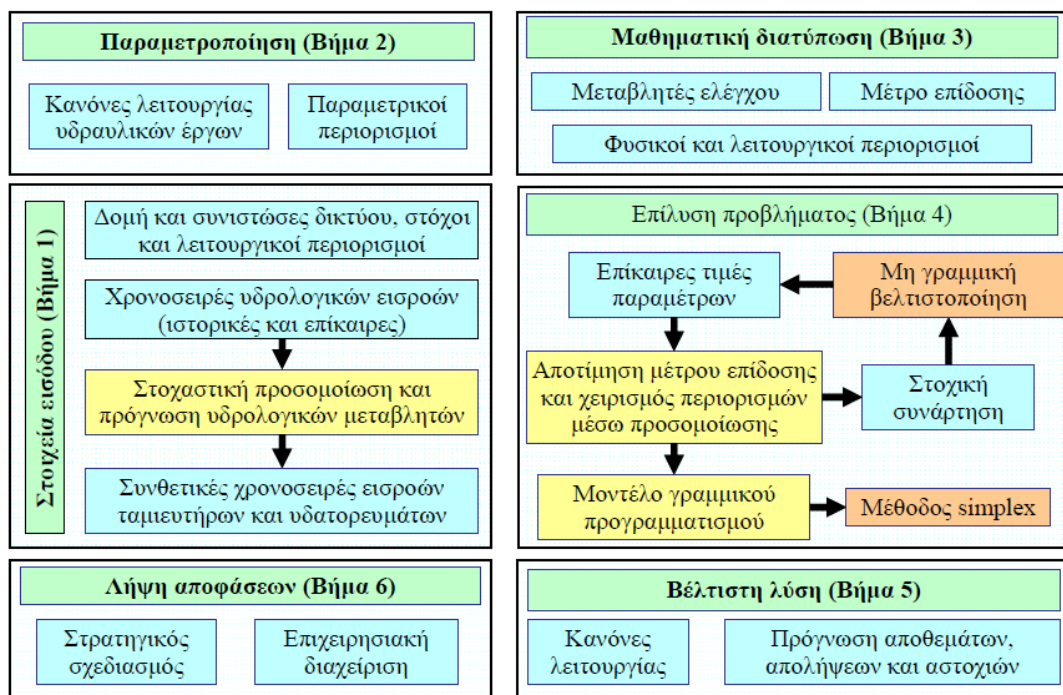
Το σχήμα παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση είναι μια εύρωστη μεθοδολογία αντιμετώπισης προβλημάτων βέλτιστου ελέγχου συστημάτων υδατικών πόρων. Η κεντρική ιδέα συνίσταται στην παραμετρική διατύπωση των πρακτικών διαχείρισης των κύριων υδραυλικών έργων (ταμιευτήρες, γεωτρήσεις, κλπ.), ώστε να περιορίζεται δραστικά το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του μαθηματικού μοντέλου, χωρίς ωστόσο να μηδενίζεται, όπως στην περίπτωση των τοποποιημένων κανόνων λειτουργίας. Οι πρακτικές αυτές, καθώς και το σύνολο των φυσικών και λειτουργικών περιορισμών, ενσωματώνονται σε μια διαδικασία προσομοίωσης, τα αποτελέσματα της οποίας αξιολογούνται ποσοτικά, με σκοπό την αποτίμηση του μέτρου επίδοσης του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, ένας αλγόριθμος μη γραμμικής βελτιστοποίησης αναλαμβάνει τον εντοπισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων, συναρτήσει του εν λόγω μέτρου, εξετάζοντας συστηματικά ένα μεγάλο αριθμό εναλλακτικών πρακτικών διαχείρισης. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται σύζευξη των μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, που συνδυάζει την ακριβή αναπαράσταση της λειτουργίας του συστήματος και τον εντοπισμό την αντικειμενικά καλύτερης πολιτικής διαχείρισης, και μάλιστα με εύλογο υπολογιστικό φόρτο, λόγω του μικρού αριθμού των παραμέτρων.

Το γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο, όπως υλοποιήθηκε στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, απεικονίζεται στην εικόνα 5-7 και περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1ο: Διαμορφώνεται η σχηματοποίηση του υδροσυστήματος και εισάγονται τα δεδομένα του μαθηματικού μοντέλου, δηλαδή τα χαρακτηριστικά μεγέθη των φυσικών και τεχνητών συνιστωσών, οι λειτουργικοί περιορισμοί, το μέτρο επίδοσης και οι χρονοσειρές εισροών. Οι τελευταίες είτε είναι οι ιστορικές είτε συνθετικές, οπότε γεννώνται μέσω ενός στοχαστικού μοντέλου που αναπαράγει τα στατιστικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων ιστορικών δειγμάτων.

Βήμα 2ο: Ορίζονται γενικοί κανόνες διαχείρισης του υδροσυστήματος, που περιγράφονται από ένα σύνολο παραμέτρων, θ . Η παραμετροποίηση οφείλει να είναι φειδωλή, έτσι ώστε το πλήθος των παραμέτρων, και συνεπώς το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος, να διατηρείται όσο

το δυνατό πιο μικρό για να μη επιβαρύνει τη διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Με την προϋπόθεση στασιμότητας των χαρακτηριστικών του συστήματος, οι κανόνες διαχείρισης, και ως εκ τούτου οι παράμετροι, δεν πρέπει να μεταβάλλονται διαχρονικά, ώστε η διάσταση του προβλήματος να μην εξαρτάται από τον χρονικό ορίζοντα ελέγχου. Από την άλλη πλευρά, ορισμένες παράμετροι έχει νόημα να μεταβάλλονται εποχιακά, ώστε η διαχειριστική πολιτική που αποτυπώνουν να προσαρμόζεται στην ενδοετήσια ανισοκατανομή ορισμένων χρήσεων νερού.



Εικόνα 5-7: Διάγραμμα ροής μεθοδολογικού σχήματος παραμετροποίηση - προσομοίωση -βελτιστοποίηση όπως υλοποιήθηκε στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (Πηγή: Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης, 2007).

Βήμα 3ο: Ορίζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης, με στοχική συνάρτηση το μέτρο επίδοσης του συστήματος και μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους θ . Επιπλέον, διατυπώνονται μαθηματικοί περιορισμοί συναρτήσει των χαρακτηριστικών μεγεθών του συστήματος και των στόχων που έχει θέσει ο χρήστης, χωρίς ωστόσο να εισάγονται στο μοντέλο βελτιστοποίησης.

Βήμα 4ο: Για δεδομένη διαχειριστική πολιτική, δηλαδή δεδομένες τιμές παραμέτρων, καλείται το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης που επιλύει το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος, δηλαδή τις εξισώσεις δυναμικής και τους μαθηματικούς περιορισμούς, για το σύνολο του ορίζοντα ελέγχου. Η επίλυση γίνεται βήμα προς βήμα, μετασχηματίζοντας το πρόβλημα σε ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού, ο χειρισμός του οποίου γίνεται με αναλυτικές τεχνικές (μέθοδος simplex). Μετά το πέρας της διαδικασίας προσομοίωσης αποτιμάται η τιμή της στοχικής συνάρτησης, δηλαδή η επίδοση του συστήματος έναντι της συγκεκριμένης διαχειριστικής πολιτικής. Για την μεγιστοποίηση του εν λόγω μέτρου, εισάγεται μια εξωτερική διαδικασία βελτιστοποίησης, σε κάθε δοκιμή της οποίας ορίζονται νέες τιμές παραμέτρων, και επαναλαμβάνεται η προσομοίωση. Η διαδικασία σταματά όταν επέλθει σύγκλιση στην βέλτιστη λύση. Επειδή το μοντέλο βελτιστοποίησης είναι έντονα μη γραμμικό, αντιμετωπίζεται με εξειδικευμένες υπολογιστικές μεθόδους (εξελκτικούς αλγορίθμους).

Βήμα 5ο: Εντοπίζεται η βέλτιστη λύση του προβλήματος, που περιλαμβάνει τους κανόνες λειτουργίας και ένα πλήθος πληροφοριών που αναφέρονται στην εκτίμηση της πιθανότητας αποτυχίας των περιορισμών και την στοχαστική πρόγνωση όλων των μεταβλητών απόκρισης του υδροσυστήματος (απολήψεις, παροχές υδραγωγείων, αντλήσεις, κλπ.).

Βήμα 6ο: Τα αποτελέσματα της βέλτιστης λύσης αξιοποιούνται για την λήψη αποφάσεων, είτε σε επίπεδο στρατηγικού σχεδιασμού είτε σε κλίμακα επιχειρησιακής διαχείρισης. Εφόσον κρίνεται αναγκαίο, η διαδικασία επαναλαμβάνεται τροποποιώντας τόσο τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου όσο και τα κριτήρια βελτιστοποίησης.

Η ανάλυση και η παραπάνω μεθοδολογία αντλήθηκε από το έργο «Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ» (Ευστρατιάδης, Καραβοκορός και Κουτσογιάννης, 2007). Περισσότερες αναλύσεις, εργασίες και θεωρητικές τεκμηριώσεις μπορεί κανείς να αναζητήσει στη σελίδα του λογισμικού¹².

5.5.2. Η αναπαράσταση του υδροσυστήματος: Επιμέρους συνιστώσες και σχηματοποίηση

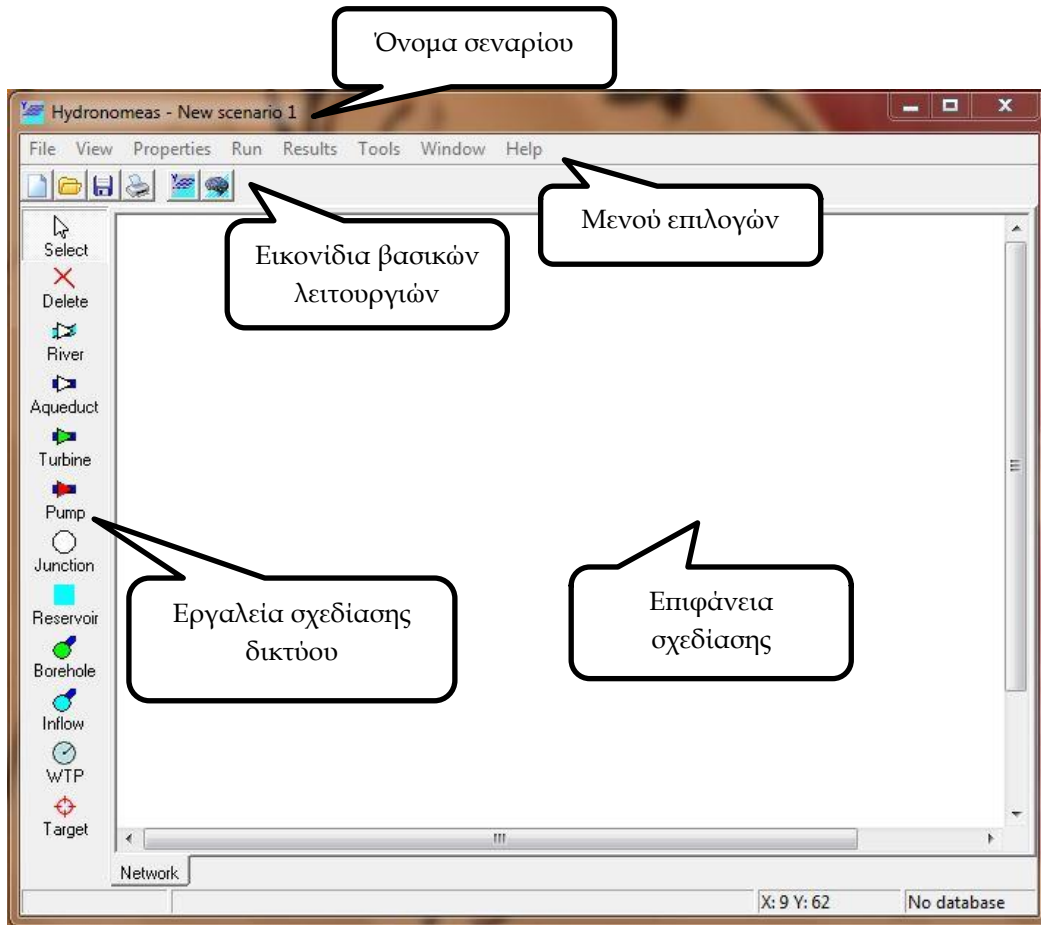
Η έννοια της σχηματοποίησης όπως συζητήθηκε προηγουμένως θεωρείται κομβική συνιστώσα της όλης προσέγγισης. Στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, παρέχεται η δυνατότητα περιγραφής όλων των σημαντικών φυσικών και τεχνητών συνιστωσών ενός υδροσυστήματος, χωρίς περιορισμούς στην κλίμακα των έργων και τη γενική τους διάταξη. Με τη βοήθεια κατάλληλων γραφικών εργαλείων, ο χρήστης μπορεί να διαμορφώσει δίκτυα υδατικών πόρων οσοδήποτε σύνθετης τοπολογίας, που περιλαμβάνουν πολλαπλά σημεία προσφοράς και ζήτησης νερού και πολλαπλές διαδρομές μεταφοράς. Χαρακτηριστικό είναι ότι τα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων και, βεβαίως, οι στόχοι και περιορισμοί, μπορούν να μεταβάλλονται διαχρονικά, επιτρέποντας έτσι τη διερεύνηση των επιπτώσεων από αλλαγές που οφείλονται στην προσθήκη νέων, την ενίσχυση των υφιστάμενων ή την προσωρινή παύση λειτουργίας ορισμένων έργων, λόγω συντήρησης ή βλάβης.

Στην εικόνα 5-8 διακρίνεται το γραφικό περιβάλλον του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, με τα επιμέρους στοιχεία του:

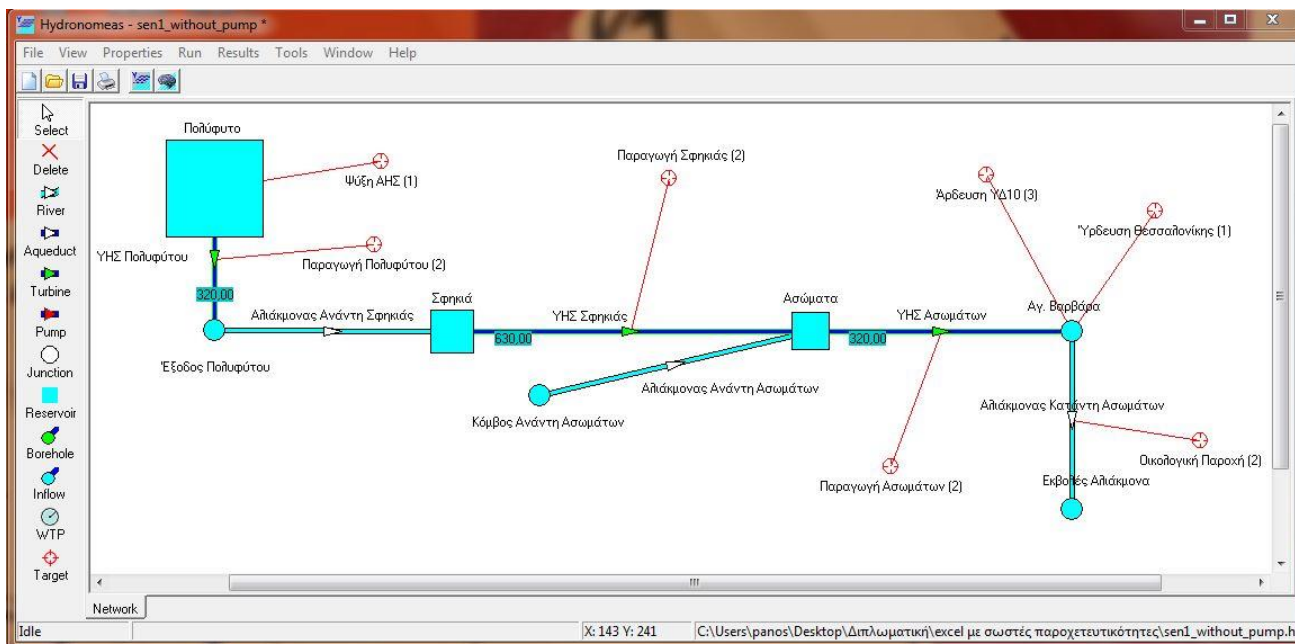
- Ονομασία σεναρίου.
- Μενού επιλογών.
- Εικονίδια λειτουργιών.
- Επιφάνεια σχεδίασης.
- Εργαλεία σχεδίασης δικτύου.

Στην εικόνα 5-9 φαίνεται ένα σχηματοποιημένο δίκτυο για ένα από τα σενάρια μελέτης που θα πραγματευτούμε στη συνέχεια.

¹² Υδρονομέας: Ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης υδροσυστημάτων, <http://itia.ntua.gr/el/softinfo/4/>



Εικόνα 5-8: Επιφάνεια εργασίας ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, με τα διάφορα τμήματά της.



Εικόνα 5-9: Σχηματοποιημένο δίκτυο στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, όπως φαίνεται στην επιφάνεια σχεδίασης.

Οι βασικές συνιστώσες της σχηματοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική είναι:



Reservoir

Reservoirs (ταμιευτήρες): Επιφανειακά έργα που προσφέρουν τη δυνατότητα αναρρύθμισης. Ως συνιστώσα, συνοδεύεται από έναν αριθμό χαρακτηριστικών που θα δούμε στη συνέχεια.



River

Rivers (υδατορεύματα): Τμήματα του Αλιάκμονα που λειτουργούν ως αγωγοί μεταφοράς με άπειρη παροχетеυτικότητα.



Aqueduct

Aqueducts (υδραγωγεία): Τμήματα του δικτύου με περιορισμένη παροχетеυτικότητα.



Turbine

Turbines (στρόβιλοι): Αγωγοί με περιορισμένη παροχетеυτικότητα και δυνατότητα παραγωγής ενέργειας. Χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των ΥΗΕ του συστήματος.



Pump

Pumps (αντλιοστάσια): Αγωγοί μεταφοράς νερού με περιορισμένη παροχетеυτικότητα και ταυτόχρονη κατανάλωση ενέργειας. Χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της άντλησης/ταμίευσης.



Junction

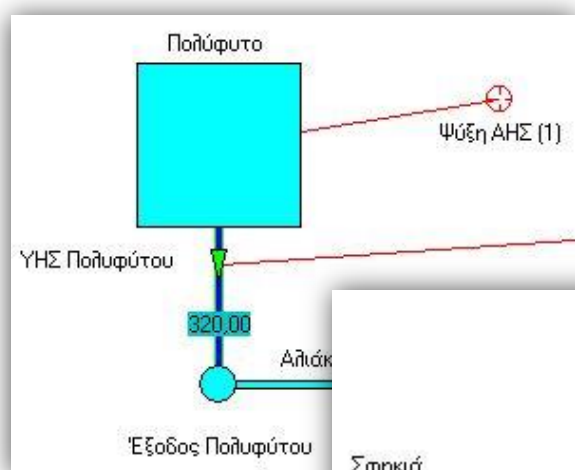
Junctions (κόμβοι): Σημεία εισροής ή εκροής νερού. Ορίζουν την αρχή και το πέρας του δικτύου.



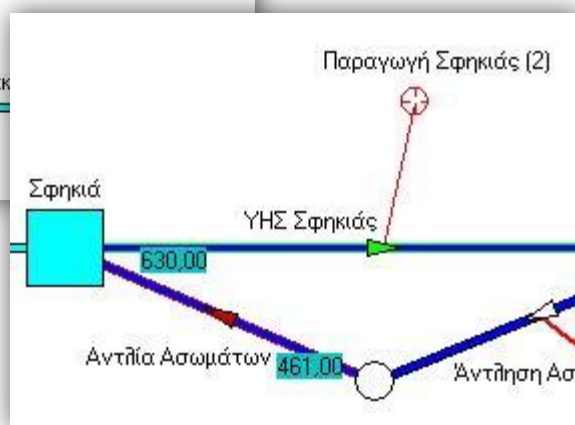
Target

Targets (στόχοι): Αντιπροσωπεύουν διάφορα είδη ζήτησης (ύδρευση, άρδευση, ενεργειακή παραγωγή, κ.ά.). Μπορούν να είναι στόχοι σταθεροί ή μεταβλητοί με το χρόνο και ανάλογα με τη φύση τους εφαρμόζονται σε διαφορετικές συνιστώσες του δικτύου.

Στην εικόνα 5-10 διακρίνουμε τους δύο διαφορετικούς τύπους στόχων: έναν που εφαρμόζεται σε ταμιευτήρα κι έναν που εφαρμόζεται σε στρόβιλο.



Εικόνα 5-10: Στόχοι σχετιζόμενοι με διαφορετικές συνιστώσες του δικτύου: Πάνω αριστερά στόχος απόληψης από ταμιευτήρα (ψύξη ατμοηλεκτρικού σταθμού) και κάτω δεξιά στόχος ενεργειακής παραγωγής.



5.5.3. Το σκέλος της παραμετροποίησης

Μετά το σκέλος της σχηματοποίησης ακολουθεί αυτό της παραμετροποίησης. Εισάγονται οι παράμετροι λειτουργίας ή κανόνες λειτουργίας θ . Το σύνολο αυτών των παραμέτρων καθορίζει το βαθμό ελευθερίας, ενώ μερικές εξ αυτών συγκροτούν τις μεταβλητές ελέγχου για τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η φειδωλή παραμετροποίηση υπαγορεύει μικρό αριθμό αυτών των παραμέτρων και πρακτική χρησιμότητα, ώστε να είναι εύληπτες από το διαχειριστή του συστήματος.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα είδη των εν λόγω παραμέτρων:

- i. Οι παράμετροι που σχετίζονται με στόχο παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας.
- ii. Οι παράμετροι που αφορούν στόχους μεταφοράς νερού (π.χ. άντληση στο σύστημα Σφηκιά-Ασώματα).
- iii. Οι παράμετροι που αφορούν στη διατήρηση ελάχιστης και μέγιστης στάθμης στους ταμιευτήρες.
- iv. Οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων.

Οι κανόνες λειτουργίας αποτελεί μια ξεχωριστή ομάδα παραμέτρων που καθορίζουν τα επιθυμητά μεγέθη διαχείρισης των ταμιευτήρων (δηλαδή τα αποθέματα ή τις απολήψεις) συναρτήσει της επίκαιρης κατάστασης του συστήματος. Θεωρώντας ότι η τελευταία ορίζεται πλήρως από το αναμενόμενο συνολικό απόθεμα, $s(t)$, στο τέλος του χρονικού βήματος, μια εφικτή μαθηματική διατύπωση κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων (όπου ο δείκτης του χρονικού βήματος παραλείπεται για λόγους απλοποίησης) είναι:

$$s_i^* = k_i - a_i k + b_i s \quad (5.28)$$

όπου k_i η ωφέλιμη χωρητικότητα του i ταμιευτήρα, k η ολική ωφέλιμη χωρητικότητα του συστήματος, a_i και b_i παράμετροι που λαμβάνουν τιμές στο διάστημα $[0, 1]$, και s_i^* το επιθυμητό απόθεμα ή απόθεμα-στόχος στο τέλος του χρονικού βήματος. Οι παράμετροι a_i και b_i μπορούν να θεωρηθούν σταθερές ή να μεταβάλλονται ανάλογα με την εποχή. Μια απλοποιημένη μορφή του κανόνα (5.28) είναι:

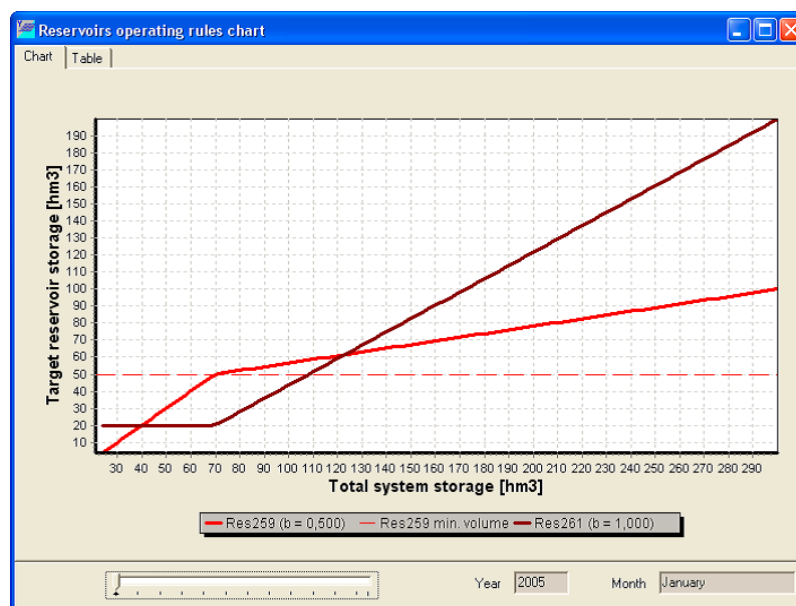
$$s_i^* = b_i s \quad (5.29)$$

Η εξίσωση (5.29) συνιστά τον λεγόμενο ομογενή κανόνα, ο οποίος προκύπτει από την (5.28) με θεώρηση σταθερών τιμών των παραμέτρων a_i , ίσων με:

$$a_i = \frac{k_i}{k} \quad (5.30)$$

Στην ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί ο ομογενής κανόνας προς απλοποίηση του προβλήματος. Η εισαγωγή των κανόνων λειτουργίας της μορφής (5.28) επιτρέπει την κατασκευή γραφημάτων για τους κανόνες λειτουργίας. Ένα τέτοιο γράφημα εικονίζεται στην 5-11. Τα γραφήματα αυτά βοηθούν στην απεικόνιση της πολιτικής διαχείρισης με εύληπτο τρόπο, μεθοδολογία απαραίτητη σε ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων όπως είναι το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ.

Εικόνα 5-11: Γραφική απεικόνιση των κανόνων λειτουργίας των ταμιευτήρων (Πηγή: Καραβοκυρός, Ευστρατιάδης και Βαζιμάς, 2007)



5.5.4. Το σκέλος της προσομοίωσης

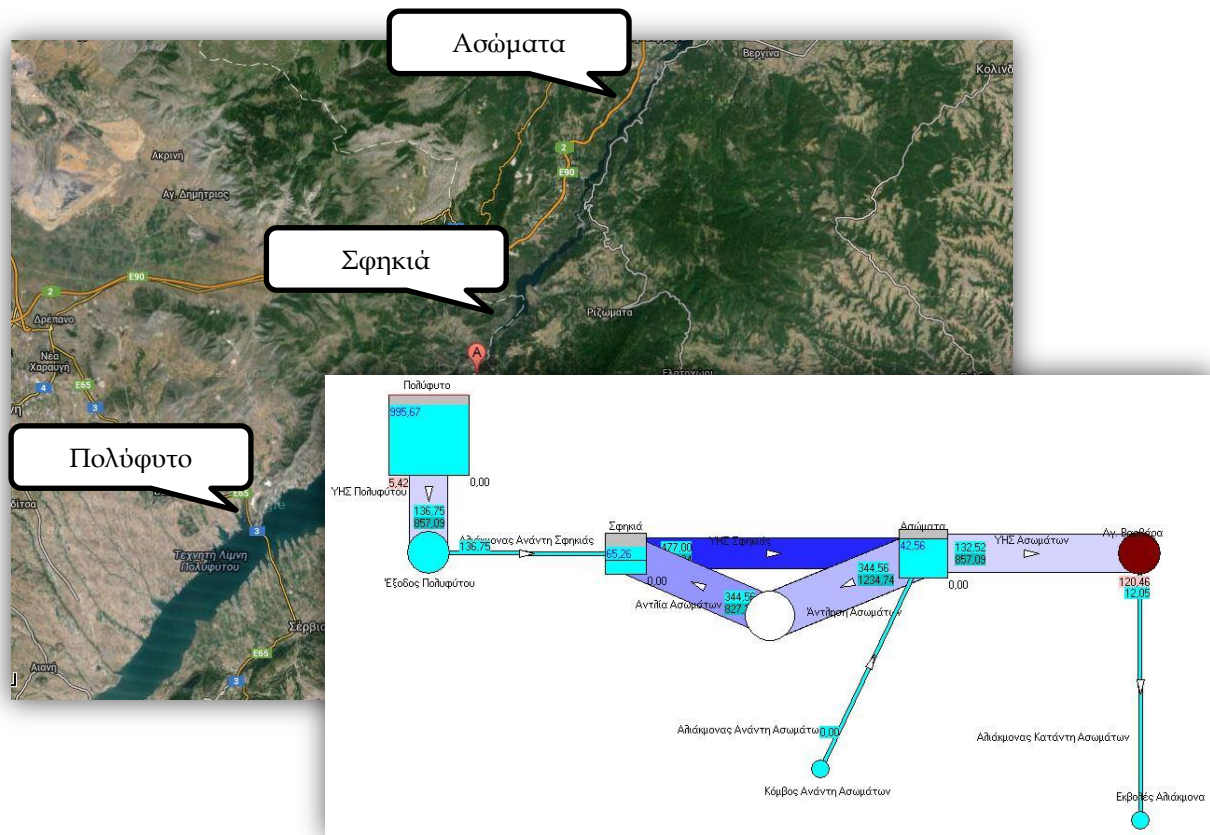
Σε μελέτες σχεδιασμού ή στρατηγικής διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων, όπου ζητούμενο είναι η αποτίμηση της μακροχρόνιας επίδοσης του συστήματος, η εν λόγω επίδοση θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες εκκίνησης του μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης, δηλαδή το αρχικό καθεστώς υδροφορίας και αποθεμάτων. Επιπλέον, όλα τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου του συστήματος, όπως η διάταξη και τα χαρακτηριστικά των έργων και η ετήσια ζήτηση νερού, θεωρούνται σταθερά και ανεξάρτητα του χρόνου. Ο τύπος αυτός της προσομοίωσης ονομάζεται μόνιμης κατάστασης (steady-state). Κατά την προσομοίωση μόνιμης κατάστασης, οι επιμέρους σειρές εισροών μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμα μιας μεμονωμένης χρονοσειράς μεγάλου (θεωρητικά άπειρου) μήκους.

Αντίθετα, η επιχειρησιακή διαχείριση ενός υδροσυστήματος, δηλαδή η λειτουργία του σε πραγματικό χρόνο, επιβάλλει την ενσωμάτωση των αρχικών συνθηκών στο μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης. Στην περίπτωση αυτή, η βραχυχρόνια και πιθανόν μεσοπρόθεσμη επίδοση του συστήματος ενδέχεται να εξαρτάται καθοριστικά τόσο από το επίκαιρο καθεστώς υδροφορίας όσο και από τα επίκαιρα αποθέματα νερού. Επιπλέον, οι παράμετροι του υδροσυστήματος είναι συνήθως μεταβαλλόμενες στον χρόνο, λόγω της ένταξης νέων έργων στο σύστημα ή και την προσωρινής απενεργοποίησης ορισμένων, λόγω συντήρησης ή βλάβης, της εισαγωγής νέων περιορισμών, της αύξησης της ζήτησης, κλπ. Στην περίπτωση αυτή ακολουθείται μια διαφορετική προσέγγιση, με εφαρμογή μιας διαδικασίας που ονομάζεται καταληκτική (terminating) προσομοίωση (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης, 2007).

Στην περίπτωση που εξετάζουμε εδώ μας ενδιαφέρει η προσομοίωση σταθερής κατάστασης, καθώς το πεδίο εφαρμογής είναι η κατάρτιση ενός μακροπρόθεσμου σχεδίου συνδιαχείρισης αιολικής και υδροηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, ακολουθείται η διαδικασία της στοχαστικής προσομοίωσης μιας και τα δεδομένα εισόδου είναι χρονοσειρές που προέκυψαν από την εφαρμογή στοχαστικού μοντέλου βασιζόμενου στην πρωτογενή υδρολογική πληροφορία. Τέλος, ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ δίνει τη δυνατότητα οπτικοποίησης

της διαδικασίας προσομοίωσης μέσω της καρτέλας animation (animation tab) όπως φαίνεται στην εικόνα 5-12.



Εικόνα 5-12: Οπτικοποίηση της προσομοίωσης του υδροσυστήματος του Αλιάκμονα.

5.5.5. Η διαδικασία βελτιστοποίησης

Η διαδικασία που ακολουθείται από τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, περιλαμβάνει αρχικά (όπως προείπαμε) τον ορισμό των μεταβλητών ελέγχου. Εκτός των παραμέτρων των κανόνων λειτουργίας, ο χρήστης μπορεί να ορίσει μεταβλητές ελέγχου σε τιμές στόχων και λειτουργικών περιορισμών, με την προϋπόθεση ότι αυτές έχουν διαχρονική ισχύ.

Η αποτίμηση της κάθε διαχειριστικής πολιτικής πραγματοποιείται μέσω ενός δείκτη που ονομάζεται μέτρο επίδοσης. Ο εν λόγω δείκτης ορίζεται ως ακολούθως:

$$F = \sum_{j=1}^m w_j f_j \quad (5.31)$$

όπου f_j μεμονωμένα κριτήρια ελέγχου και w_j συντελεστές βάρους, που εκφράζουν τη σχετική σπουδαιότητα των κριτηρίων. Όπως ορίζεται το μέτρο επίδοσης, με στάθμιση δηλαδή επιμέρους κριτηρίων που δεν χρησιμοποιούν κοινή μονάδα μέτρησης, είναι αδύνατο να αποδοθεί κάποιο φυσικό νόημα. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για μια μαθηματική ποσότητα, που αντιστοιχεί στη στοχική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης και χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης εναλλακτικών λύσεων (ως λύση νοείται ένα σύνολο εφικτών τιμών των μεταβλητών ελέγχου, που υποδηλώνει μια συγκεκριμένη διαχειριστική πολιτική). Είναι προφανές ότι η εισαγωγή

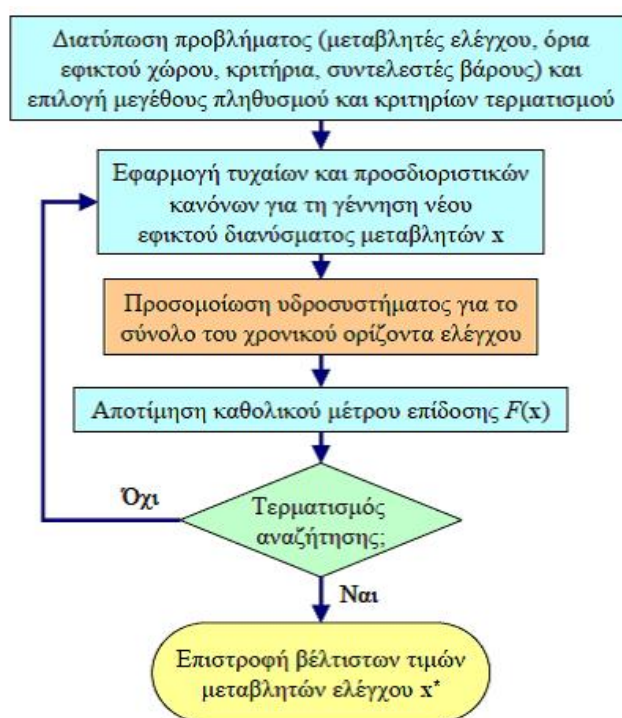
διαφορετικών κριτηρίων ή και η διατήρηση των ίδιων, αλλά με διαφορετικές τιμές συντελεστών βάρους, διαφοροποιεί το πρόβλημα και οδηγεί εύλογα σε αλλαγή της προτεινόμενης διαχειριστικής πολιτικής (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης, 2007).

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης αναζητεί τη βέλτιστη διαχειριστική πολιτική όπως αυτή εκφράζεται από το σύνολο των μεταβλητών ελέγχου $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ μέσω της ελαχιστοποίησης της συνάρτησης F :

$$\min F(x) = \sum_{j=1}^m w_j f_j(x) \quad (5.32)$$

$$x \in [x_{\min}, x_{\max}]$$

Ο αλγόριθμος της διαδικασίας βελτιστοποίησης¹³ εικονίζεται στη μορφή διαγράμματος ροής στην 5-13.



Εικόνα 5-13: Διάγραμμα ροής διαδικασίας βελτιστοποίησης (Πηγή: Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης, 2007).

Το γραφικό περιβάλλον του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης της εξέλιξης της τιμής του μέτρου επίδοσης ανάλογα με τον αύξοντα αριθμό της προσομοίωσης. Αντίστοιχα παραδείγματα θα παρατεθούν στη συνέχεια, όπου αναλύονται τα διαφορετικά σενάρια μελέτης.

¹³ Περισσότερες πληροφορίες για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ και τις τεχνικές που χρησιμοποιεί μπορούν να αναζητηθούν στο τεύχος τεκμηρίωσής του: *Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ»*, (Ευστρατιάδης, Καραβοκυρός και Κουτσογιάννης, 2007):

http://itia.ntua.gr/softwaredownload/4/2/software/Hydronomeas_theory.pdf

5.5.6. Η ενεργειακή παραγωγή στο λογισμικό Υδρονομίας

Όπως ήδη έχουμε περιγράψει στο κεφάλαιο 2, η σχέση υπολογισμού της ενέργειας για κάθε στρόβιλο (i, j) είναι:

$$E_{ij} = \psi_{ij} V_{ij} H_{ij} \quad (5.33)$$

όπου τα υπεισερχόμενα μεγέθη έχουν ήδη αναλυθεί. Κάτω από τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν, η ειδική ενέργεια είναι συνάρτηση του ολικού ύψους πτώσης H και έχει μέγιστη δυνατή τιμή 0.2725 GWh/hm^4 . Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε συντελεστή απόδοσης 1 και σε μηδενικές γραμμικές και τοπικές απώλειες, οπότε $H_n = H$.

Η μαθηματική περιγραφή των στροβίλων στο μοντέλο προσομοίωσης γίνεται μέσω των συναρτήσεων $\psi(H)$. Οι συναρτήσεις αυτές περιγράφονται από ακολουθίες συντεταγμένων (H_i, ψ_i) μέσω των οποίων είναι δυνατή η εκτίμηση της ειδικής ενέργειας για οποιοδήποτε ύψος πτώσης, χρησιμοποιώντας λογαριθμική παρεμβολή. Ο υπολογισμός αυτών των ζευγών με ακρίβεια προϋποθέτει αναλυτικούς υδραυλικούς υπολογισμούς με δεδομένα τα χαρακτηριστικά του αγωγού προσαγωγής και τις καμπύλες των στροβίλων και των αντλιών. Το ολικό ύψος πτώσης ορίζεται ως εξής:

$$H = Level_{inlet} - Level_{outlet} \quad (5.34)$$

Τα υψόμετρα είναι σταθερά, εφόσον ο στρόβιλος συνδέεται με κόμβους ή μεταβλητά, εφόσον συνδέεται με έναν τουλάχιστο ταμιευτήρα, οπότε το ενεργειακό διαθέσιμο εξαρτάται από την επίκαιρη στάθμη του. Στην περίπτωση αυτή, η εκτίμηση του μεταβλητού ύψους πτώσης γίνεται κατά προσέγγιση, λαμβάνοντας τη γνωστή στάθμη στην αρχή του χρονικού βήματος.

Τέλος, ένα ακόμη χαρακτηριστικό μέγεθος του κάθε στροβίλου είναι η εγκατεστημένη του ισχύς PI_{ij} που δίνεται σε MW και εκφράζει το άνω όριο της παραγόμενης ενέργειας μέσω της σχέσης:

$$E_{ij} \leq \lambda PI_{ij} \quad (5.35)$$

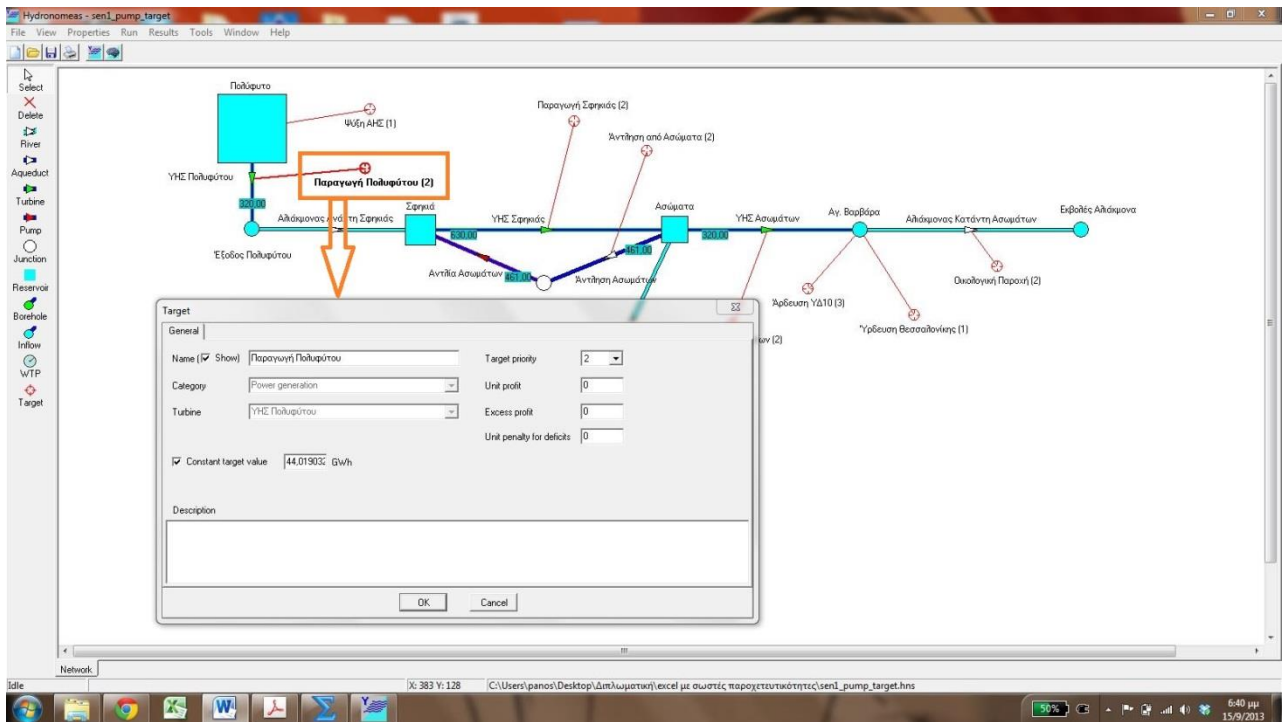
όπου λ συντελεστής αναγωγής, οι διαστάσεις του οποίου εξαρτώνται από τη χρονική κλίμακα στην οποία αναφέρεται η παραγόμενη ενέργεια.

Τονίζεται ότι, σε αντίθεση με τα κοινά υδραγωγεία, η μεταφορά νερού μέσω των στροβίλων και αντλιοστασίων γίνεται χωρίς διαρροές.

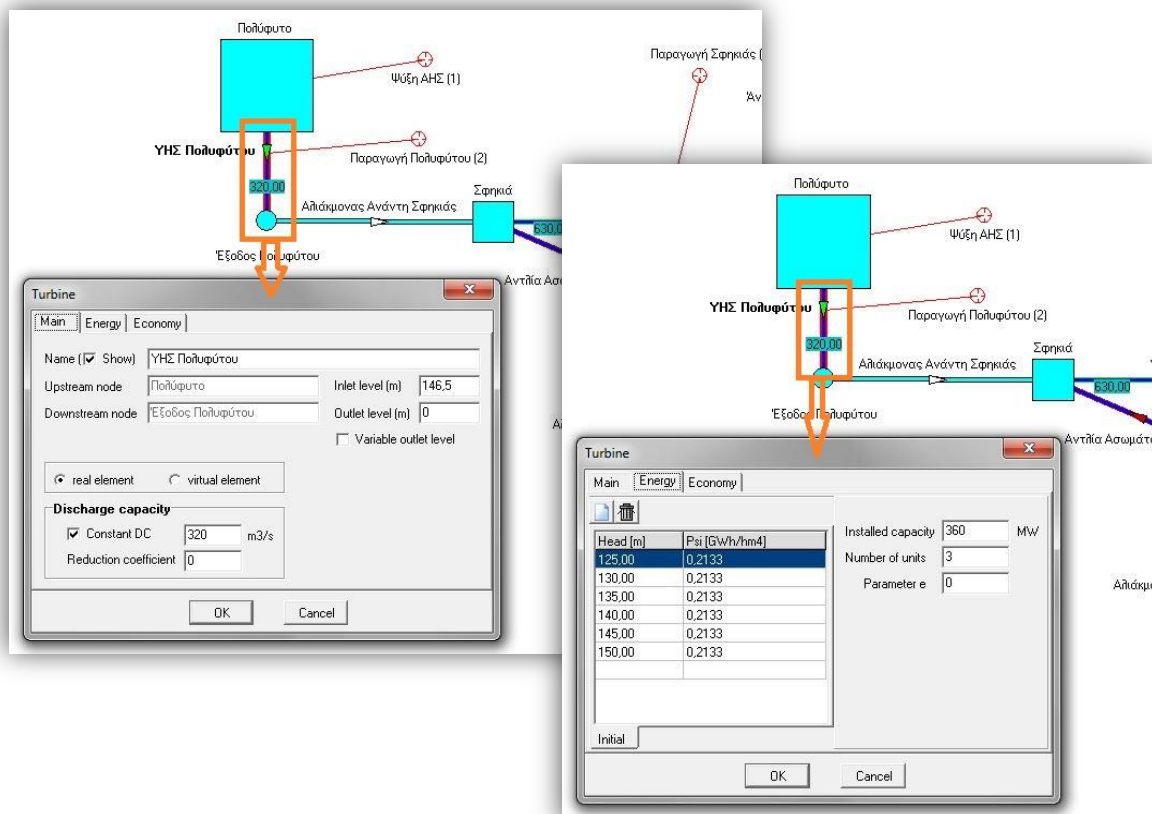
Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής μπορεί να παραμετροποιηθεί με δύο μεθόδους:

- i. Με σταθερό ενεργειακό στόχο ανά στρόβιλο για κάθε μήνα.
- ii. Με την εισαγωγή της παραμέτρου $e_{ij} \in [0, 1]$ που ουσιαστικά εκφράζει τον στόχο ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος.

Στην εικόνα 5-14 διακρίνουμε το παράθυρο εισαγωγής στόχου στον Υδρονομέα, ενώ στην 5-15 τα πεδία εισαγωγής χαρακτηριστικών του στρόβιλου.



Εικόνα 5-14: Εισαγωγή χαρακτηριστικών στόχου ενεργειακής παραγωγής (προτεραιότητα, τιμή σε GWh).



Εικόνα 5-15: Παράθυρα εισαγωγής χαρακτηριστικών μεγεθών στροβίλου στον Υδρονομέα.

5.6. Οι συναρτήσεις ενέργειας του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ

Όπως περιγράψαμε και στις προηγούμενες ενότητες, η προσομοίωση ουσιαστικά οδηγεί στον υπολογισμό της στοχαστικής συνάρτησης. Όταν επιδιώκουμε τη μεγιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής, τα αποτελέσματα στα οποία βασίζεται ο υπολογισμός της στοχαστικής συνάρτησης είναι οι χρονοσειρές ενεργειακής παραγωγής για κάθε στρόβιλο $E_i(t)$. Τότε η εν λόγω στοχαστική συνάρτηση είναι ένας μετασχηματισμός της μορφής:

$$J(\theta) = \hat{T}(E_1(t), E_2(t), \dots, E_n(t)) \quad (5.36)$$

όπου n ο αριθμός των στρόβιλων του υδροσυστήματος. Αν επιδιώκεται η ανάλυση διακινδύνευσης της υδροηλεκτρικής παραγωγής τότε αναπόφευκτα καταφεύγουμε στην έννοια της αξιοπιστίας. Θεωρώντας ότι \hat{a} είναι η σχέση υπολογισμού της αξιοπιστίας (από τη σχέση (2.13)), τότε οι στοχαστικές συναρτήσεις είναι της μορφής:

$$J(\theta) = \hat{a}(E_1(t), E_2(t), \dots, E_n(t)) \quad (5.37)$$

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του Μπουζιώτα (2012) αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν οι ακόλουθες συναρτήσεις:

- i. Total Generated Firm Power (Συνολική παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια): Ορίζεται ως η συνολική πρωτεύουσα ενέργεια που μπορεί να αποδώσει το σύστημα για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας α^* . Η αξιοπιστία υπολογίζεται βάσει της χρονοσειράς της συνολικής μηνιαίας παραγόμενης ενέργειας του συστήματος ως εξής: (a.) Αθροίζεται η ενέργεια κάθε ΥΗΕ σε κάθε χρονικό βήμα και προκύπτει η συνολική χρονοσειρά. (b.) Υπολογίζεται η αξιοπιστία βάσει της συνολικής χρονοσειράς. Η στοχαστική συνάρτηση λαμβάνει τη μορφή:

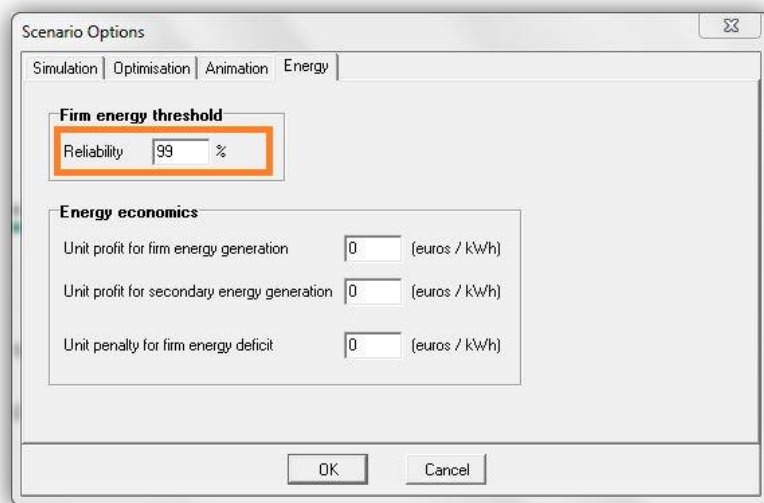
$$J(\theta) = \hat{a} \left(\sum_{i=1}^n E_i(t) \right) \quad (5.38)$$

- ii. Sum of Generated Firm Power (Άθροισμα παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας): Ορίζεται ως το άθροισμα της πρωτεύουσας ενέργειας που μπορεί να αποδώσει κάθε έργο για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας α^* . Εκτιμάται με τα ακόλουθα βήματα: (a.) Υπολογίζεται η πρωτεύουσα ενέργεια κάθε έργου από την αντίστοιχη χρονοσειρά επιμέρους παραγόμενης ενέργειας. (b.) Υπολογίζεται το άθροισμα των επιμέρους πρωτεύουσών ενεργειών. Δε χρησιμοποιείται η συνολική παραγόμενη ενέργεια του συστήματος:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^n \hat{a}(E_i(t)) \quad (5.39)$$

Και στις δύο συναρτήσεις η αξιοπιστία α^* ορίζεται από το χρήστη μέσω της επιλογής Scenario Options και της καρτέλας Energy. Η εν λόγω επιλογή εικονίζεται στην 5-16.

Οι συναρτήσεις αυτές τίθενται προς μεγιστοποίηση στο σκέλος της βελτιστοποίησης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ και παράγουν τιμές πρωτεύουσας ενέργειας χαρακτηριστικές του συστήματος.



Εικόνα 5-16: Παράθυρο εισαγωγής επιπέδου αξιοπιστίας της παραγόμενης ενέργειας στον Υδρονομέα.

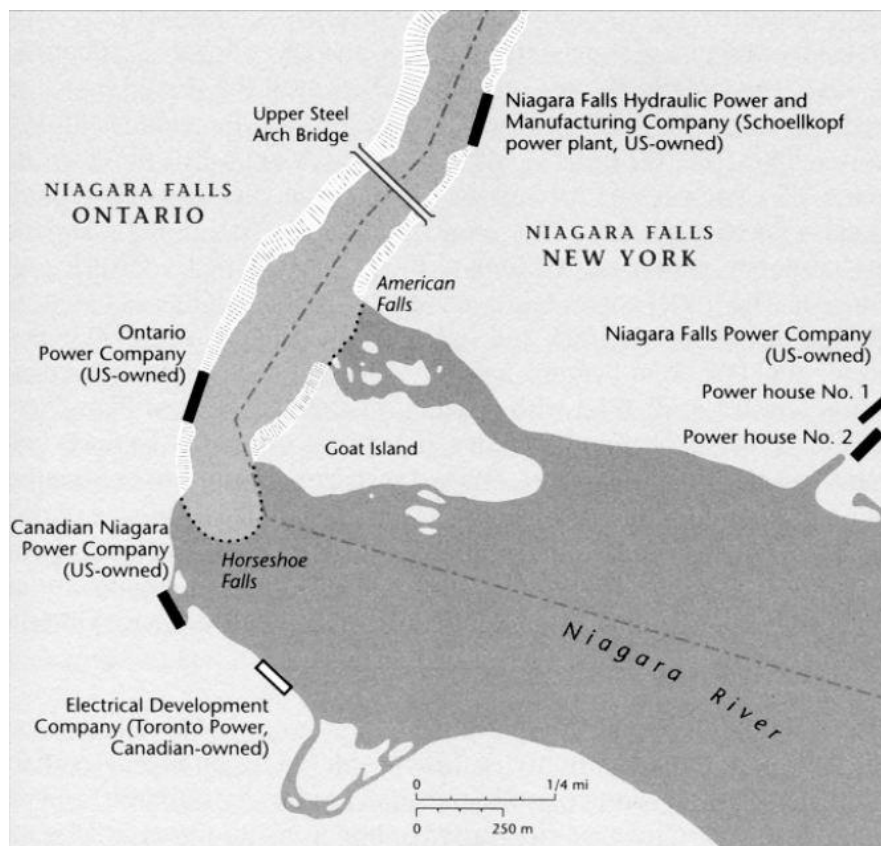
5.7. Η επιμερισμένη διαχείριση ενέργειας ενάντια στη συνολική

Η αναγκαιότητα υιοθέτησης δύο διαφορετικών συναρτήσεων υπαγορεύεται από δύο διακριτές πολιτικές διαχείρισης των υδροηλεκτρικών έργων. Η Total Generated Firm Power δίνει έμφαση στη συνολική λειτουργία του συστήματος ενώ η Sum of Generated Firm Power μεγιστοποιεί την παραγωγή των επιμέρους έργων.

Κάθε φορά η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης έχει να κάνει με το χαρακτήρα της ίδιας της διαχείρισης αλλά και των φορέων της εν γένει. Η πρώτη επιλέγεται όταν υπάρχει ένας ενιαίος φορέας διαχείρισης (όπως η Δ.Ε.Η. στην περίπτωση των έργων του Αλιάκμονα), ενώ η δεύτερη σε περιπτώσεις όπου επικρατούν πλαίσια επιμερισμένης και κατακερματισμένης διαχείρισης. Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να είναι τα διακρατικά νερά ενός ποταμού ή περιπτώσεις διαφορετικών φορέων διαχείρισης ενός συνόλου υδροηλεκτρικών έργων κατά μήκος ενός ποταμού.

Χαρακτηριστική περίπτωση πολυδιασπασμένης διαχείρισης αποτελούν τα υδροηλεκτρικά έργα του ποταμού Νιαγάρα. Στον ποταμό Νιαγάρα υπάρχουν εγκατεστημένα υδροηλεκτρικά έργα κάποια εκ των οποίων ανήκουν στις ΗΠΑ και κάποια στον Καναδά. Η Καναδική πλευρά θεωρούσε ότι τα δικαιώματα επί της παραγωγής ενέργειας και οι ανάλογες εγκαταστάσεις πρέπει να ιδιωτικοποιηθούν. Λόγω της ασύμμετρης εκβιομηχάνισης των δύο χωρών η ιδιωτική εταιρία διαχείρισης αντλούσε κέρδος από την πώληση της ενέργειας στην αμερικάνικη πλευρά σε βάρος της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών της канаδέζικης. Αναδεικνύεται η ανάγκη διαμόρφωσης ενιαίου φορέα που θα διαχειρίζεται το σύστημα ανάλογα με την προτεραιότητα των αντικρουόμενων στόχων (Δήμας και Μπουζιώτας, 2013).

Στην εικόνα 5-17 διακρίνουμε το καθεστώς πολυδιάσπασης των ΥΗΕ του Νιαγάρα. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι έργα της Καναδικής πλευράς που βρίσκονταν παλιότερα σε καθεστώς δημόσιας διαχείρισης αγοράστηκαν από Αμερικάνικες εταιρίες (δηλαδή ιδιωτικοποιήθηκαν). Η Αμερικάνικη πλευρά κατείχε ήδη τη μερίδα του λέοντος των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων του ποταμού.



Εικόνα 5-17: Το καθεστώς διαχείρισης των ΥΗΕ στον ποταμό Νιαγάρα. Διακρίνονται οι εγκαταστάσεις που ανήκουν στην Καναδική και την Αμερικάνικη πλευρά (Πηγή: Δήμας και Μπουζιώτας, 2013).

Στην περίπτωση του ελληνικού χώρου, έχει παρουσιαστεί από το ΥΠΕΚΑ το σχέδιο ιδιωτικοποίησης της ΔΕΗ που περιλαμβάνει τρεις φάσεις:

Α) Ιδιωτικοποίηση και πλήρης απόσπαση του ΑΔΜΗΕ¹⁴ από τη ΔΕΗ σε δύο στάδια. Στο πρώτο, μέχρι 12-2013, ιδιοκτησιακός διαχωρισμός του ΑΔΜΗΕ μέσω αύξησης μετοχικού κεφαλαίου και εισοδο επενδυτή -49%- που θα έχει τη διοίκηση. Ενώ στο δεύτερο, μέχρι το δεύτερο τρίμηνο του 2014, ολοκληρωτική απόσπαση του ΑΔΜΗΕ από τη ΔΕΗ με διάθεση και του υπόλοιπου 51%.

Β) Σπάσιμο της ΔΕΗ και δημιουργία καθετοποιημένης «Μικρής ΔΕΗ» που θα περιλαμβάνει το 30% του παραγωγικού της δυναμικού, 1400MW λιγνιτικών, 500MW υδροηλεκτρικών, 500MW μονάδων φυσικού αερίου. Η πώλησή της θα έχει ολοκληρωθεί μέχρι το πρώτο τρίμηνο του 2015.

Γ) Ιδιωτικοποίηση της εναπομείνουσας ΔΕΗ μέχρι το τέλος του 2015 ή το αργότερο το πρώτο τρίμηνο του 2016.

Το σχέδιο της ιδιωτικοποίησης γεννά σκέψεις και προβληματισμούς:

¹⁴ Ο ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) είναι 100% θυγατρική της ΔΕΗ Α.Ε., ωστόσο είναι πλήρως ανεξάρτητος λειτουργικά και διοικητικά. Έχει αναλάβει τα καθήκοντα του Διαχειριστή του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ).

- Αδυναμία των δύο ΔΕΗ (μία που θα διαχειρίζεται ένα μεγάλο ποσοστό των υδροηλεκτρικών και μία που θα διαχειρίζεται τις ΑΠΕ) να συνεργαστούν ώστε να συμβάλουν σε ένα ολιστικό σύστημα διαχείρισης και στα ανάλογα πλεονεκτήματα της οικονομίας κλίμακας.
- Αδυναμία εξασφάλισης με βεβαιότητα ότι μια πλήρης απελευθέρωση στην υδροηλεκτρική παραγωγή θα μπορεί να εξασφαλίσει υψηλή αξιοπιστία στην κάλυψη της ζήτησης. Δεν μπορούν να διαμορφωθούν επαρκείς μηχανισμοί ελέγχου.
- Ένα τέτοιο άνοιγμα δε θα είναι ευεργετικό από τη στιγμή που ανάλογες κινήσεις στο παρελθόν είχαν αρνητικές επιπτώσεις στην αγορά ενέργειας.
- Δεν μπορούμε να επιτρέψουμε σε μια υποδομή ζωτικής σημασίας (όπως είναι η παραγωγή ενέργειας) να λειτουργεί κάτω από την αρχή «ιδιωτικοποίηση του κέρδους-κοινωνικοποίηση των απωλειών».

Το πλαίσιο ιδιωτικοποίηση των κερδών-κοινωνικοποίηση των επιπτώσεων περιλαμβάνει τους ακόλουθους άξονες:

Βασική αρχή η πρωταρχική συσσώρευση κεφαλαίου και υποδομών: Εταιρίες με τη δυνατότητα παραχώρησης κεφαλαίου και κατασκευής υποδομών λειτουργούν αυτόνομα κατασκευάζοντας έργα παραγωγής ενέργειας. Κατόπιν, η παραγόμενη ενέργεια πωλείται στη ΔΕΗ με αυξημένες τιμές, ενώ τα κατασκευασμένα έργα παραμένουν στην κυριότητα του ιδιώτη επενδυτή και όχι του διαχειριστή.

Η ενέργεια αντιμετωπίζεται ως εμπόρευμα και όχι ως κοινωνικό αγαθό: Σε πολλές περιπτώσεις αντίστοιχων ιδιωτικοποιήσεων υποδομών, οι ιδιώτες επενδυτές αναζητούν νέα πεδία κερδοφορίας μέσω της αύξησης των τιμολογίων και της ελλιπούς συντήρησης υποδομών. Έτσι, οι πολίτες δεν έχουν τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών τους αναγκών, ενώ οι εγκαταστάσεις σταδιακά καταστρέφονται.

Οι περιβαλλοντικές πολιτικές διαχείρισης παρακάμπτονται: Τα νέα νομοθετικά πλαίσια δίνουν την προτεραιότητα σε λογικές “fast track” όπου η επένδυση ανάγεται σε αρχή με τη δική της αυταξία σε βάρος της βιωσιμότητας του περιβάλλοντος και των οικοσυστημάτων.

Ενισχύεται ο κατακερματισμός των υποδομών και υποσκάπτεται η δυνατότητα συνολικότερου σχεδιασμού: Ενδεικτικές είναι οι επιπτώσεις επενδύσεων στο τρίπτυχο σχεδιασμός-παραγωγή-διανομή από τη στιγμή που καταστρατηγούνται οι ενιαίοι φορείς που μέχρι στιγμής ευθύνονταν για την υλοποίησή του.

Συγκεντρωτικά: Ο νεοφιλελευθερισμός και ο καπιταλιστικός τρόπος οργάνωσης της παραγωγής οργανώνουν την επέκτασή τους στην κτήση μελλοντικών δικαιωμάτων επί της παραγωγής ενέργειας, αναζητώντας νέα πεδία κερδοφορίας (Δήμας και Μπουζιώτας, 2013).

Συνολικότερα, η πολιτική κατακερματισμού της διαχείρισης των υδροηλεκτρικών έργων μέσω της ένταξής τους στη σφαίρα των ιδιωτικοποιήσεων αποτελεί άλλη μια έκφανση της κρίσης υπερσυσσώρευσης¹⁵. Κεφάλαια και ροές κεφαλαίων που έχουν κορεστεί σε συγκεκριμένες σφαίρες

¹⁵ Περισσότερο αναλυτικά η έννοια της συσσώρευσης περιγράφεται στο έβδομο μέρος του πρώτου τόμου του Κεφαλαίου: Κ. Μαρξ, *Το Κεφάλαιο*, Α' τόμος, μέρος έβδομο «Το προτσές συσσώρευσης του κεφαλαίου».

της παραγωγής αναζητούν μια «φυγή προς τα εμπρός» επεκτεινόμενα και διευρυνόμενα σε νέους τομείς.

5.8. Υδρολογικά δεδομένα

Σε πρώτη φάση, μας ενδιαφέρει η έκταση των σχετικών με τα έργα του υδροσυστήματος Αλιάκμονα υπολεκανών. Δηλαδή οι λεκάνες (ή υπολεκάνες) ανάντη του Πολυφύτου, της Σφηκιάς και των Ασωμάτων. Στον πίνακα 5-1 παρατίθενται οι εκτάσεις όλων των υπολεκανών της περιοχής μελέτης για λόγους πληρότητας.

Πίνακας 5-1: Έκταση λεκανών και υπολεκανών απορροής της περιοχής μελέτης.

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

Εκτός της έκτασης των λεκανών απορροής, ως ορίσματα στο μοντέλο απαιτούνται οι χρονοσειρές της απορροής επί των υπολεκανών και οι χρονοσειρές βροχόπτωσης και εξάτμισης επί των επιφανειών των ταμιευτήρων.

Για τη χρονοσειρά της απορροής αξιοποιήθηκε το ισοζύγιο της ΔΕΗ που σχετίζεται με τον ταμιευτήρα Πολυφύτου. Στο δεδομένο ισοζύγιο δίνονται:

- Το απόθεμα για κάθε χρονική στιγμή t , S_t .
- Το ύψος βροχής P σε mm.
- Το ύψος εξάτμισης E σε mm.
- Ο όγκος νερού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας από τους στροβίλους, V_{power} σε κάθε χρονικό βήμα.
- Η στάθμη του ταμιευτήρα σε κάθε χρονική στιγμή, H_t .
- Παράλληλα, δίνεται και η εισροή σε κάθε χρονικό βήμα I_t σε hm³.

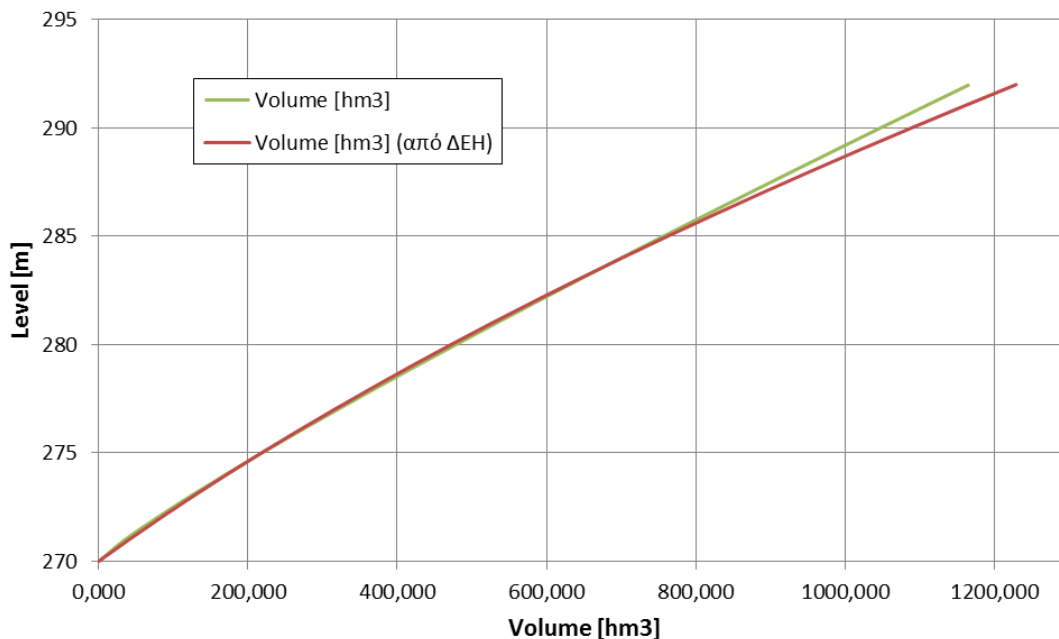
Παρά το γεγονός ότι η χρονοσειρά εισροής δίνεται, επειδή τα δεδομένα επαρκούν για τον υπολογισμό της με μεγαλύτερη ακρίβεια μέσω του ισοζυγίου του ταμιευτήρα, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Από τη σχέση στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα $S = f(H)$ υπολογίζουμε το απόθεμα σε κάθε χρονικό βήμα t .
- Πολλαπλασιάζοντας το ύψος βροχής P με την επιφάνεια του ταμιευτήρα Πολυφύτου (50km²) υπολογίζουμε τον όγκο βροχής P_t σε hm³.
- Πολλαπλασιάζοντας το ύψος εξάτμισης E με την επιφάνεια υπολογίζουμε τον όγκο εξάτμισης σε hm³.
- Υπολογίζουμε τη διαφορά του αποθέματος σε δύο διαδοχικά χρονικά βήματα ΔS σε hm³.

Μέσω της σχέσης του ισοζυγίου υπολογίζουμε την εισροή σε hm³ ως εξής:

$$I_t = \Delta S - P_t + E_t + V_{power,t} \quad (5.40)$$

Στην εικόνα 5-18 διακρίνουμε την καμπύλη στάθμης όγκου που χρησιμοποιήθηκε για να εξαχθεί με ακρίβεια το απόθεμα δεδομένης της στάθμης για κάθε χρονικό βήμα.



Εικόνα 5-18: Καμπύλη στάθμης-όγκου ταμιευτήρα Πολυφύτου (Πηγή: ΔΕΗ).

Η σχέση παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε είναι:

$$S = 35,448 \cdot (H - 270)^{1,1303} \quad (5.41)$$

Παρατηρούμε στην εικόνα 5-19 όπου γίνεται η σύγκριση της χρονοσειράς εισροών της ΔΕΗ με αυτή που προκύπτει από το ισοζύγιο διαφορές κατά τους θερινούς μήνες μιας και δεν έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση της εξάτμισης. Στους χειμερινούς μήνες όπου η εξάτμιση παίζει δευτερεύοντα ρόλο η επιρροή της εξάτμισης είναι αμελητέα.

Στην εικόνα 5-19 παρατηρούμε τη σύγκριση ανάμεσα στη χρονοσειρά όπως προκύπτει από το ισοζύγιο και όπως δίνεται από τη ΔΕΗ.

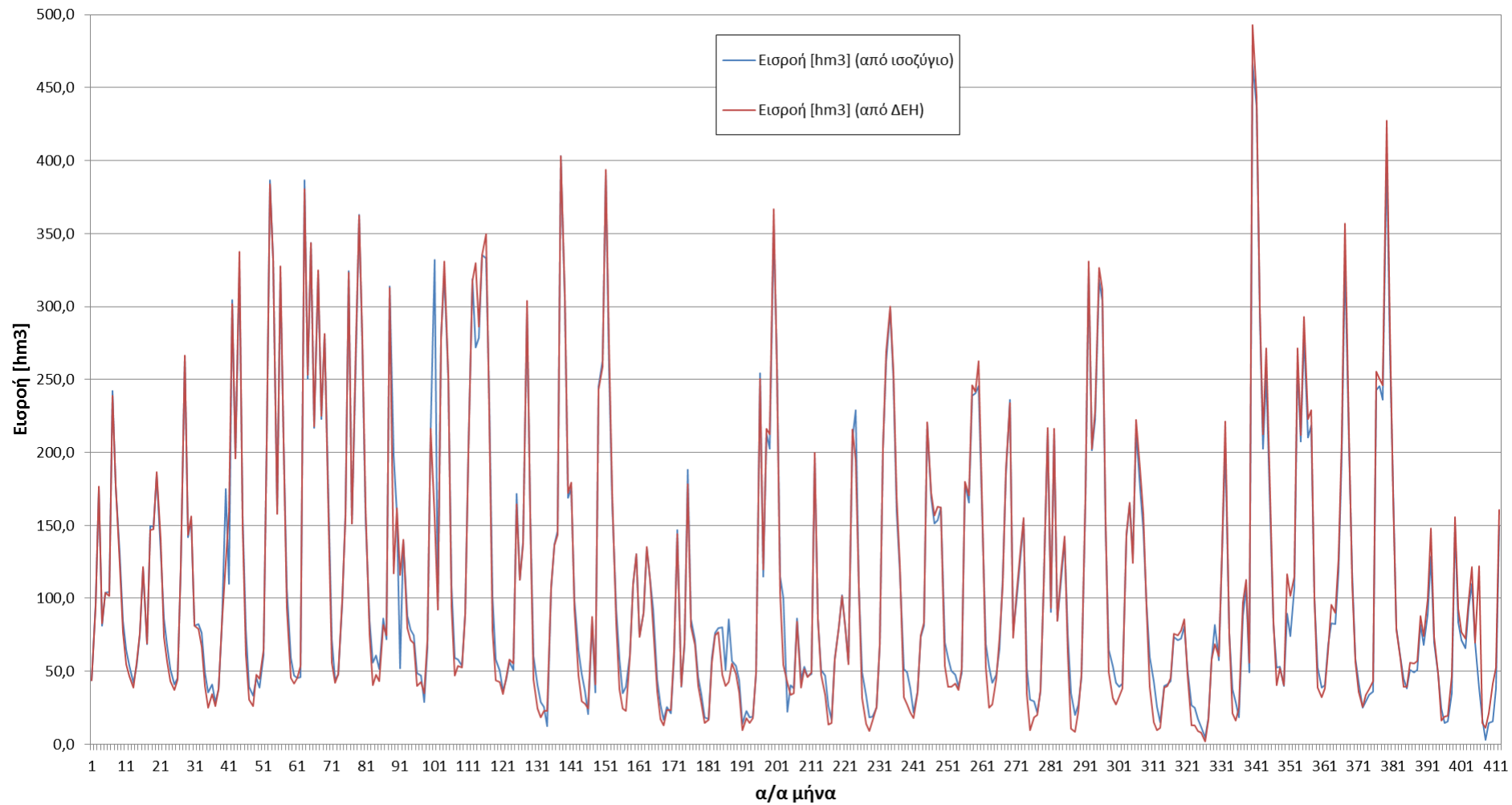
Για να μετατραπεί ο όγκος εισροών I_t (hm^3) σε ύψος απορροής I (mm), χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$I = I_t \cdot 1000 / A \quad (5.42)$$

όπου A η έκταση της λεκάνης απορροής σε km^2 .

Με βάση τη χρονοσειρά απορροής που παράχθηκε από το ισοζύγιο του ταμιευτήρα καθώς και τη δεδομένη ιστορική χρονοσειρά βροχοπτώσης και εξάτμισης, παρήχθησαν μέσω του προγράμματος ΚΑΣΤΑΛΙΑ οι αντίστοιχες συνθετικές χρονοσειρές. Στο παράρτημα παρατίθενται οι ιστορικές χρονοσειρές με τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά καθώς και η σύγκριση των στατιστικών χαρακτηριστικών των ιστορικών με τις συνθετικές χρονοσειρές.

Σχετικά με τις υπόγειες διαφυγές των ταμιευτήρων δεν υπήρχαν στοιχεία (συγκεκριμένα στο Πολύφυτο ήταν μηδενικές σύμφωνα με τη ΔΕΗ), οπότε και παραλήφθηκαν κατά την προσομοίωση.



Εικόνα 5-19: Σύγκριση χρονοσειράς εισροών όπως δίνεται από τη ΔΕΗ με αυτή που προέκυψε από το ισοζύγιο του ταμιευτήρα Πολυφύτου.

5.9. Οι ζητήσεις νερού του υδροσυστήματος Αλιάκμονα και οι αντίστοιχοι περιορισμοί

5.9.1. Οι στόχοι κάλυψης του μοντέλου

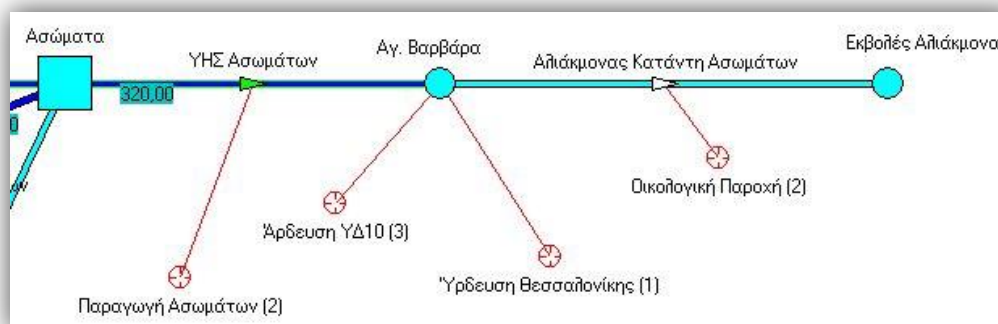
Όπως περιγράφηκε και σε προηγούμενες ενότητες, το μοντέλο της προσομοίωσης του υδροσυστήματος Αλιάκμονα καλείται να κατανείμει συγκεκριμένες ποσότητες υδάτων ανάμεσα στις ακόλουθες κατηγορίες στόχων (οι οποίοι είναι και αντικρουόμενοι):

- i. Παραγωγή ενέργειας από τους ΥΗΣ. Μεγιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής του συνόλου του συστήματος.
- ii. Ύρδευση Θεσσαλονίκης και άρδευση του Υδατικού Διαμερίσματος 10.
- iii. Ψύξη του Ατμοηλεκτρικού σταθμού Πτολεμαΐδας.
- iv. Διατήρηση περιβαλλοντικής ροής κατάντη των υδροηλεκτρικών έργων.

Για να καλυφθούν οι παραπάνω στόχοι απαιτείται από μεριάς χρήστη η εισαγωγή των κατάλληλων προτεραιοτήτων σε κάθε στόχο. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ακολουθήθηκε η παρακάτω πολιτική ιεράρχησης:

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

Στην εικόνα 5-20 διακρίνουμε όλες τις «οικογένειες» στόχων με τις αντίστοιχες προτεραιότητες ως προς την κάλυψή τους.



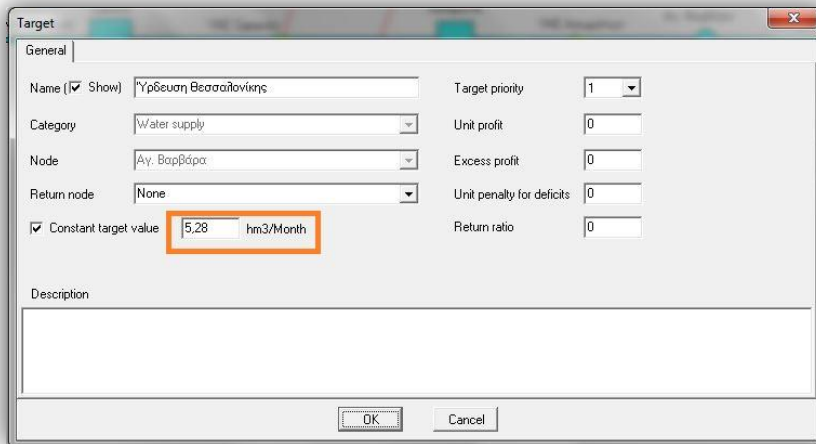
Εικόνα 5-20: Κατηγοριοποίηση στόχων και σειρά προτεραιότητας στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.

Σημειώνεται πως στον αλγόριθμο υλοποίησης της βέλτιστης πολιτικής στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, η κατανομή των υδάτων πραγματοποιείται ανάλογα με τη σειρά προτεραιότητας του κάθε στόχου στο διαφορετικό χρονικό βήμα. Επομένως, στη διαχειριστική πολιτική που επιλέχθηκε η προτεραιότητα δίνεται στην κάλυψη των υδατικών αναγκών της Θεσσαλονίκης και σε δεύτερο επίπεδο στην περιβαλλοντική ροή και την ενεργειακή παραγωγή.

Σημαντικό ρόλο ως προς τη διατήρηση της περιβαλλοντικής ροής έχει το αναρρυθμιστικό έργο της Αγ. Βαρβάρας το οποίο επιλέχθηκε να μη συμπεριληφθεί στην προσομοίωση.

5.9.2. Οι υδατικές ανάγκες της Θεσσαλονίκης και οι αρδευτικές ανάγκες του Υδατικού Διαμερίσματος

Η ύδρευση της Θεσσαλονίκης τοποθετείται ως στόχος επί της Αγ. Βαρβάρας η οποία έχει μοντελοποιηθεί σαν κόμβος κατάντη του ταμιευτήρα Ασωμάτων. Οι ανάγκες της Θεσσαλονίκης υπολογίζονται σε 63,36 hm³/χρόνο. Η ποσότητα αυτή ισοκατανέμεται στους 12 μήνες, δηλαδή ως τιμή στόχου τοποθετούνται τα 5,28 hm³/μήνα. Στην εικόνα 5-21 διακρίνουμε το παράθυρο εισαγωγής της αντίστοιχης τιμής από το περιβάλλον του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.



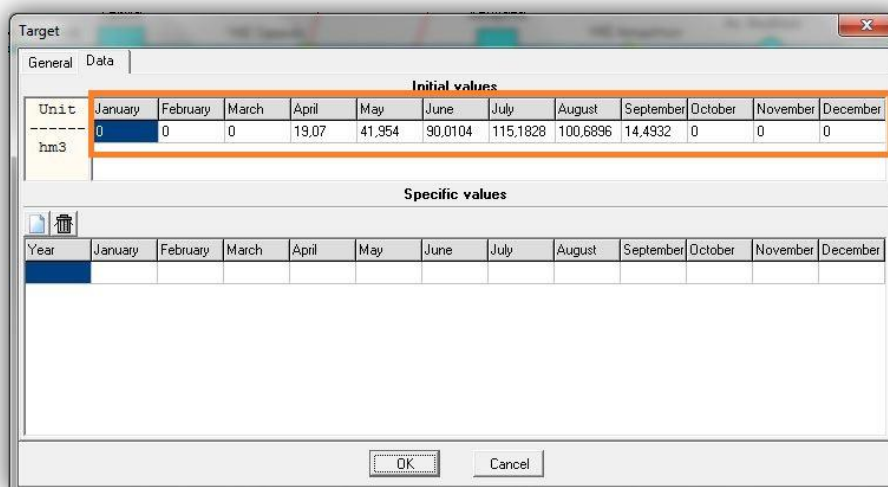
Εικόνα 5-21: Παράθυρο εισαγωγής στόχου ύδρευσης Θεσσαλονίκης στον Υδρονομέα.

Οι αρδευτικές ανάγκες του υδατικού διαμερίσματος εκτιμώνται σε 381,4 hm³/χρόνο. Οι αρδευτικές ζητήσεις ακολουθούν τη μηνιαία κατανομή του πίνακα 5-2 (Μπουζιώτας, 2012):

Πίνακας 5-2: Μηνιαία κατανομή αρδευτικής ζήτησης.

	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Σύνολο
Ποσοστό ζήτησης [%]	5	11	23,6	30,2	26,4	3,8	100
Ζήτηση [hm³]	19,07	41,954	90,0104	115,1828	100,6896	14,4932	381,4

Η εισαγωγή των αντίστοιχων δεδομένων στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ διακρίνεται στην εικόνα 5-22.



Εικόνα 5-22: Εισαγωγή κατανεμημένης αρδευτικής ζήτησης στο περιβάλλον του Υδρονομέα.

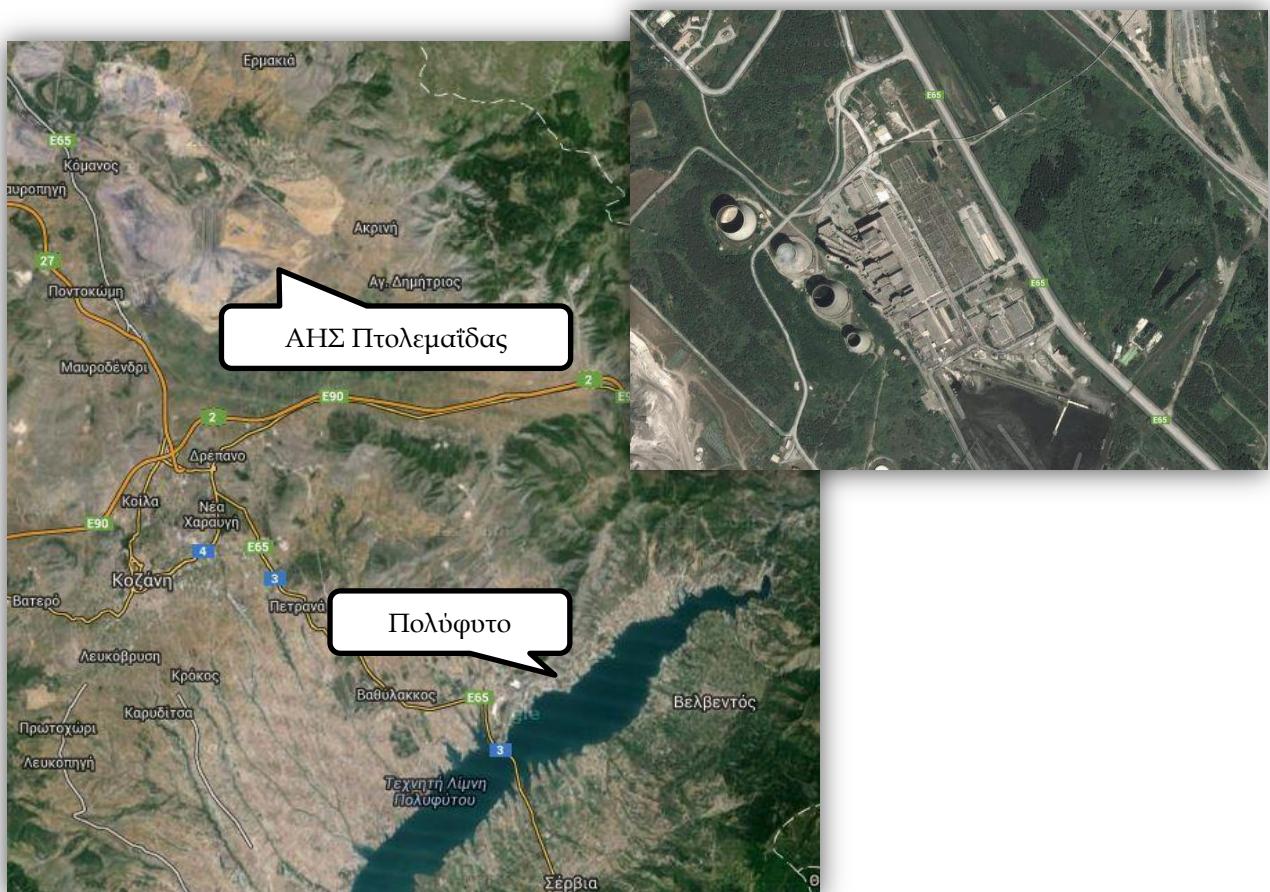
5.9.3. Υδατικές ανάγκες για την ψύξη του ατμοηλεκτρικού σταθμού Πτολεμαΐδας

Ο Ατμοηλεκτρικός Σταθμός Πτολεμαΐδας (ΑΗΣ) είναι το πρώτο βήμα της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με εκμετάλλευση εγχώριων κοιτασμάτων λιγνίτη μικρής θερμογόνου δύναμης. Αποτελείται από 4 μονάδες με διαφορετικά τεχνικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά όπως περιγράφονται παρακάτω. Οι μονάδες έχουν συνολική ισχύ 620MW, με επιμέρους κατανομή:

- Μονάδα I ισχύος 70MW.
- Μονάδα II ισχύος 125MW.
- Μονάδα III ισχύος 125MW.
- Μονάδα IV ισχύος 300MW.

Η Μονάδα I τέθηκε σε λειτουργία το Σεπτέμβριο 1959, η μονάδα II 125MW τέθηκε σε λειτουργία τον Οκτώβριο 1962, η Μονάδα III τέθηκε σε λειτουργία τον Οκτώβριο 1965 και η Μονάδα IV τέθηκε σε λειτουργία τον Απρίλιο 1973.

Στην εικόνα 5-23 διακρίνεται ο σταθμός και η σχετική του θέση ως προς τον ταμιευτήρα Πολυφύτου.



Εικόνα 5-23: ΑΗΣ Πτολεμαΐδας και σχετική του θέση ως προς τον ταμιευτήρα Πολυφύτου.

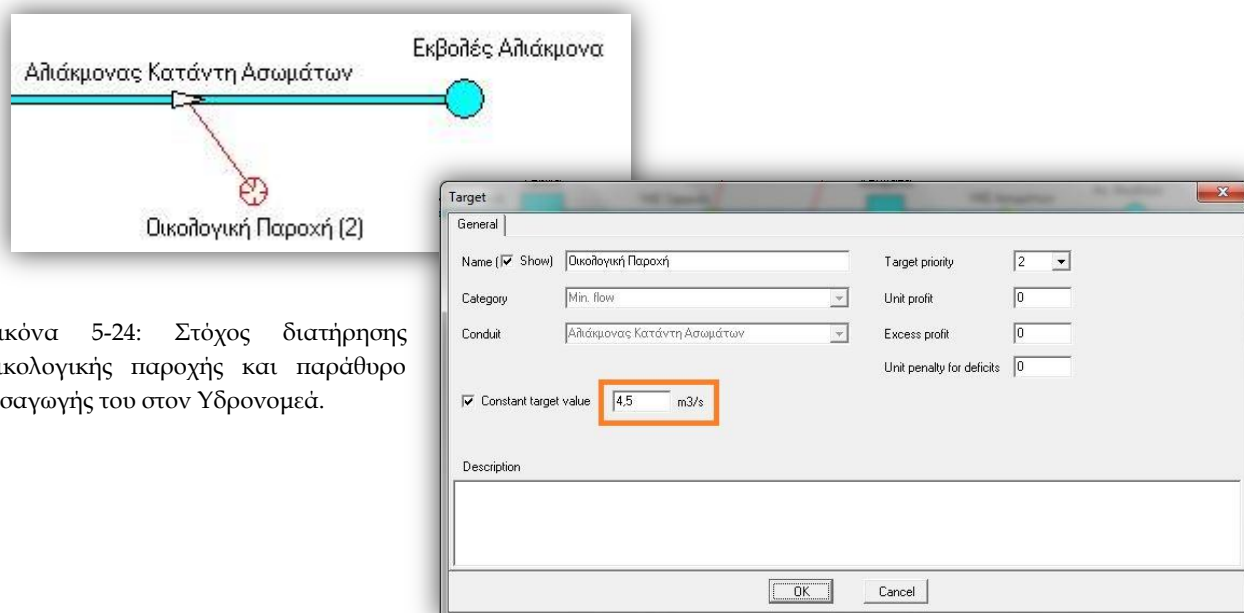
Οι ετήσιες ανάγκες σε νερό για την ψύξη του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας εκτιμώνται σε 65 hm³/χρόνο, μια ποσότητα που ισοκατανέμεται σε μία ποσότητα 5,42 hm³/μήνα.

5.9.4. Διατήρηση περιβαλλοντικής ροής

Από την απόφαση της διεύθυνσης υδάτων Δυτικής Μακεδονίας (Αριθ. Πρωτ.: 40754) έχουμε:

«Η οικολογική παροχή του π. Αλιάκμονα κατάντη του αναρρυθμιστικού έργου Αγίας Βαρβάρας στην κοίτη του π. Αλιάκμονα, θα είναι ανεμπόδιστη και συνεχής σε όλη τη διάρκεια του έτους και κατ' ελάχιστο ίση με 4,5 κ.μ./δλ. (σχετ. 22). Με βάση την παραπάνω παροχή η συνολική ποσότητα νερού που θα απελευθερωθεί κατά την περίοδο από Μάιο μέχρι Σεπτέμβριο 2013 για τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας του π. Αλιάκμονα κατάντη του έργου της Αγ. Βαρβάρας, θα ανέλθει σε τουλάχιστον 60.000.000 κ.μ. (σχετ. 26).»

Επομένως, ο αντίστοιχος στόχος της οικολογικής παροχής κατάντη των Ασωμάτων επιλέγεται να έχει σταθερή τιμή 4,5 m³/sec. Στην εικόνα 5-24 διακρίνουμε τον αντίστοιχο στόχο και το παράθυρο εισαγωγής της τιμής του.



Εικόνα 5-24: Στόχος διατήρησης οικολογικής παροχής και παράθυρο εισαγωγής του στον Υδρονομέα.

5.10. Τα σενάρια και οι αναλύσεις της προσομοίωσης του υδρουσστήματος Αλιάκμονα

Για την πλήρη διερεύνηση της συμπεριφοράς του συστήματος άντλησης/ταμίευσης στον Αλιάκμονα κατασκευάζονται τέσσερα σενάρια τα οποία συμβολίζονται με το γράμμα «Σ» και τον αύξοντα αριθμό τους.

Πιο συγκεκριμένα τα σενάρια της προσομοίωσης που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι:

- i. *Σενάριο Σ1:* Μοντελοποίηση του υδρουσστήματος του Αλιάκμονα χωρίς αντλητική διάταξη. Χρησιμέυει στη δυνατότητα που μας δίνεται να διερευνήσουμε την επιρροή της τεχνολογίας άντλησης-ταμίευσης σε σχέση με την απλή διάταξη που δε δίνει τέτοια δυνατότητα.
- ii. *Σενάριο Σ2:* Μοντελοποίηση του υδρουσστήματος Αλιάκμονα με την παρουσία αντλητικής διάταξης, αλλά απουσία στόχου (target) άντλησης. Διερεύνηση της συνάρτησης Sum of Generated Firm Power.

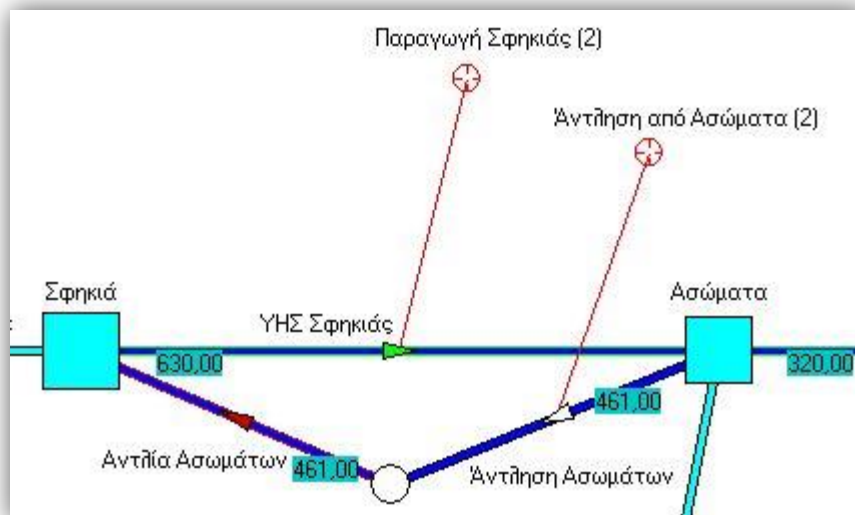
- iii. Σενάριο Σ3: Μοντελοποίηση του υδροσυστήματος Αλιάκμονα με την παρουσία αντλητικής διάταξης, αλλά απουσία στόχου (target) άντλησης. Διερεύνηση της συνάρτησης Total Generated Firm Power.
- iv. Σενάριο Σ4: Μοντελοποίηση του υδροσυστήματος Αλιάκμονα με την παρουσία αντλητικής διάταξης και ταυτόχρονη εισαγωγή στόχου άντλησης. Διερεύνηση της δυνατότητας εισαγωγής στόχου κατά την προσομοίωση και η επιρροή στην παραγόμενη ενέργεια.

Με την παραπάνω μεθοδολογία διερευνάται το πλήρες φάσμα των δυνατοτήτων διαχείρισης του υδροσυστήματος με τη χρήση του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ. Κάποια εξ' αυτών αποτελούν ενδιάμεσα σενάρια ή σενάρια προκαταρκτικής διερεύνησης. Όπως θα δούμε στη συνέχεια στο κεφάλαιο της συνδυασμένης διαχείρισης υδροηλεκτρικής-αιολικής ενέργειας, κάποια άλλα από αυτά τα σενάρια έχουν πραγματική διαχειριστική χρησιμότητα, χωρίς να σημαίνει ότι τα ενδιάμεσα σενάρια δεν έχουν την αυταξία τους.

Πιο συγκεκριμένα, με τα σενάρια Σ2 & Σ3 και την σύγκριση μεταξύ τους διαλευκάζεται η επίπτωση της κατακερματισμένης διαχείρισης (Σ2) στην υδροηλεκτρική παραγωγή μέσω της αντιπαραβολής με ένα ενιαίο πλάνο υπό τη σκέπη ενός φορέα (Σ3). Στις εικόνες 5-26 έως 5-28 διακρίνουμε τα σχηματοποιημένα σενάρια της προσομοίωσης.

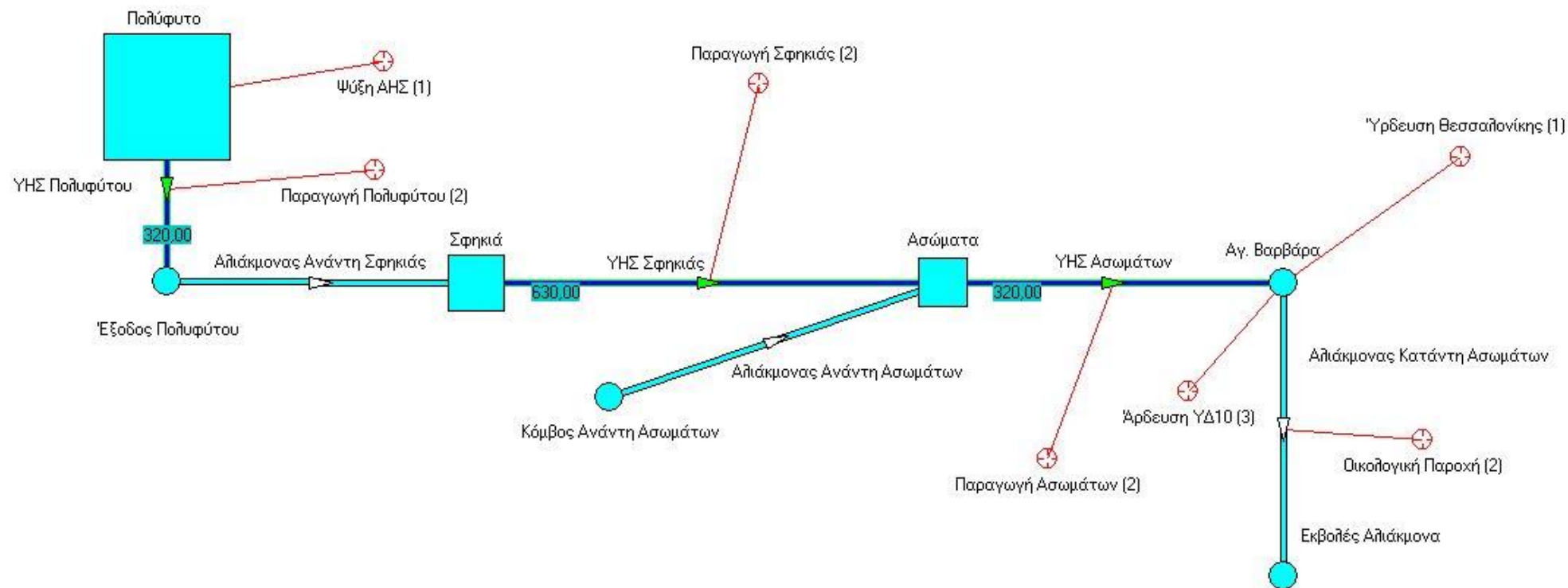
5.11. Μοντελοποίηση υδροστροβίλων στον Υδρονομέα

Στην περίπτωση της σχηματοποίησης του συστήματος άντλησης-ταμίευσης στον Υδρονομέα χρησιμοποιείται ένα ενδιάμεσος κόμβος και ένα υδραγωγείο με παροχετευτικότητα ίση με αυτή της αντλίας μιας και δεν υπάρχει δυνατότητα προσθήκης στόχου στη διάταξη αντλίας. Στην εικόνα 5-25 διακρίνουμε πως πραγματοποιείται η εν λόγω διάταξη.

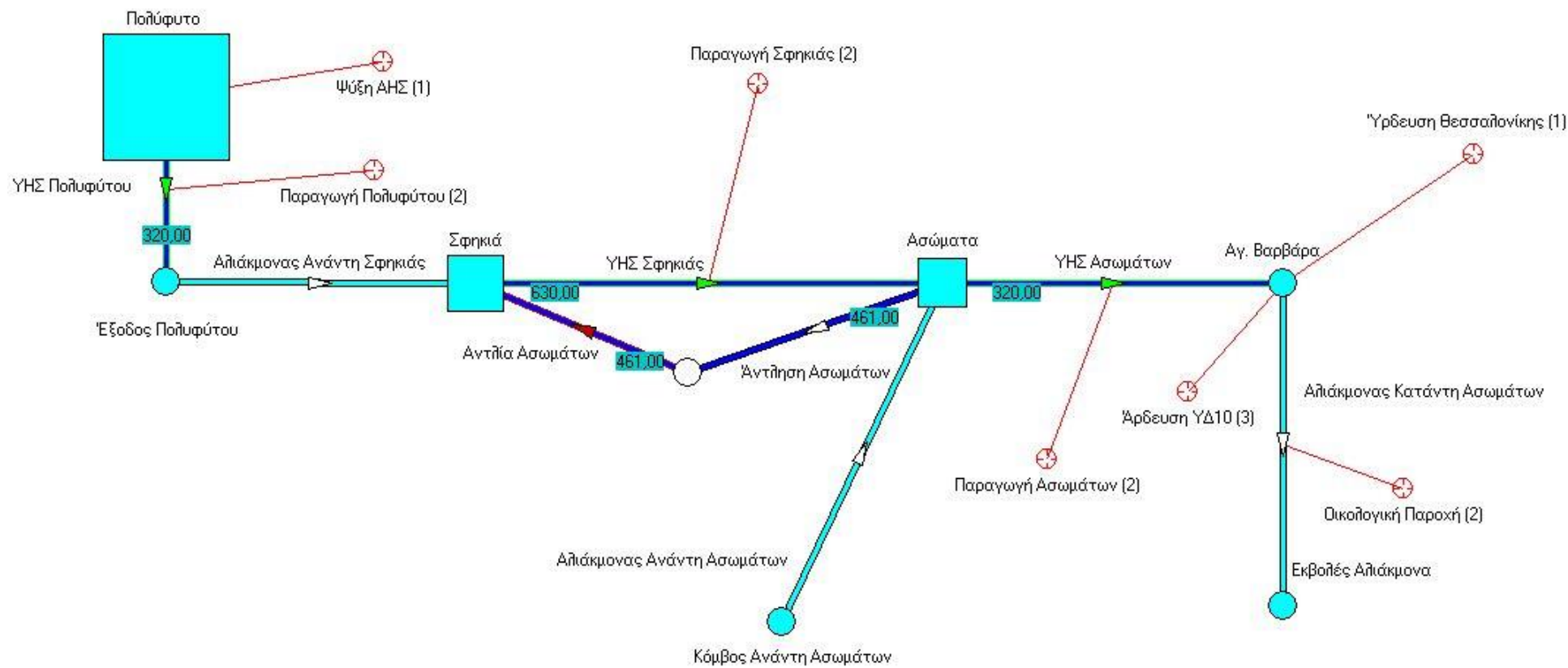


Εικόνα 5-25: Σχηματοποίηση και κατ' επέκταση μοντελοποίηση διάταξης αντλιοστροβίλου στον Υδρονομέα.

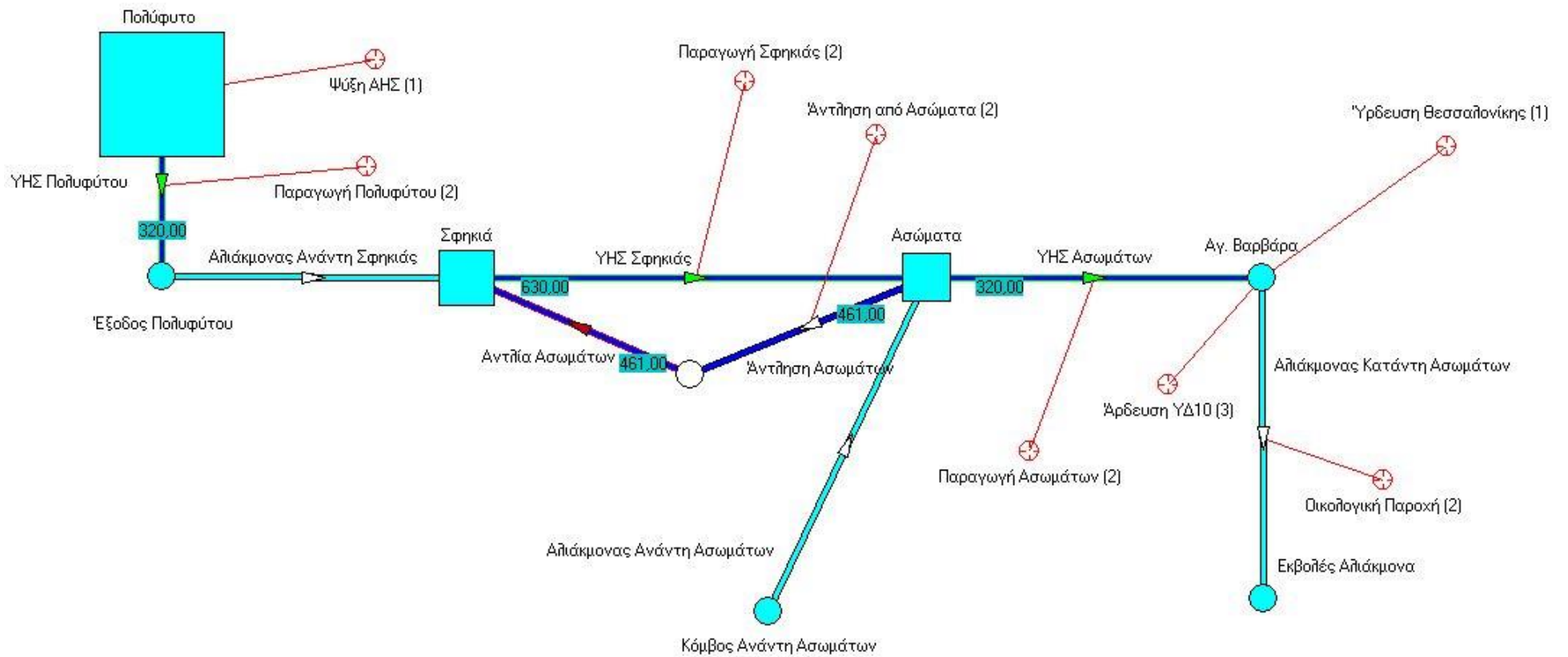
Σε μια πρόταση μελλοντικής βελτίωσης του λογισμικού και των συστατικών του μερών (components) προτείνεται η βελτίωση της προαναφερθείσας σχηματοποίησης μέσω εισαγωγής στοιχείου αντλιοστροβίλου ή τη δημιουργία στοιχείου αντλίας με δυνατότητα εφαρμογής στόχου.



Εικόνα 5-26: Σενάριο Σ1 (απουσία διάταξης αντλίας).



Εικόνα 5-27: Σενάρια Σ2 και Σ3. Μοντελοποίηση του υδροοσστήματος Αλιτάκμονα με την παρουσία αντλητικής διάταξης, αλλά απουσία στόχου (target) άντλησης. Διερεύνηση της συνάρτησης Sum of Generated Firm Power και της Total Generated Firm Power. Παρά τη διαφορά στις συναρτήσεις η σχηματοποίηση των σεναρίων είναι κοινή.



Εικόνα 5-28: Σενάριο Σ4 (Μοντελοποίηση του υδρουσστήματος Αλιάκμονα με την παρουσία αντλητικής διάταξης και ταυτόχρονη εισαγωγή στόχου άντλησης).

5.12. Οι παραδοχές της διάταξης άντλησης

Η διαχειριστική πολιτική του συστήματος βασίζεται σε μια θεώρηση που θέλει τις μονάδες άντλησης-ταμίευσης να λειτουργούν τις νυχτερινές ώρες κάθε μήνα ώστε να εκμεταλλεύονται την περίσσεια ενέργειας των θερμοηλεκτρικών έργων. Τα θερμοηλεκτρικά λόγω της αδράνειας που παρουσιάζει η έναρξη και διακοπή της λειτουργίας τους εξακολουθούν να λειτουργούν τις νυχτερινές ώρες παρά τη χαμηλή ζήτηση. Ως απότοκο αυτού του περιορισμού το «νυχτερινό ρεύμα» έχει περισσότερο ευέλικτη τιμολόγηση σε σχέση με αυτό που παράγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Για τους παραπάνω λόγους θεωρούμε ότι η αντλητική διάταξη λειτουργεί 8h/ημέρα. Με άλλα λόγια, η άντληση λειτουργεί στο 33% του κάθε χρονικού βήματος. Ο αντλιοστρόβιλος μοντελοποιείται με βάση τις ακόλουθες παραδοχές:

- i. Για κάθε αντλιοστρόβιλο υπάρχουν δύο ζεύγη καμπυλών (H, Q) και (H, ψ) : ένα για τη λειτουργία στρόβιλου και ένα για τη λειτουργία αντλίας.
- ii. Η άντληση λειτουργεί στο 33% του χρόνου, ενώ η παραγωγή στο 67%. Έτσι σε κάθε στοιχείο επιβάλλεται η μείωση της ονομαστικής του παροχетеυτικότητας ώστε να μοντελοποιηθεί κατάλληλα η λειτουργία για δεδομένο διάστημα εντός ενός βήματος.

Η προαναφερθείσα μείωση επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλων συντελεστών (reduction factors), με τιμές $\psi_1 = 0,67$ και $\psi_2 = 0,33$. Για τους συντελεστές αυτούς ισχύει:

$$\psi_1 + \psi_2 = 1 \quad (5.43)$$

είναι δηλαδή συμπληρωματικοί. Η εν λόγω κατανομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις περιπτώσεις εναλλακτικών διαχειριστικών πολιτικών, μοντελοποιώντας κάθε φορά τις ώρες λειτουργίας της άντλησης με κατάλληλους συντελεστές.

5.13. Υπολογισμός των συντελεστών μείωσης ψ και των παροχетеυτικότητων

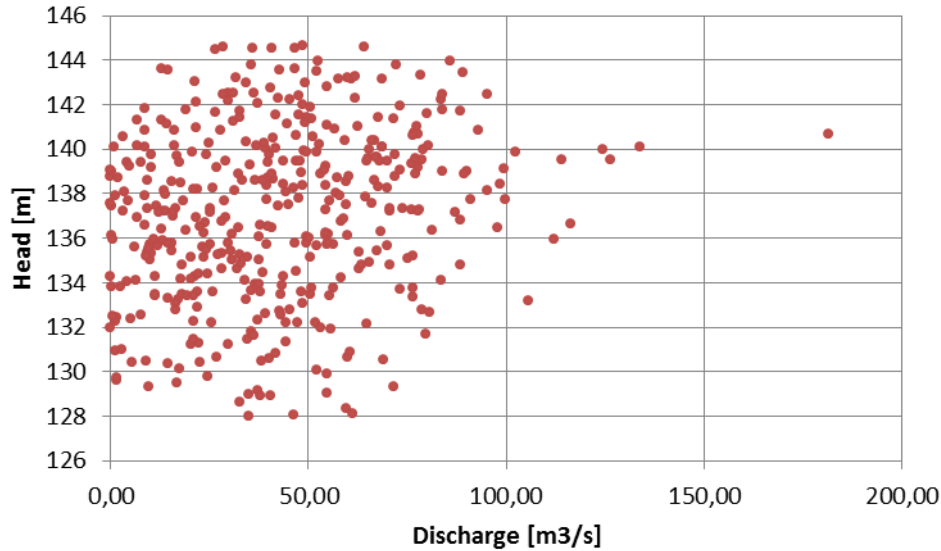
Η πρώτη προσπάθεια υπολογισμού των συντελεστών μείωσης και της παροχетеυτικότητας έγινε για το στρόβιλο του ταμιευτήρα Πολυφύτου. Από το ισοζύγιο της ΔΕΗ δίνεται η μέση στάθμη του ταμιευτήρα, οπότε δεδομένης και της στάθμης υδροληψίας (144,5m) υπολογίστηκε το ύψος πτώσης κάθε βήματος της ιστορικής χρονοσειράς (Head). Δεδομένης της ποσότητας υδάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την υδροηλεκτρική παραγωγή (σε χιλιάδες m^3) υπολογίστηκε η παροχетеυτικότητα των στρόβιλων σε κάθε βήμα (Discharge) σε m^3/s μέσω της σχέσης:

$$Q = \frac{V_{power}}{24 \cdot 3600 \cdot 31} 1000 \quad (5.44)$$

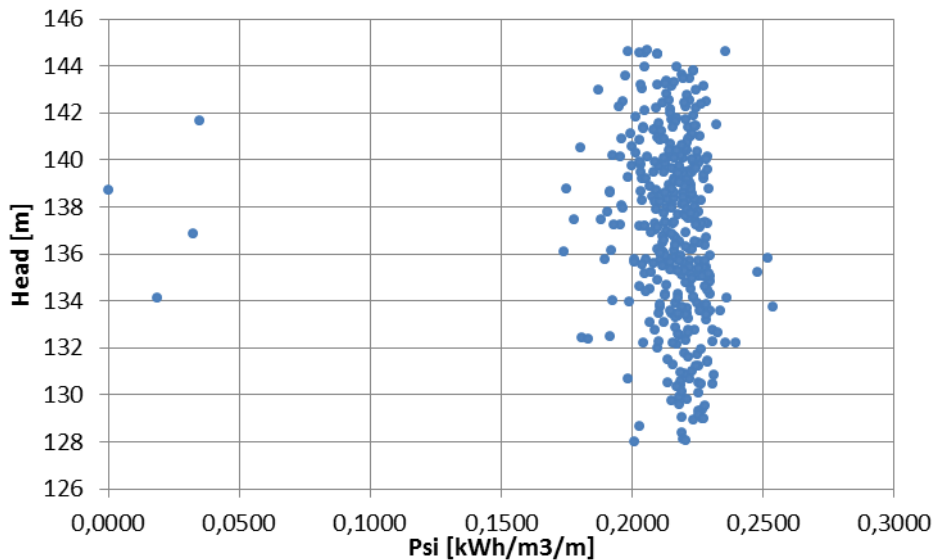
Με αυτή τη σχέση υπολογίστηκαν τα ζεύγη (H, Q) και απεικονίστηκαν στο διάγραμμα της εικόνας 5-29. Αντίστοιχα στο ισοζύγιο της ΔΕΗ δίνεται η μηνιαία παραγωγή του σταθμού E_{month} (σε mWh) οπότε κατέστη δυνατός και ο υπολογισμός των ζευγών (H, ψ) από τη σχέση:

$$\psi = 100 \frac{E_{month}}{V_{power} \cdot Head} \quad (5.45)$$

Τα ζεύγη αυτά εικονίζονται στο διάγραμμα της εικόνας 5-30.



Εικόνα 5-29: Διάγραμμα ζευγών (H,Q)



Εικόνα 5-30: Διάγραμμα ζευγών (H,ψ)

Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές πως δεν μπορεί να καθοριστεί συγκεκριμένη σχέση παροχευτικότητας και ύψους πτώσης. Παράλληλα δεν υπάρχει και συγκεκριμένη συσχέτιση ανάμεσα στον συντελεστή ψ και το ύψος πτώσης, παρά τη συγκέντρωση γύρω από την τιμή 0,23.

Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν σταθερές παροχευτικότητες για όλες τις διατάξεις στροβίλων και αντλιών του συστήματος, με στοιχεία που αντλήθηκαν από τον τομέα ενεργειακής παραγωγής της ΔΕΗ. Τα στοιχεία αυτά εικονίζονται στον πίνακα 5-3 και στον 5-4. Αντίστοιχα, επιλέχθηκαν σταθεροί συντελεστές ψ , οι οποίοι υπολογίστηκαν με δεδομένη την ειδική κατανάλωση $SpCon$ (σε m^3/kWh) από τη σχέση:

$$\psi = \frac{1}{SpCon \cdot Head} 100 \quad (5.46)$$

Οι τιμές τους εικονίζονται στον πίνακα 5-5.

Πίνακας 5-3: Χαρακτηριστικά παροχεταιυκότητας στροβίλων

Παροχή m3/sec σε μέγιστη ισχύ	Πολύφυτο	Σφηκιά	Ασώματα	Αγ. Βαρβάρα
Ειδική κατανάλωση (m3/kWh)	3,2	7,2	10,5	
Ισχύς ανα στρόβιλο (MW)	120	105	55	
Στρόβιλος 1 (m3/sec)	107	210	160	
Στρόβιλος 2 (m3/sec)	107	210	160	
Στρόβιλος 3 (m3/sec)	107	210		
Σύνολο (m3/sec)	320	630	321	

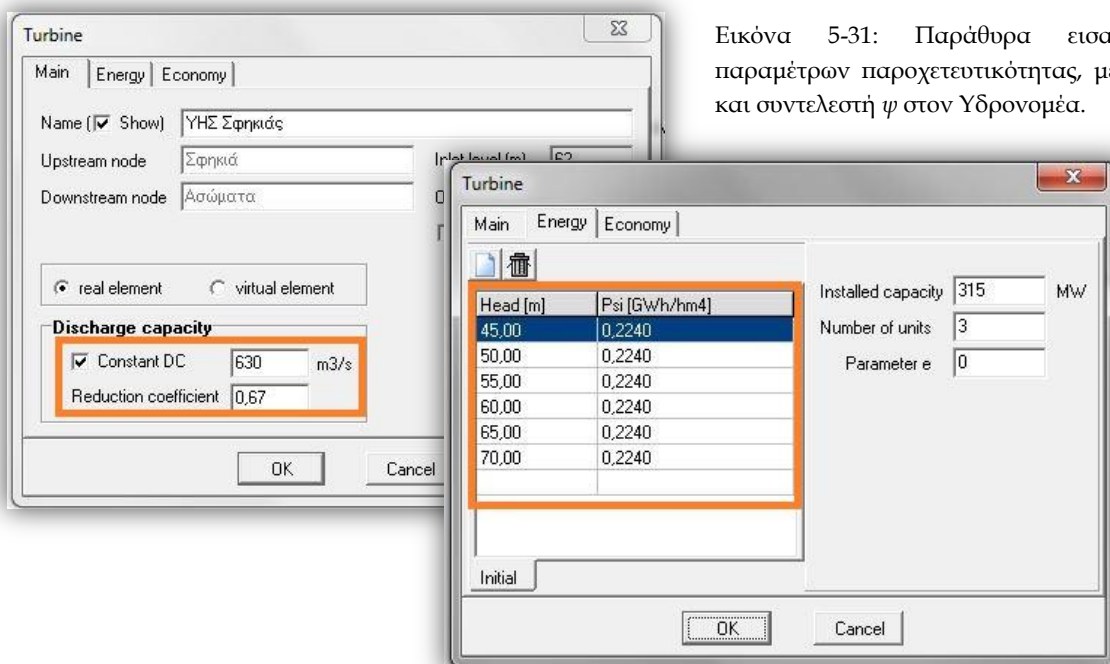
Πίνακας 5-4: Χαρακτηριστικά παροχεταιυκότητας αντλίας

Παροχή m3/sec σε μέγιστη ισχύ	Σφηκιά
Ειδική κατανάλωση (m3/kWh)	5,3
Ισχύς ανα στρόβιλο-αντλία (MW)	105
Αντλία 1 (m3/sec)	154
Αντλία 2 (m3/sec)	154
Αντλία 3 (m3/sec)	154
Σύνολο (m3/sec)	461

Πίνακας 5-5: Χαρακτηριστικά συντελεστών ψ στροβίλων και αντλιών

Ταμειυτήρας	Πολύφυτο	Σφηκιά	Ασώματα	Ταμειυτήρας	Σφηκιά
Head [m]	146,5	62	42	Head [m]	62
Ειδική κατανάλωση [m3/kWh]	3,2	7,2	10,5	Ειδική κατανάλωση [m3/kWh]	5,3
Psi [kWh/m3/m]	0,2133106	0,224014	0,2267574	Psi [kWh/m3/m]	0,3043214
Αρ. Στροβίλων	3	3	2	Αρ. Στροβίλων	3
Ισχύς στροβίλου [MW]	120	105	55	Ισχύς στροβίλου [MW]	105
Συνολική ισχύς [MW]	360	315	110	Συνολική ισχύς [MW]	315

Στην εικόνα 5-31 διακρίνουμε τα πεδία εισαγωγής των παραμέτρων παροχεταιυκότητας-μείωσης και του συντελεστή ψ για έναν εκ των υδροστροβίλων του υδροσυστήματος Αλιάκμονα.



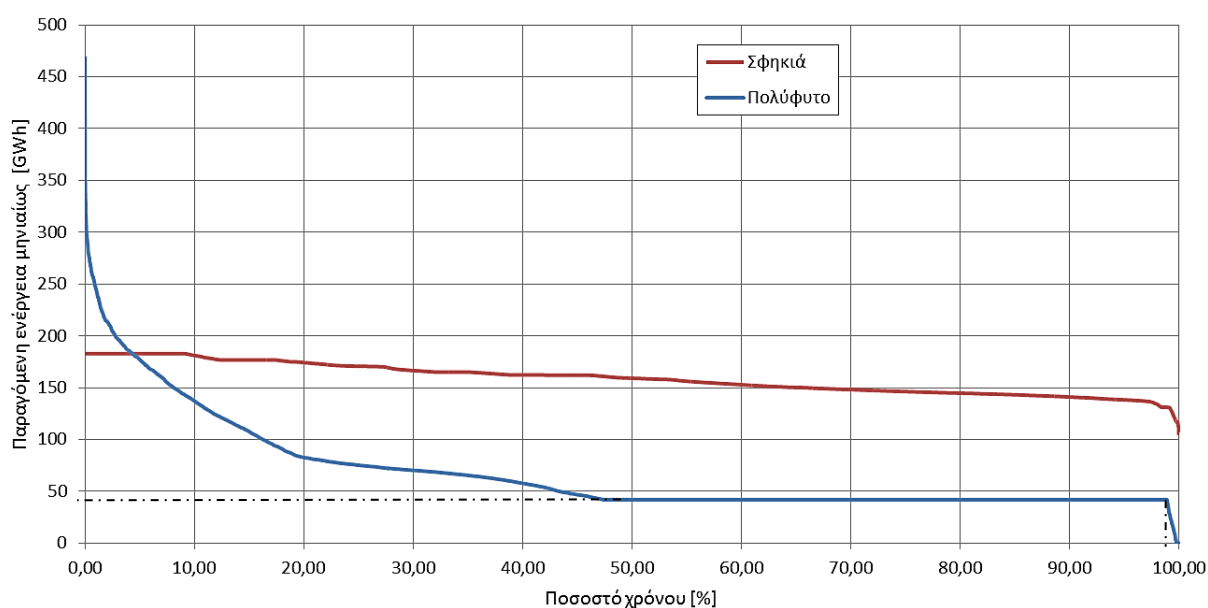
Εικόνα 5-31: Παράθυρα εισαγωγής παραμέτρων παροχεταιυκότητας, μείωσης και συντελεστή ψ στον Υδρονομέα.

5.14. Αναλυτική μεθοδολογία και πλαίσιο παρουσίασης των σεναρίων

Μετά την σχηματοποίηση του προβλήματος μέσω των σεναρίων της υποενότητας 5.10 ακολουθείται η διαδικασία προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. Συνοπτικά και σε βήματα η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι:

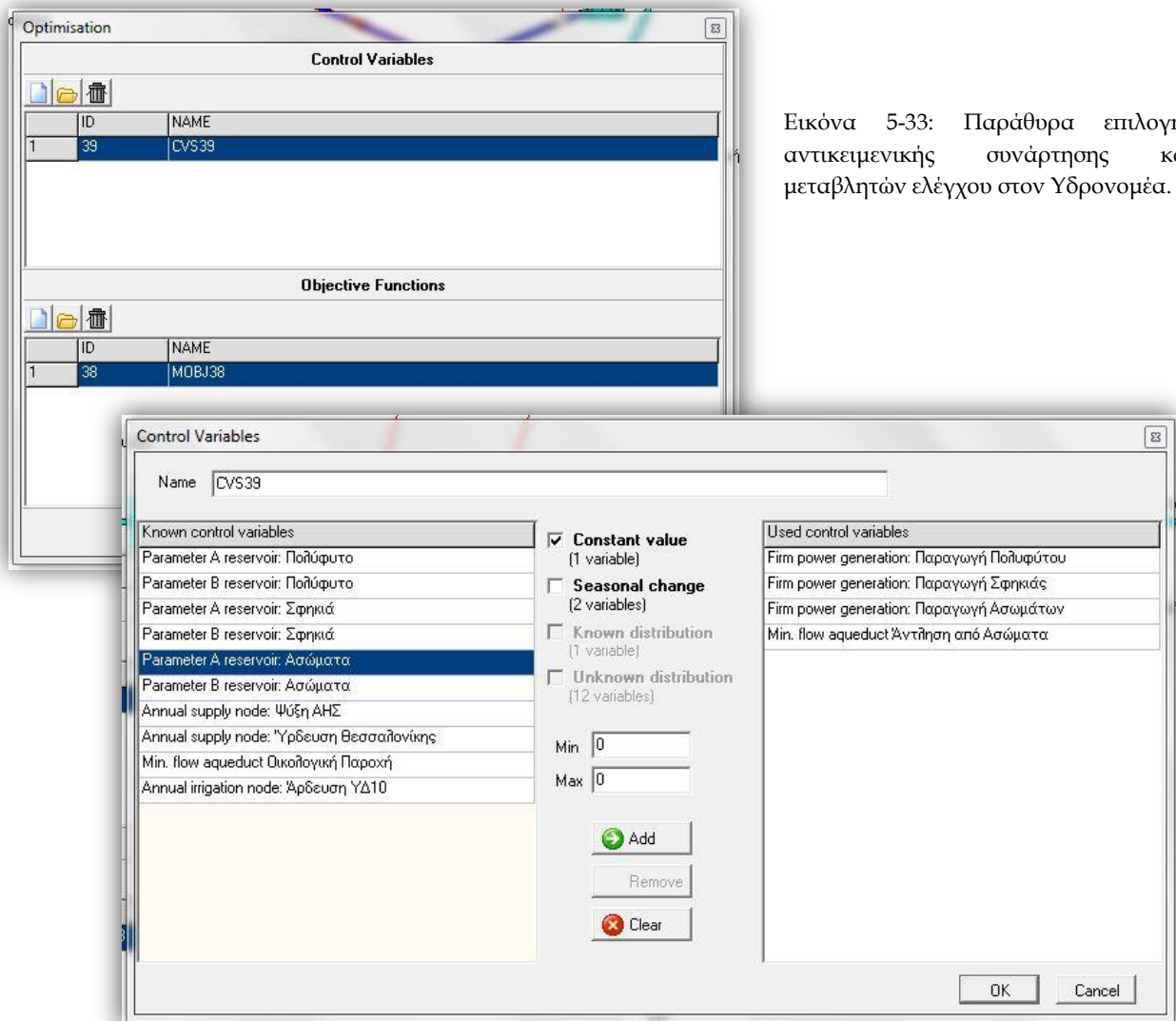
- i. Εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων στο σενάριο (χρονοσειρές απορροής, βροχής και εξάτμισης σε κάθε ταμιευτήρα, χαρακτηριστικά στροβίλων και αντλιών, περιορισμοί, υδατικές καταναλώσεις, περιβαλλοντική ροή).
- ii. Επιλογή των μεταβλητών ελέγχου για τη διαδικασία βελτιστοποίησης μέσα από το σύνολο παραμέτρων του Υδρονομέα.
- iii. Εκτέλεση διαδικασίας βελτιστοποίησης με χρήση των κατάλληλων μέτρων επίδοσης και της εξίσωσης (5.31). Τα μέτρα επίδοσης σχετίζονται με την παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας (παραπομπή στο υποκεφάλαιο 2.2.5). Για την αποτίμηση των μέτρων επίδοσης ακολουθεί προσομοίωση μετά τη βελτιστοποίηση.
- iv. Μετά την προσομοίωση καταγράφονται τα μεγέθη που προκύπτουν. Συγκεκριμένα στο παράρτημα παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν την εξέλιξη του μέτρου επίδοσης σε σχέση με τον αύξοντα αριθμό της προσομοίωσης.
- v. Από τη χρονοσειρά της παραγόμενης ενέργειας παράγουμε την καμπύλη διάρκειας. Η παραγόμενη μηνιαία ενέργεια απεικονίζεται συναρτήσει του χρονικού ποσοστού στο οποίο αυτή εμφανίζεται. Ένδειξη ομαλής υδροηλεκτρικής παραγωγής είναι η παρουσία πλατό (plateau) στις καμπύλες διάρκειας. Στις εν λόγω καμπύλες, η αξιοπιστία της ενεργειακής παραγωγής εκφράζεται μέσα από το ποσοστό του χρόνου στο οποίο το διάγραμμα σταθεροποιείται. Δηλαδή, με άλλα λόγια, η αξιοπιστία εντοπίζεται από το σημείο στο οποίο εμφανίζεται το πλατό.

Στην εικόνα 5-32 διακρίνουμε την εικόνα αντιπαραβολής μιας καμπύλης διάρκειας ενός έργου με ομαλή παραγωγή και ενός με μη ομαλή. Η καμπύλη του Πολυφύτου παρουσιάζει πλατό με αξιοπιστία 98,84%, ενώ η καμπύλη της Σφηκιάς εμφανίζει μη ομαλή παραγωγή.



Εικόνα 5-32: Ομαλή και μη ομαλή μορφή καμπύλης διάρκειας.

Στην εικόνα 5-33 διακρίνουμε τα παράθυρα επιλογής της αντικειμενικής συνάρτησης και των μεταβλητών ελέγχου.



Εικόνα 5-33: Παράθυρα επιλογής αντικειμενικής συνάρτησης και μεταβλητών ελέγχου στον Υδρονομέα.

Η διερεύνηση των διαφόρων σεναρίων γίνεται στη βάση φειδωλών παραμετροποιήσεων που περιλαμβάνουν τους στόχους ενεργειακής παραγωγής και το στόχο άντλησης (ανάλογα με την παρουσία ή όχι αντλητικής διάταξης). Οι χρησιμοποιούμενες μεταβλητές ελέγχου εικονίζονται στο δεύτερο (κάτω) παράθυρο της ανωτέρω εικόνας στο δεξιό μέρος: πεδίο «Used control variables».

Από τη διερεύνηση της επόμενης ενότητας συνάγονται συμπεράσματα για το πλέον κατάλληλο σενάριο που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη συνδυασμένη διαχείριση υδροηλεκτρικής-αιολικής ενέργειας στη συνέχεια.

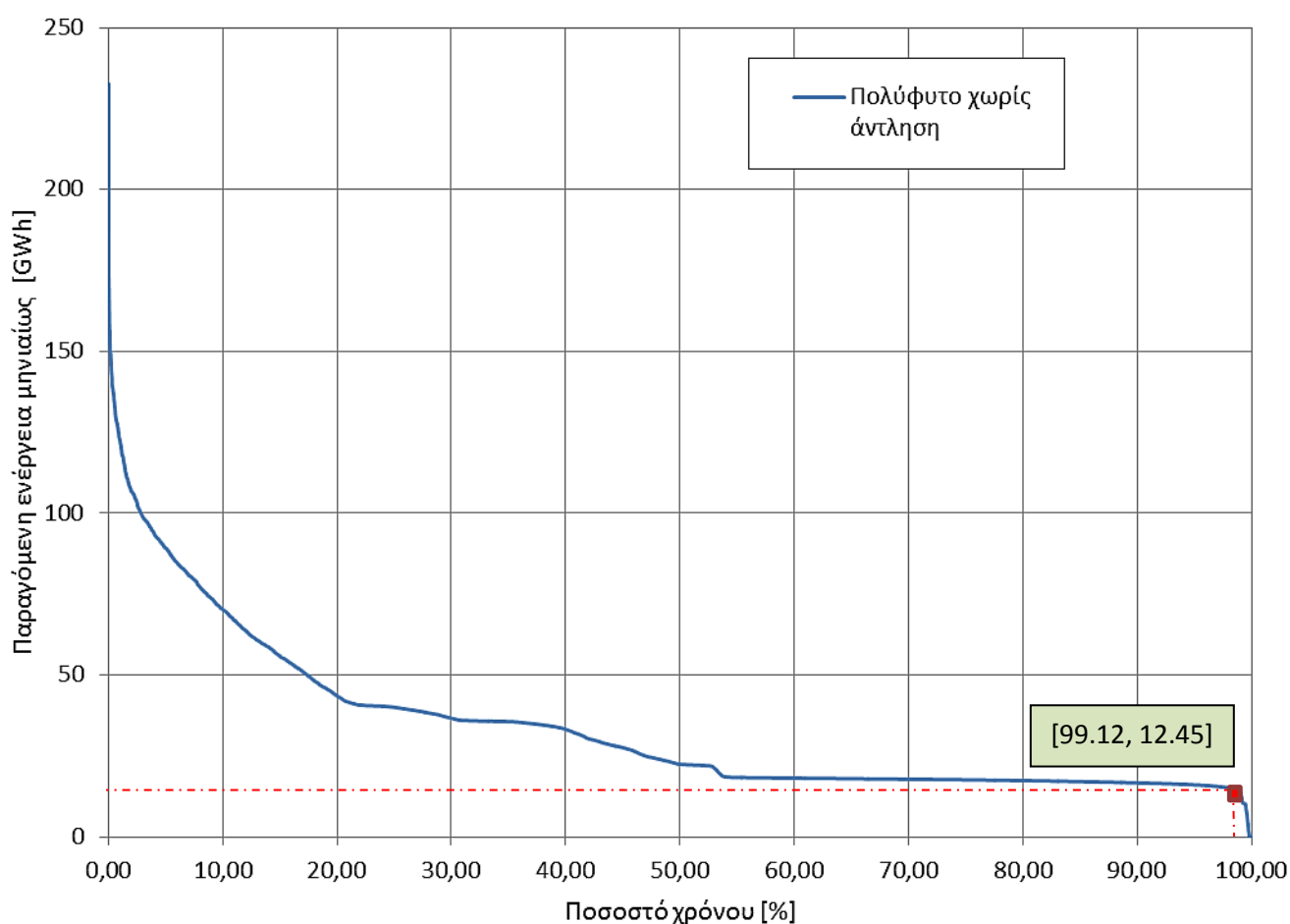
Για μια περισσότερο εκτεταμένη ανάλυση του σκέλους της ενεργειακής παραγωγής στον Υδρονομέα ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη διπλωματική του Μπουζιώτα¹⁶ (2012).

¹⁶ Περισσότερα στοιχεία μαζί με το πλήρες κείμενο της εν λόγω εργασίας εδώ: <http://itia.ntua.gr/el/docinfo/1293/>

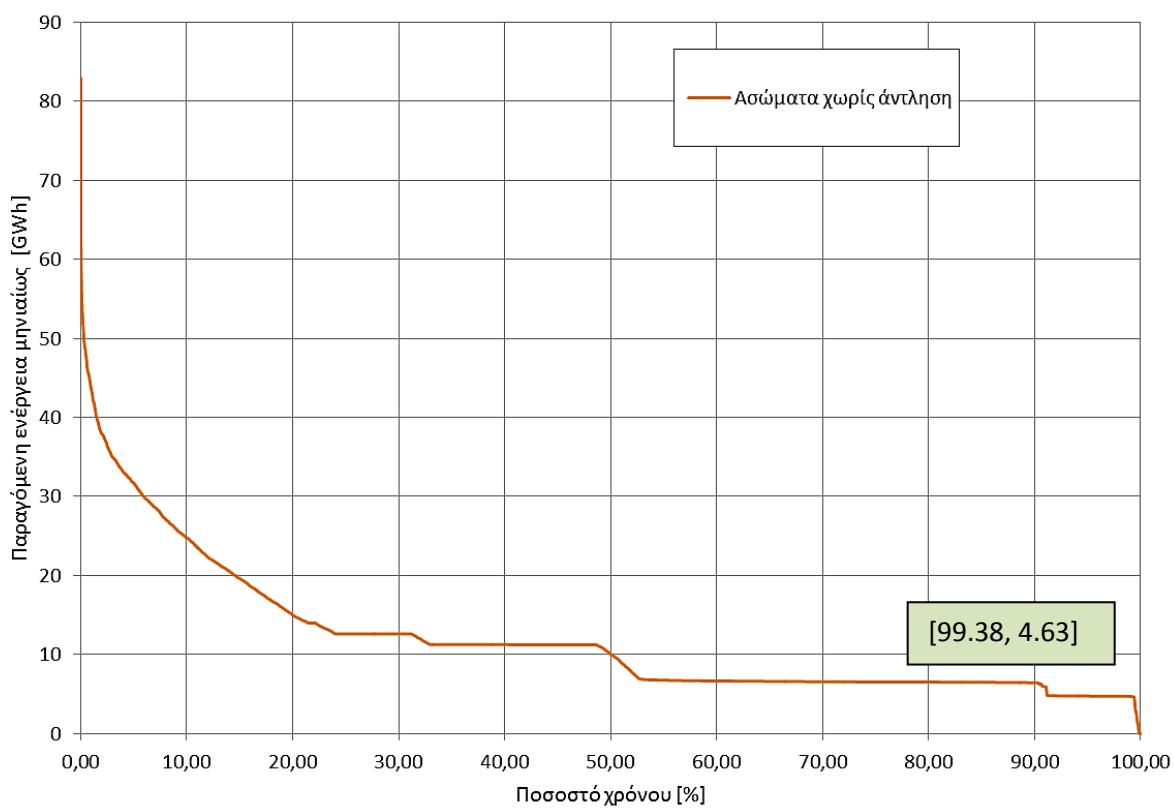
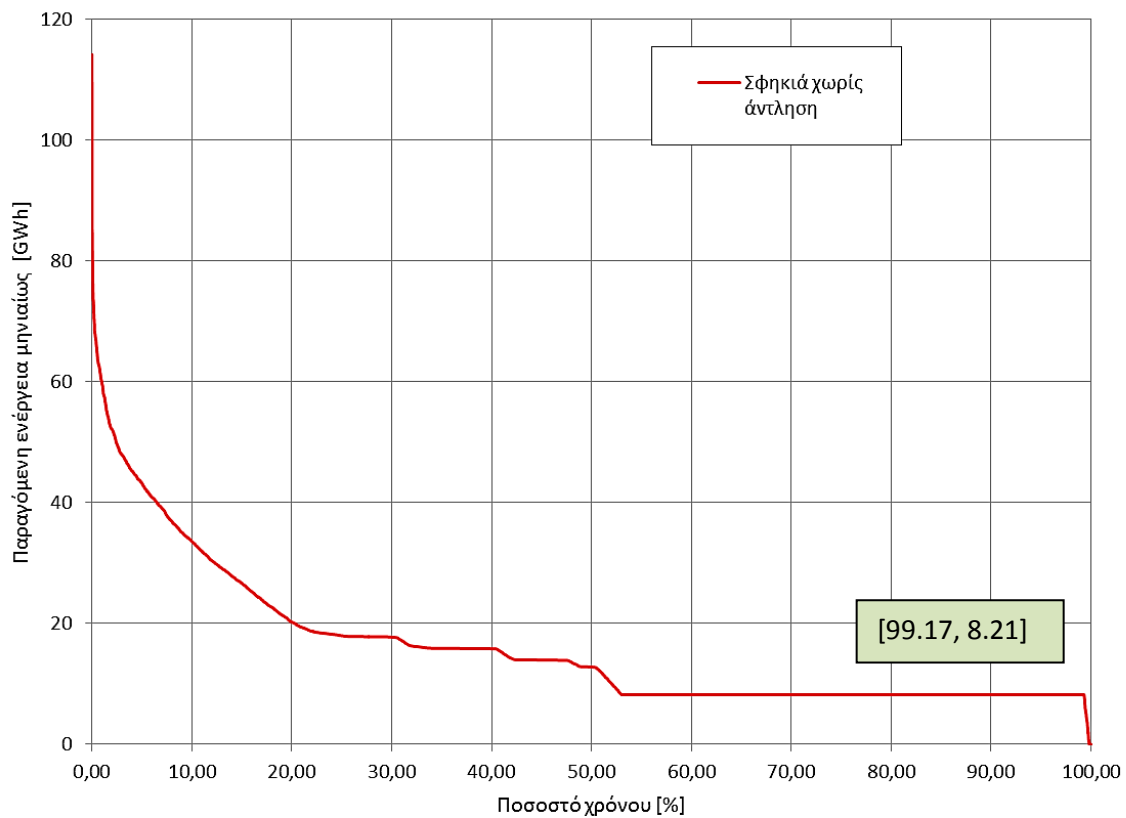
5.15. Αποτελέσματα αναλύσεων και επιμέρους σεναρίων

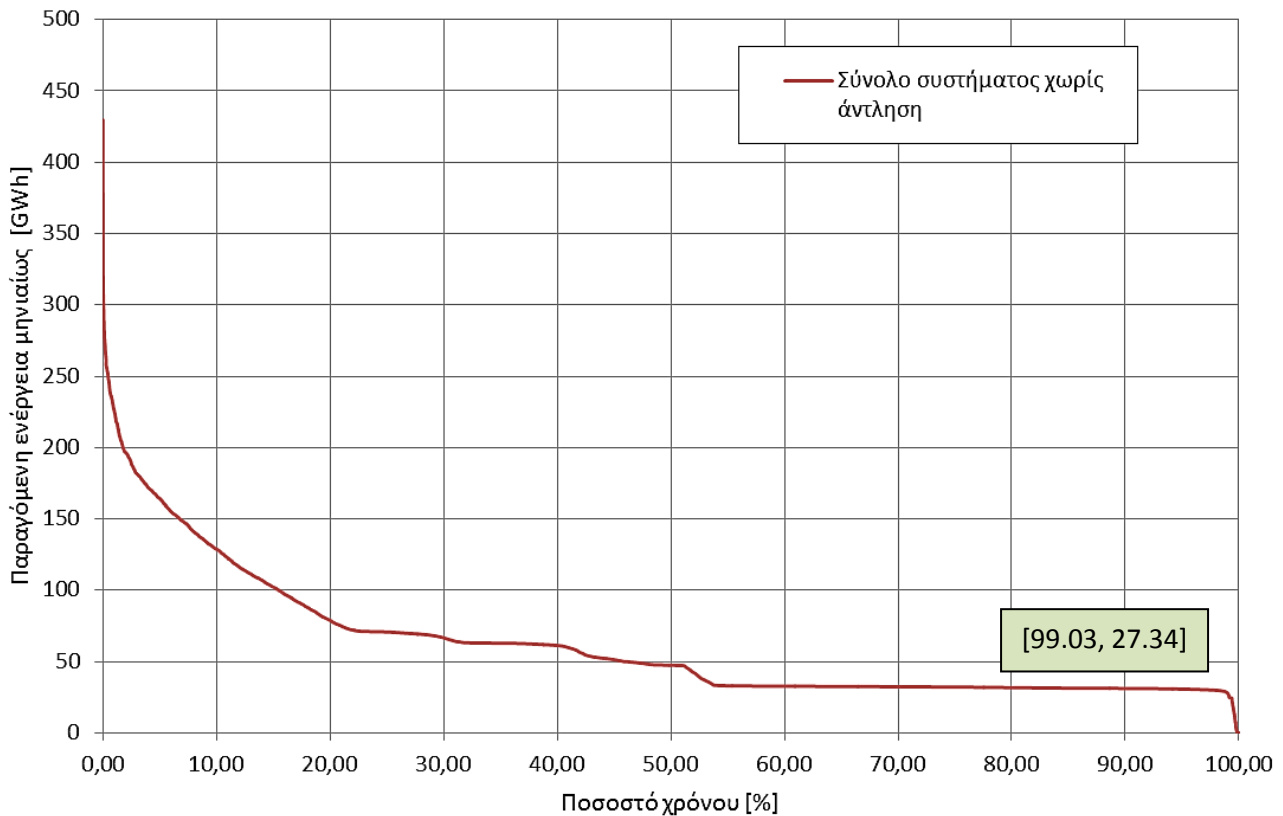
5.15.1. Σενάριο Σ1: Απουσία αντλητικής διάταξης

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του σεναρίου Σ1 υπό τη μορφή των εξαγομένων καμπυλών διαρκείας. Ο Υδρονομέας δεν παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής αυτών των καμπυλών. Από την εξαγόμενη χρονοσειρά της παραγόμενης ενέργειας για κάθε επιμέρους έργο του υδροσυστήματος κατασκευάστηκαν οι καμπύλες διαρκείας μέσω ταξινόμησης των τιμών από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη. Η ταξινόμηση έγινε με χρήση του Microsoft Excel και της συνάρτησης «small». Στη συνέχεια διακρίνουμε τις καμπύλες διαρκείας κάθε επιμέρους ΥΗΣ αλλά και του συνόλου τους για την περίοδο προσομοίωσης που είναι 1000 έτη. Να σημειώσουμε πως η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε στο εν λόγω σενάριο είναι η Total Generated Firm Power.



Σχολιασμός θα γίνει μόνο για την ανωτέρω καμπύλη, τα υπόλοιπα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά και γίνεται ευρύτερος σχολιασμός στο τέλος κάθε υποενότητας και σεναρίου. Στη συγκεκριμένη καμπύλη διακρίνουμε πως η τιμή της πρωτεύουσας ενέργειας είναι 12,45 GWh, ενώ το ποσοστό αξιοπιστίας είναι 99,12%. Ο εντοπισμός της πρωτεύουσας ενέργειας καθώς και του αντίστοιχου ποσοστού γίνεται μέσω του σημείου όπου εμφανίζεται το πλατό και έχει επισημανθεί με το κόκκινο τετραγωνάκι. Στη συνέχεια παρατίθενται οι καμπύλες για τα εναπομείναντα έργα και το σύστημα ως σύνολο.



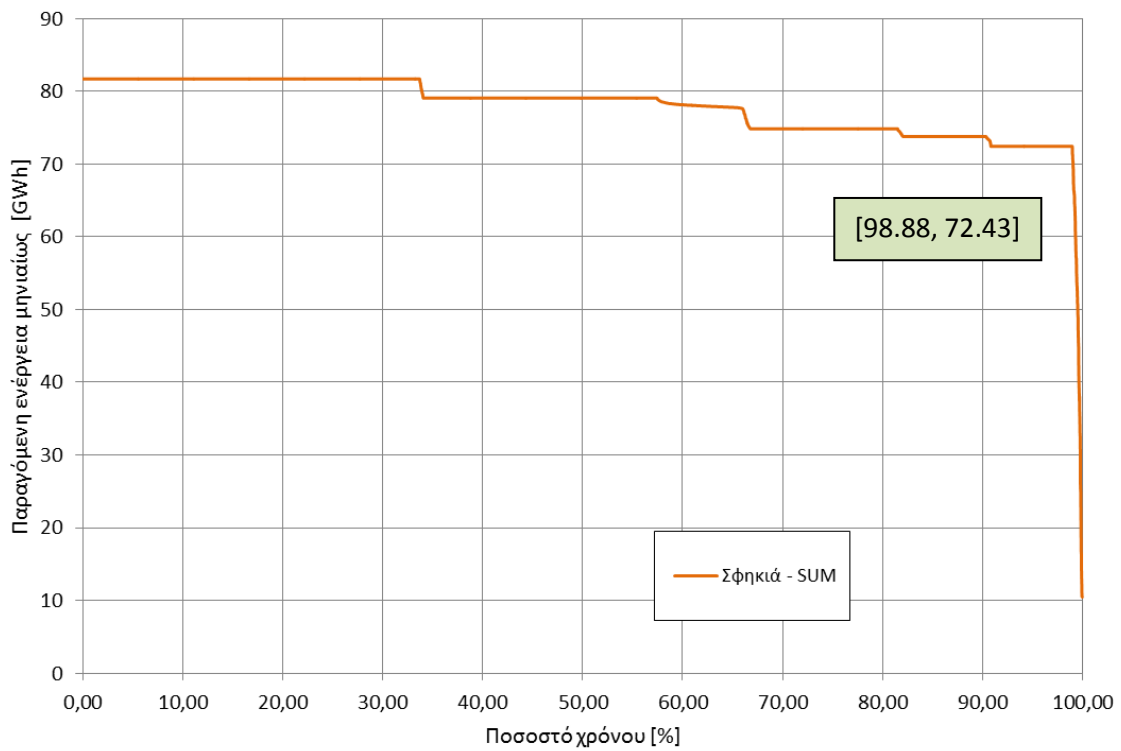
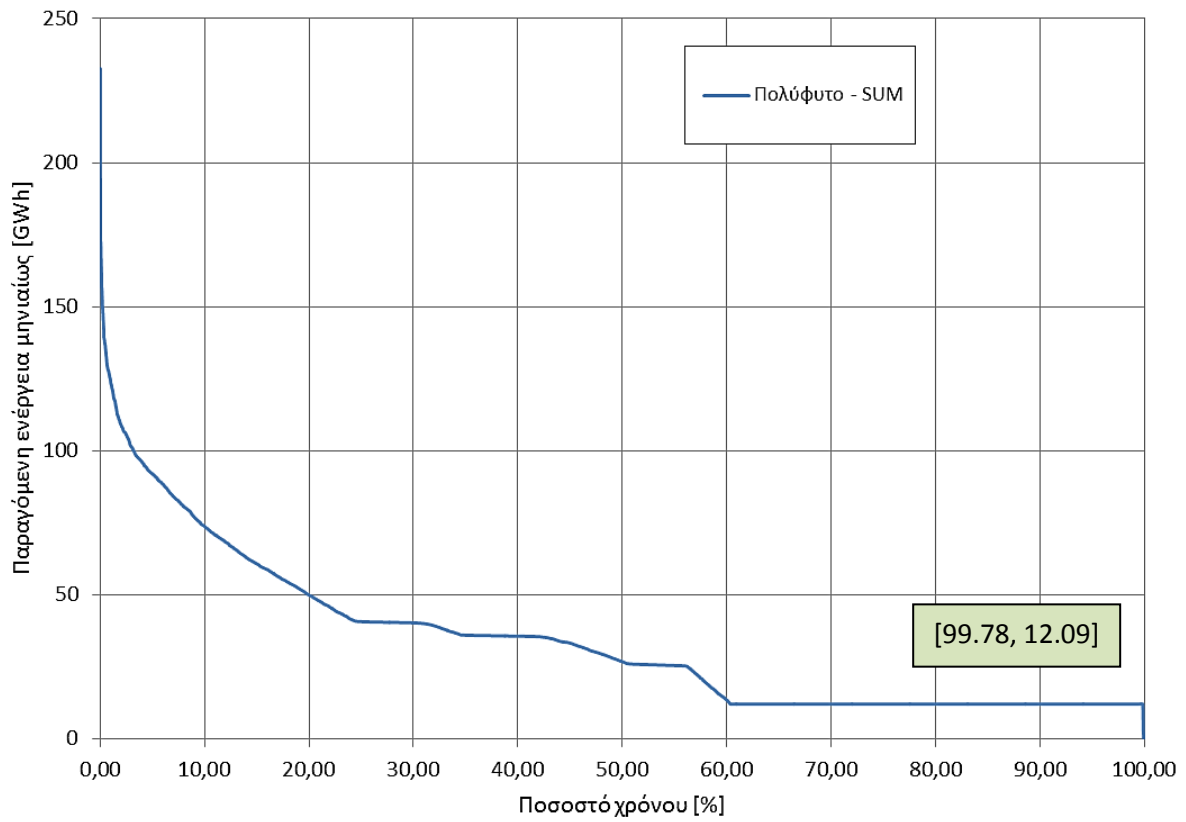


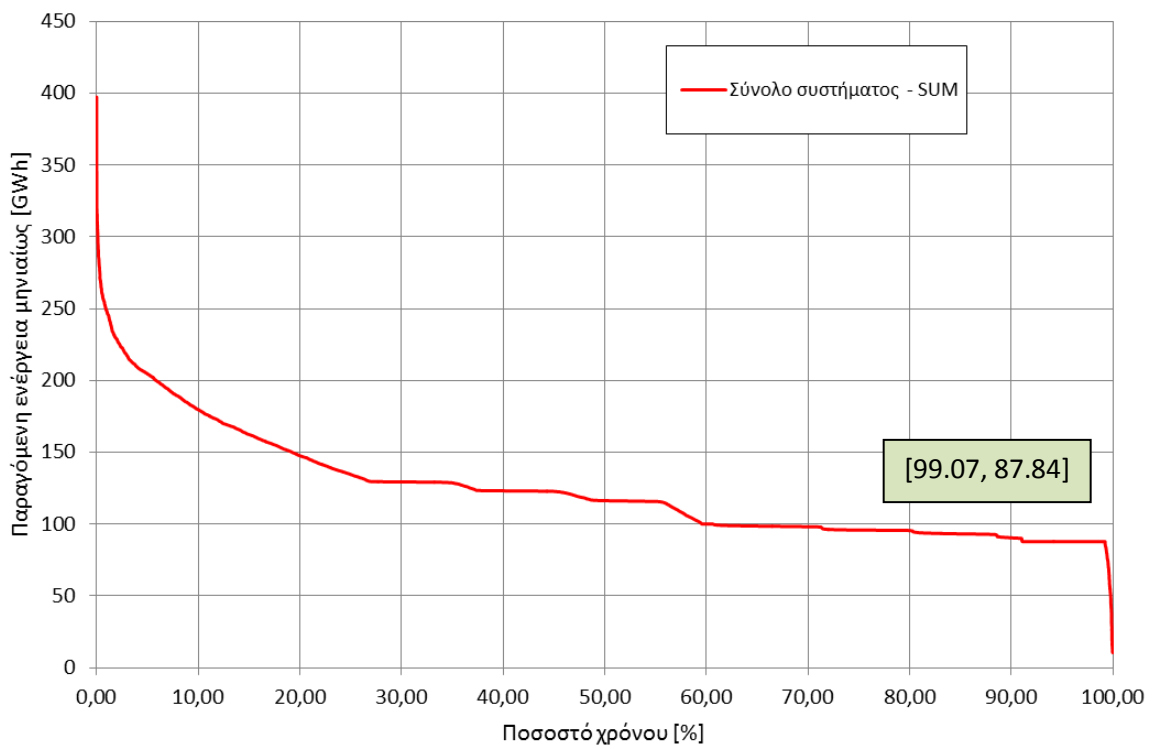
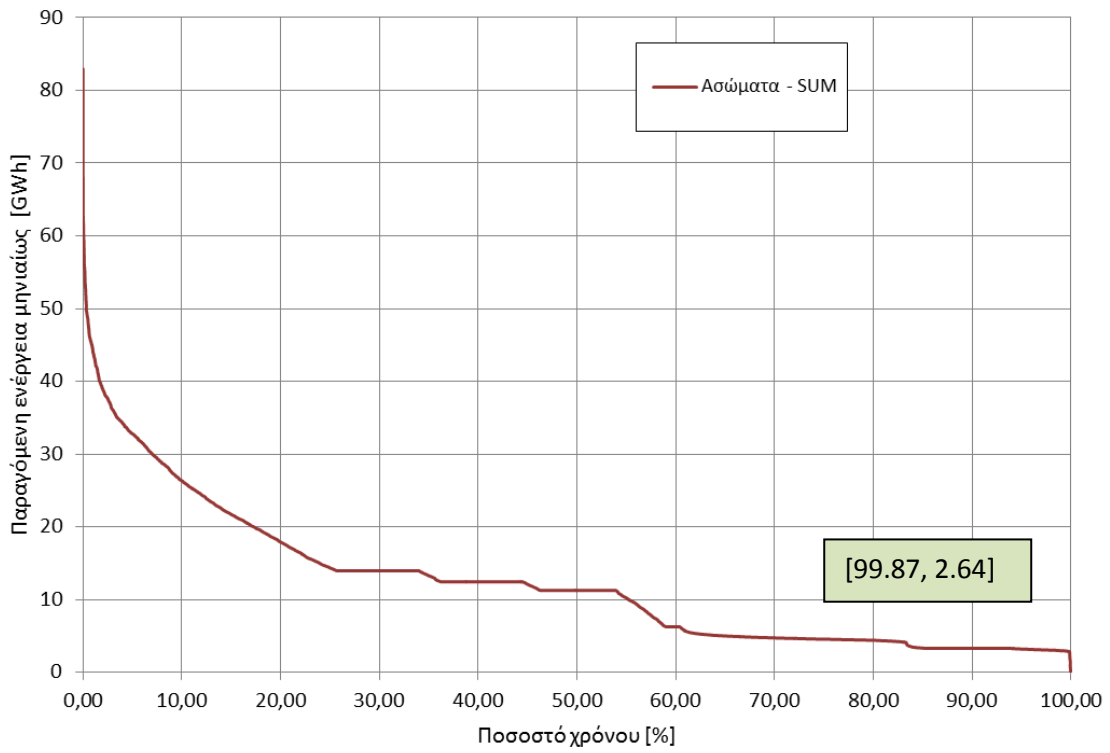
Εικόνες 5-34, 5-35, 5-36, 5-37: Εύρεση αξιοπιστίας και πρωτεύουσας παραγόμενης ενέργειας για το σενάριο Σ1.

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα παρατηρείται η συνεισφορά της πρωτεύουσας ενέργειας του ΥΗΣ Πολυφύτου στην πρωτεύουσα ενέργεια του συνόλου του υδροσυστήματος (12,45 GWh έναντι 27,34 GWh). Τα δύο μικρότερα έργα λόγω μικρότερου ωφέλιμου όγκου και ύψους πτώσης παρουσιάζουν μειωμένη συνεισφορά στη συνολική ενεργειακή παραγωγή. Σε κάθε περίπτωση, τα πλατό των καμπυλών διάρκειας είναι αρκετά εκτεταμένα, γεγονός που υποδηλώνει την αξιόπιστη συμπεριφορά ως προς την παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας.

Η επιλογή της συνάρτησης Total Generated Firm Power έναντι της Sum of Generated Firm Power δεν βλάπτει τη γενικότητα της διερεύνησης, μιας και η σύγκριση των δύο συναρτήσεων θα πραγματοποιηθεί από την ανάλυση των σεναρίων Σ2, Σ3 και την μεταξύ τους σύγκριση.

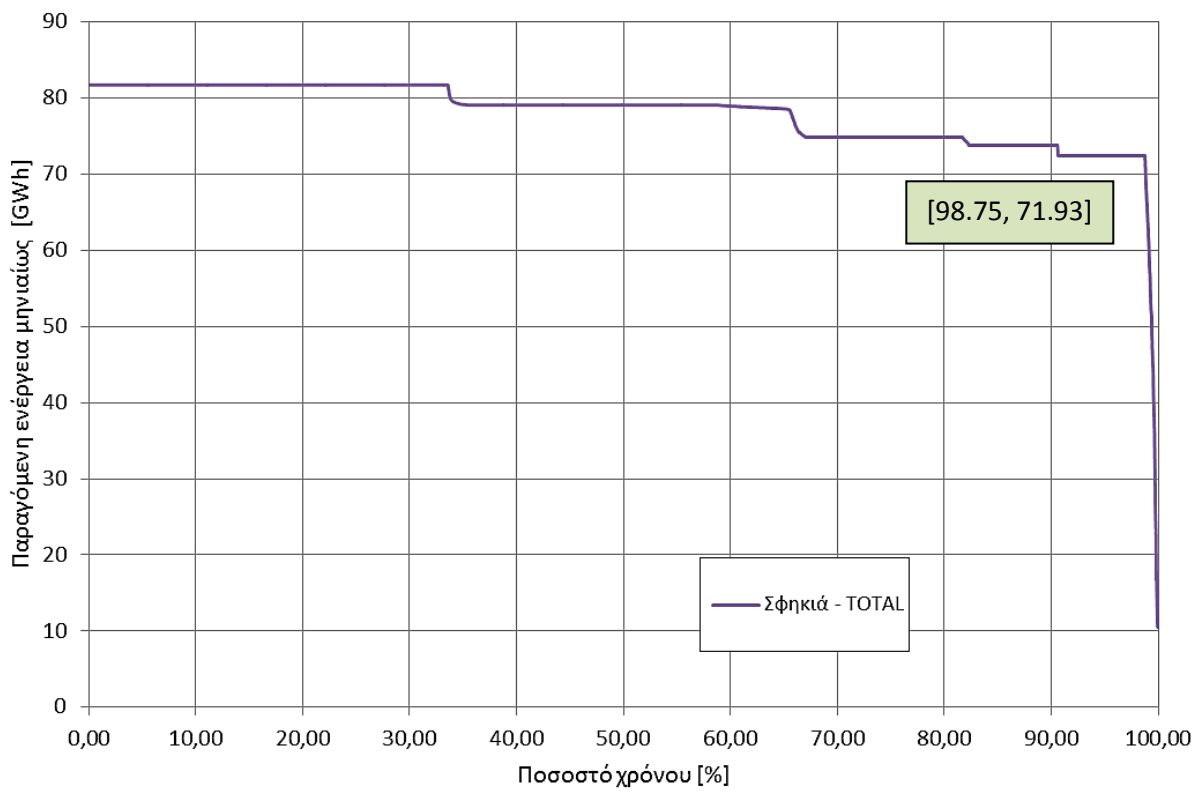
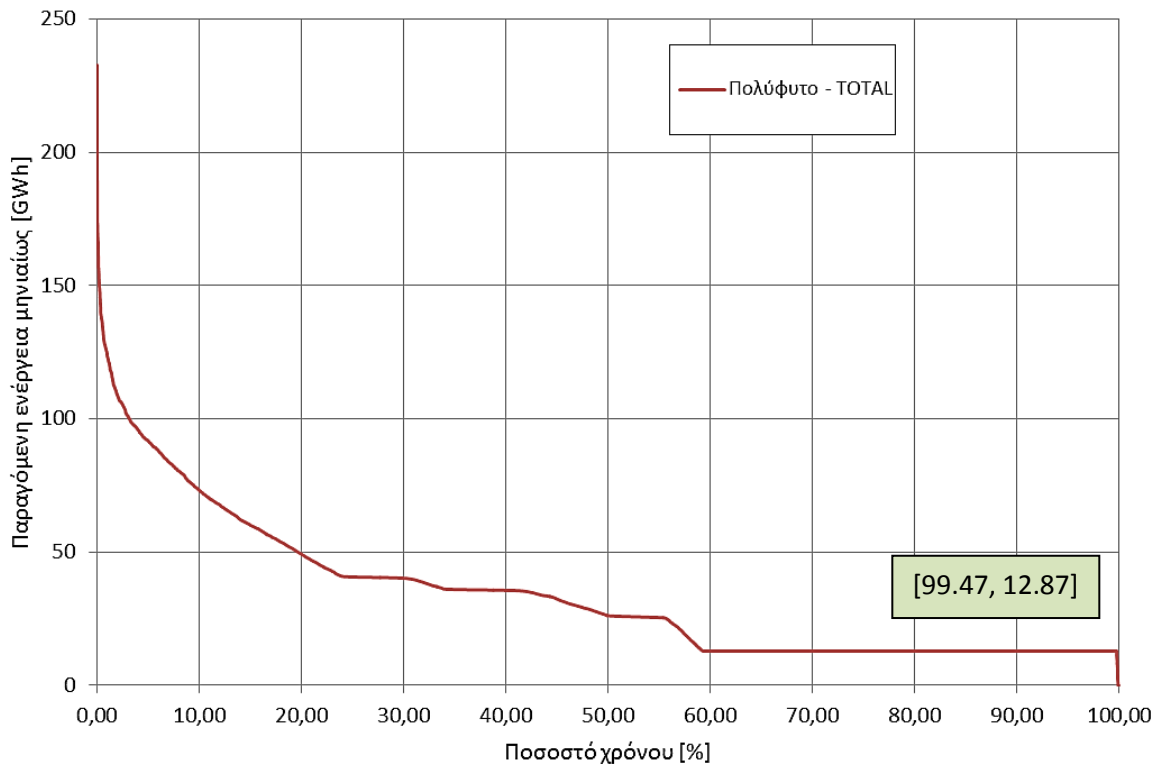
5.15.2. Σενάριο Σ2: Παρουσία αντλητικής διάταξης-απουσία στόχου/Sum of Generated Firm Power

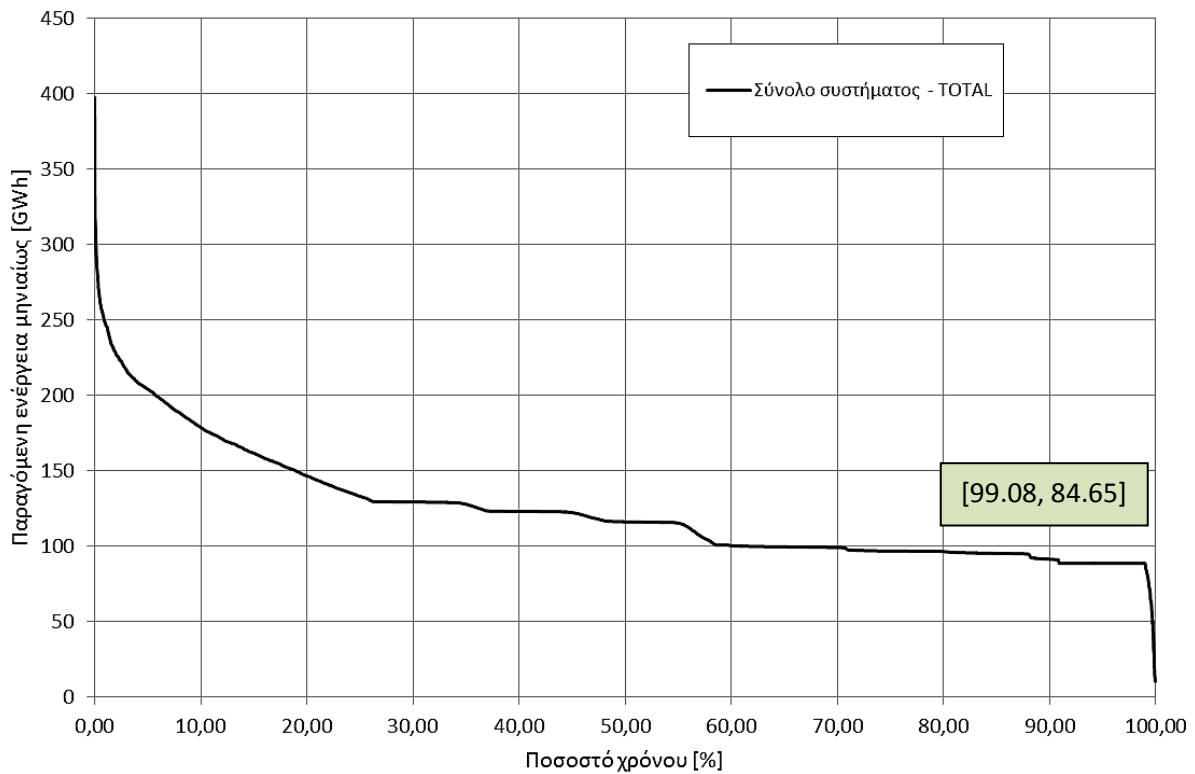
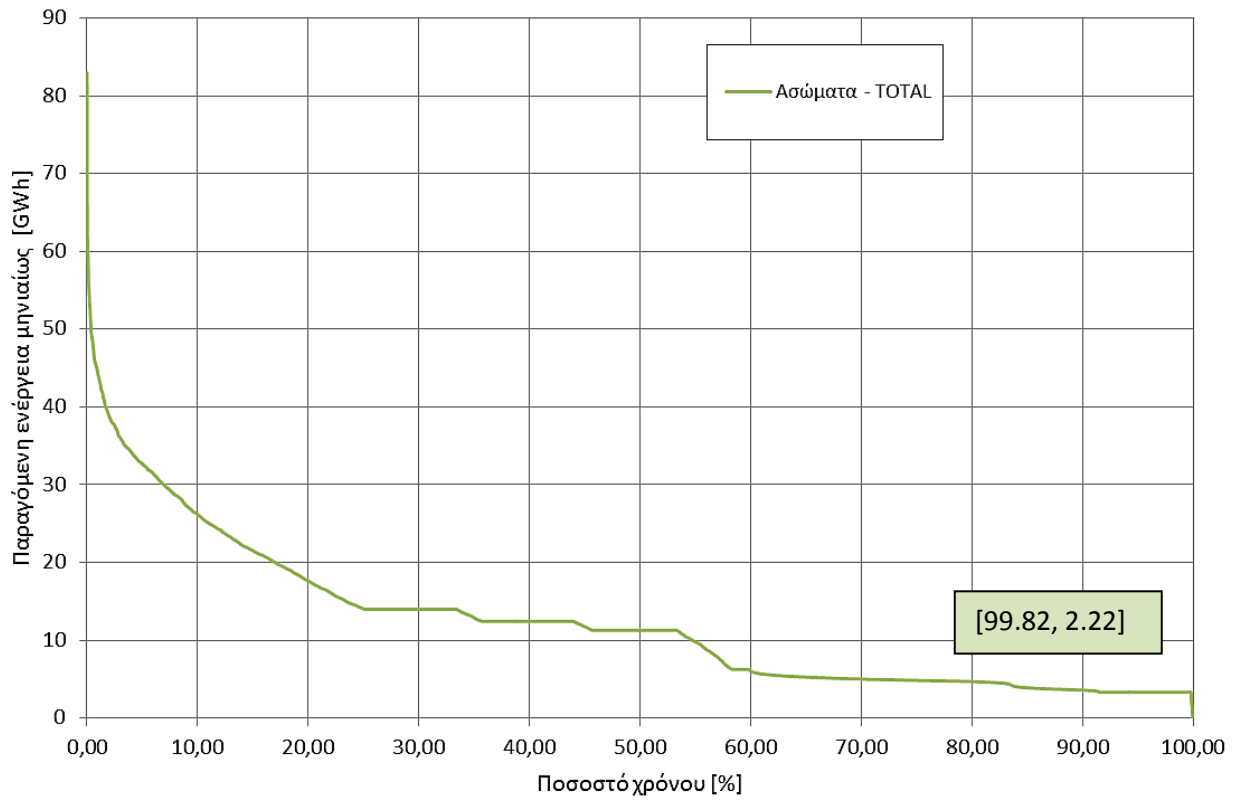




Εικόνες 5-38, 5-39, 5-40, 5-41: Εύρεση αξιοπιστίας και πρωτεύουσας παραγόμενης ενέργειας για το σενάριο Σ2.

5.15.3. Σενάριο Σ2: Παρουσία αντλητικής διάταξης-απουσία στόχου/Total Generated Firm Power

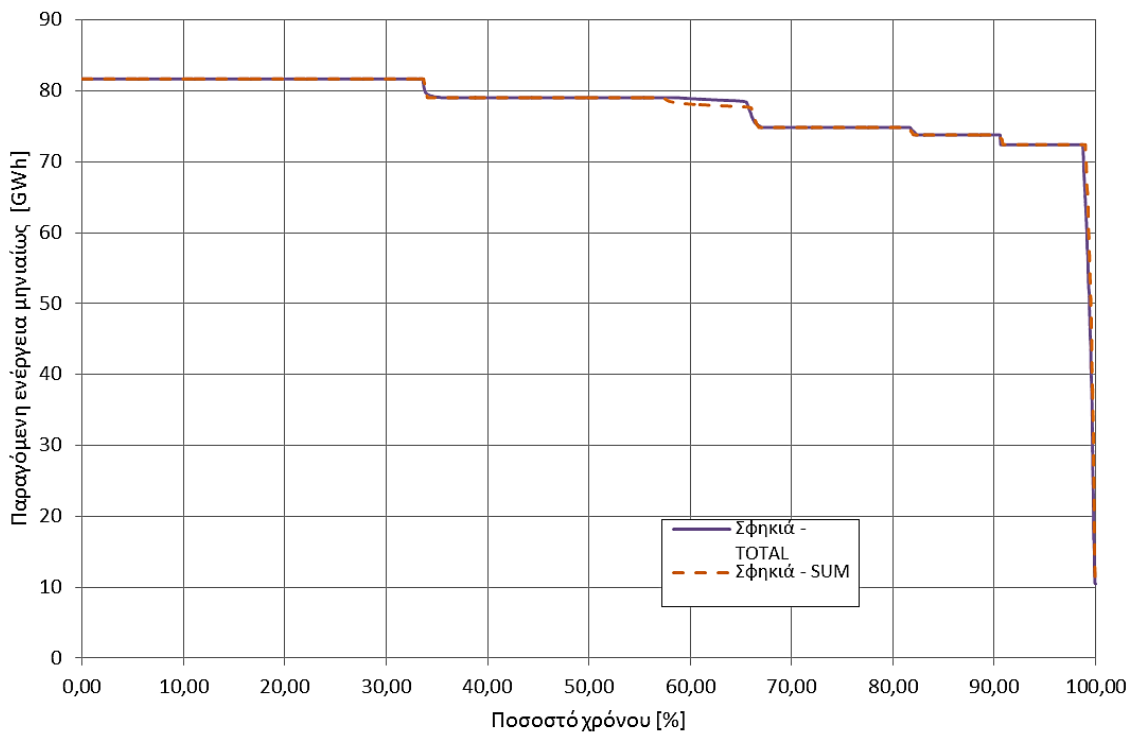
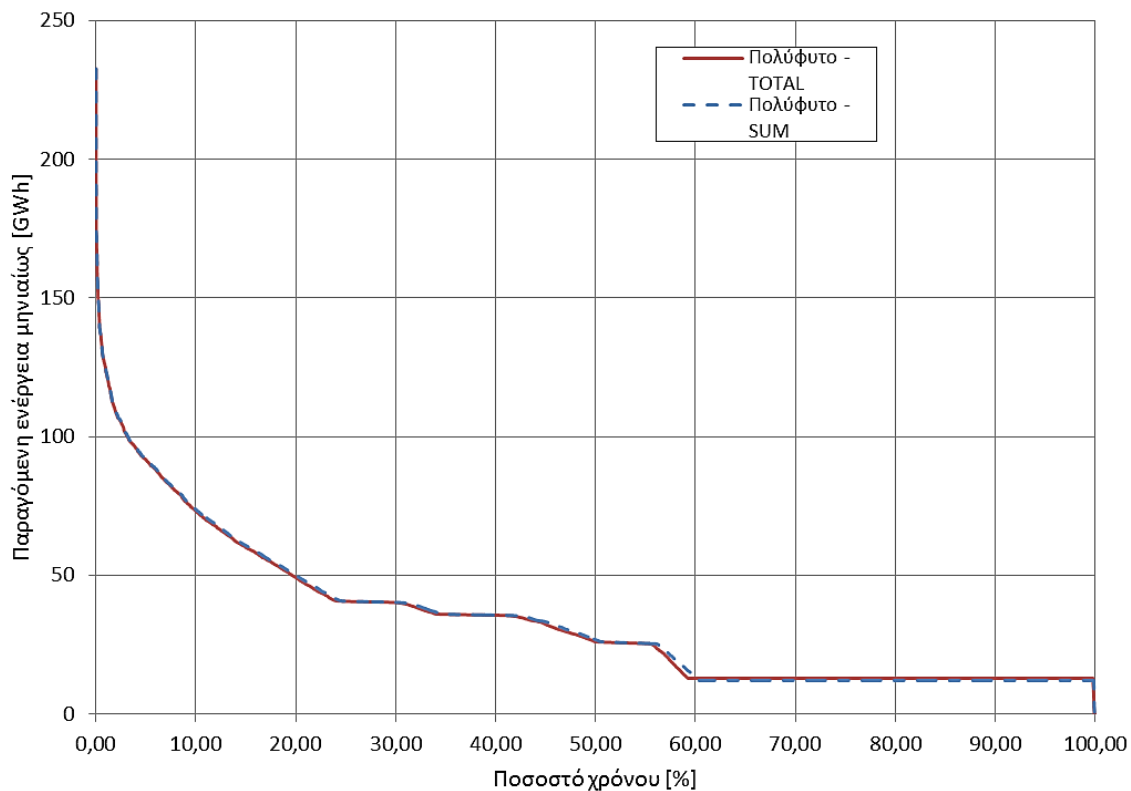


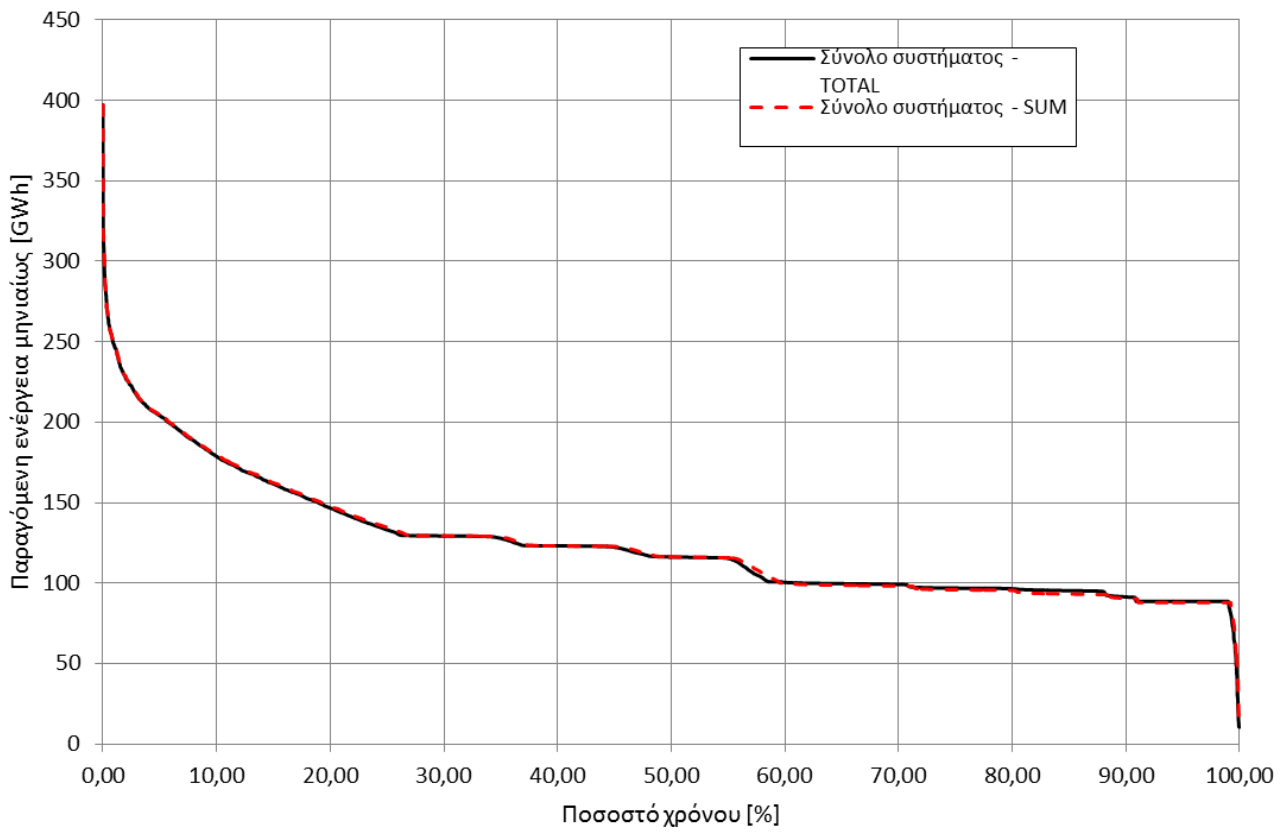
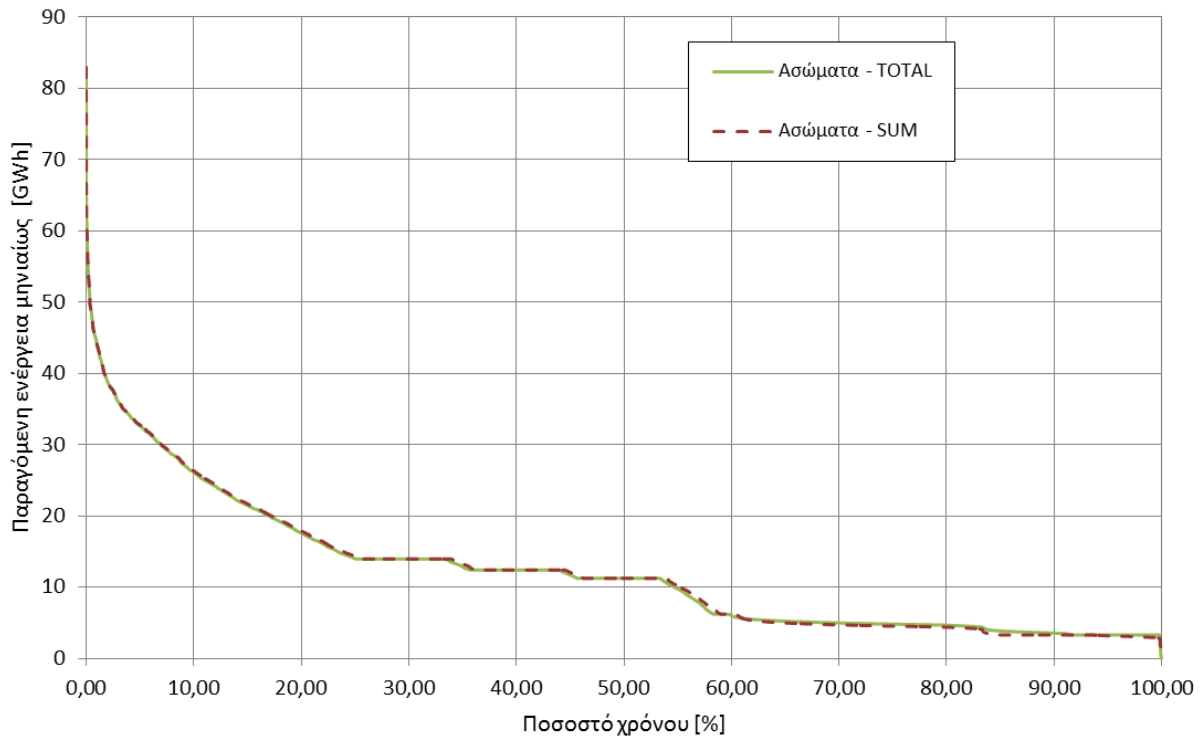


Εικόνες 5-42, 5-43, 5-44, 5-45: Εύρεση αξιοπιστίας και πρωτεύουσας παραγόμενης ενέργειας για το σενάριο Σ3.

5.15.4. Σύγκριση σεναρίων Σ2-Σ3

Στην παρούσα ενότητα συγκρίνονται οι καμπύλες διάρκειας των σεναρίων Σ2 και Σ3, ώστε να επιλεγεί η καταλληλότερη συνάρτηση για την καταληκτική προσομοίωση του υδροσυστήματος Αλιάκμονα.





Εικόνα 5-46, 5-47, 5-48, 5-49: Σύγκριση σεναρίων Σ2-Σ3.

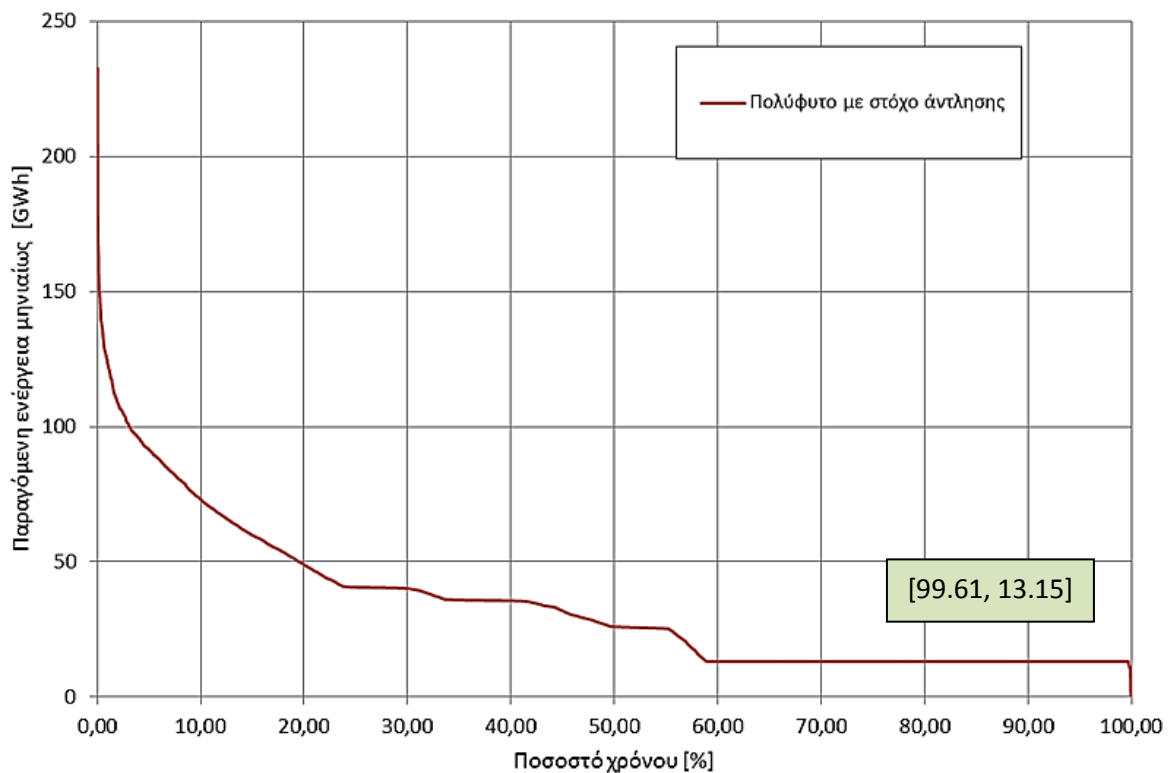
Παρά τις μικρές διαφορές των δύο καμπυλών διάρκειας, παρατηρούμε πως η συνάρτηση Total Generated Firm Power οδηγεί σε υψηλότερες τιμές ενεργειακής παραγωγής του συστήματος για μεγάλα ποσοστά του χρόνου, οι οποίες έχουν και πρακτική χρησιμότητα εφόσον δίνουν μεγαλύτερη πρωτεύουσα ενέργεια. Η συνάρτηση Sum of Generated Firm Power δίνει μεγαλύτερη τιμή πρωτεύουσας ενέργειας από την Total Generated Firm Power μόνο για τον ΥΗΣ Σφηκιάς ενώ στα υπόλοιπα έργα (αλλά και στο σύνολο) η εικόνα είναι αντιδιαμετρική, με την Total Generated Firm Power να δίνει μεγαλύτερες τιμές.

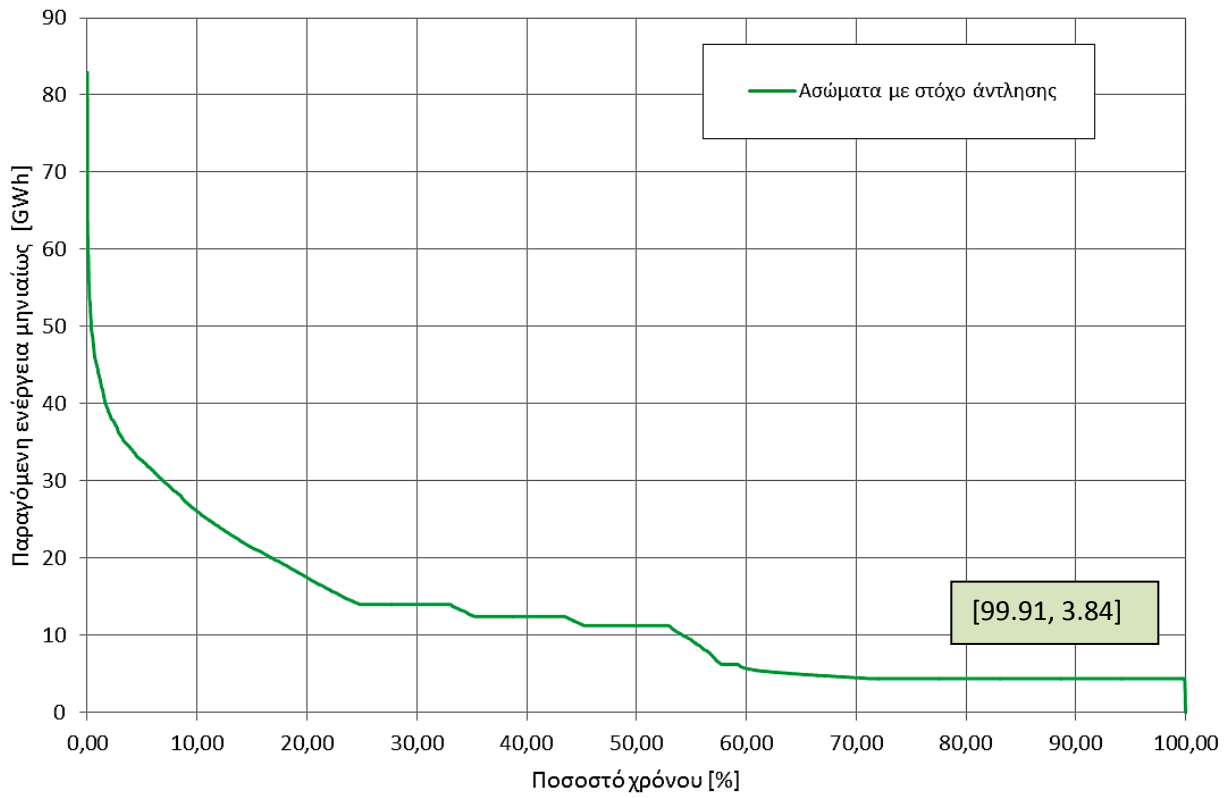
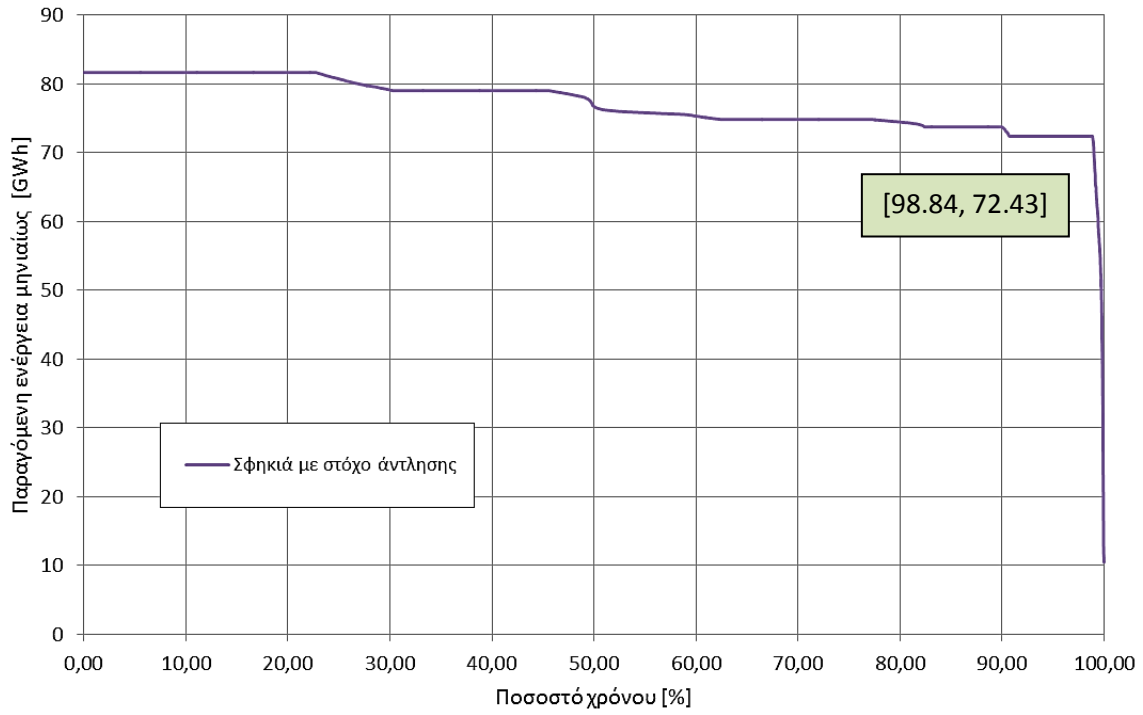
Από τις παραπάνω αναλύσεις γίνεται εμφανές πως μια πολιτική συνολικής διαχείρισης του υδροσυστήματος όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.7 έχει πλεονεκτική θέση έναντι της κατακερματισμένης. Με άλλα λόγια, η δυναμικότητα του συστήματος μπορεί να αξιοποιηθεί με βέλτιστο τρόπο μέσω ενός κεντρικού και ενιαίου φορέα (όπως η δημόσια ΔΕΗ εν προκειμένω). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής όπου ενδιαφέρει ο σχεδιασμός του συστήματος ως σύνολο θα αξιοποιήσουμε τη συνάρτηση Total Generated Firm Power.

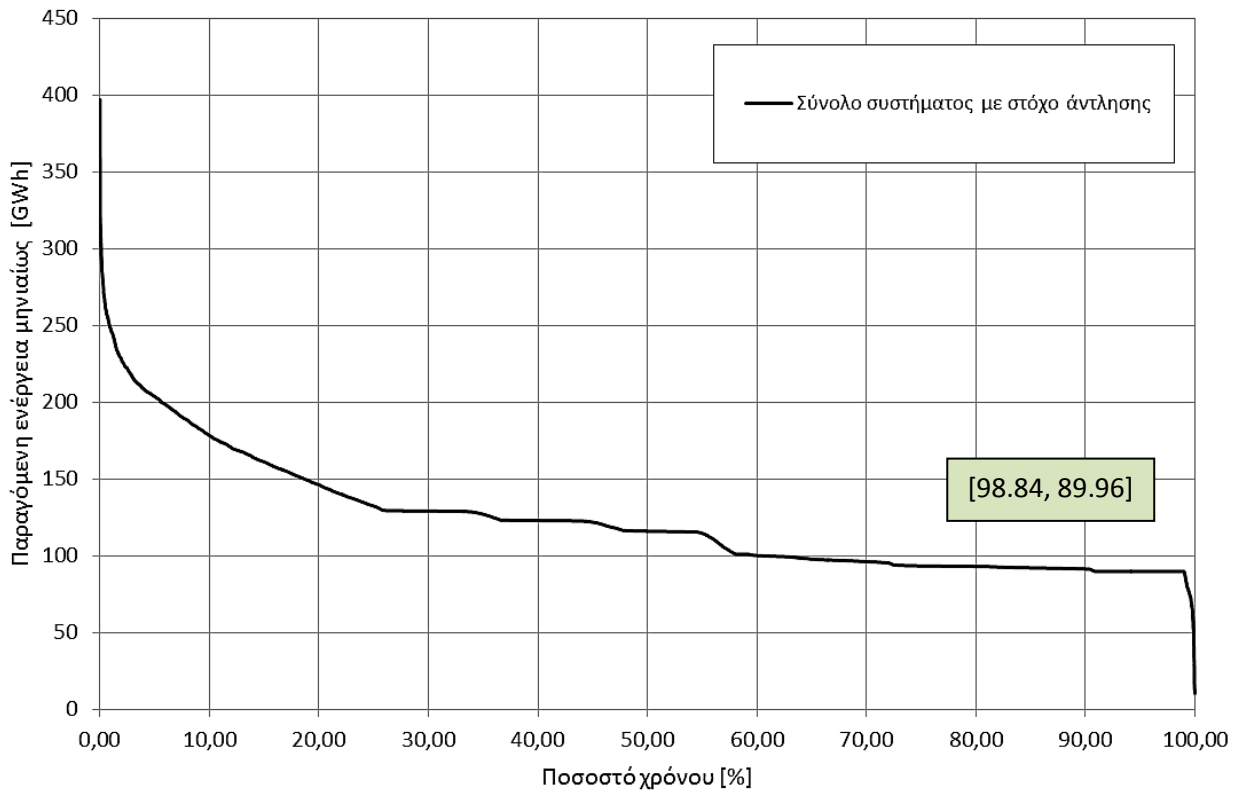
5.15.5. Σενάριο Σ4: Παρουσία αντλητικής διάταξης και στόχου άντλησης/Total Generated Firm Power

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του υδροσυστήματος παρουσία αντλητικής διάταξης και στόχου άντλησης. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα είναι και αυτά που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια κατά το σχεδιασμό του συστήματος συνδυασμένης χρήσης υδροηλεκτρικής και αιολικής ενέργειας.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα των διαφόρων περιπτώσεων.





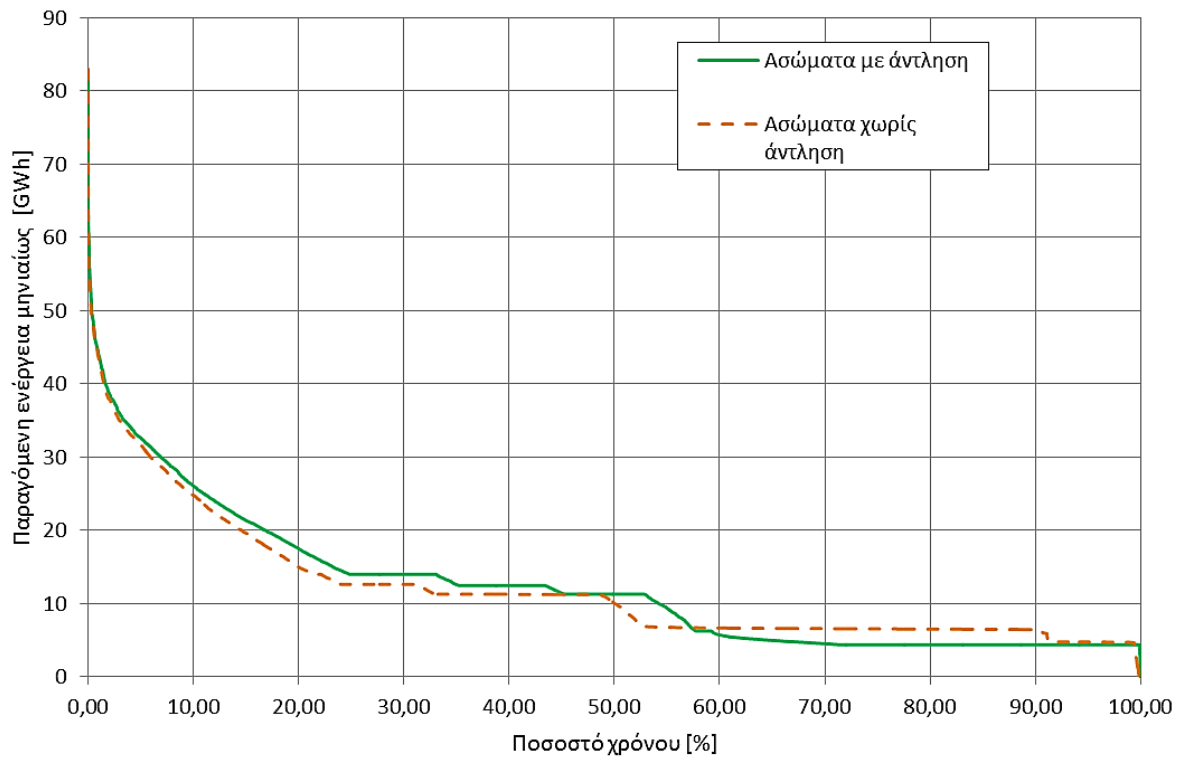
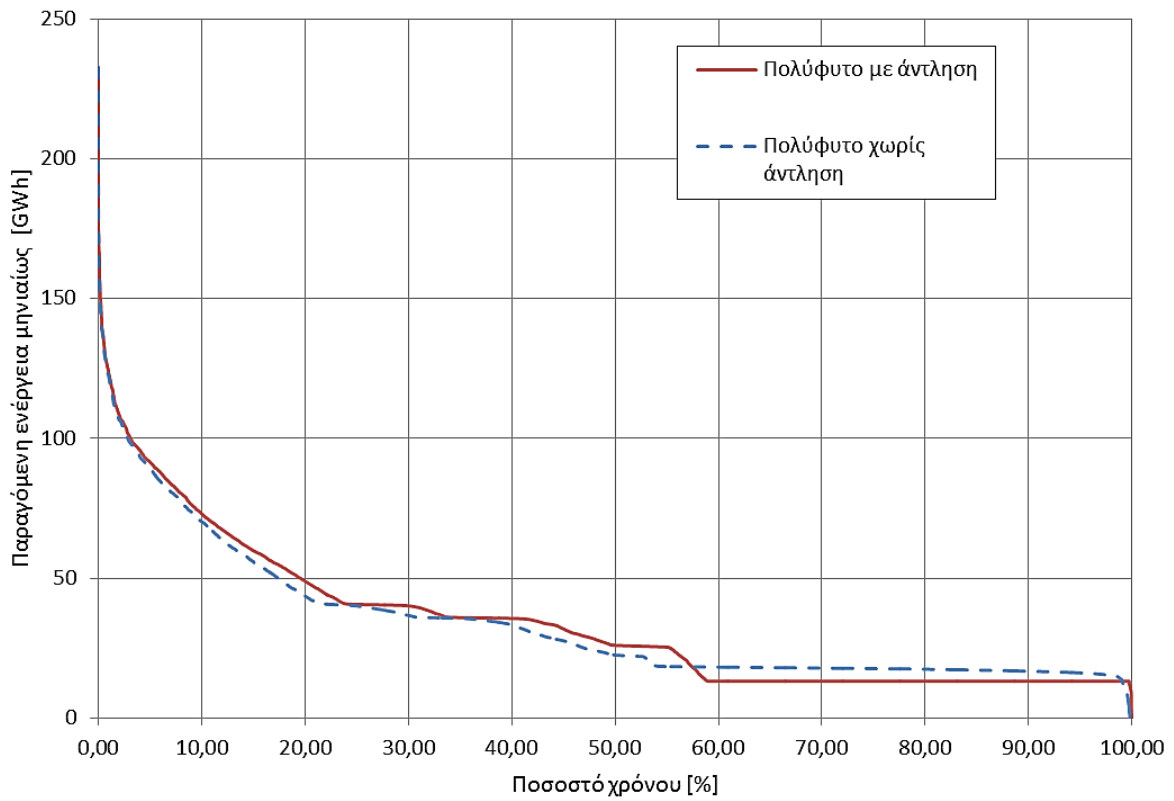


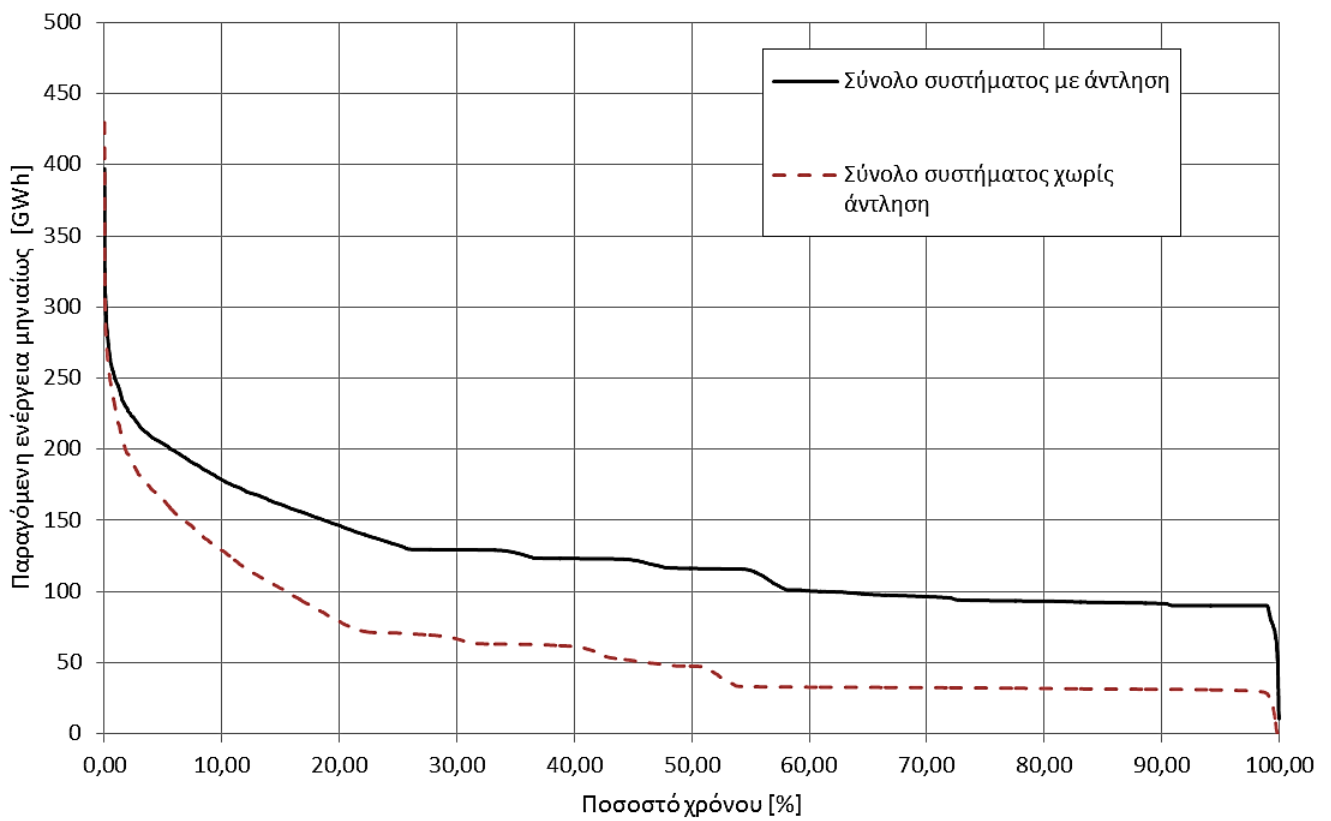
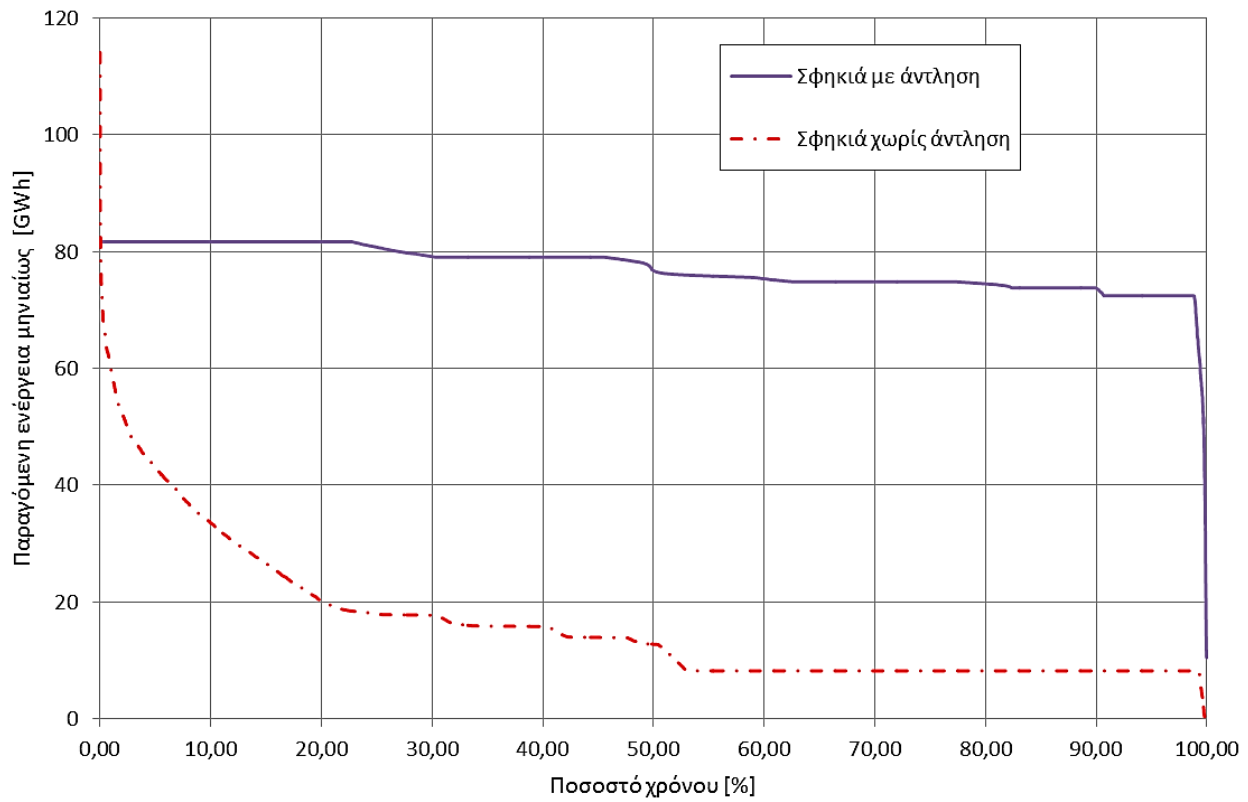
Εικόνες 5-50, 5-51, 5-52, 5-53: Εύρεση αξιοπιστίας και πρωτεύουσας παραγόμενης ενέργειας για το σενάριο Σ4.

Παρατηρείται πως η υδροηλεκτρική παραγωγή του ΥΗΣ Σφηκιάς αδυνατεί να εμφανίσει ομαλή υδροηλεκτρική παραγωγή. Πιο συγκεκριμένα, η καμπύλη διάρκειας του εν λόγω σταθμού έχει ανώμαλη μορφή, χωρίς πλατό. Ωστόσο, έχει μεγάλη συμβολή στη συνολική παραγόμενη ενέργεια από το σύστημα.

5.16. Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίων και μεταξύ τους συγκρίσεις

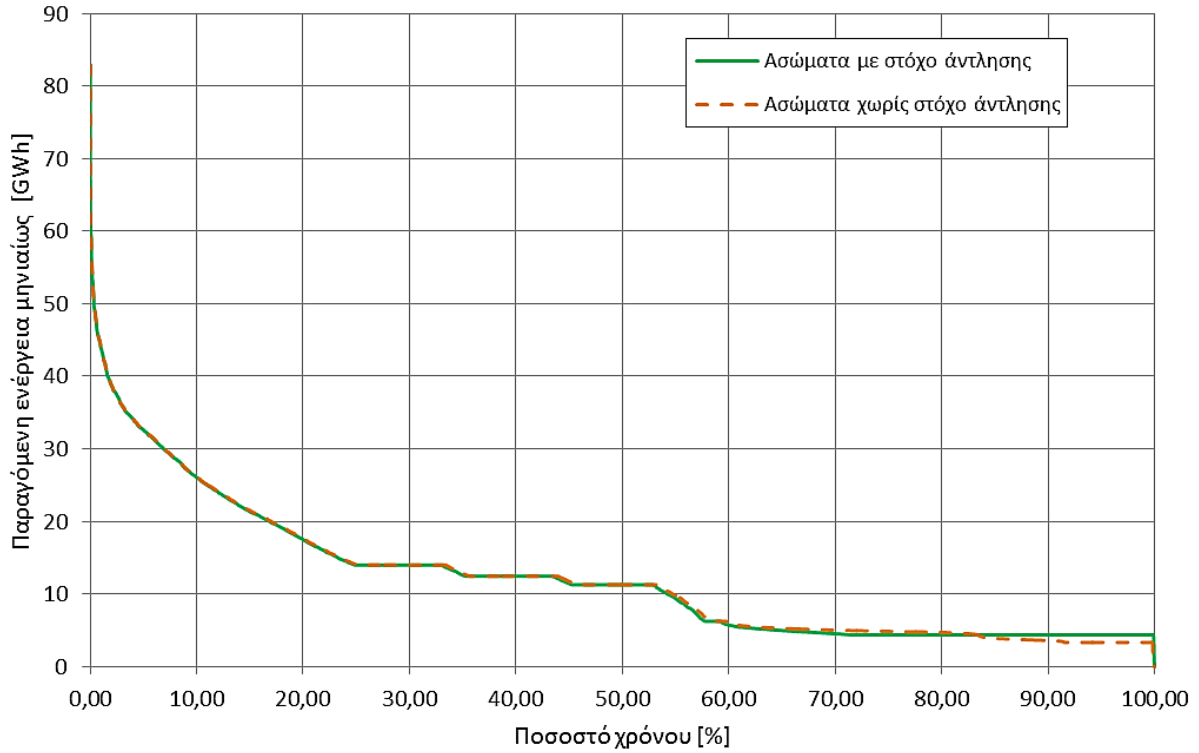
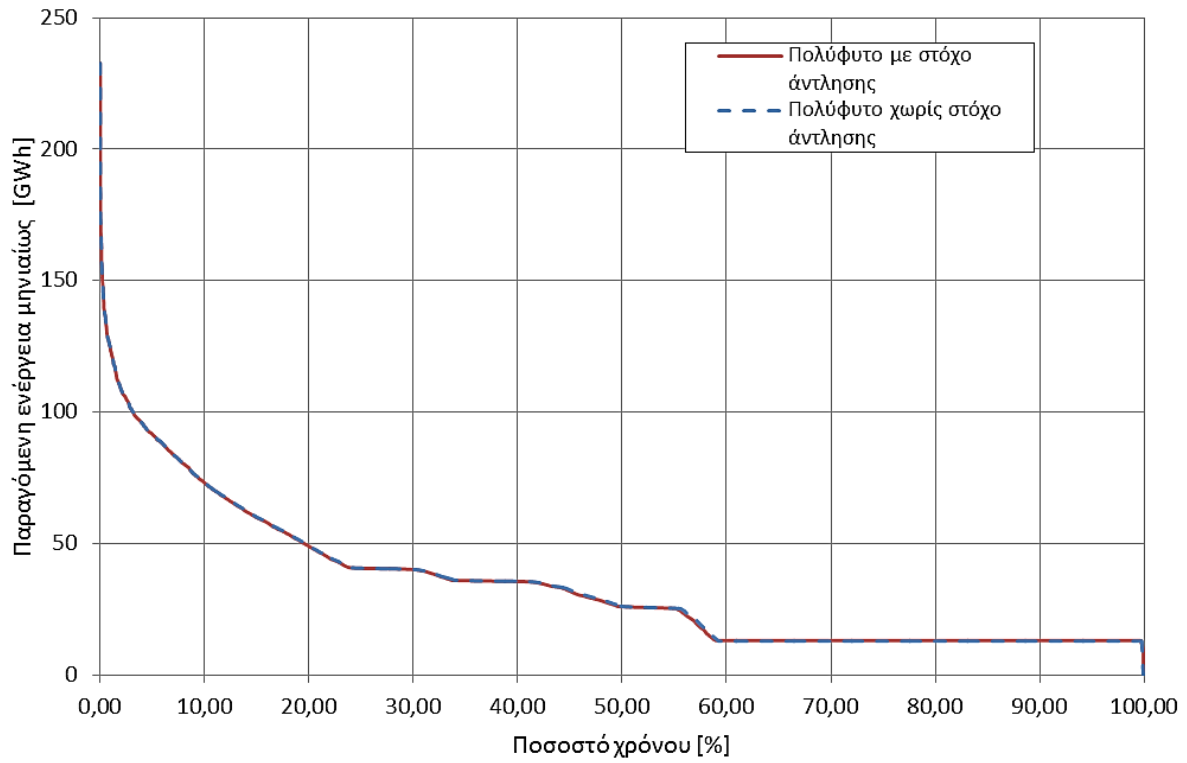
5.16.1. Σύγκριση μεταξύ των Σ1-Σ4

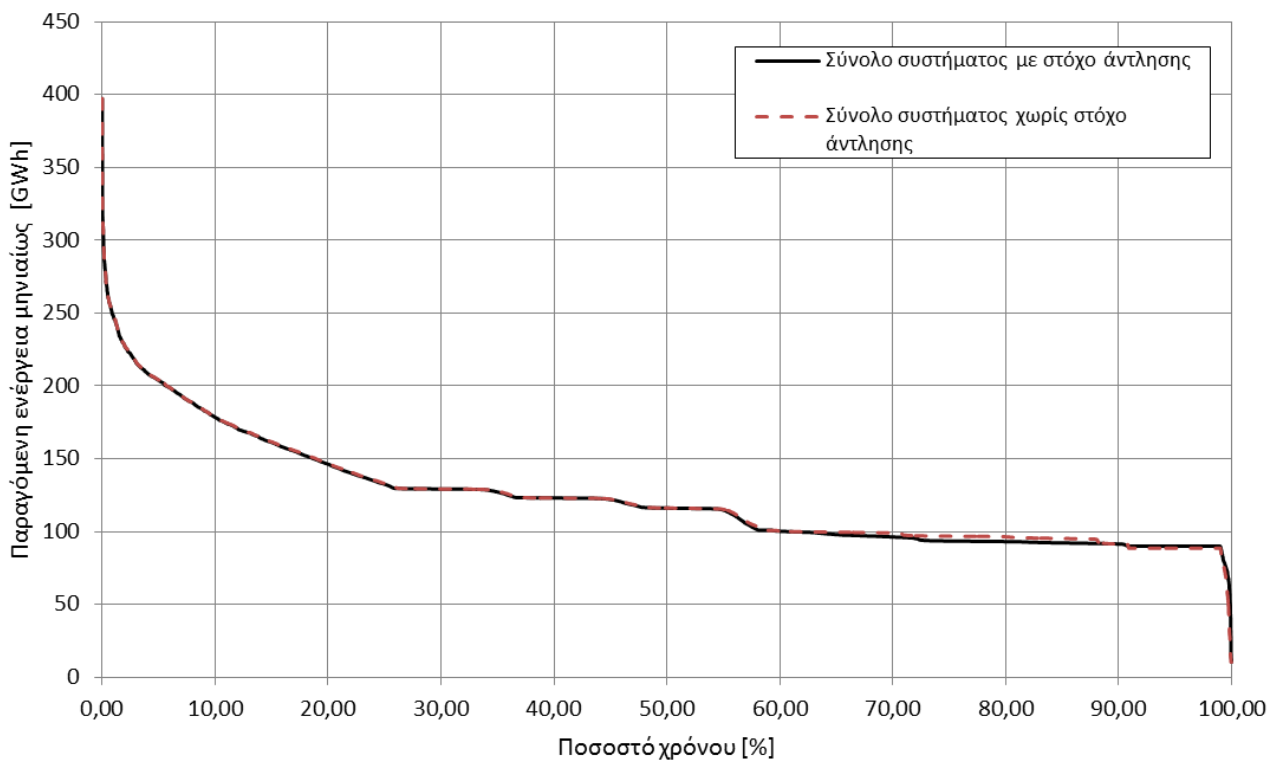
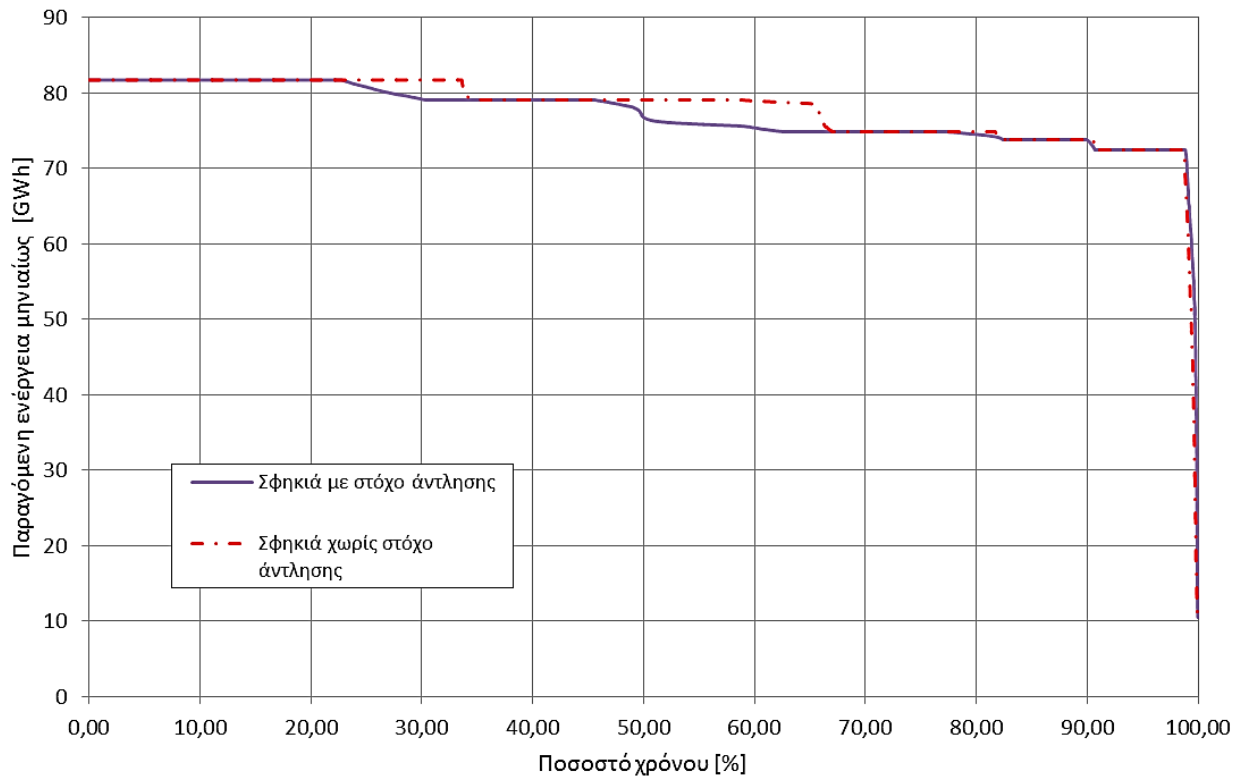




Εικόνες 5-54, 5-55, 5-56, 5-57: Σύγκριση σεναρίων Σ1-Σ4.

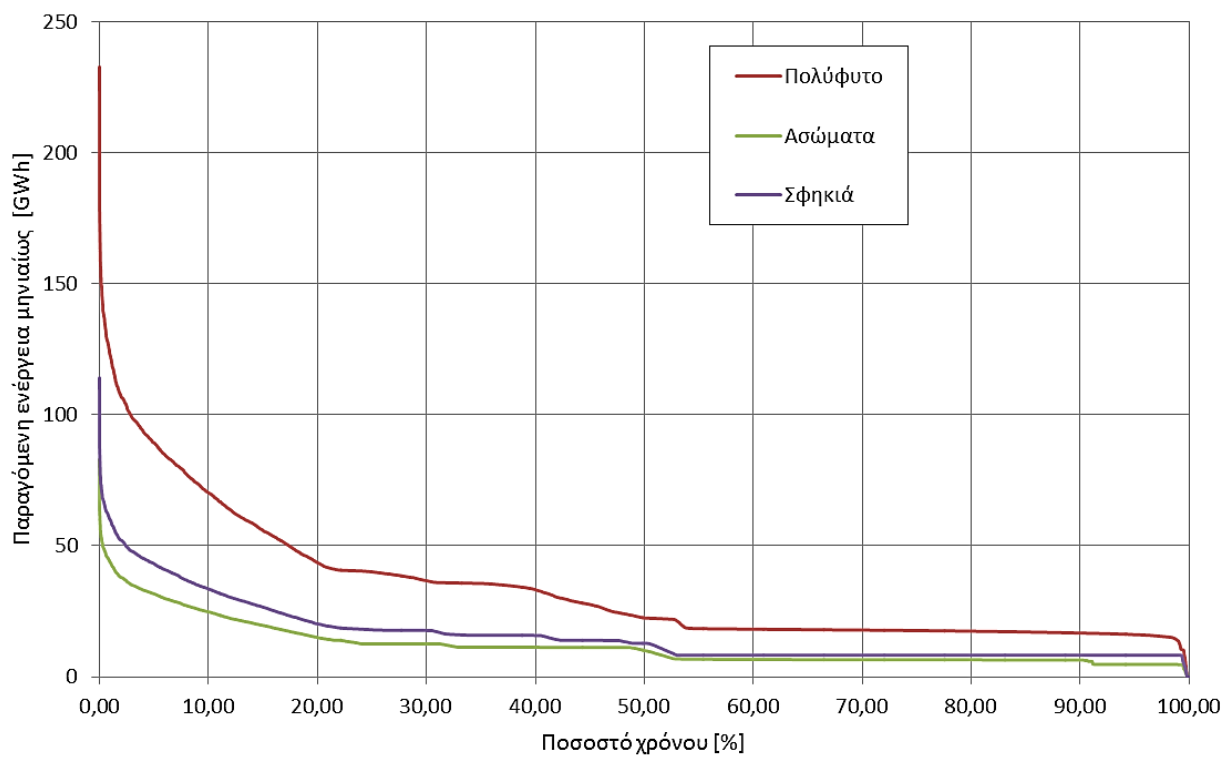
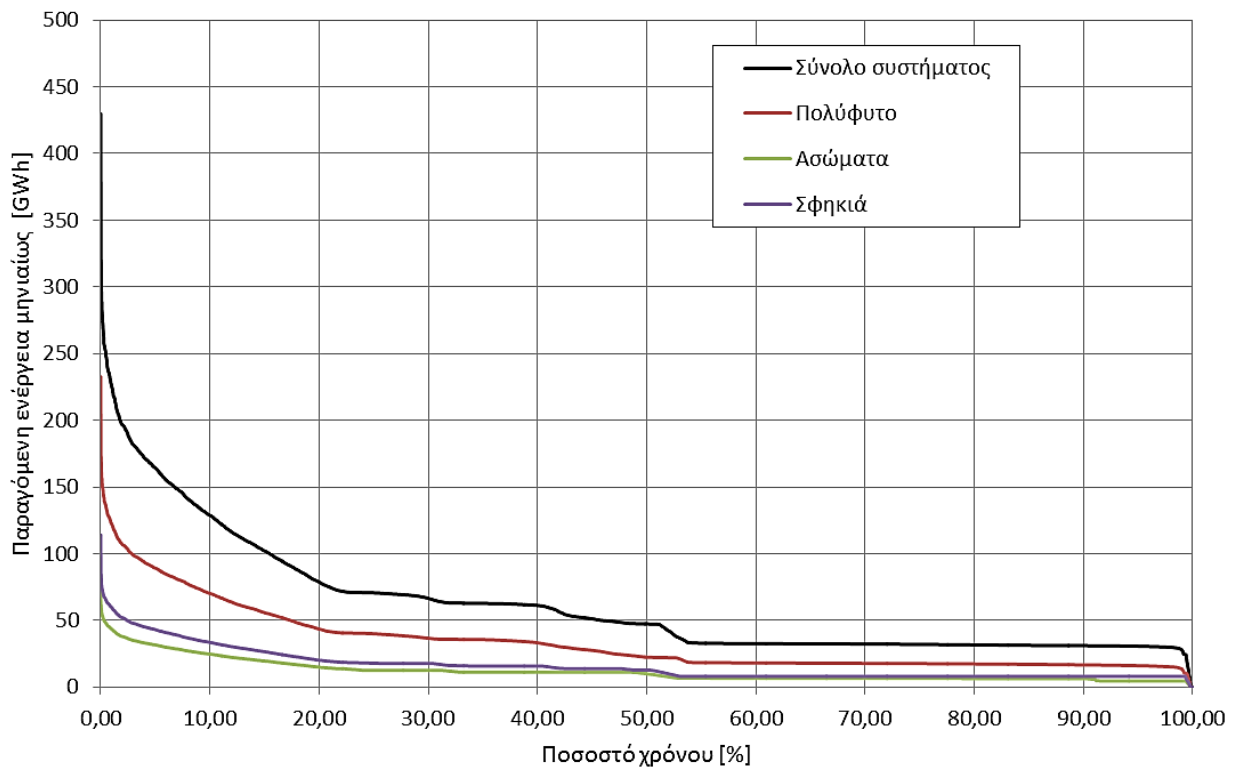
5.16.2. Σύγκριση μεταξύ των Σ3-Σ4





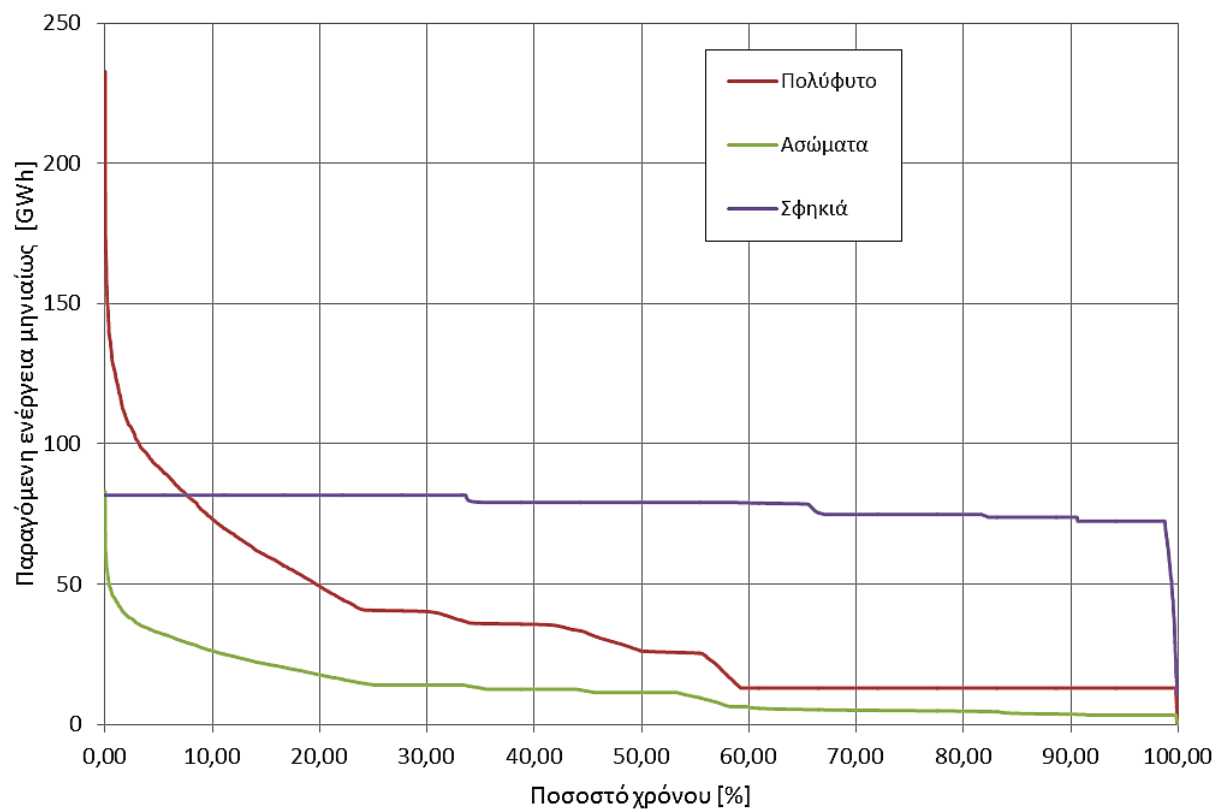
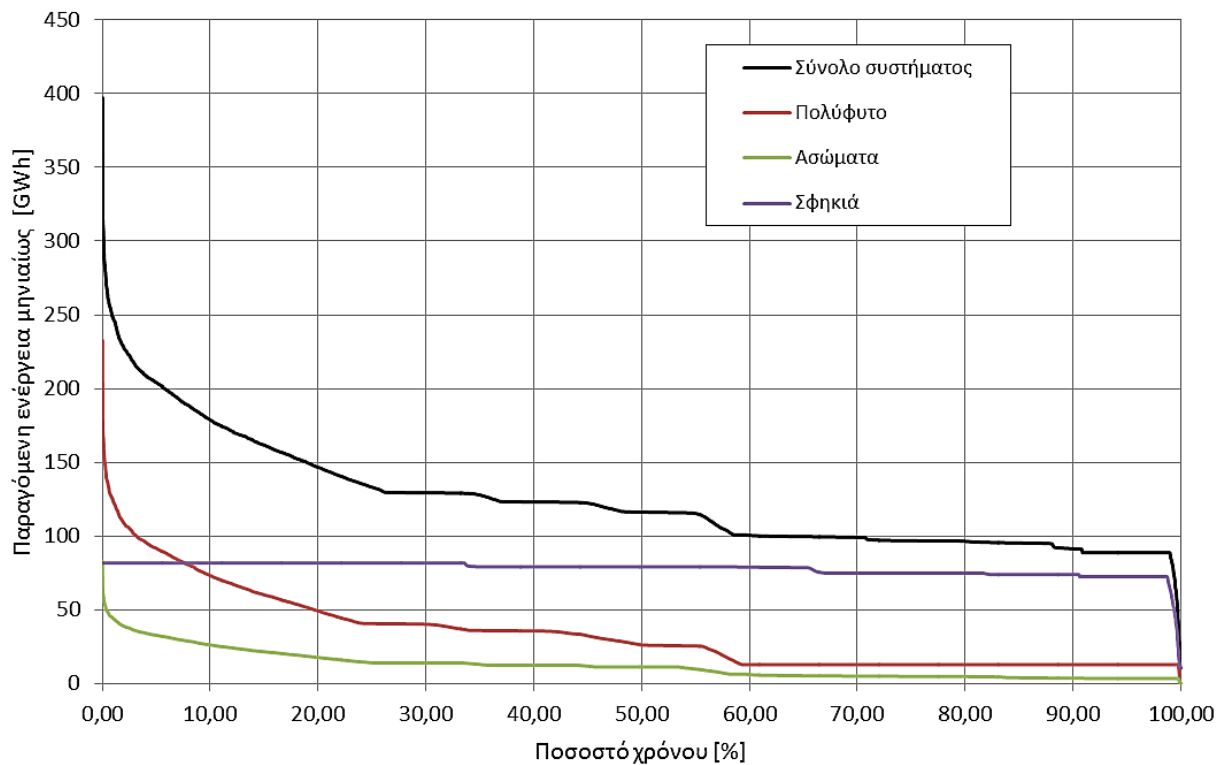
Εικόνες 5-58, 5-59, 5-60, 5-61: Σύγκριση σεναρίων Σ3-Σ4.

5.16.3. Συνοπτικά αποτελέσματα του Σ1



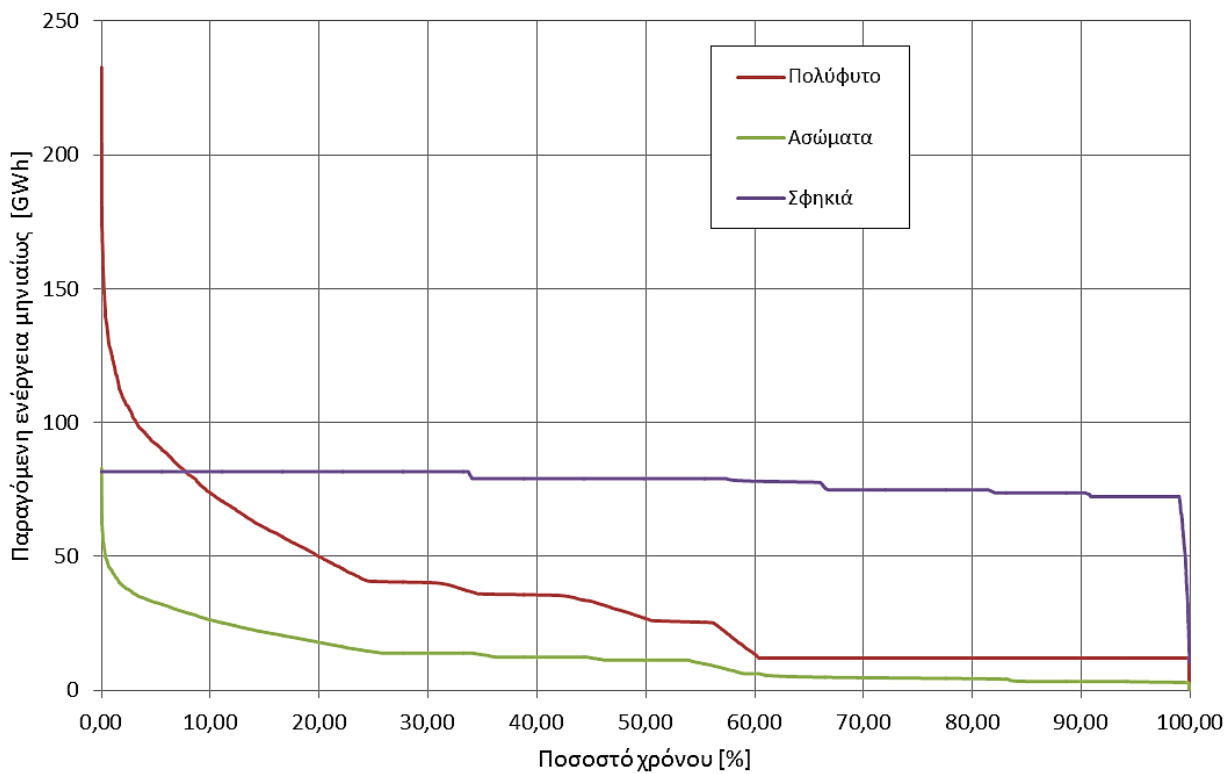
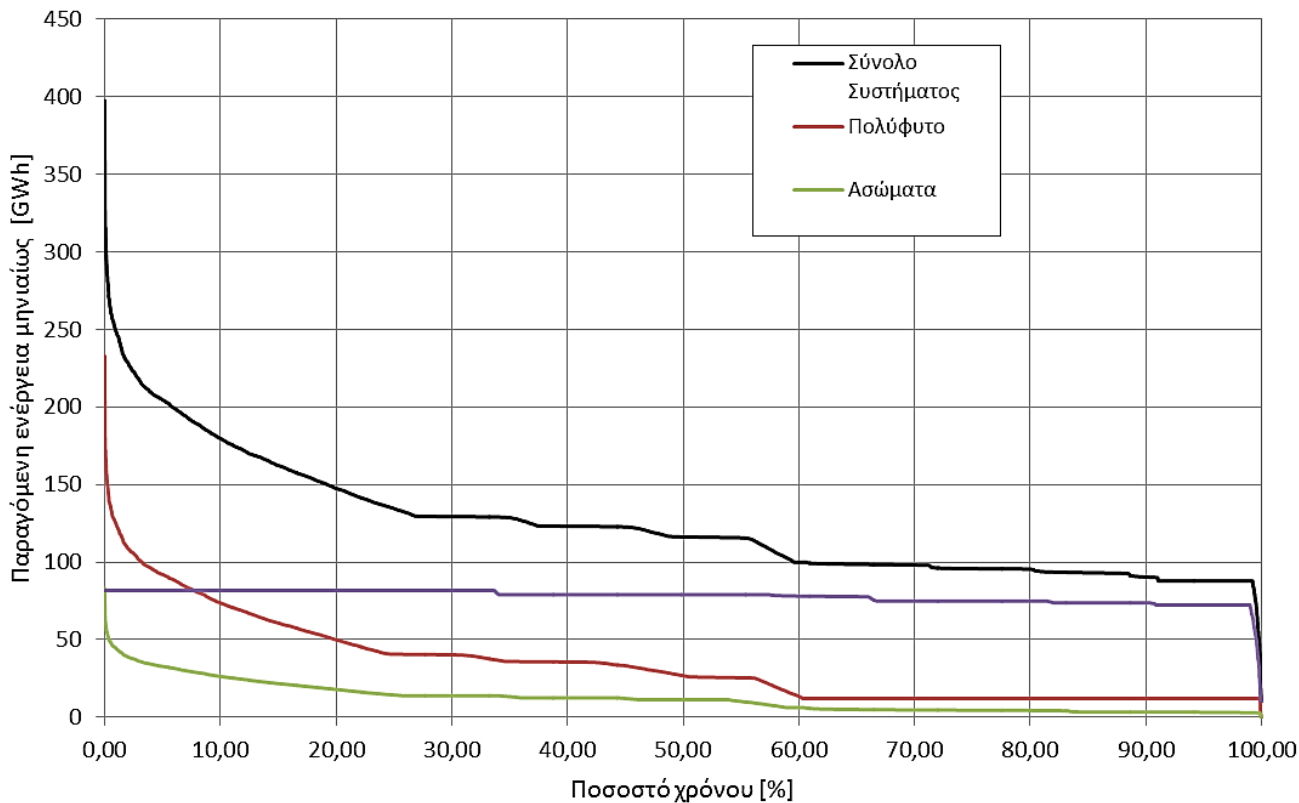
Εικόνες 5-62, 5-63: Συνοπτικά αποτελέσματα σεναρίου Σ1.

5.16.4. Συνοπτικά αποτελέσματα του Σ2



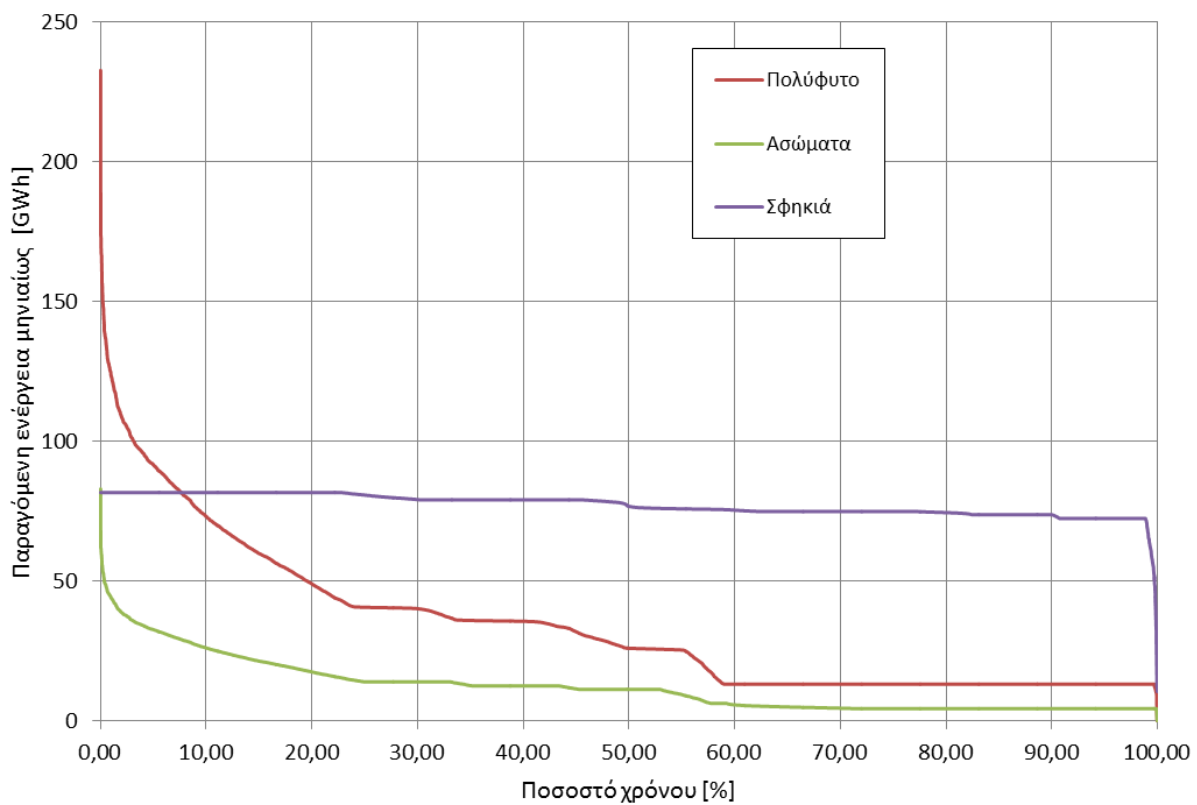
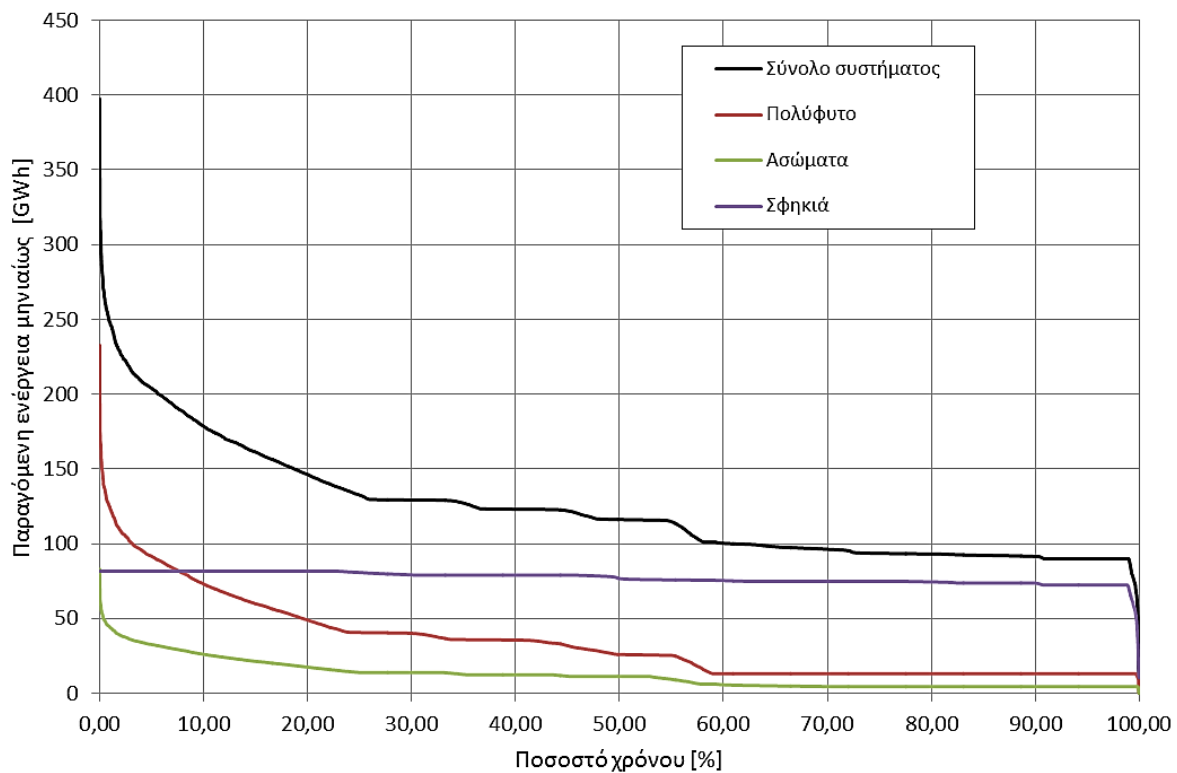
Εικόνες 5-64, 5-65: Συνοπτικά αποτελέσματα σεναρίου Σ2.

5.16.5. Συνοπτικά αποτελέσματα του Σ3



Εικόνες 5-66, 5-67: Συνοπτικά αποτελέσματα σεναρίου Σ3.

5.16.6. Συνοπτικά αποτελέσματα του Σ4

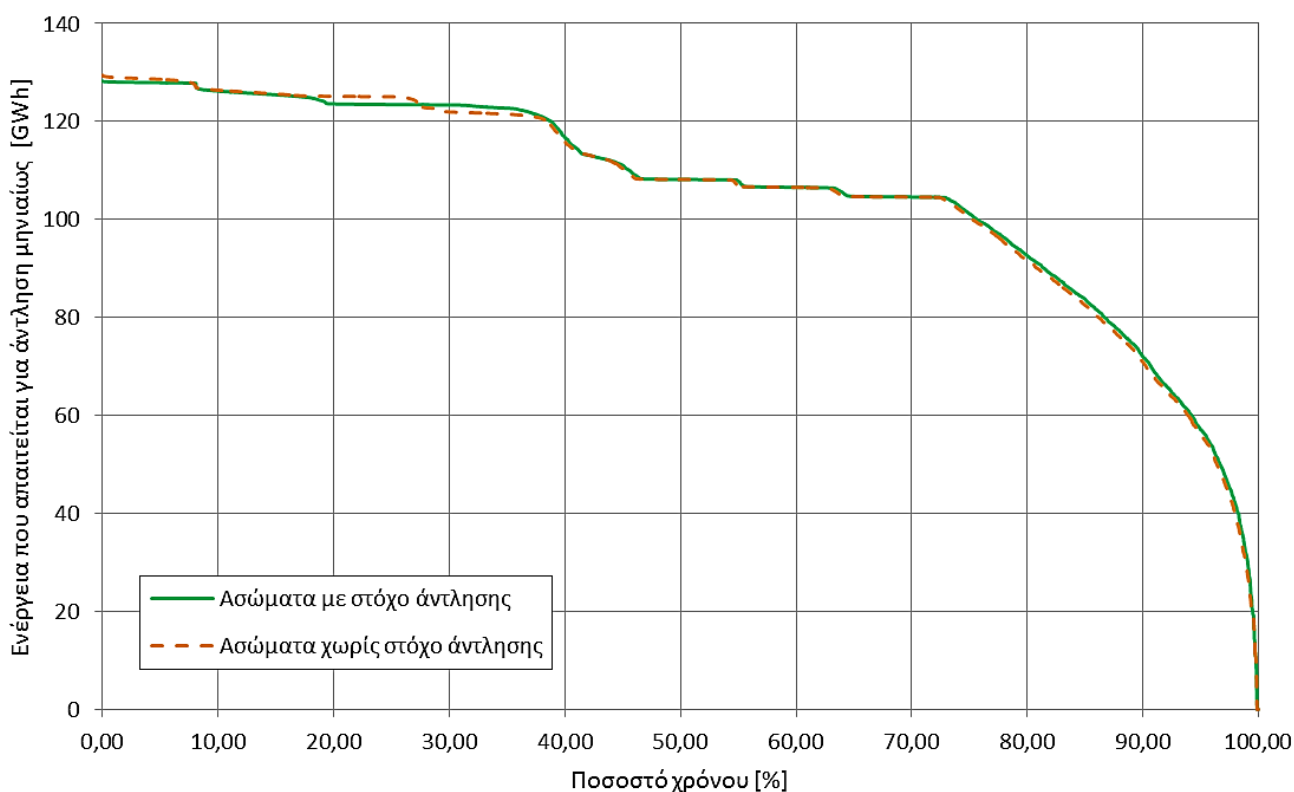


Εικόνες 5-68, 5-69: Συνοπτικά αποτελέσματα σεναρίου Σ4.

5.17. Καμπύλη διάρκειας ζήτησης ενέργειας της εγκατάστασης άντλησης

Εκτός της παραγόμενης ενέργειας και των αντίστοιχων χρονοσειρών, μας ενδιαφέρει και η ζήτηση ενέργειας της αντλητικής διάταξης. Δηλαδή, με άλλα λόγια, η ενέργεια που απαιτεί για τη λειτουργία της η διάταξη άντλησης-ταμίευσης. Όπως είναι αναμενόμενο η εν λόγω διάταξη θα απαιτεί λίγο μεγαλύτερη ενέργεια όταν το υδροσύστημα μοντελοποιείται παρουσία στόχου άντλησης σε σχέση με την απουσία στόχου.

Στα πλαίσια της παρούσας ενότητας ενδιαφέρουν τα αποτελέσματα των σεναρίων Σ3 και Σ4, δηλαδή η μοντελοποίηση παρουσία αντλητικής διάταξης ώστε να διερευνηθεί η επιρροή της επιβολής στόχου. Στην εικόνα 5-70 διακρίνουμε τις δύο καμπύλες διάρκειας για τη ζήτηση ενέργειας της αντλίας, συγκρίνοντας τα δύο σενάρια.



Εικόνα 5-70: Καμπύλες διάρκειας ζήτησης αντλίας για τα σενάρια Σ3, Σ4.

Η συγκεκριμένη ανάλυση είναι άκρως ενδιαφέρουσα καθώς αποτελεί το σημείο-κλειδί της συνδυασμένης διαχείρισης αιολικής και υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση που θα ακολουθηθεί και προτείνεται ως μεθοδολογία βασίζεται στη θεώρηση του σχεδιασμού στη βάση της κάλυψης της ζήτησης της αντλίας από την παραγωγή ενός αιολικού πάρκου, τα χαρακτηριστικά του οποίου αποτελούν την ουσία του προβλήματος σχεδιασμού. Η λύση που θα δοθεί στο συγκεκριμένο πρόβλημα σχεδιασμού αποτελεί ταυτόχρονα και την απάντηση σε ένα μοντέλο ανάπτυξης και ενεργειακής παραγωγής που θα ξεφύγει από τις δεσμεύσεις των ορυκτών πόρων και τις μεγέθυνσης ως άλλη όψη της περιβαλλοντικής καταστροφής.

6. Η προσομοίωση του αιολικού συστήματος: Αιολική ενέργεια και Στοχαστική Προσομοίωση της παραγωγής

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζουμε μεμονωμένα το σκέλος της αιολικής παραγωγής και της στοχαστικής της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται θεωρητικά η αιολική παραγωγή ενέργειας και τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών, ενώ στη συνέχεια περιγράφεται το στοχαστικό μοντέλο γέννησης χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου. Παράλληλα, εξετάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών χρονοσειρών και η σχέση τους με αυτά των συνθετικών. Η ανάλυση του συνδυασμένου σχεδιασμού θα μας απασχολήσει σε επόμενο κεφάλαιο, οπότε στο παρόν δε γίνεται σχετική αναφορά.

6.1. Εισαγωγή στην αιολική ενέργεια

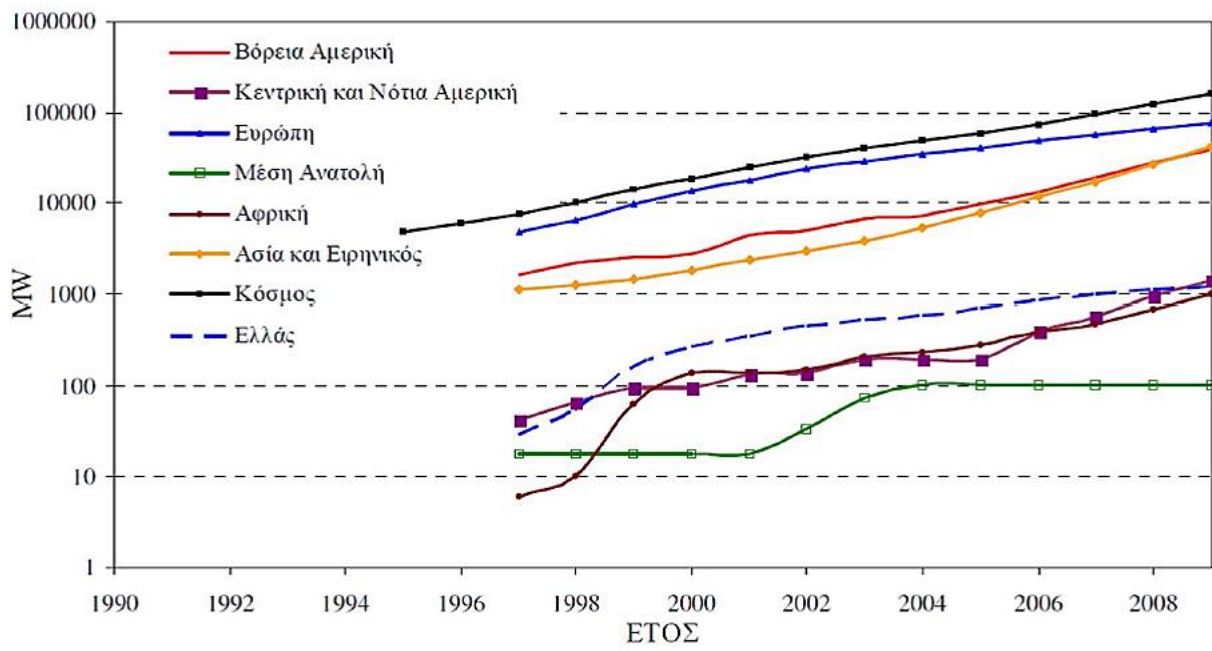
Η αιολική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου, χρησιμοποιείται από την αρχαιότητα στη ναυσιπλοΐα και αργότερα με την κατασκευή των πρώτων ανεμόμυλων (6^{ος}-9^{ος} αιώνας μ.Χ.) για άλεσμα δημητριακών και για άντληση νερού. Στον ελληνικό χώρο χρησιμοποιούνται ανεμόμυλοι από τον 13^ο αιώνα. Το 1888 κατασκευάστηκε ο πρώτος ανεμόμυλος για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Παράλληλα, μέσω της αιολικής παραγωγής επιτυγχάνεται η απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και την εγγενή μεταβλητότητα της τιμής τους. Ταυτόχρονα επιτυγχάνεται μείωση στις εκπομπές ρύπων, ενώ η πανίδα της περιοχής εγκατάστασης των ανεμογεννητριών δεν πλήττεται. Επομένως, αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον μορφή ενέργειας. Επιπλέον είναι και μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας που μπορεί να λειτουργήσει σε τοπικό-αποκεντρωμένο επίπεδο ανεξάρτητα από τα κεντρικά δίκτυα διανομής λόγω της ώριμης και εξελιγμένης τεχνολογίας εκμετάλλευσής της.

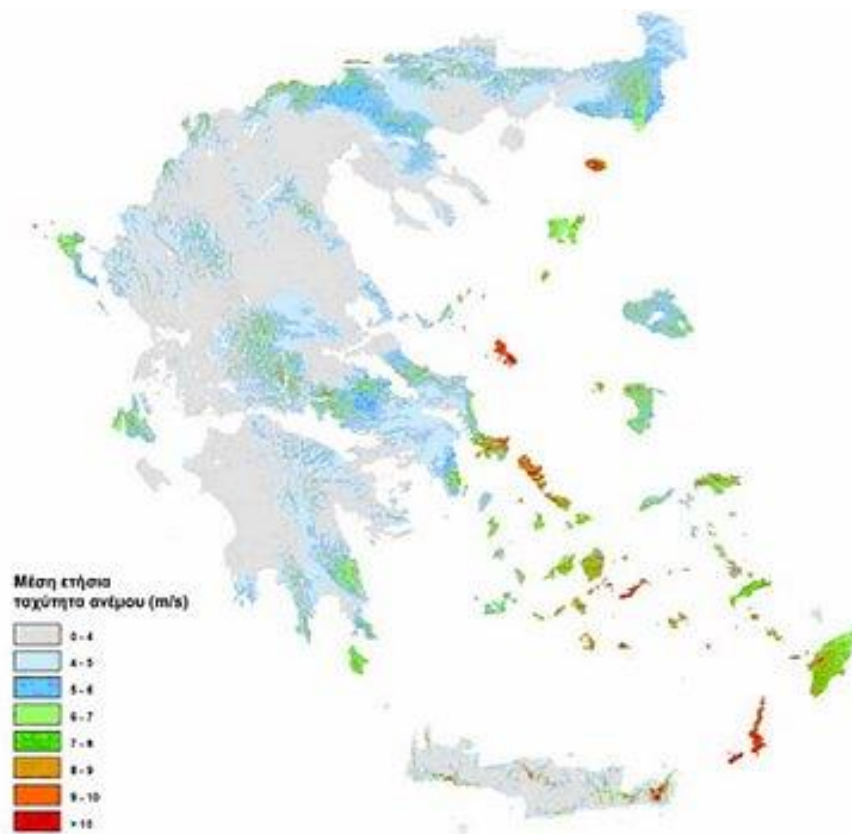
Όπως κάθε μορφή ενέργειας, έτσι και η αιολική έχει και κάποια μειονεκτήματα ως προς την παραγωγή της. Χαρακτηριστικά και συχνά αναφερόμενα είναι ο θόρυβος και η οπτική όχληση. Επίσης, πρόβλημα αποτελεί και ο θάνατος πουλιών λόγω της πρόσκρουσης στις ανεμογεννήτριες. Στον ελληνικό χώρο, λόγω της αυθαιρεσίας των εκάστοτε κυβερνητικών πολιτικών που αγνοούν την εμπλοκή των τοπικών κοινωνιών μέσω συμμετοχικού σχεδιασμού στην διείσδυση των ΑΠΕ, έντονα προβληματική είναι και η καταστροφή εκτάσεων έντονου φυσικού κάλλους μέσω της πυκνής τοποθέτησης των ανεμογεννητριών. Σημαντικό παράγοντα ανάσχεσης αποτελεί και η απρόβλεπτη διακύμανση της ενέργειας των αιολικών μηχανών που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο δίκτυο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας (Ιωάννου, 2012).

Παρά τα μειονεκτήματα ωστόσο, η χρήση της αιολικής ενέργειας φαίνεται να παρουσιάζει μια αυξητική τάση παγκοσμίως (Εικόνα 6-1). Ειδικότερα στην Ελλάδα, η προοπτική περαιτέρω διείσδυσης των ανεμογεννητριών στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής είναι πολύ θετική. Στα νησιά παρουσιάζεται υψηλό αιολικό δυναμικό το οποίο δεν έχει περιέλθει σε καθεστώς τεχνικής εκμετάλλευσης.

Στην εικόνα 6-2 διακρίνουμε το χάρτη αιολικού δυναμικού του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).



Εικόνα 6-1: Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος αιολικής ενέργειας σε περιοχές ανά τον κόσμο και στον ελληνικό χώρο (Πηγή: Ρίτση, 2013)



Εικόνα 6-2: Χάρτης αιολικού δυναμικού ελληνικού χώρου (Πηγή: ΚΑΠΕ)

Τα μέρη που αποτελούν την αιολική μηχανή είναι ο πύργος κυλινδρικής μορφής (συνήθως από χάλυβα) -από δύο ή τρία συνδεδεμένα τμήματα, ο θάλαμος που περιέχει τα μηχανικά υποσυστήματα (κύριος άξονας, σύστημα πέδησης, κιβώτιο ταχυτήτων, ηλεκτρογεννήτρια), τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου ασφαλούς λειτουργίας και τα περσόνια. Όλα τα προαναφερθέντα διακρίνονται στην εικόνα 6-3.



Εικόνα 6-3: Συστατικά μέρη ανεμογεννήτριας (Πηγή: Enercon)

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της αιολικής μηχανής είναι η διάμετρο της περσώτης, το ύψος τοποθέτησης, το πλήθος των περσόνιων (συνήθως τρία), το είδος τους (πάχος και υλικό), η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής τους (που έχει να κάνει με τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου και την αντοχή των περσόνιων σε φυγόκεντρες τάσεις) και η ονομαστική ισχύς (δηλαδή η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραχθεί.

6.2. Χαρακτηριστικές καμπύλες ανεμογεννήτριας

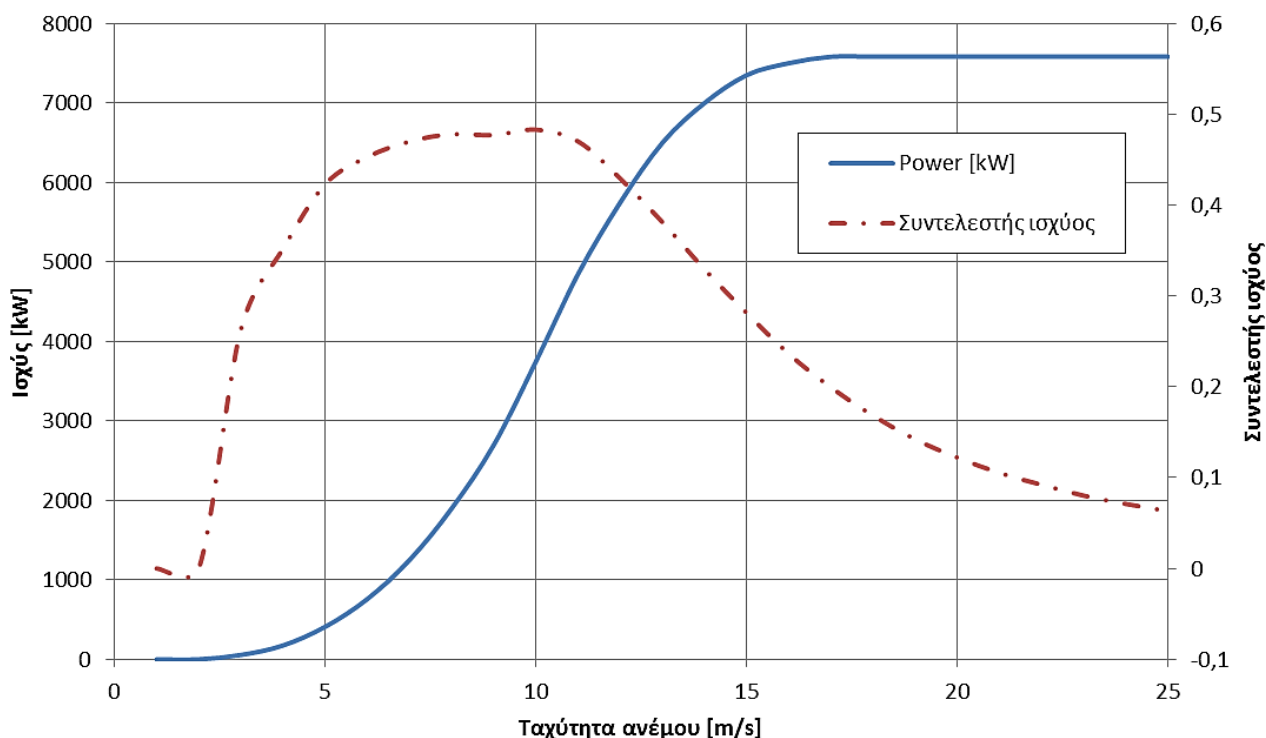
Προκειμένου να υπολογιστεί η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια χρειάζεται η καμπύλη ισχύος της, στην οποία δίνεται η σχέση ισχύος της ανεμογεννήτριας ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Τέτοιες καμπύλες κατασκευάζονται εμπειρικά μετρώντας με ανεμόμετρο την ταχύτητα του ανέμου και σε παράλληλο χρόνο την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ.

Στην εικόνα 6-4 δίνεται ένα παράδειγμα μιας τέτοιας καμπύλης όπου παρατηρούμε πως δεν αποδίδεται καθόλου ισχύς κάτω και πάνω από κάποια συγκεκριμένα όρια. Για μικρές ταχύτητες έχουμε μηδενική παραγωγή, ενώ για μεγάλες η ισχύς φτάνει σε ένα δεδομένο πλατό. Σε ένα ανώτατο όριο η παραγωγή σταματάει. Ο συντελεστής ισχύος είναι ο λόγος της ισχύος που παράγει η ανεμογεννήτρια σε κάθε ταχύτητα ανέμου προς τη θεωρητική. Είναι δηλαδή ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης της περσώτης και έχει μέγιστο όριο την τιμή:

$$C \leq \frac{16}{27} = 0,593 \quad (6.1)$$

που ονομάζεται όριο Betz. Υψηλός συντελεστής ισοδυναμεί με υψηλή εκμετάλλευση διατιθέμενης ενέργειας και αντίστοιχα χαμηλός συντελεστής σημαίνει χαμηλή εκμετάλλευση. Στην εικόνα 6-4

μπορούμε να διακρίνουμε πως ο συντελεστής αυξάνεται έντονα με την έναρξη λειτουργίας μέχρι ένα μέγιστο και μετά μειώνεται μέχρι το σημείο διακοπής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Σε εκείνο το σημείο ο συντελεστής διατηρεί τις χαμηλές τιμές του μιας και η καμπύλη ισχύος έχει φτάσει στο πλατό.



Εικόνα 6-4: Καμπύλη ισχύος και συντελεστής ισχύος ανεμογεννήτριας.

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας χρησιμοποιούμε μια σχέση παρεμβολής της παραγόμενης ισχύος η οποία είναι:

$$y = -0,0021x^6 + 0,175x^5 - 5,2109x^4 + 66,301x^3 - 300,76x^2 + 441,72x \quad (6.2)$$

Η σχέση αυτή βασίζεται στην καμπύλη που έχει παραχθεί από τον πίνακα 6-1. Ο πίνακας αυτός περιέχει την αποδιδόμενη ισχύ για διάφορες ταχύτητες ανέμου που αλλάζουν με σταθερό βήμα. Η ισχύς πολλαπλασιαζόμενη με το χρονικό διάστημα που πνέει ο άνεμος με τη συγκεκριμένη ταχύτητα μας δίνει την παραγόμενη ενέργεια.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιείται η ανεμογεννήτρια E-126/7,5 MW/38 της Enercon. Αφενός λόγω της πρότερης εμπειρίας από τη διπλωματική του Ιωάννου (2012), αφετέρου λόγω της εξαιρετικά μεγάλης ισχύος της: είναι μία από τις ισχυρότερες αιολικές μηχανές που κυκλοφορούν στο εμπόριο.

Στην εικόνα 6-5 εικονίζεται η εν λόγω ανεμογεννήτρια.

Πίνακας 6-1: Συντεταγμένες της καμπόλης ισχύος της ανεμογεννήτριας
E-126/7,5 MW/38



Εικόνα 6-5: Ανεμογεννήτρια E-126/7,5 MW/38 της Enercon

Wind speed [m/s]	Power [kW]	Συντελεστής ισχύος
1	0	0
2	0	0
3	55	0,263
4	175	0,352
5	410	0,423
6	760	0,453
7	1250	0,47
8	1900	0,478
9	2700	0,477
10	3750	0,483
11	4850	0,47
12	5750	0,429
13	6500	0,381
14	7000	0,329
15	7350	0,281
16	7500	0,236
17	7580	0,199
18	7580	0,168
19	7580	0,142
20	7580	0,122
21	7580	0,105
22	7580	0,092
23	7580	0,08
24	7580	0,071
25	7580	0,063

Οι τεχνικές προδιαγραφές της ανεμογεννήτριας αντλήθηκαν από τη διπλωματική του Ιωάννου και εικονίζονται στον πίνακα 6-2 στη συνέχεια.

Πίνακας 6-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας E-126/7,5 MW/38 (Πηγή: Ιωάννου, 2012)

Ισχύς:	7 500 kW	Ταχύτητα περιστροφής:	Κυμαινόμενη, 5-11.7 rpm
Διάμετρος ρότορα:	127 m	Pitch control:	ENERCON single blade pitch system;
Ύψος κόμβου:	135 m		one independent pitch system per rotor
Wind zone (DIBt):	WZ III		blade with allocated emergency supply
Wind class (IEC):	IEC/NVN IA	Drive train with generator	
Ρότορας		Κόμβος:	Rigid
Τύπος:	Upwind rotor with active pitch control	Main bearing:	Single-row tapered roller bearing
Κατεύθυνση περιστροφής:	Ωρολογιακή	Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Αριθμός πτερυγίων	3	Grid feed:	ENERCON inverter
Περιοχή σάρωσης:	12 668 m ²	Brake systems:	- 3 independent pitch control systems with emergency power supply
Υλικό λεπίδας:	GRP (epoxy resin) / GRP; GRP (epoxy resin) / steel; Built-in lightning protection	Yaw system:	- Rotor brake Active via yaw gear, load-dependent damping
		Cut-out wind speed:	28 – 34 m/s
		Remote monitoring:	ENERCON SCADA

Το πιο σημαντικό από τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά (και αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια) είναι το ύψος κόμβου (135 m).

Η ιστοσελίδα με τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας είναι: <http://www.enercon.de/en-en/66.htm>

6.3. Υπολογισμός ταχύτητας ανέμου στο ύψος τοποθέτησης

Τα ιστορικά δεδομένα της ταχύτητας ανέμου δίνονται ανά δέκα λεπτά σε km/h, αλλά η μέτρηση έχει πραγματοποιηθεί στο ύψος του οργάνου. Για να είναι αξιοποιήσιμα τα δεδομένα της ταχύτητας ως προς το σκέλος της ενεργειακής παραγωγής από την ανεμογεννήτρια πρέπει να αναχθούν στο ύψος του κόμβου της ανεμογεννήτριας (hub height). Ως γνωστόν, η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται με το υψόμετρο. Η μεταβολή αυτή μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη σχέση (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

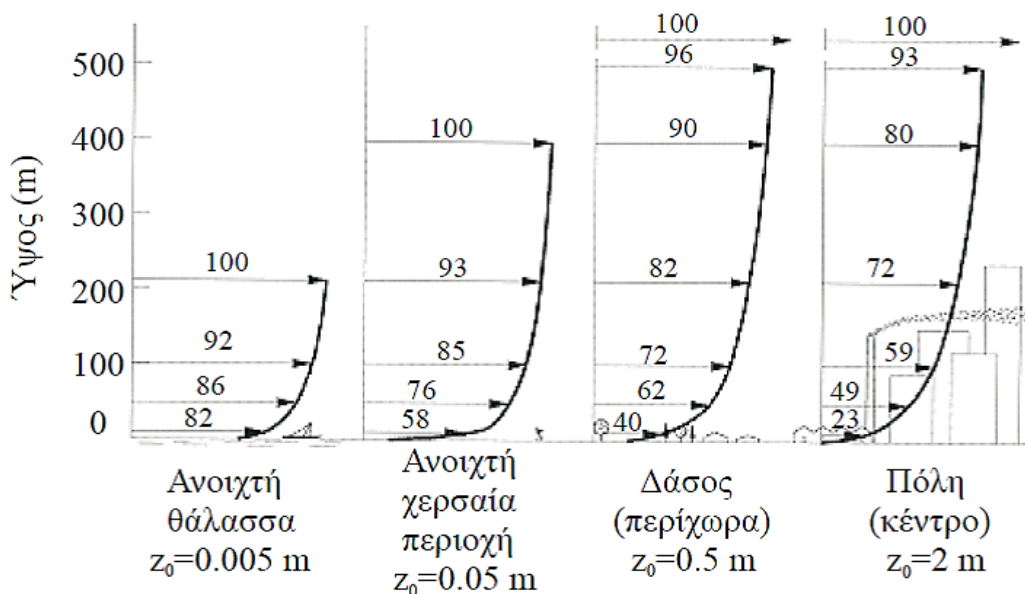
$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln(z_2 / z_0)}{\ln(z_1 / z_0)} \quad (6.3)$$

όπου u_1, u_2 η ταχύτητα ανέμου στα ύψη z_1 και z_2 αντίστοιχα και z_0 η παράμετρος τραχύτητας του εδάφους. Το δεύτερο μέρος της εξίσωσης (6.3) όπως υπολογίστηκε, καθώς και τα υπόλοιπα μεγέθη διακρίνονται στον πίνακα 6-3.

Πίνακας 6-3: Στοιχεία αναγωγής ταχύτητας ανέμου στο ύψος κόμβου.

	Έως 31/10/2011	Από 1/11/2011
z1 [m]	10	5
z2 [m]	135	135
z0 [m]	0,1	0,1
Συντελεστής	1,565	1,842

Η επιλογή της τραχύτητας του εδάφους έγινε για περιοχή ενδιάμεση της δασικής και της χερσαίας, για αυτό επιλέχθηκε η τιμή 0,1m. Στην εικόνα 6-6 διακρίνουμε τη μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος για διάφορους τύπους εδάφους.



Εικόνα 6-6: Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με το ύψος ανάλογα με την τραχύτητα εδάφους

Παρατηρούμε πως η επιρροή του ύψους είναι αρκετά σημαντική καθώς οι αντίστοιχοι συντελεστές είναι 1,565 και 1,842. Έχουμε δηλαδή σημαντικές αυξήσεις σε σχέση με την αρχική ταχύτητα που δεν μπορούν να αγνοηθούν. Η περίοδος των δεδομένων διαρκεί από τη 10/10/2006 στις 15:00 ως τη 31/12/2012 στις 23:50.

6.4. Διερεύνηση της επιρροής του χρονικού βήματος στην παραγόμενη ενέργεια

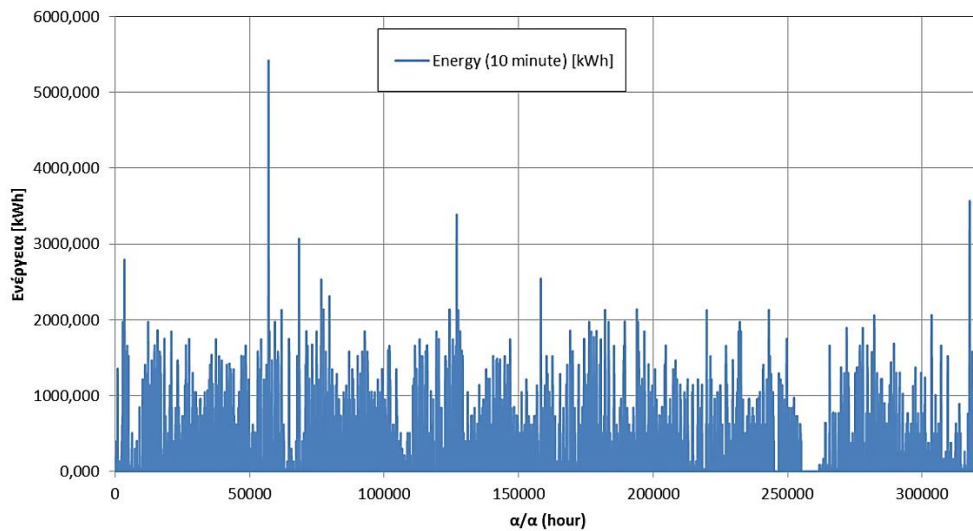
Στη συνέχεια με χρήση της (6.3) υπολογίζεται η παραγόμενη ενέργεια ανά δεκαλέπτο και πολλαπλασιάζοντας με 1/6 ώστε να υπολογιστεί η ποσότητα σε kWh. Αν u_2 είναι η ταχύτητα ανέμου στο ύψος του κόμβου σε m/s και $P(u_2)$ η αντίστοιχη ισχύς σε kW μέσω της (6.3) τότε η ενέργεια δεκαλέπτου σε kWh είναι:

$$E_{ten} = P(u_2) / 6 \quad (6.4)$$

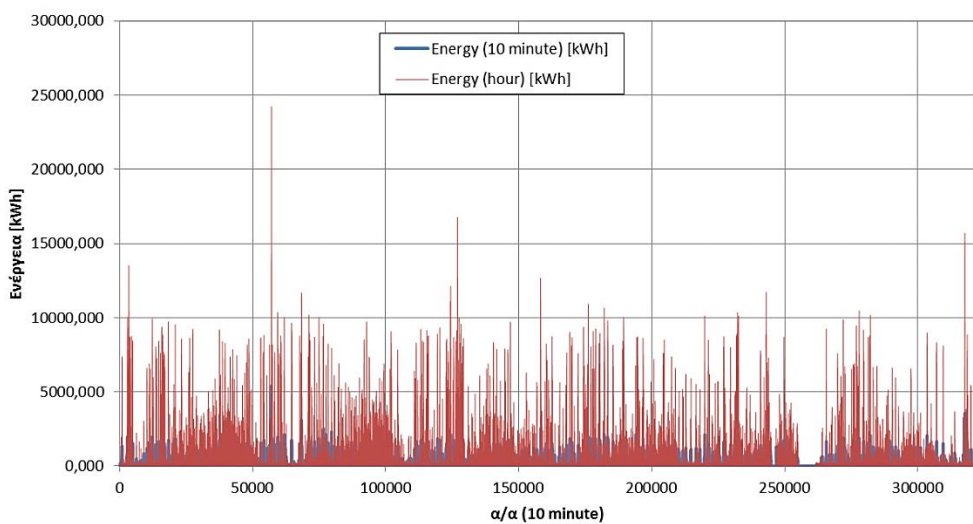
Αντίστοιχα αν u_{hour} είναι η μέση ωριαία ταχύτητα ανέμου σε m/s, τότε η ωριαία ενέργεια σε kWh είναι:

$$E_{hour} = P(u_{hour}) \cdot 1 \quad (6.5)$$

Η χρονοσειρά της παραγόμενης ενέργειας του δεκαλέπτου εικονίζεται στο γράφημα της εικόνας 6-7. Η χρονοσειρά της ωριαίας παραγόμενης ενέργειας εικονίζεται στην 6-8 όπου γίνεται και η σύγκριση με τη χρονοσειρά του δεκαλέπτου.



Εικόνα 6-7: Χρονοσειρά παραγόμενης ενέργειας δεκαλέπτου.



Εικόνα 6-8: Σύγκριση χρονοσειράς ωριαίας παραγόμενης ενέργειας με την αντίστοιχη του δεκαλέπτου.

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα αθροίσματα της ενέργειας για την χρονοσειρά του δεκαλέπτου και την ωριαία. Εικονίζονται στον πίνακα 6-4.

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

Πίνακας 6-4: Αθροίσματα ενέργειας σε κλίμακα δεκαλέπτου και ώρας

Παρατηρούμε πως η διαφορά των δύο αθροισμάτων είναι αναντίστοιχη του υπολογιστικού φόρτου που απαιτείται για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών στην κλίμακα του δεκαλέπτου. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου στην ωριαία κλίμακα.

6.5. Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου: Το μοντέλο Bartlett-Lewis

Για να προσομοιωθεί η ταχύτητα ανέμου και επομένως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των ανεμογεννητριών χρησιμοποιήθηκε το στοχαστικό μοντέλο παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών Bartlett-Lewis (RBLRPM), το οποίο προσαρμόστηκε στα στατιστικά χαρακτηριστικά των διαθέσιμων ιστορικών χρονοσειρών.

Προκειμένου να παραχθούν οι συνθετικές χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου, διατηρώντας τη διαλείπουσα φύση του ίδιου του ανέμου καθώς και την έντονη δομική εξάρτηση που παρουσιάζουν οι υδρομετεωρολογικές μεταβλητές στις μικρές χρονικές κλίμακες (ωριαία εν προκειμένω) χρησιμοποιείται το προαναφερθέν μοντέλο (Bartlett-Lewis) το οποίο κατασκευάστηκε για το σκοπό αυτό. το μοντέλο Bartlett-Lewis, αποτελεί μια βελτίωση του κλασικού μοντέλου ορθογωνικών παλμών Bartlett - Lewis, αφού κάλυψε την αδυναμία αυτού να προσομοιώνει ικανοποιητικά την πιθανότητα απουσίας βροχοπτώσης για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η περιγραφή του μοντέλου που ακολουθεί, αποτελείται από αποσπάσματα της διπλωματικής εργασίας «Ανάπτυξη υπολογιστικού συστήματος για τον μονοδιάστατο στοχαστικό επιμερισμό ημερήσιων βροχοπτώσεων σε ωριαίες» που αναπτύχθηκε στο ΕΜΠ (Κοσσιέρης, 2011). Παράλληλα αξιοποιήθηκε η εμπειρία από τη διπλωματική της Ρίπη (2013) στην εν λόγω μοντελοποίηση.

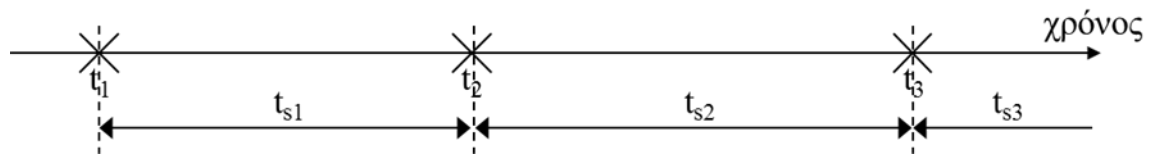
Τα βασικά χαρακτηριστικά του BLRPM είναι τα εξής (Rodriguez-Iturbe et al., 1987a, σελ. 279, Κοσσιέρης, 2011):

1. Μια αρχική ανέλιξη Poisson¹⁷ με παράμετρο λ , η οποία καθορίζει τα χρονικά σημεία έναρξης των καταιγίδων, t_i . Εξ ορισμού τα χρονικά διαστήματα t_s είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την εκθετική συνάρτηση κατανομής με παράμετρο λ .

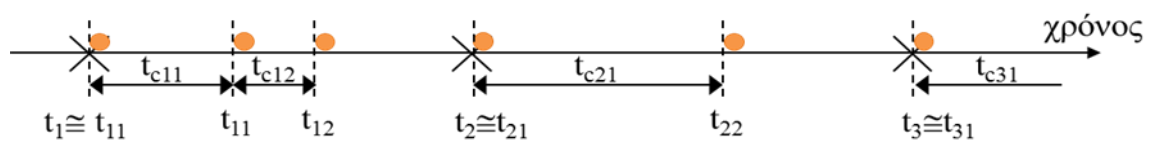
¹⁷ Η ανέλιξη Poisson με παράμετρο λ , αποτελεί μια ακολουθία τυχαίων σημείων t_n στο χρόνο, με την ιδιαιτερότητα ότι οι χρόνοι διαδοχής Δt_n είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές, που ακολουθούν την εκθετική συνάρτηση κατανομής με παράμετρο λ και συνεπώς ισχύει η σχέση $F(t) = P[\Delta t \leq t] = 1 - e^{-\lambda t}, \forall t \geq 0$. Αποδεικνύεται πως ο χρόνος άφιξης t_n μεταξύ n γεγονότων ακολουθεί

τη (διπαραμετρική) γάμα κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f_n(t) = \lambda(\lambda t)^{n-1} \frac{e^{-\lambda t}}{(n-1)!}, t \geq 0$

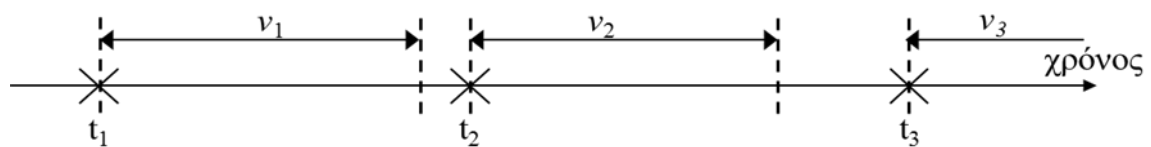
και επιπλέον, ο αριθμός γεγονότων x σε ξένα μεταξύ τους χρονικά διαστήματα είναι ανεξάρτητες τυχαίες



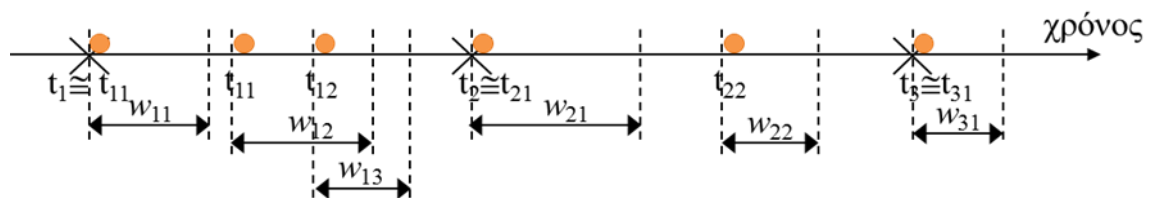
2. Μια δεύτερη ανάλυση Poisson, ανεξάρτητη της πρώτης, με παράμετρο β , η οποία καθορίζει τα χρονικά σημεία έναρξης των ορθογωνικών παλμών, t_{ij} , κατά τη διάρκεια κάθε καταιγίδας, i . Όπως προκύπτει από τον ορισμό της Poisson ανάλυσης, στο BLRPM ως χρονικό σημείο αναφοράς για την έναρξη κάθε παλμού λαμβάνεται το σημείο έναρξης του αμέσως προηγούμενου του. Τα χρονικά διαστήματα, t_{cij} , που μεσολαβούν μεταξύ των αφίξεων των παλμών ακολουθούν την εκθετική κατανομή με παράμετρο β .



3. Ο συνολικός χρόνος παραγωγής ορθογωνικών παλμών σε κάθε καταιγίδα, v_i , δηλαδή το χρονικό «παράθυρο» μέσα στο οποίο βρίσκονται οι χρονικές αφετηρίες των παλμών κάθε καταιγίδας, i , αποτελεί ανεξάρτητη τυχαία μεταβλητή, που ακολουθεί την εκθετική κατανομή με παράμετρο γ .

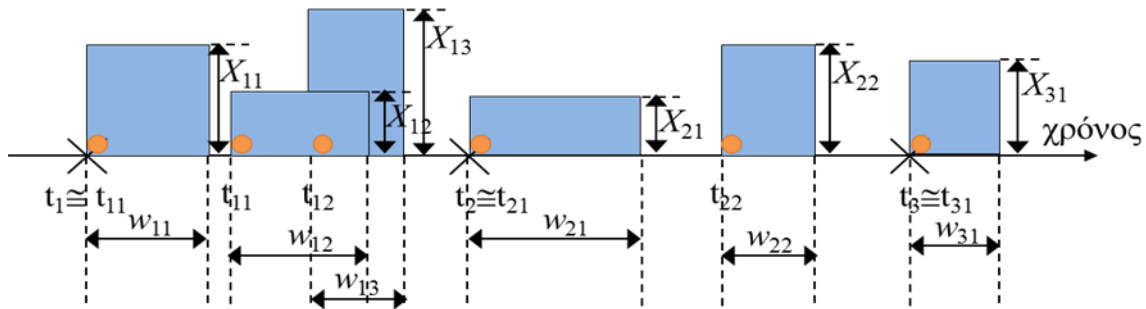


4. Οι διάρκειες των παλμών, w_{ij} , είναι τυχαίες μεταβλητές, και ακολουθούν την εκθετική κατανομή με παράμετρο n .



μεταβλητές, που ακολουθούν την Poisson κατανομή με παράμετρο λt , όπου t το μήκος του χρονικού διαστήματος μελέτης με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $P(x) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^x}{x!}$, $x = 0, 1, 2, \dots$. Ο κύριος λόγος που υιοθετείται η ανάλυση Poisson για τη μαθηματική προσομοίωση της εμφάνισης βροχερών επεισοδίων, είναι η στοχαστική ανεξαρτησία των χρόνων διαδοχής Δt_n (Κουτσογιάννης 1988, Κοσιέρης 2011).

5. Τέλος, για κάθε ορθογωνικό παλμό απαιτείται μια εκτίμηση του εντατικού μεγέθους (ένταση, ύψος), X_{ij} .



Προκειμένου ωστόσο, να γίνεται σωστή πρόγνωση των υγρών και ξηρών περιόδων αναπτύχθηκε, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το τυχαίο μοντέλο RBLRPM, στο οποίο η τυχαία μεταβλητή, που αντιστοιχεί στη διάρκεια των ορθογωνικών παλμών, ακολουθεί εκθετική συνάρτηση κατανομής, αλλά με διαφορετική παράμετρο, $n^{(i)}$, για κάθε καταιγίδα, i .

Συνεπώς, η παράμετρος της εκθετικής κατανομής, $n^{(i)}$, αποκτά χαρακτήρα ανεξάρτητης τυχαίας μεταβλητής και η προτεινόμενη συνάρτηση κατανομής της είναι η διπαραμετρική κατανομή γάμα με παράμετρο σχήματος a και παράμετρο κλίμακας ν , έτσι ώστε (Rodríguez-Iturbe et al., 1988, σελ.284):

$$E[n] = \frac{a}{\nu}, \text{Var}[n] = \frac{a}{\nu^2}, a > 1 \quad (6.6)$$

Η επιλογή της γάμα ως συνάρτησης κατανομής της παραμέτρου $n^{(i)}$, στηρίζεται στην ευελιξία που έχει να προσεγγίζει ικανοποιητικά ένα μεγάλο πλήθος άλλων κατανομών, ανάλογα με την τιμή που θα λάβει η παράμετρος σχήματός της, a . Ενώ ο περιορισμός, που υπαγορεύει παράμετρο σχήματος της γάμα κατανομής πάντα μεγαλύτερη της μονάδας, $a > 1$, στην περίπτωση του RBLRPM, τίθεται για να εξασφαλίσει πεπερασμένες τιμές στο χρονικό εύρος των παλμών.

Έτσι οι παράμετροι σχήματος, a , και κλίμακας, ν , αποκτούν χαρακτήρα μεταβλητών επίλυσης στο μαθηματικό μοντέλο RBLRPM και οι τιμές τους προκύπτουν από την επίλυση του σχετικού μαθηματικού συστήματος, όπως αυτό ορίζεται παρακάτω.

Σύμφωνα με την αυστηρώς θεωρητική τεκμηρίωση του μοντέλου, ως ανεξάρτητες μεταβλητές επίλυσης θα έπρεπε να επιλεγούν και οι παράμετροι των εκθετικών κατανομών β και γ , όπως αυτές ορίστηκαν στο κλασικό μοντέλο Bartlett-Lewis. Σε αυτή τη περίπτωση, τα πηλικά $1/\beta$ και $1/\gamma$, που αντιστοιχούν στη μέση διάρκεια της καταιγίδας και στη μέση χρονική απόσταση των σημείων άφιξης των ορθογωνικών παλμών αντίστοιχα, θα παρέμεναν ανεξάρτητα από τη μεταβαλλόμενη μέση χρονική διάρκεια των παλμών, $1/n_i$, ανά καταιγίδα. Όμως, η φυσική ερμηνεία μιας τέτοιας θεώρησης θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μη ρεαλιστική, αφού μεγάλης διάρκειας καταιγίδες είναι λογικό να αποτελούνται από παλμούς, οι οποίοι έχουν μεγάλη διάρκεια και οι χρονικές τους αφετηρίες απέχουν περισσότερο (Rodríguez-Iturbe et al., 1988, σελ. 285). Προς

αποκατάσταση της παραπάνω ανακολουθίας, οι Rodriguez-Iturbe et al. εισάγουν τις αδιαστατοποιημένες παραμέτρους:

$$\kappa = \frac{\beta_i}{n_i}, \quad \varphi = \frac{\gamma_i}{n_i} \quad (6.7)$$

σύμφωνα με τις οποίες, οι παράμετροι των δύο εκθετικών κατανομών β_i και γ_i , μεταβάλλονται σε κάθε καταιγίδα, i , εξαρτώμενες από την εκάστοτε τιμή της παραμέτρου n_i . Έτσι, στο RBLRPM οι παράμετροι κ και φ εισάγονται στη μαθηματική έκφραση του μοντέλου ως παράμετροι επίλυσης.

Όπως και στο κλασικό μοντέλο Bartlett-Lewis, έτσι και στο τυχαίο, υποθέτουμε πως η τυχαία μεταβλητή που περιγράφει το εντατικό μέγεθος (ύψος, ένταση), X , κάθε παλμού ακολουθεί την εκθετική συνάρτηση κατανομής, με μέση τιμή μ_X . Ενώ, για τη τυχαία μεταβλητή, C , που περιγράφει τον αριθμό παλμών ανά καταιγίδα υιοθετείται η γεωμετρική κατανομή με μέση τιμή:

$$\mu_C = 1 + \frac{\kappa}{\varphi} \quad (6.8)$$

Συνεπώς, η παράμετρος μ_C είναι εξαρτημένο μέγεθος και αποτελεί συνάρτηση των αδιάστατων μεγεθών κ και φ .

Με τις παραδοχές που προηγήθηκαν, όσον αφορά στις συναρτήσεις κατανομής που επιλέγονται για την περιγραφή των βασικών στατιστικών παραμέτρων του μοντέλου, καταφέρνουμε να περιορίσουμε το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών επίλυσης στο ελάχιστο δυνατό. Οι έξι μεταβλητές επίλυσης είναι οι εξής:

$$\lambda, \alpha, \nu, \kappa, \varphi, \mu_X \quad (6.9)$$

Για να λάβουμε μια διακριτή χρονοσειρά υψών βροχής, $Y_i(h)$, απαιτείται η χρονική ολοκλήρωση των εντάσεων των παλμών σε διακριτά, σταθερά χρονικά διαστήματα, h :

$$Y_i^{(h)} = \int_{(i-1)h}^{ih} Y(s) ds, \quad i = 1, 2, \dots \quad (6.10)$$

Οι αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις του μοντέλου BLRPM δίνουν τις ροπές 1ης και 2ης τάξης, καθώς και την πιθανότητα απουσίας βροχόπτωσης, $P(Y_i(h) = 0)$, της διακριτής χρονοσειράς υψών βροχής, $Y_i(h)$, για μια δεδομένη χρονική κλίμακα h , και μια δεδομένη υστέρηση k (Rodriguez-Iturbe et al., 1987, σελ. 285):

$$E\left[Y_i^{(h)}\right] = \lambda h \mu_X \nu \frac{1 + (\kappa / \varphi)}{\alpha - 1} \quad (6.11)$$

$$\text{Var}\left[Y_i^{(h)}\right] = 2A_1\{(\alpha - 3)h\nu^{2-\alpha} - \nu^{3-\alpha} + (\nu + h)^{3-\alpha} - 2A_2\{\varphi(\alpha - 3)h\nu^{2-\alpha} - \nu^{3-\alpha} + (\nu + \varphi h)^{3-\alpha}\} \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}\left[Y_i^{(h)}, Y_{i+k}^{(h)}\right] &= A_1 \left\{ \left[\nu + (k+1)h \right]^{3-\alpha} - 2(\nu + kh)^{3-\alpha} + \left[\nu + (k-1)h \right]^{3-\alpha} \right\} \\ &\quad - A_2 \left\{ \left[\nu + (k+1)\varphi h \right]^{3-\alpha} - 2(\nu + h\varphi k)^{3-\alpha} + \left[\nu + (k-1)h\varphi \right]^{3-\alpha} \right\} \end{aligned} \quad (6.13)$$

όπου A_1, A_2 οι ακόλουθες ισότητες:

$$A_1 = \frac{\lambda \mu_c v^\alpha}{(\alpha-1)(\alpha-2)(\alpha-3)} \left[E(X^2) + \frac{\kappa \varphi \mu_x^2}{\varphi^2 - 1} \right] \quad (6.14)$$

$$A_2 = \frac{\lambda \mu_c \kappa \mu_x^2 v^\alpha}{\varphi^2 (\varphi^2 - 1)(\alpha-1)(\alpha-2)(\alpha-3)} \quad (6.15)$$

Η πιθανότητα απουσίας βροχοπτώσης για περίοδο h δίνεται από τη σχέση:

$$P(Y_i^{(h)} = 0) = \exp \left\{ -\lambda h - \lambda \mu_\tau + \lambda G_p^*(0,0) \left[\frac{\varphi + \kappa \left(\frac{v}{v + (\kappa + \varphi)h} \right)^{\alpha-1}}{\varphi + \kappa} \right] \right\} \quad (6.16)$$

όπου μ_τ και $G_p^*(0,0)$ οι εξισώσεις:

$$\mu_\tau \cong E \left[\frac{1}{\eta} \right] \frac{1}{\varphi} \left\{ 1 + \varphi(\kappa + \varphi) - \frac{1}{4} \varphi(\kappa + \varphi)(\kappa + 4\varphi) + \frac{1}{72} \varphi(\kappa + \varphi)(4\kappa^2 + 27\kappa\varphi + 72\varphi^2) \right\} \quad (6.17)$$

$$G_p^*(0,0) \cong E \left[\frac{1}{\eta} \right] \frac{1}{\varphi} \left\{ 1 - \kappa - \varphi + \frac{3}{2} \kappa\varphi + \varphi^2 + \frac{1}{2} \kappa^2 \right\} \quad (6.18)$$

Από τις παραδοχές που έγιναν νωρίτερα λαμβάνουμε τις εξής ισότητες:

$$\kappa = \frac{\beta_i}{\eta_i}, \quad \varphi = \frac{\gamma_i}{\eta_i}, \quad \mu_c = E[C] = 1 + \frac{\kappa}{\varphi}, \quad E[X^2] = 2E[X] = 2\mu_x^2 \quad (6.19)$$

Η επιτυχία του εν λόγω στοχαστικού μοντέλου εξαρτάται από τη δυνατότητά του να αναπαράγει τα επιθυμητά στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής χρονοσειράς. Το μοντέλο Bartlett-Lewis έχει κατασκευαστεί για τη στοχαστική προσομοίωση γεγονότων καταιγίδας, ωστόσο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αξιοποιείται για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ανέμου. Αν u_i είναι η ταχύτητα ανέμου της ιστορικής χρονοσειράς, τότε -θεωρώντας πως η ανεμογεννήτρια παράγει ενέργεια για $u > 2m/s$ μέσω του πίνακα 6-1- μετασχηματίζουμε την ιστορική χρονοσειρά βάσει της σχέσης:

$$u^* = \max(u - 2, 0) \quad (6.20)$$

Τροποποιούμε δηλαδή τον ορισμό της πιθανότητας απουσίας βροχοπτώσης ώστε το μοντέλο να μπορεί να λειτουργήσει για την προσομοίωση της ενεργειακής παραγωγής της ανεμογεννήτριας. Αντί για την πιθανότητα απουσίας βροχοπτώσης (probability dry) έχουμε την πιθανότητα εμφάνισης μη αξιοποιήσιμης ταχύτητας ανέμου (την οποία ονομάζουμε πάλι probability dry χωρίς βλάβη της γενικότητας).

Στην επόμενη ενότητα εξετάζουμε ακριβώς αυτά τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μετασχηματισμένης ιστορικής χρονοσειράς.

6.5. Στατιστικά χαρακτηριστικά ιστορικής χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου

Στην παρούσα ενότητα εξετάζουμε τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής χρονοσειράς της ταχύτητας ανέμου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η διακόμανση των χαρακτηριστικών κατά τη διάρκεια της ημέρας σε ωριαία κλίμακα.

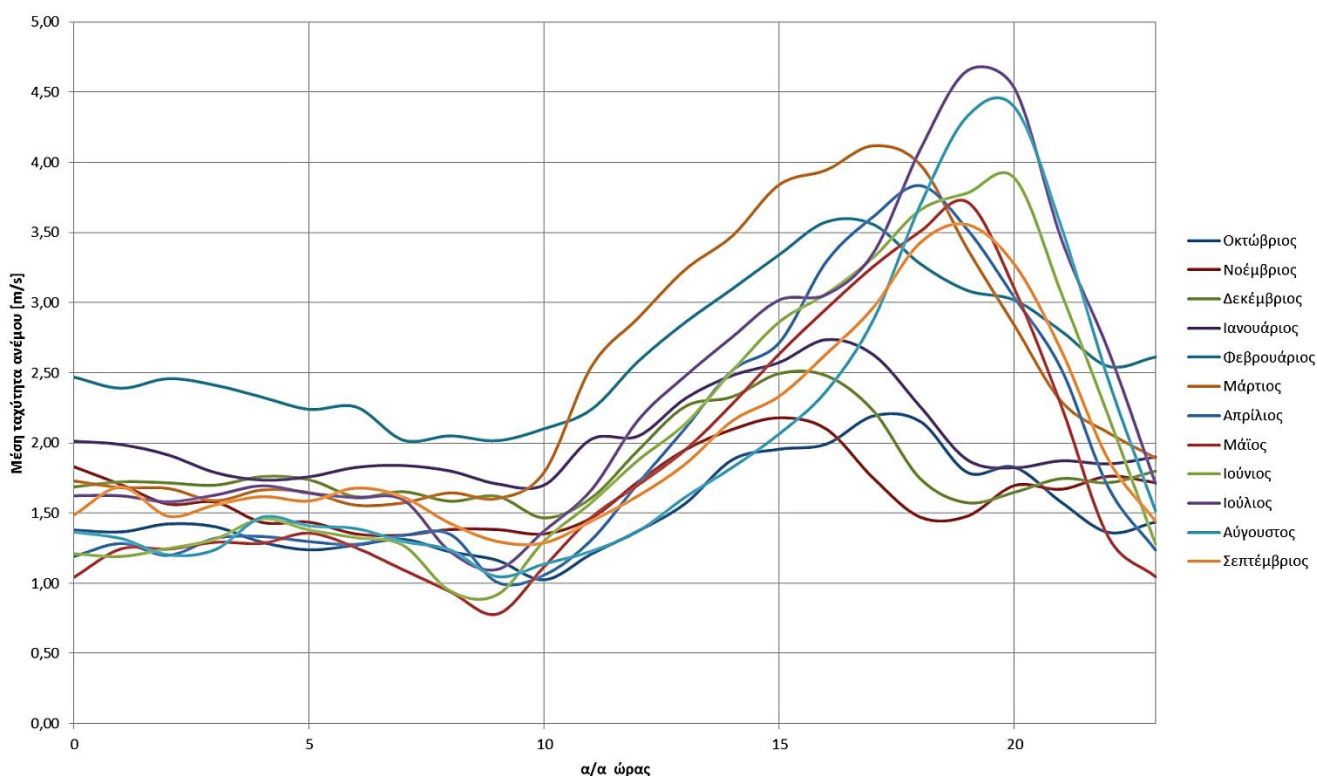
Τα στατιστικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν είναι:

- Μέση τιμή.
- Τυπική απόκλιση.
- Συντελεστής ασυμμετρίας.

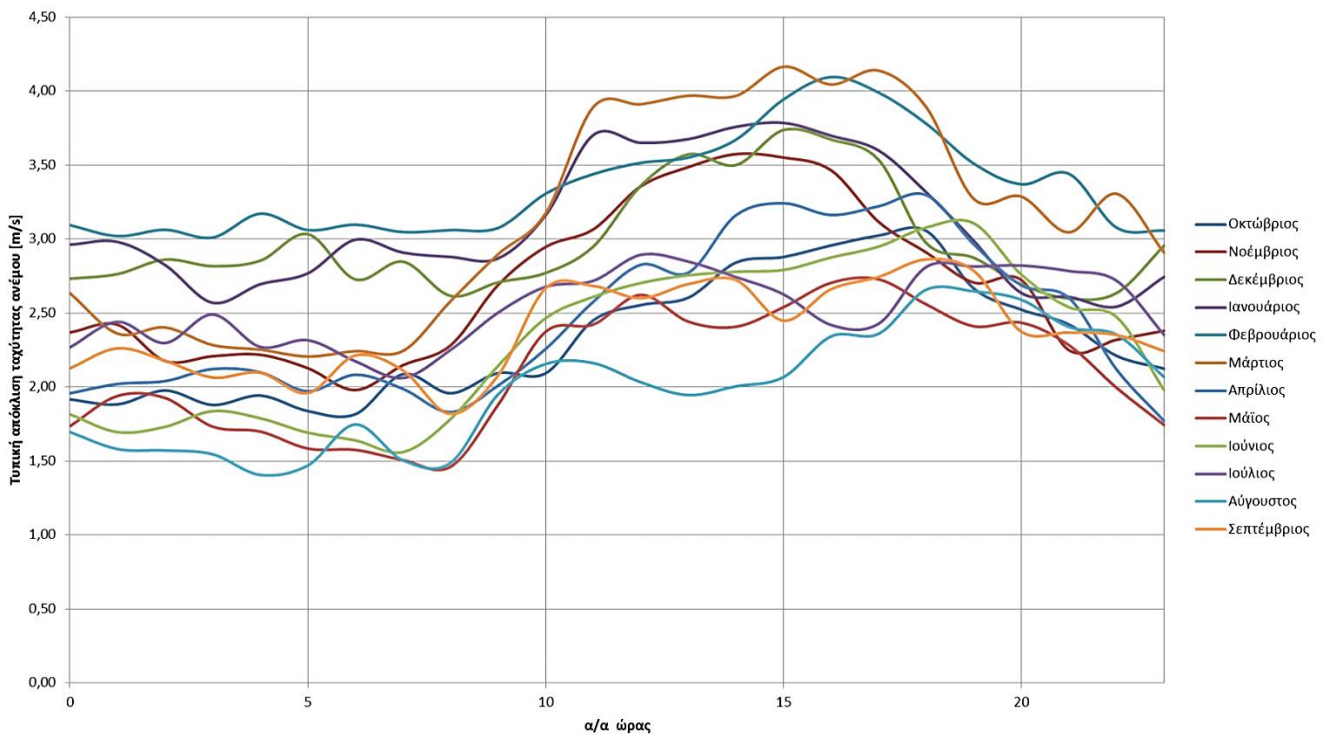
Για να εξαχθεί η ιστορική χρονοσειρά σε ωριαία κλίμακα από την κλίμακα δεκαλέπτου χρησιμοποιήθηκε η εντολή «offset» του Microsoft Excel, σε συνδυασμό με την εντολή «average».

Γενικότερα, διακρίνουμε μια αύξηση των τιμών της ταχύτητας τις μεσημεριανές προς απογευματινές ώρες. Δηλαδή από τις 15:00 το μεσημέρι ως τις 20:00 αργά το απόγευμα. Οι τυπικές αποκλίσεις παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές την ίδια συμπεριφορά με τη μέση τιμή, ενώ ο συντελεστής ασυμμετρίας παρουσιάζει αντίστροφη εικόνα. Εν γένει η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει μεγάλες ασυμμετρίες, λόγω και της έντονης μεταβλητότητας του φαινομένου.

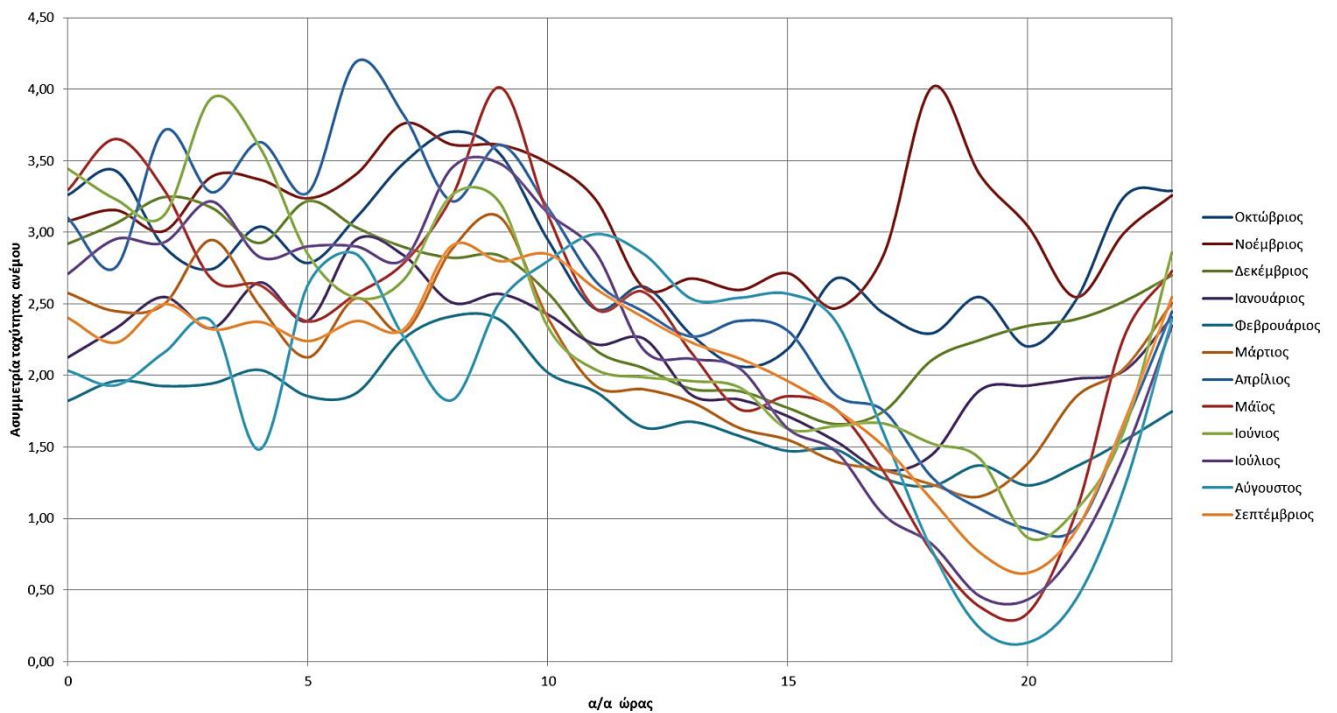
Στις ακόλουθες εικόνες διακρίνουμε τη μεταβολή των εν λόγω χαρακτηριστικών.



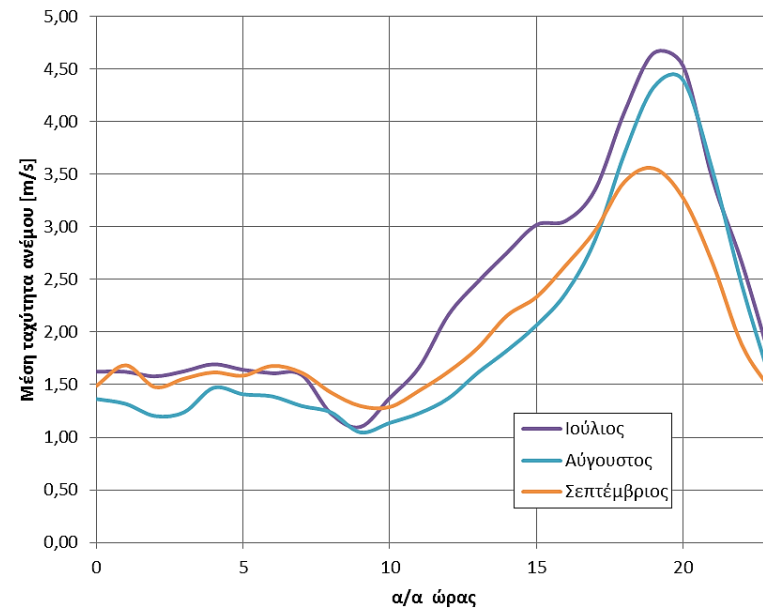
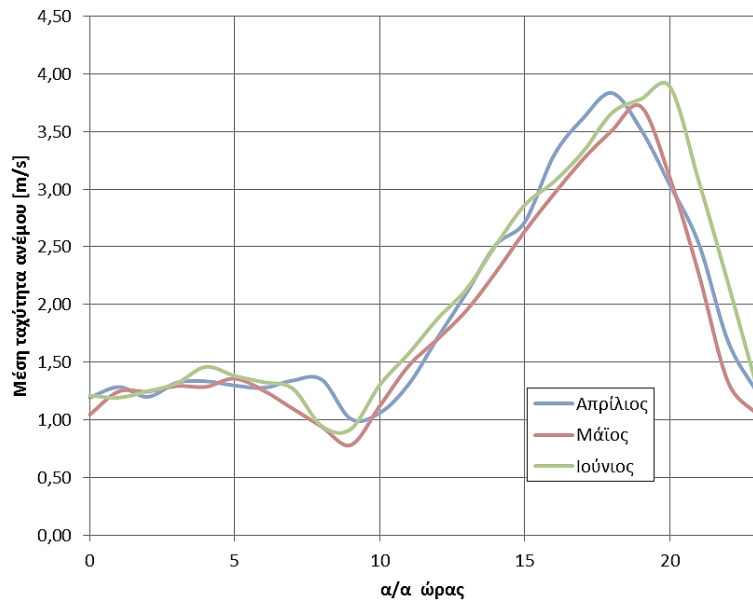
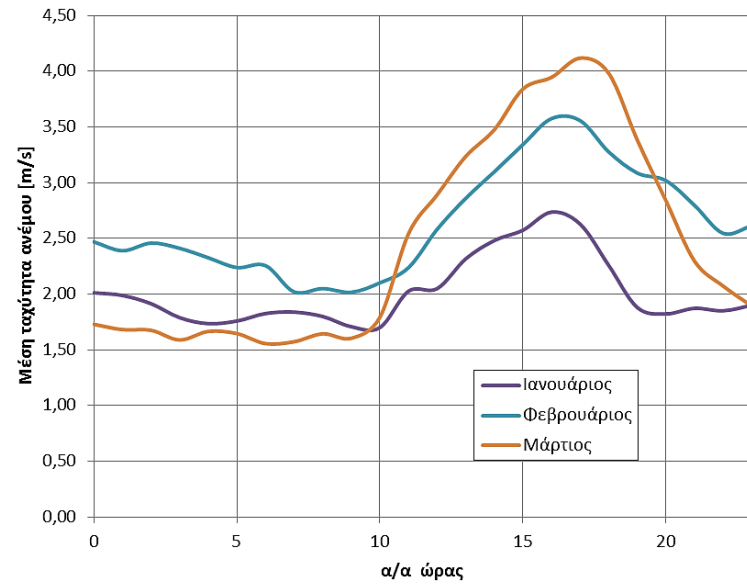
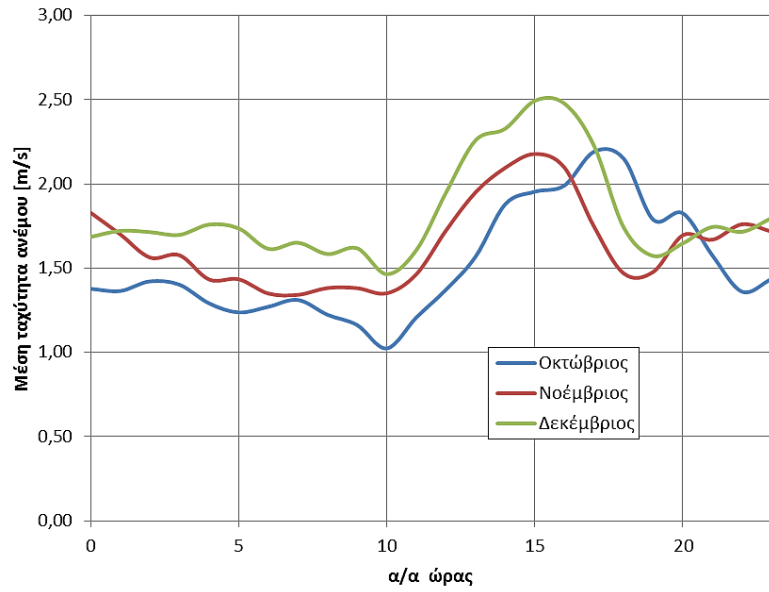
Εικόνα 6-9: Διακόμανση μέσης τιμής ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας.

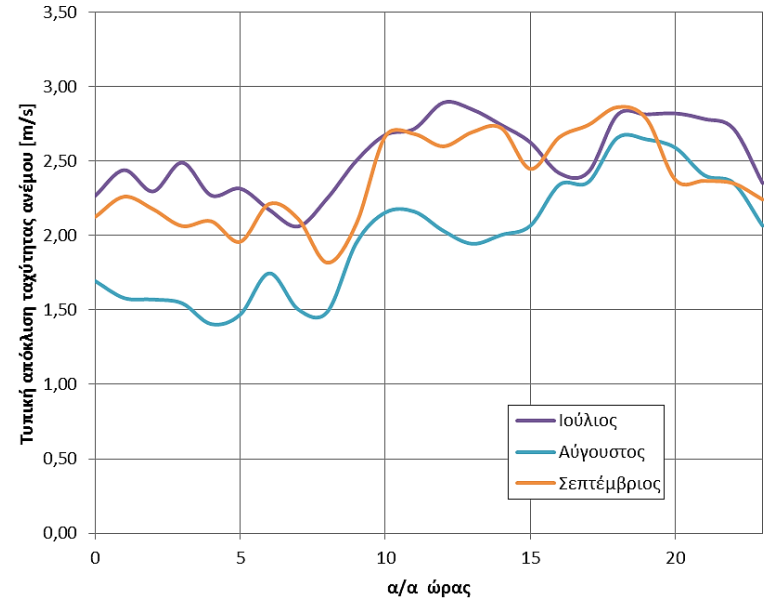
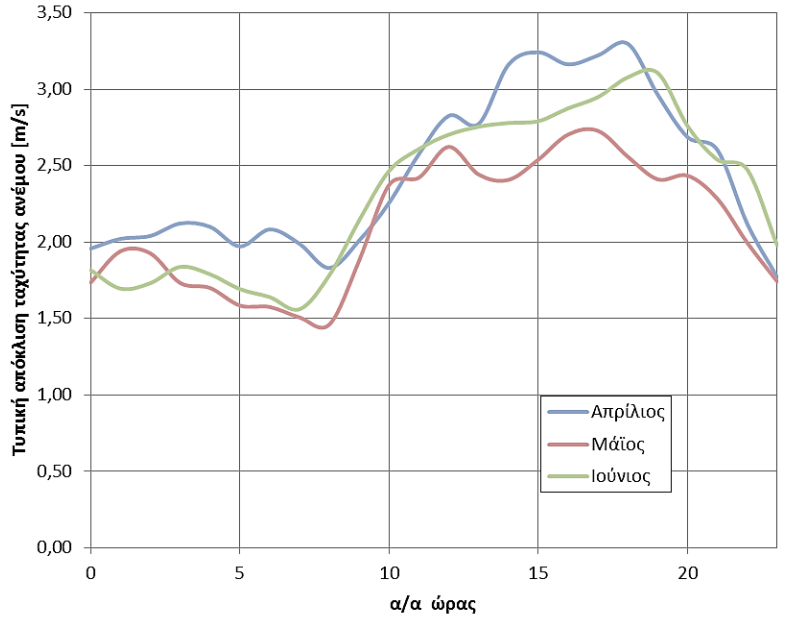
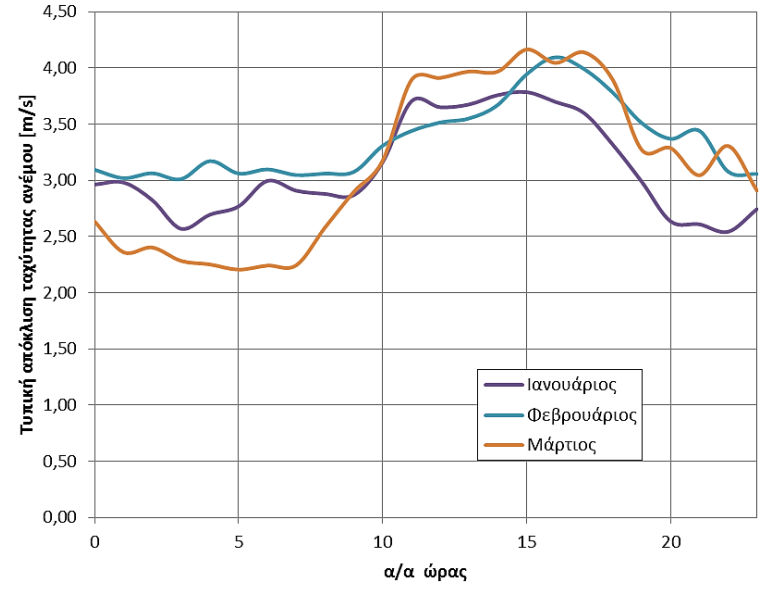
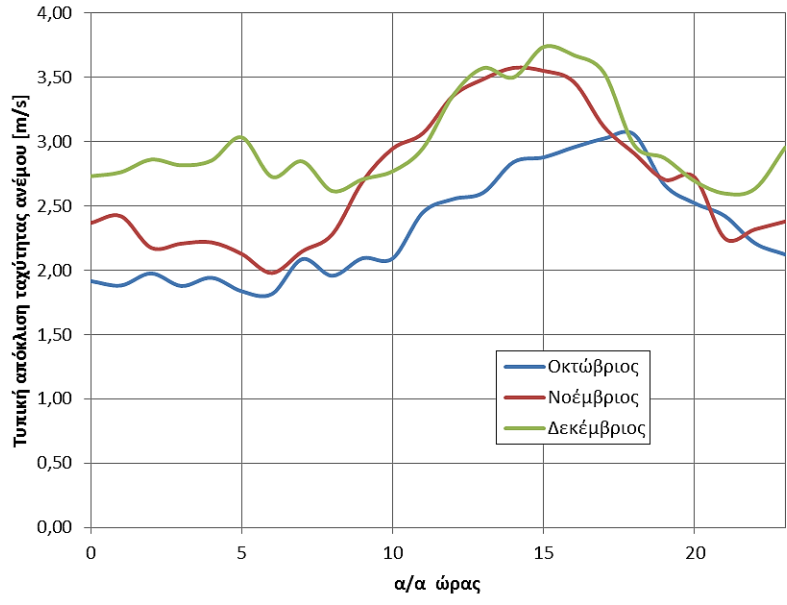


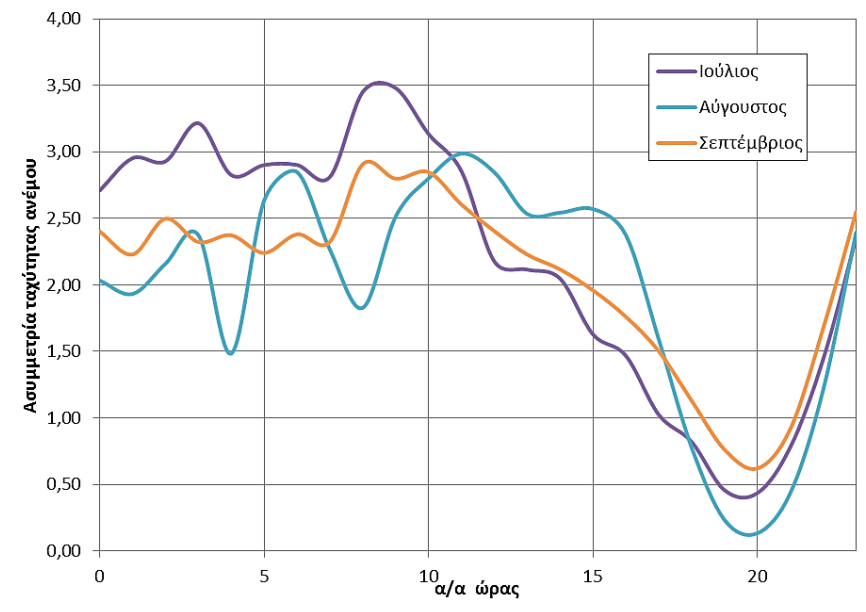
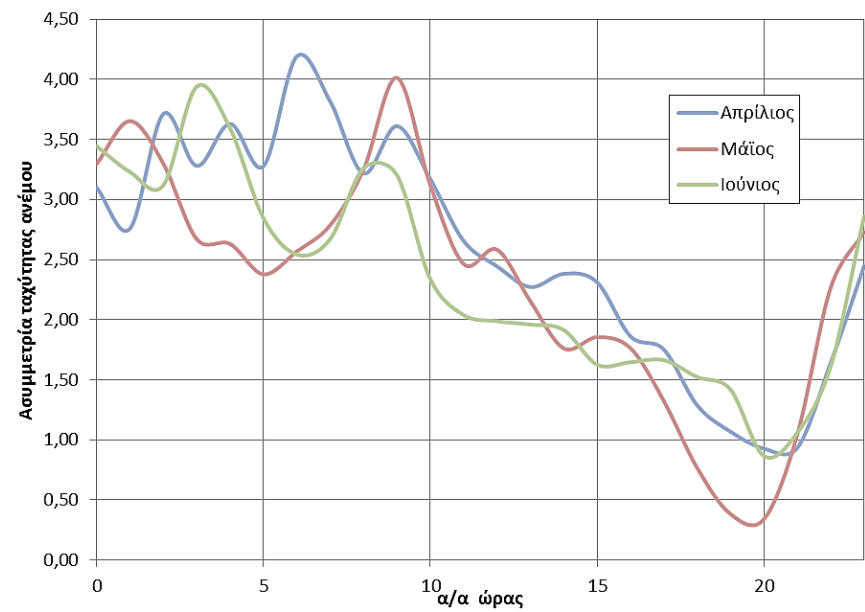
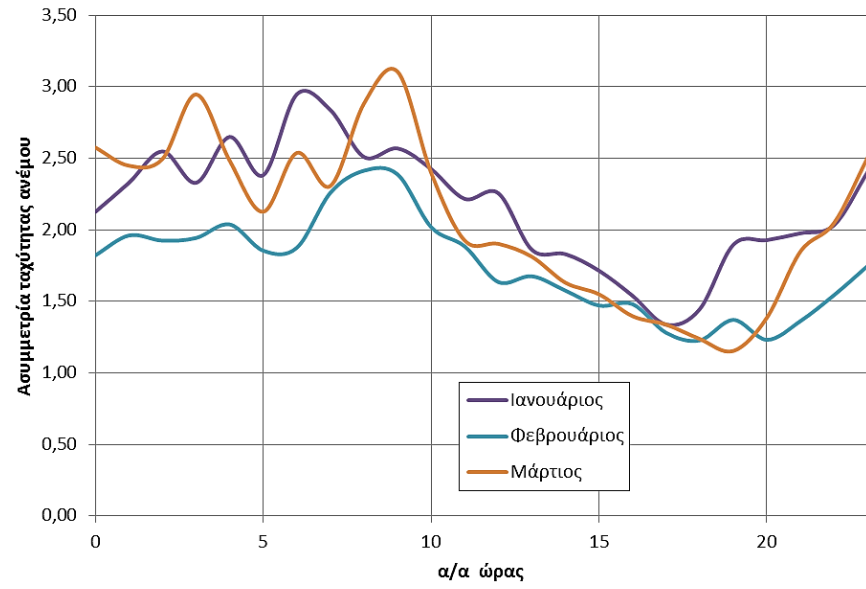
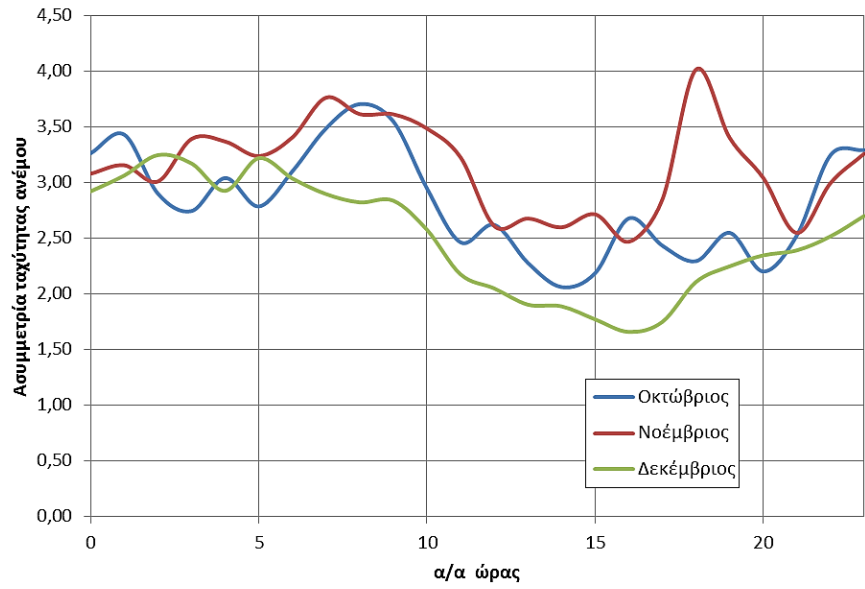
Εικόνα 6-10: Διακόμανση τυπικής απόκλισης ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 6-11: Διακόμανση ασυμμετρίας ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας.





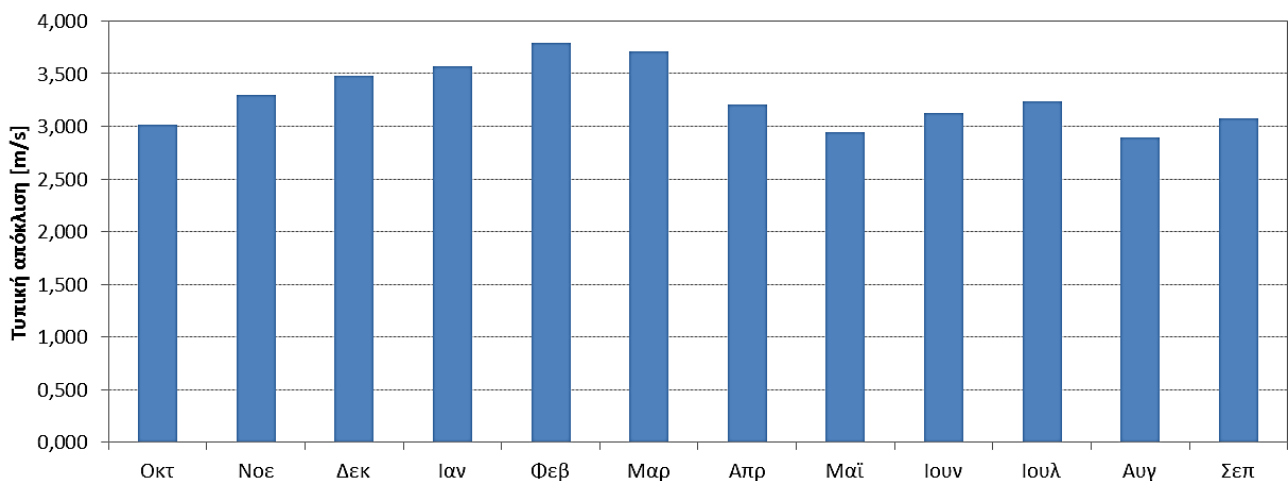
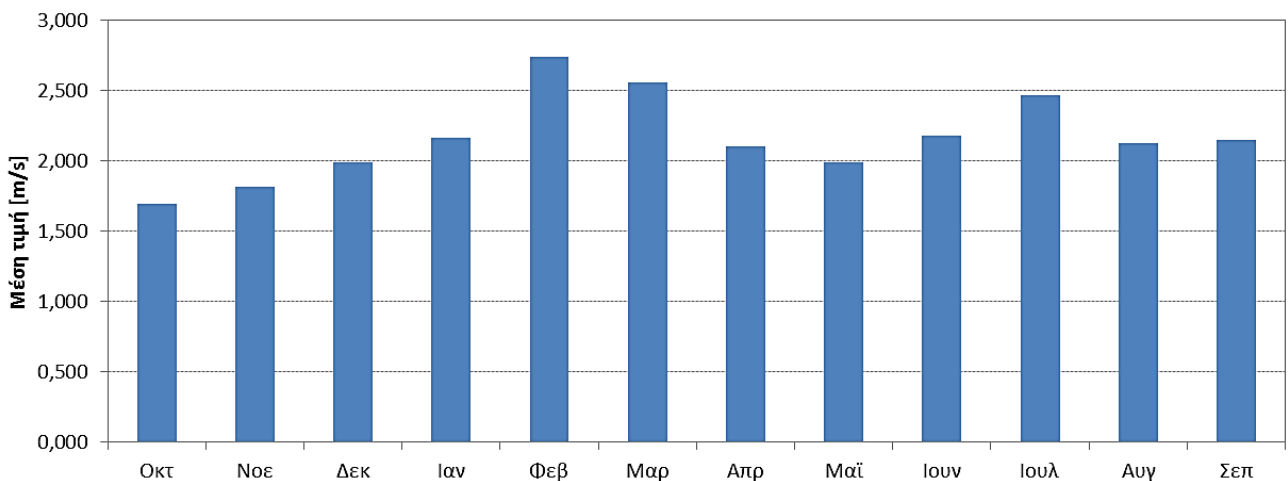


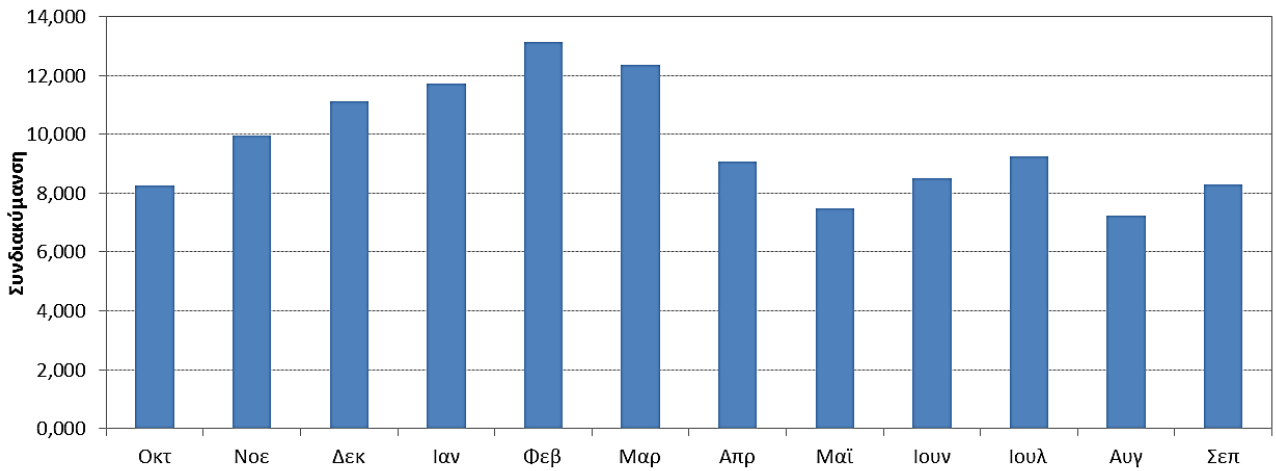
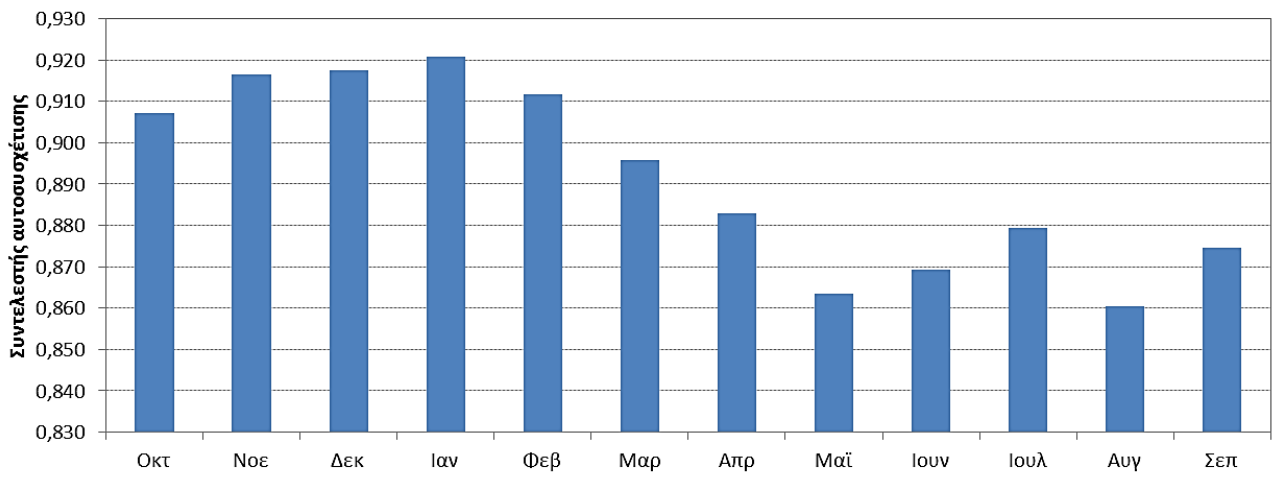
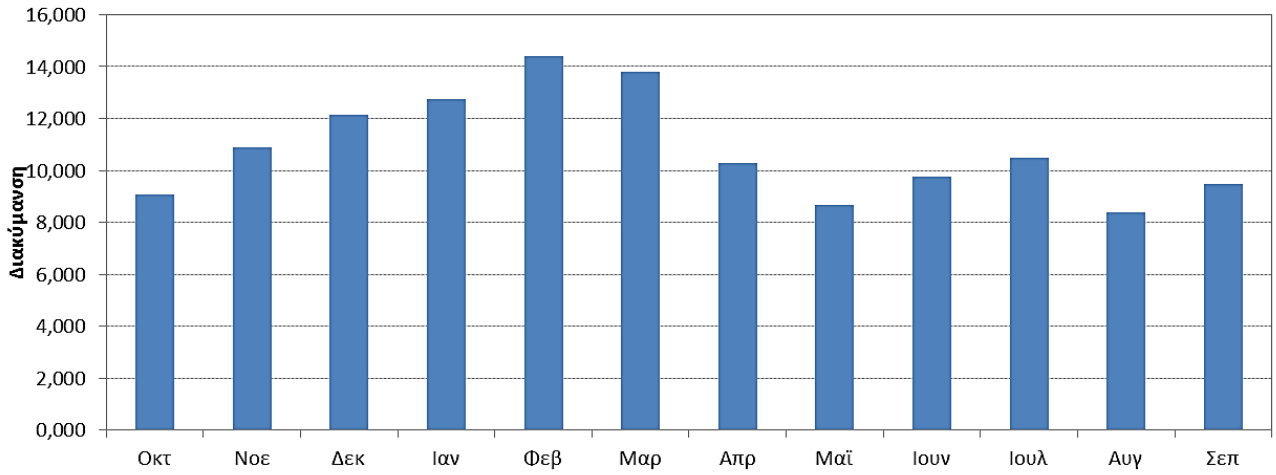
Εικόνα 6-12: Διακόμανση των στατιστικών χαρακτηριστικών σε ωριαία κλίμακα.
[149]

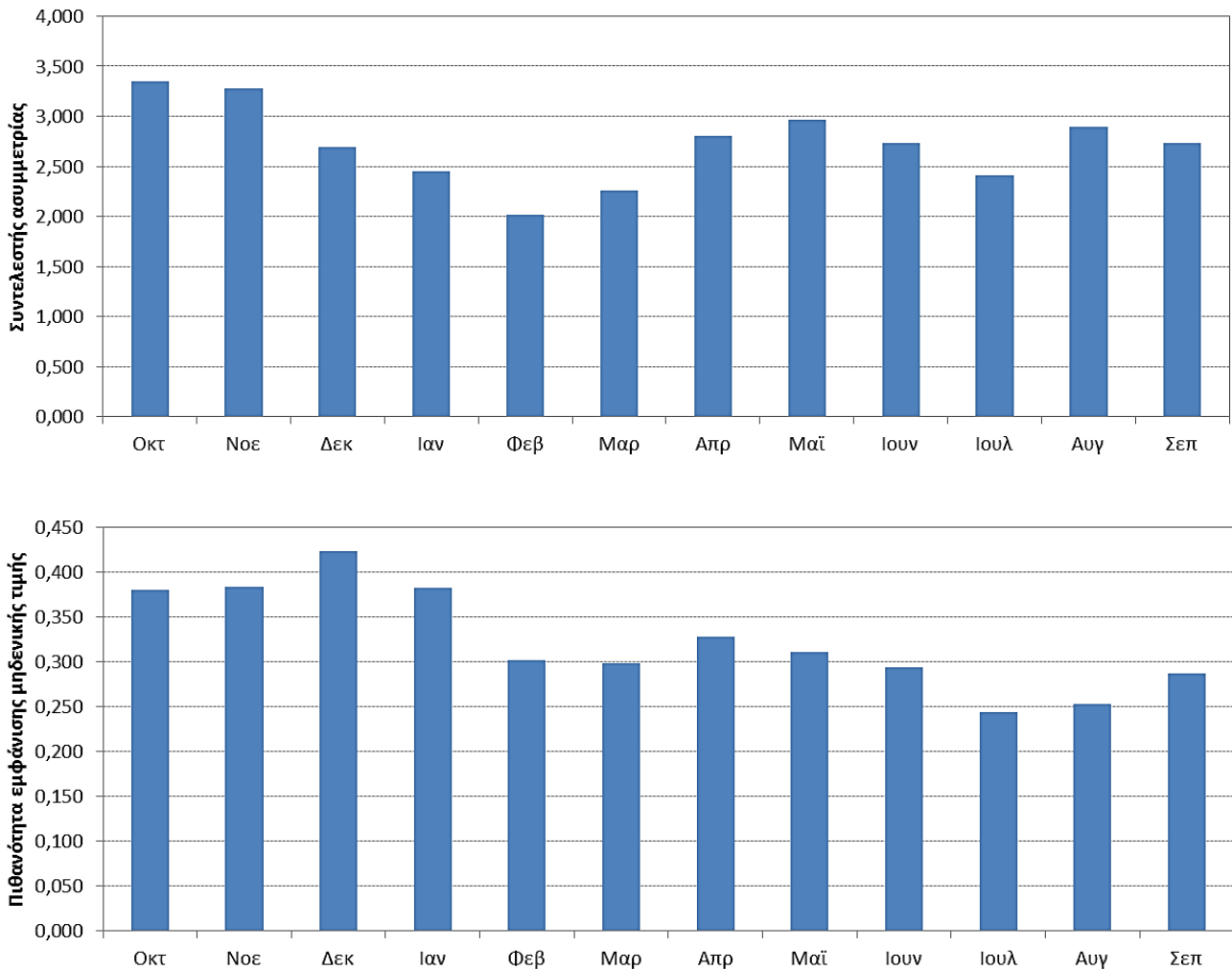
Στη συνέχεια (εικόνα 6-13) διακρίνουμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά της ιστορικής χρονοσειράς:

- i. Μέση τιμή.
- ii. Τυπική απόκλιση.
- iii. Διακύμανση.
- iv. Συντελεστής αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης.
- v. Συνδιακύμανση.
- vi. Συντελεστής ασυμμετρίας.
- vii. Πιθανότητα εμφάνισης μηδενικής τιμής (probability dry).

Το τελευταίο χαρακτηριστικό ενδιαφέρει ιδιαίτερα, γιατί εκφράζει το ποσοστό του χρόνου κάθε μήνα που έχουμε μηδενική παραγωγή ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες, ενώ αποτελεί ουσιαστικά το τέχνασμα για τη λειτουργία του μοντέλου Bartlett-Lewis για την προσομοίωση των ταχυτήτων ανέμου.







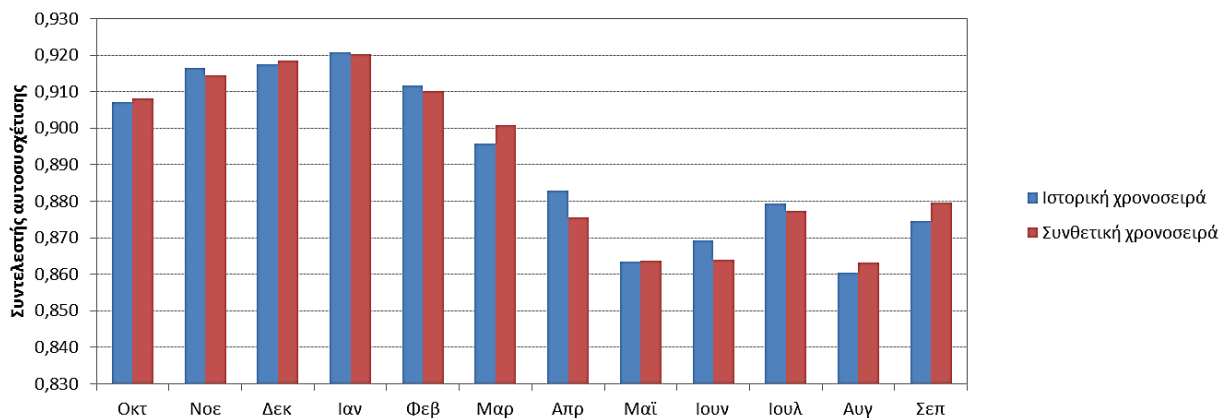
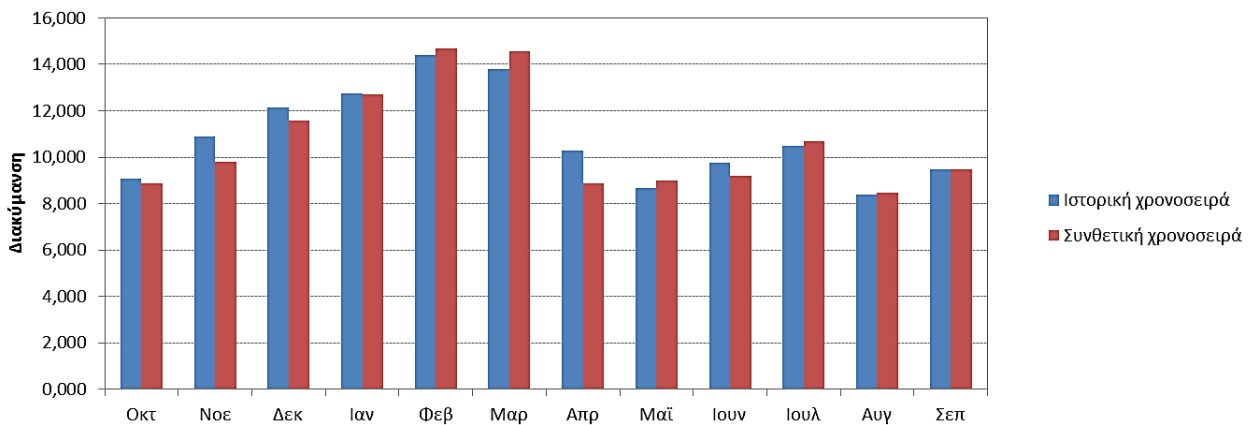
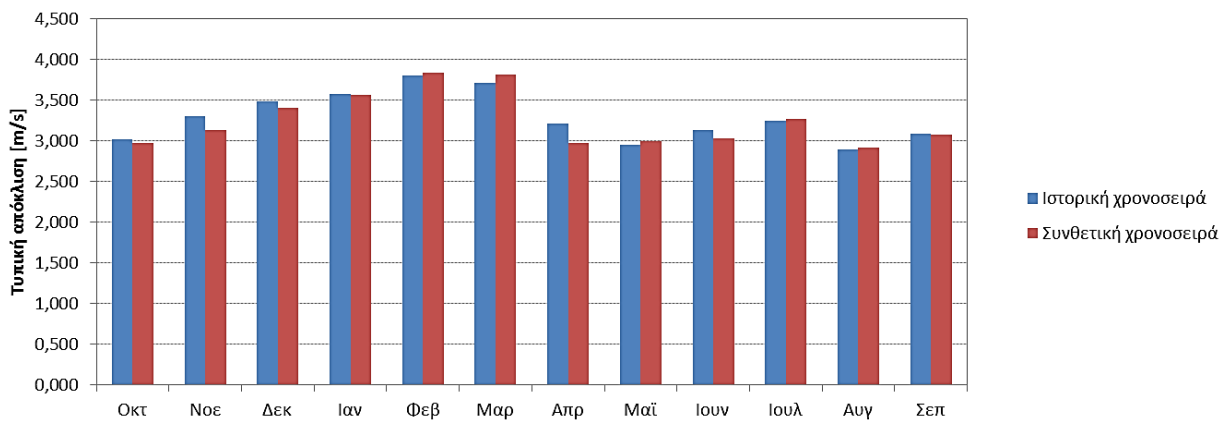
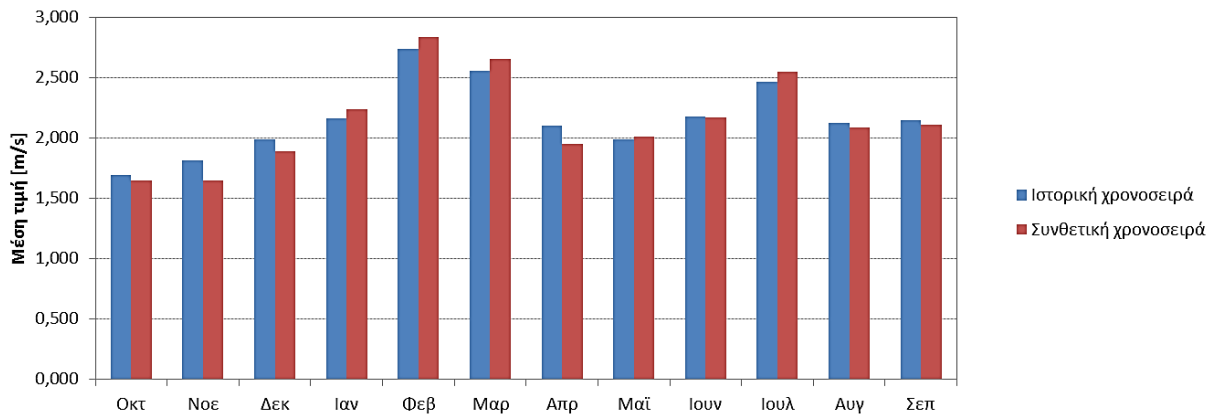
Εικόνα 6-13: Στατιστικά χαρακτηριστικά ιστορικής χρονοσειράς ταχύτητας ανέμου ανά μήνα.

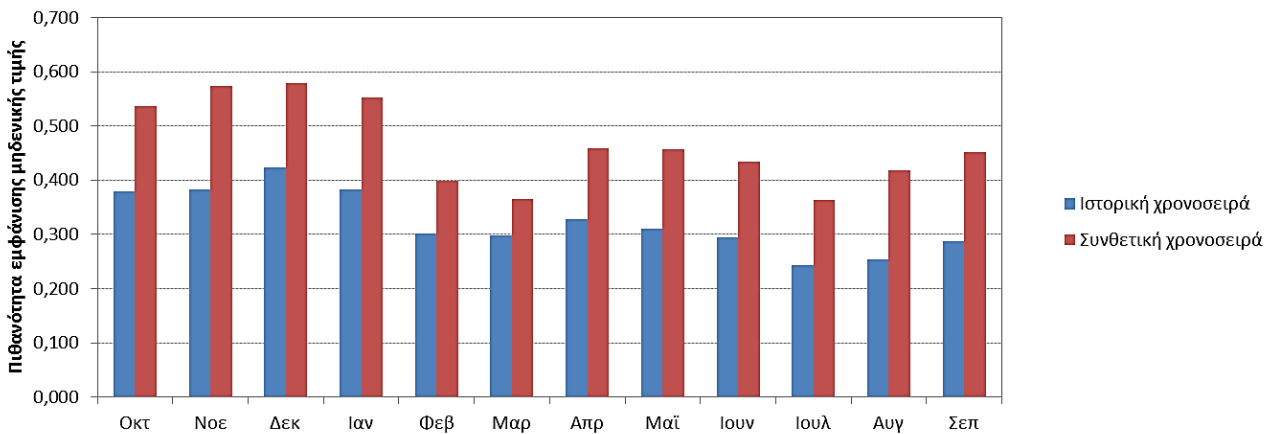
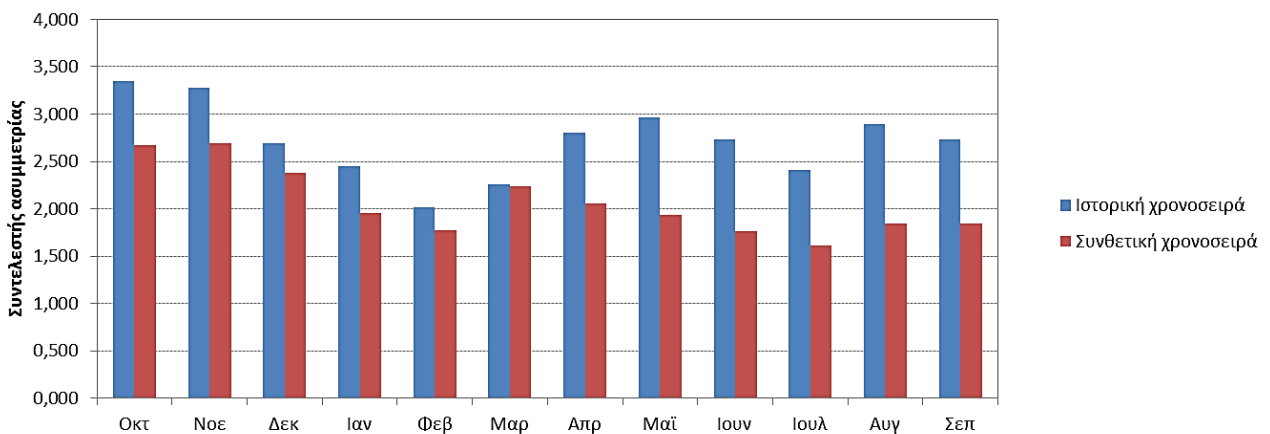
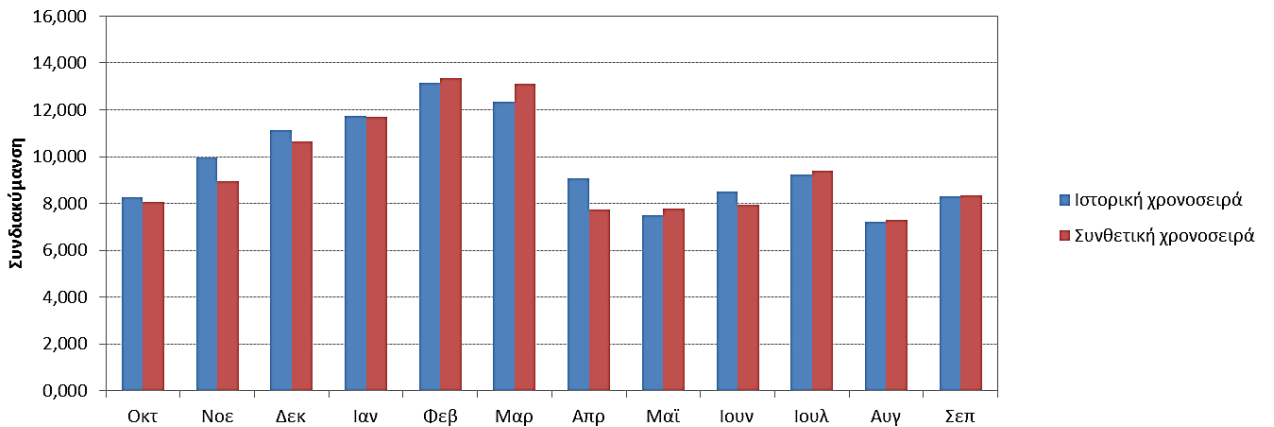
6.6. Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου

Η παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου έγινε με τη χρήση του προγράμματος HYETOS-R που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του Κοσιέρη (2011). Το πακέτο HYETOS-R σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε με σκοπό να παρέχει ένα ολοκληρωμένο εργαλείο επιμερισμού και παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών ύψους βροχής σε λεπτές χρονικές κλίμακες, σε περιβάλλον R.

Για να δοκιμαστεί η λειτουργία του προγράμματος για την παραγωγή ταχυτήτων ανέμου αρχικά παράχθηκαν συνθετικές χρονοσειρές με μήκος 50 χρόνια, αντί για 1000 που είναι το μήκος της περιόδου προσομοίωσης. Στα πλαίσια αυτής της διερεύνησης έγινε σύγκριση των στατιστικών χαρακτηριστικών της ενότητας 6.5 με αυτά της συνθετικής χρονοσειράς.

Στην εικόνα 6-14 διακρίνουμε τη σύγκριση των χαρακτηριστικών της ιστορικής και της συνθετικής χρονοσειράς.



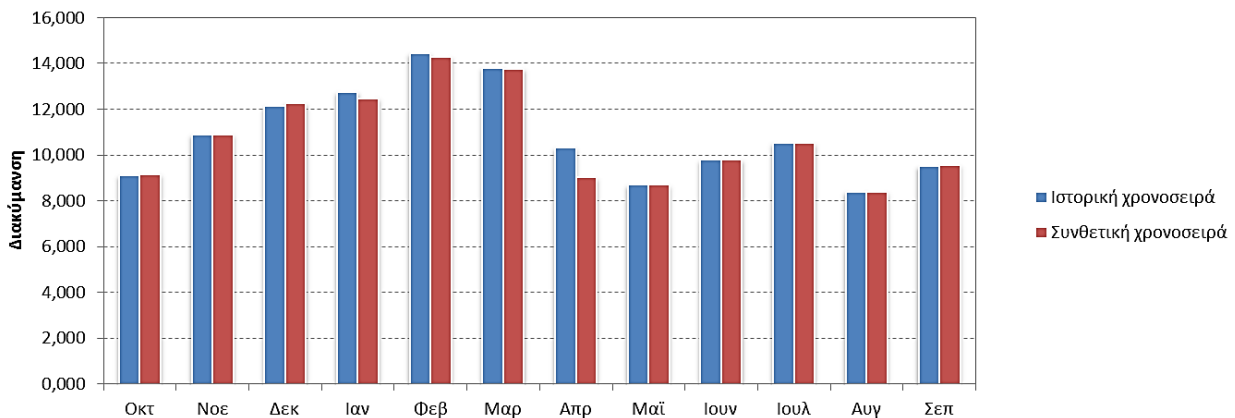
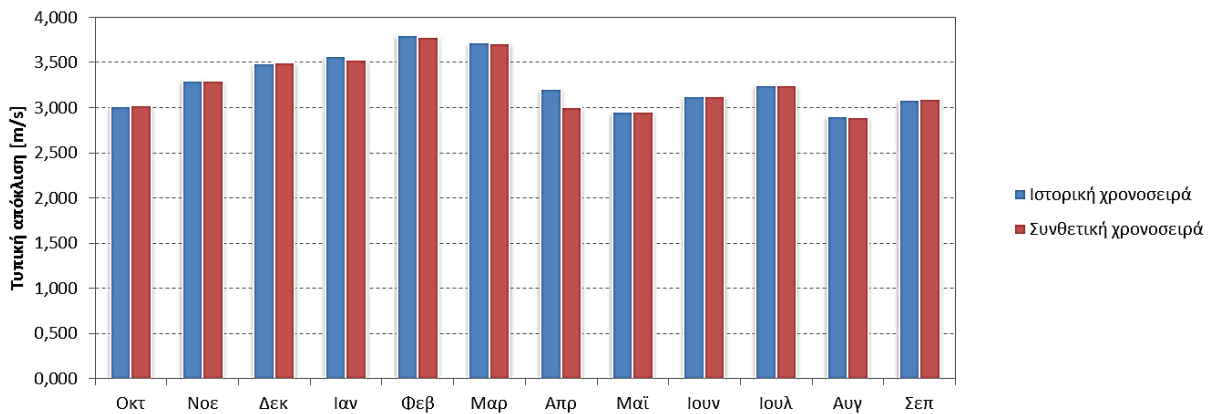
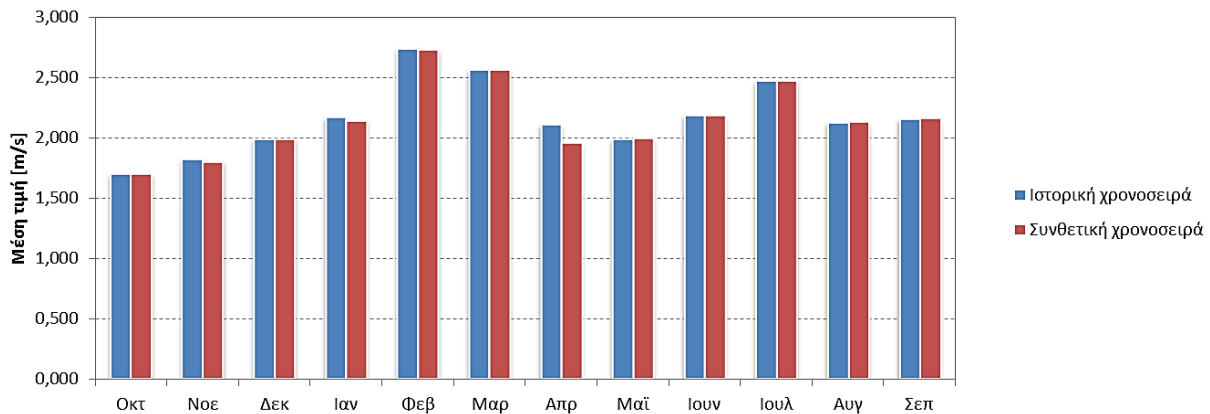


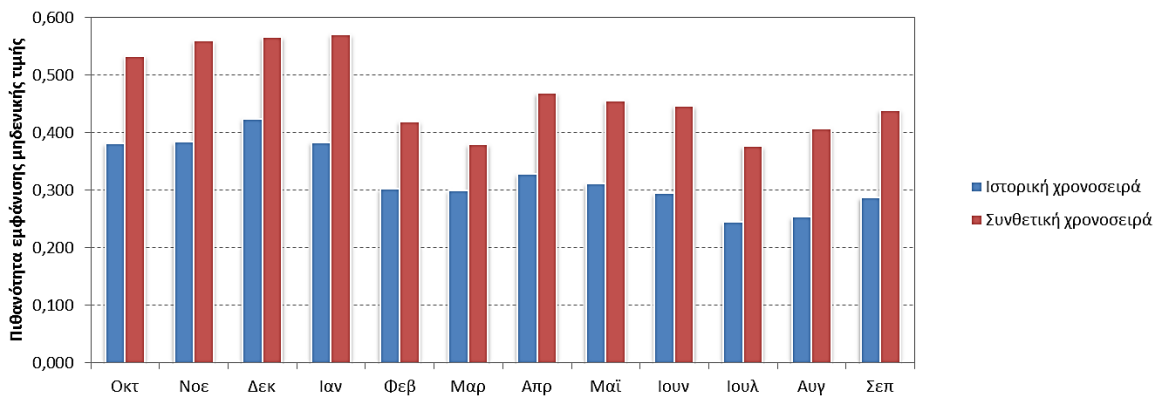
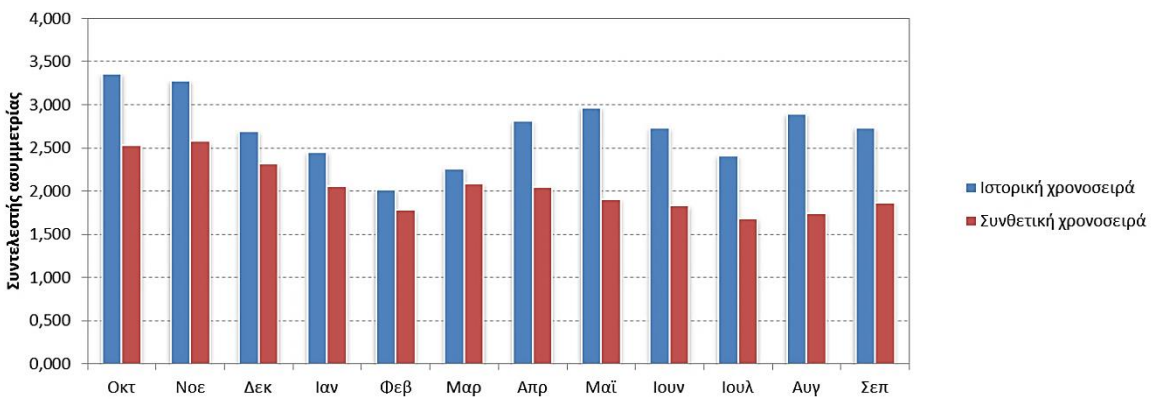
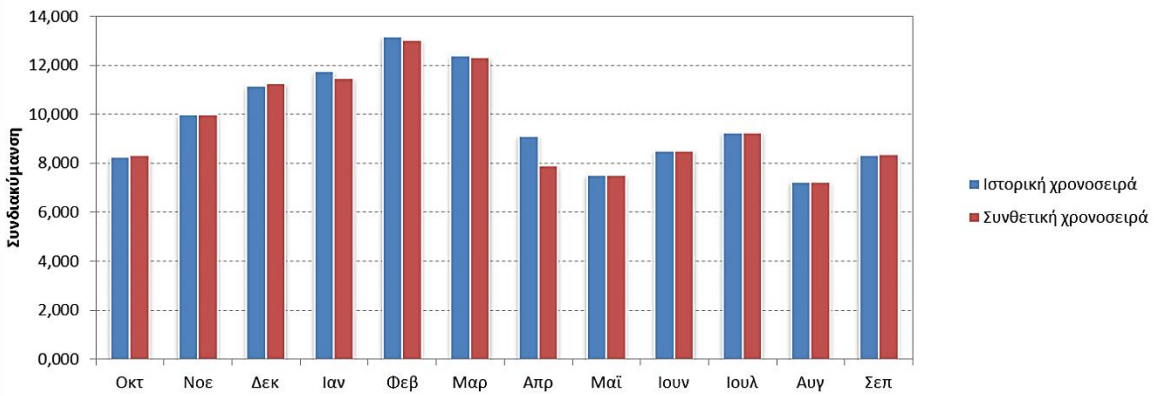
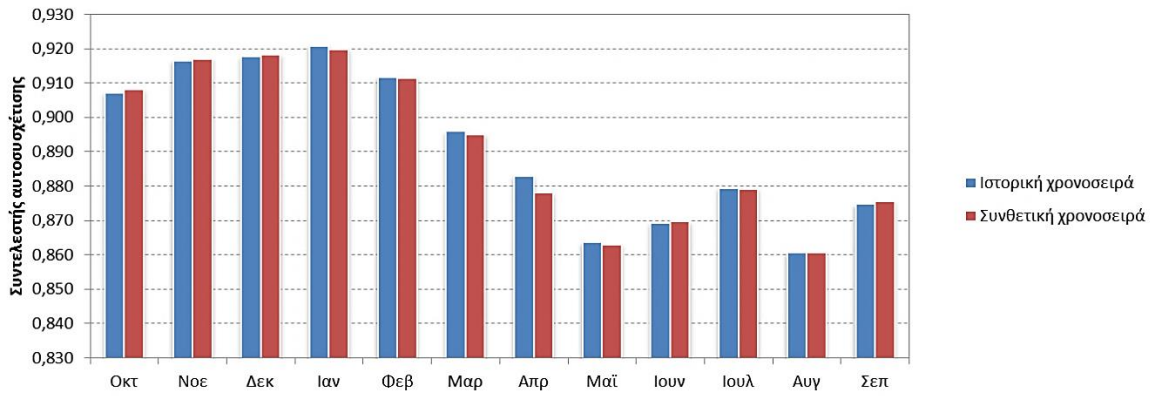
Εικόνα 6-14: Σύγκριση στατιστικών χαρακτηριστικών ιστορικής χρονοσειράς με τη συνθετική μήκους 50 ετών.

Παρατηρούμε πως το στοχαστικό μοντέλο παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών μπορεί να αναπαράγει με μεγάλη ακρίβεια τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής χρονοσειράς. Μόνη εξαίρεση ο συντελεστής ασυμμετρίας: η ιστορική χρονοσειρά εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές σε κάθε μήνα εξαιτίας της εγγενούς μεταβλητότητας και διακυμαινόμενης συμπεριφοράς των ταχυτήτων ανέμου στην πραγματικότητα σε σχέση με το μοντέλο (που έχει κατασκευαστεί για την παραγωγή καταγίδων που εν γένει δεν έχουν την ίδια μεταβλητότητα με τον άνεμο).

Από την άλλη, η πιθανότητα εμφάνισης μηδενικής τιμής είναι μεγαλύτερη στη συνθετική χρονοσειρά, ακριβώς για το λόγο που περιγράφηκε παραπάνω.

Εφόσον το μοντέλο Bartlett-Lewis ανταποκρίνεται με ακρίβεια στην αναπαραγωγή των στατιστικών χαρακτηριστικών της ιστορικής χρονοσειράς ταχυτήτων ανέμου, χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς ταχυτήτων στην ωριαία κλίμακα. Η νέα συνθετική χρονοσειρά έχει μήκος ίσο με αυτό της περιόδου προσομοίωσης, δηλαδή τα 1000 χρόνια. Στην εικόνα 6-15 διακρίνουμε τη σύγκριση των στατιστικών χαρακτηριστικών ιστορικής και συνθετικής χρονοσειράς μήκους 1000 ετών.





Εικόνα 6-15: Σύγκριση στατιστικών χαρακτηριστικών ιστορικής χρονοσειράς με τη συνθετική μήκους 1000 ετών.

Από τα γραφήματα αυτά βλέπουμε πως η ακρίβεια στην αναπαραγωγή των στατιστικών χαρακτηριστικών από τη συνθετική χρονοσειρά μήκους 1000 ετών είναι ακόμα μεγαλύτερη από εκείνη μήκους 50 ετών. Οι τιμές είναι ταυτόσημες σε όλα τα στατιστικά μεγέθη πλην συντελεστή ασυμμετρίας και πιθανότητας εμφάνισης μηδενικής τιμής για τους λόγους που εξηγήθηκαν και προηγουμένως.

Στο παράρτημα παρατίθεται ένα σύνολο γραφημάτων που δείχνουν τη διακύμανση των στατιστικών χαρακτηριστικών κατά τη διάρκεια της ημέρας, τόσο για τη συνθετική όσο και για την ιστορική χρονοσειρά. Παράλληλα, παρατίθεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών μέσω του πακέτου HYETOS-R¹⁸.

6.7. Προσομοίωση παραγωγής ενέργειας της ανεμογεννήτριας

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία προσομοίωσης της παραγωγής ενέργειας από την ανεμογεννήτρια. Στα πλαίσια αυτής της ενότητας χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα MATLAB™ για την επεξεργασία των δεδομένων λόγω της ευχέρειας που παρέχει στη διαχείριση πινάκων και στις πράξεις μεταξύ τους. Ο συνολικός κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο παράρτημα για λόγους πληρότητας της εργασίας. Εδώ θα αναλυθεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε.

- i. Υπολογίστηκε το πολυώνυμο που παρεμβάλλει την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, δηλαδή η σχέση 6.2 μέσω της συνάρτησης `polyfit` του MATLAB™:

```
%Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας
turb=xlsread('kilkis_anemos.xlsx',2,'B4:C28');
windspeed=turb(:,1);
power=turb(:,2);
pcurve=polyfit(windspeed,power,6);
```

Μέσω της συνάρτησης `xlsread` διαβάστηκαν οι συντεταγμένες της καμπύλης ισχύος από φύλλο excel και διαχωρίστηκαν σε δύο στήλες (`windspeed`, `power`). Έπειτα χρησιμοποιήθηκε η σχέση παρεμβολής `pcurve`.

- ii. Μέσω του ακόλουθου βρόχου υπολογίζεται η παραγόμενη ενέργεια κάθε ώρας για τη χρονοσειρά κάθε μήνα ξεχωριστά. Παρατίθεται ως παράδειγμα το τμήμα του κώδικα για το μήνα Οκτώβριο:

```
%oct
octsize=size(oct);
for i=1:octsize
    if oct(i)<=2
        octenerghour(i)=0;
    else
        octenerghour(i)=polyval(pcurve,oct(i));
        if octenerghour(i)<0;
            octenerghour(i)=0;
        end
    end
end
```

¹⁸ Περισσότερες πληροφορίες για την ανάπτυξη του προγράμματος Υετός σε περιβάλλον γλώσσας R εδώ: <http://itia.ntua.gr/el/docinfo/1185/>

Το ίδιο το πρόγραμμα με τη θεωρητική του τεκμηρίωση εδώ: <http://itia.ntua.gr/el/softinfo/3/>

- iii. Στη συνέχεια γίνεται η συνάθροιση πρώτα από την ωριαία κλίμακα στην ημερήσια και κατόπιν από την ημερήσια στη μηνιαία. Χρησιμοποιείται η εντολή `reshape` του MATLAB™ που μετατρέπει έναν πίνακα στήλη σε μητρώο με επιθυμητές διαστάσεις. Κατόπιν αθροίζονται ανά ημέρα ή μήνα οι αντίστοιχες στήλες ή γραμμές του επαναδιαμορφωμένου πίνακα, ώστε να προκύψουν οι ημερήσιες και μηνιαίες χρονοσειρές. Ο αντίστοιχος κώδικας για το μήνα Οκτώβριο είναι:

```
octenerghour=octenerghour';
octenergmat=reshape(octenerghour,24,31000);
octmat=sum(octenergmat);
octcol=octmat';
octdaily=reshape(octcol,31,1000);
octmonthenerg=sum(octdaily);
octmonthenerg=octmonthenerg';
```

- iv. Υπολογίζεται η καμπύλη διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας για τη μία ανεμογεννήτρια, κατασκευάζοντας έναν ενιαίο πίνακα που περιέχει όλες τις μηνιαίες τιμές της παραγόμενης ενέργειας για όλη την περίοδο προσομοίωσης. Για την κατανομή των τιμών από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη χρησιμοποιείται η συνάρτηση `sort` του MATLAB™:

```
totalmonthenergy=vertcat(octmonthenerg,novmonthenerg,decmonthenerg,janmonthenerg,febmonthenerg,marmmonthenerg,aprmonthenerg,maymonthenerg,junmonthenerg,julmonthenerg,augmonthenerg,sepmonthenerg);
sorttotal=sort(totalmonthenergy,'descend');
```

- v. Επειδή οι χρονοσειρές που παράγονται ανά μήνα δεν αντιστοιχούν στις πραγματικές διαδοχές των τιμών (δηλαδή στην ακολουθία των μηνών, μιας και ο Υετός παράγει χρονοσειρές για κάθε μήνα, π.χ. μια χρονοσειρά με 12000 τιμές για τον Οκτώβριο) χρησιμοποιείται ένα σκέλος κώδικα για την αναδιάταξη των τιμών. Π.χ. για τον Οκτώβριο:

```
october=reshape(oct,744,1000);
```

Ο κώδικας αυτός είναι:

```
windseries=[october;november;december;january;february;march;april;may;june;july;august;september];
```

```
windser=windseries(:);
windsizer=size(windser);
```

```
for i=1:windsizer
    if windser(i)<=2
        windpower(i)=0;
    else
        windpower(i)=polyval(pcurve,windser(i));
        if windpower(i)<0;
            windpower(i)=0;
        end
    end
end
```

```
windpower=windpower';
windpowermat=reshape(windpower,24,365000);
```

```

windmat=sum(windpowermat);
windcolumn=windmat';
winddailymat=reshape(windcolumn,365,1000);

```

Ενώ στη συνέχεια από τον συνολικό πίνακα της παραγόμενης ενέργειας `winddailymat` εξάγονται οι τιμές του κάθε μήνα προς επαλήθευση μέσω της σύγκρισης με τις προηγούμενες:

```

windoct=winddailymat(1:31,:);
windnov=winddailymat(32:61,:);
winddec=winddailymat(62:92,:);
windjan=winddailymat(93:123,:);
windfeb=winddailymat(124:151,:);
windmar=winddailymat(152:182,:);
windapr=winddailymat(183:212,:);
windmay=winddailymat(213:243,:);
windjun=winddailymat(244:273,:);
windjul=winddailymat(274:304,:);
windaug=winddailymat(305:335,:);
windsep=winddailymat(336:365,:);

```

```

octmonth=sum(windoct);
novmonth=sum(windnov);
decmonth=sum(winddec);
janmonth=sum(windjan);
febmonth=sum(windfeb);
marmonth=sum(windmar);
aprmonth=sum(windapr);
maymonth=sum(windmay);
junmonth=sum(windjun);
julmonth=sum(windjul);
augmonth=sum(windaug);
sepmonth=sum(windsep);

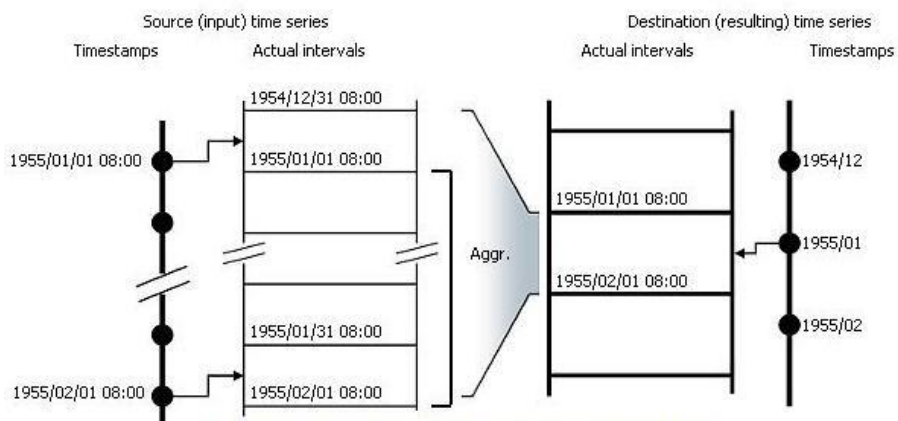
```

```

monthpowermat=[octmonth;novmonth;decmonth;janmonth;febmonth;marmonth;aprmonth;
maymonth;junmonth;julmonth;augmonth;sepmonth];
monthpowercol=monthpowermat(:);
monthpowersort=sort(monthpowercol,'descend');

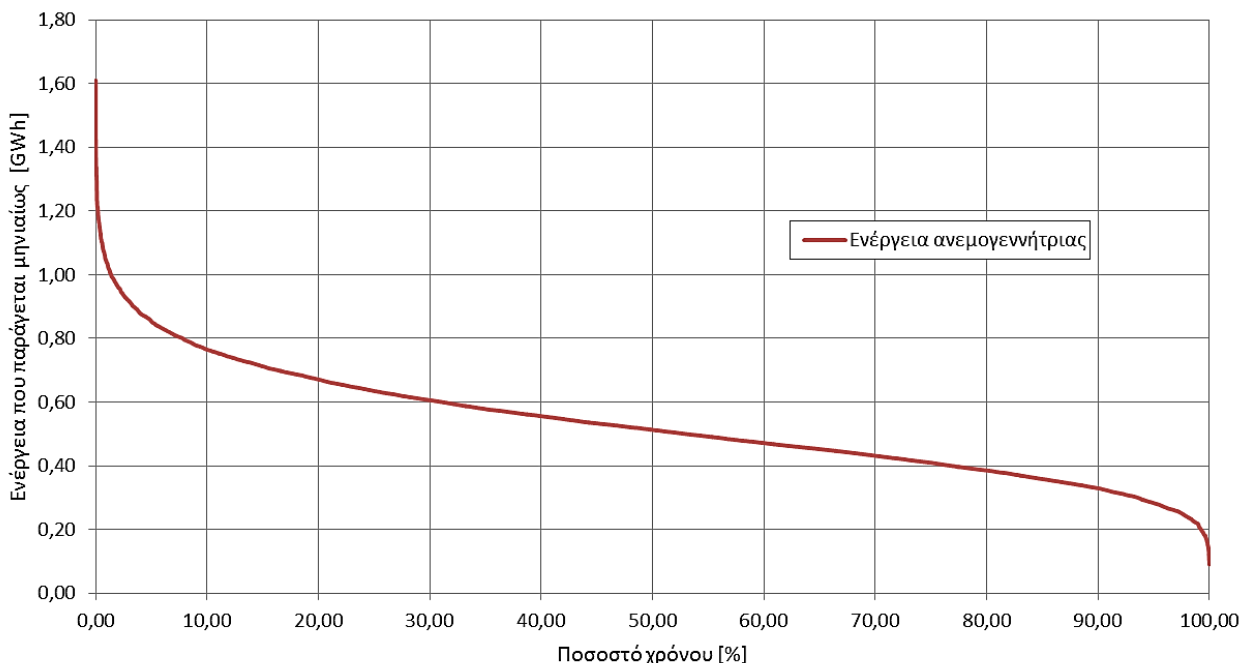
```

Η διαδικασία της συνάθροισης (aggregate) από τη μία κλίμακα στην άλλη (διαδοχικά ωριαία, ημερήσια, μηνιαία) εικονίζεται στην 6-16. Η εικόνα έχει παρθεί από το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος Υδρογνώμων.

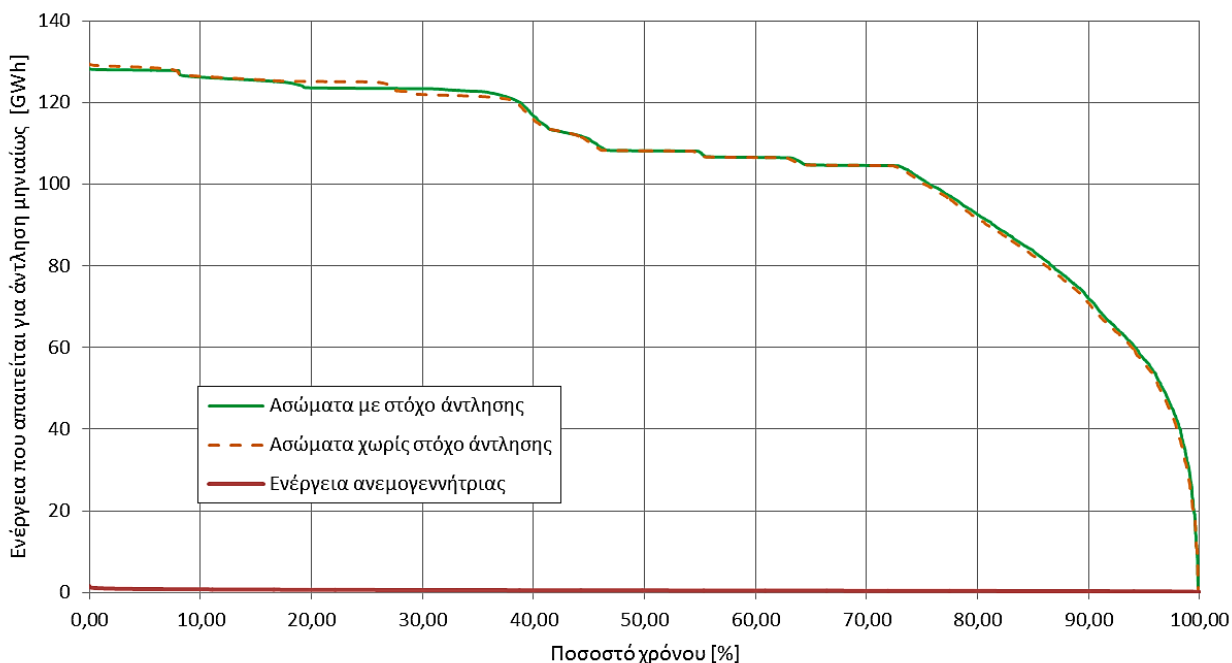


Εικόνα 6-16: Σχηματοποιημένη διαδικασία συνάθροισης (Πηγή: Ευστρατιάδης, Κοζάνης και Χριστοφίδης, 2009).

Η καμπύλη διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας από τη μία ανεμογεννήτρια διακρίνεται στην εικόνα 6-17. Το βήμα είναι μηνιαίο ώστε η καμπύλη να είναι συγκρίσιμη με τις αντίστοιχες καμπύλες του υδροσυστήματος. Η εν λόγω σύγκριση πραγματοποιείται με την καμπύλη διάρκειας ζήτησης ενέργειας της αντλίας του υδροσυστήματος Αλιάκμονα στην εικόνα 6-18.



Εικόνα 6-17: Καμπύλη διάρκειας παραγόμενης ενέργειας ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 6-18: Σύγκριση καμπύλης διάρκειας ζήτησης ενέργειας αντλίας με αυτή της παραγόμενης ενέργειας από την ανεμογεννήτρια.

7. Σχεδιασμός υβριδικού συστήματος: Διατύπωση του προβλήματος και αποτελέσματα της ανάλυσης

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του συνδυασμένου συστήματος υδροηλεκτρικής και αιολικής ενέργειας. Διατυπώνονται οι προκλήσεις και οι παραδοχές του δεδομένου προβλήματος ενώ περιγράφεται και η προτεινόμενη μεθοδολογία υπέρβασης ή επίλυσής του. Αφού τεθεί επαρκώς το πλαίσιο ανάλυσης και επίλυσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπό μορφή διαγραμμάτων και πινάκων ώστε να διευκολυνθεί η εποπτεία από μεριάς του αναγνώστη και του ενδεχόμενου μελετητή.

7.1. Αρχική διατύπωση του προβλήματος σχεδιασμού

Στην ενότητα 3.6 και στην εικόνα 3-14 τέθηκε το πρόβλημα βελτιστοποίησης του συνδυασμένου συστήματος διαχείρισης υδροηλεκτρικής και αιολικής ενέργειας. Ωστόσο, η θεώρηση αυτή προϋποθέτει την ανάπτυξη λογισμικού που θα εμπεριέχει και συνιστώσα μοντελοποίησης του αιολικού πάρκου (βελτιστοποιώντας τη συνολική παραγωγή ενέργειας μέσω παραμετροποίησης του αριθμού και της εγκατεστημένης ισχύος των ανεμογεννητριών).

Το πρόγραμμα ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ δεν παρέχει αυτή τη δυνατότητα μιας και η αρχική του στοχοθεσία ήταν η μοντελοποίηση υδροσυστημάτων ως προς την κάλυψη υδατικών ζητήσεων. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν οι δυνατότητες προσομοίωσης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στα πλαίσια της διπλωματικής του Μπουζιώτα (2012), με μερικές συμπερασματικές προτάσεις της να αξιοποιούνται και στην παρούσα εργασία ως προς τις χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις προς βελτιστοποίηση. Η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου διαχειριστικού εργαλείου που θα δίνει τη δυνατότητα συνολικής και ταυτόχρονης μοντελοποίησης ενός συστήματος που θα συνδυάζει υδροηλεκτρική, αιολική και ηλιακή ενέργεια αποτελεί ανάγκη που εκφράζεται ως βασικό συστατικό μιας πολιτικής βασισμένης στην ενεργειακή δημοκρατία και τις ανανεώσιμες πηγές. Περισσότερα γι αυτό το μεθοδολογικό πλαίσιο περιγράφονται στο κεφάλαιο 8.

Στη συγκεκριμένη εργασία ακολουθήθηκε μια μεθοδολογία διακριτής μοντελοποίησης του υδροηλεκτρικού και του αιολικού σκέλους. Για να διατυπωθεί ένα συνεκτικό πλαίσιο σχεδιασμού υποθέτουμε μια σταθερή ζήτηση ίση με 200 GWh ανά μήνα. Μια τέτοια ζήτηση αντιστοιχεί σε μια πόλη 50000 κατοίκων. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα εξάγεται από τις αναλύσεις της διπλωματικής του Ιωάννου (2012). Στη συγκεκριμένη εργασία η μέση ζήτηση του ελληνικού χώρου εκτιμάται σε 4290 GWh το μήνα. Οπότε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εξετάζεται μια ζήτηση που αποτελεί το 5% περίπου της ζήτησης της χώρας σε μηνιαίο επίπεδο.

Αν θεωρήσουμε πως P_w είναι η παραγωγή ενέργειας της μίας ανεμογεννήτριας σε μηνιαίο χρονικό βήμα (σε GWh) και n ο αριθμός ανεμογεννητριών του προς σχεδιασμό αιολικού πάρκου, τότε η συνολική ενέργεια είναι:

$$\Pi_w = n \cdot P_w \quad (7.1)$$

Η ζήτηση που περιγράψαμε προηγουμένως εκφράζεται με το σύμβολο D_A και είναι:

$$D_A = 150GWh \quad (7.2)$$

Η χρονοσειρά της ενέργειας που απαιτεί η αντλία Ασωμάτων για τη λειτουργία του συστήματος άντλησης-ταμίευσης συμβολίζεται ως E_p^* (σε GWh), ενώ η συνολική ενέργεια που παράγεται από τους ΥΗΣ του υδροσυστήματος Αλιάκμονα (Πολύφυτο, Σφηκιά, Ασώματα) συμβολίζεται με E_{tur}^* .

Όταν η συνολική ζήτηση καλύπτεται από την παραγωγή του αιολικού πάρκου έχουμε μια περίσσεια ενέργειας που συμβολίζεται ως E_p και υπολογίζεται από τη σχέση:

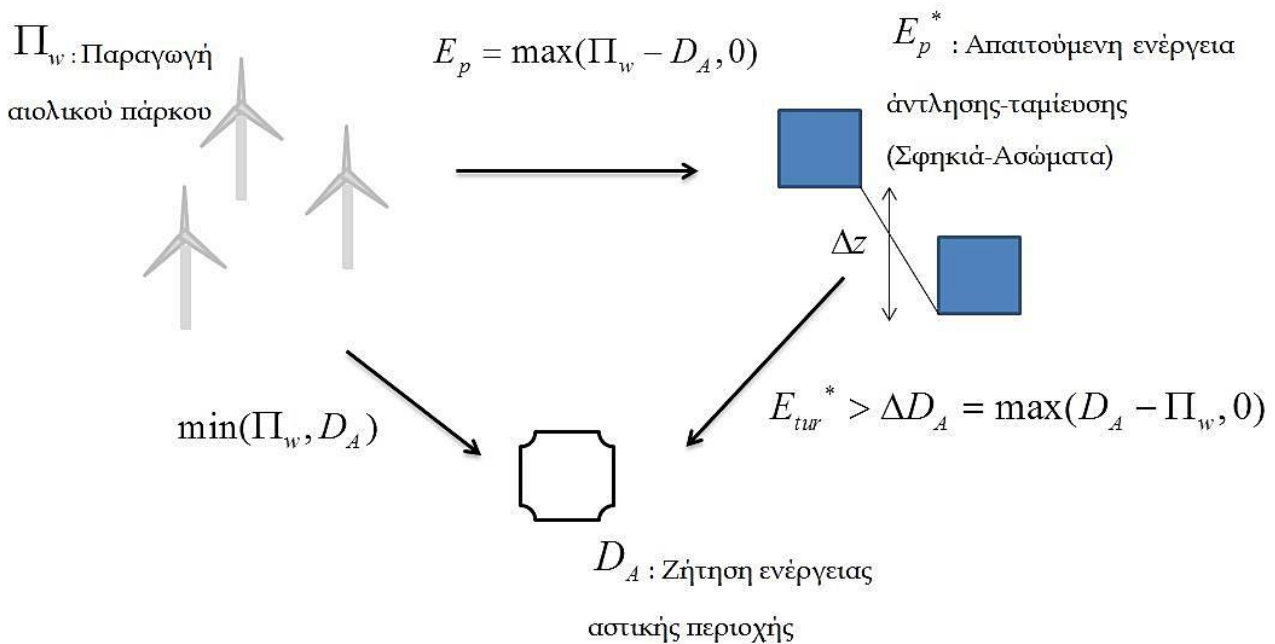
$$E_p = \max(\Pi_w - D_A, 0) \quad (7.3)$$

Αντίστοιχα όταν η ζήτηση δεν καλύπτεται από το αιολικό πάρκο, έχουμε ένα έλλειμμα ζήτησης, ΔD_A , το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta D_A = \max(D_A - \Pi_w, 0) \quad (7.4)$$

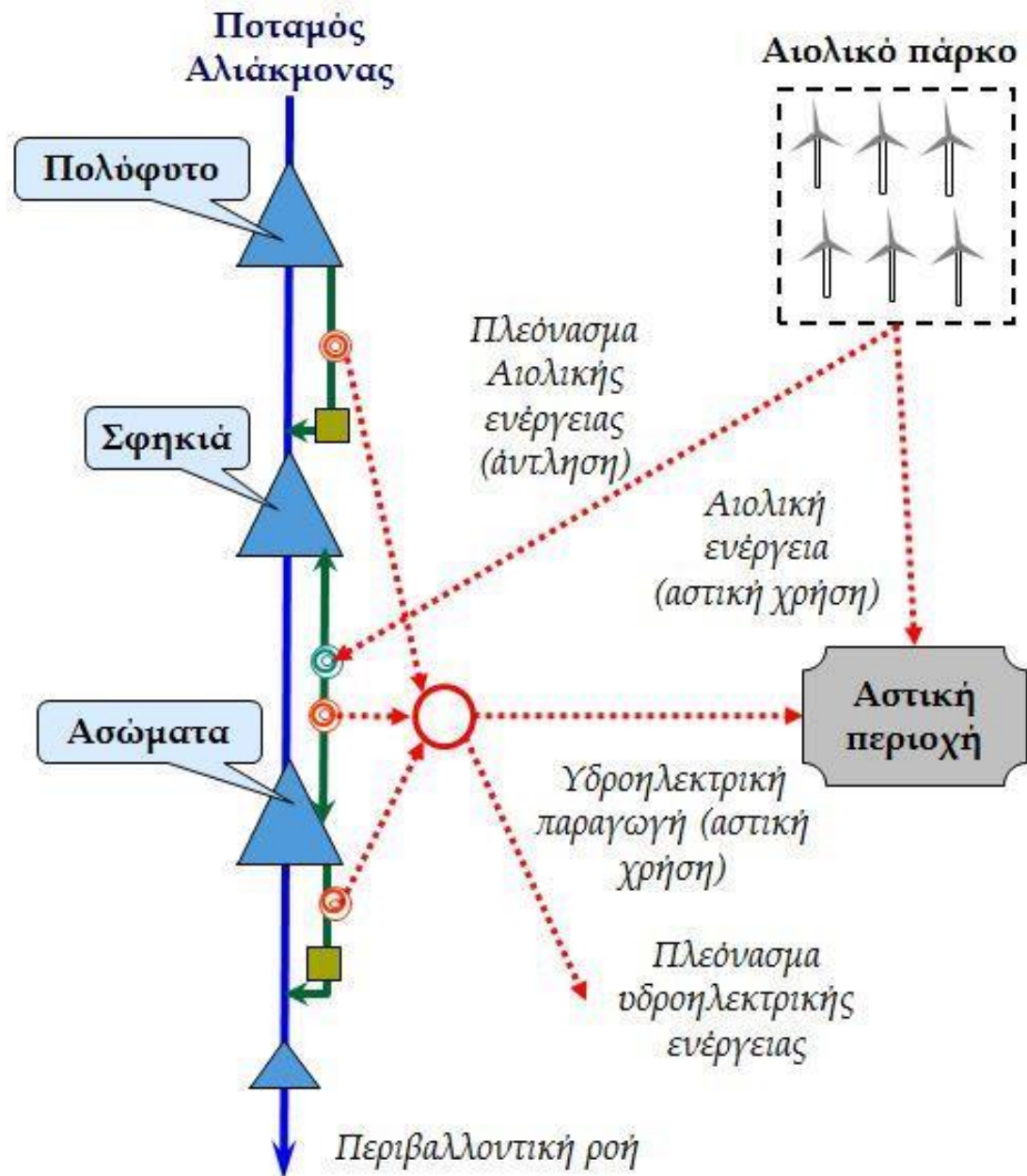
Η μεθοδολογία σχεδιασμού έγκειται στην στατιστική σύγκριση των χρονοσειρών E_p και E_p^* ώστε να επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος άντλησης-ταμίευσης με ταυτόχρονη κάλυψη των ενδεχόμενων ελλειμμάτων (ΔD_A) από την υδροηλεκτρική παραγωγή του υδροσυστήματος Αλιάκμονα.

Το πρόβλημα σχεδιασμού εικονίζεται σχηματικά στην 7-1.



Εικόνα 7-1: Σχηματοποίηση προβλήματος σχεδιασμού συνδυασμένου συστήματος υδροηλεκτρικής-αιολικής ενέργειας.

Στην επόμενη υποενότητα εξετάζουμε ποια μεγέθη επιλέγουμε να είναι υπό σχεδιασμό και με ποια μεθοδολογική ανάλυση επιλέγεται να γίνει ο εν λόγω σχεδιασμός. Κάποιες προβληματικές ως προς την εικονιζόμενη μοντελοποίηση εξετάζονται στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων και των ενδεχόμενων μελλοντικών προτάσεων προς αξιοποίηση (κεφάλαιο 8). Στην εικόνα 7-2 διακρίνουμε μια περισσότερο αναλυτική σχηματοποίηση του συνδυασμένου συστήματος σε σχέση με την εικόνα 7-1.



Εικόνα 7-2: Σχηματοποίηση του υβριδικού συστήματος. Απεικονίζονται οι ροές νερού και ενέργειας (Πηγή -μετά από τροποποίηση: Dimas, Bouziotas, Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2013¹⁹)

Σε κάθε ανάλυση που έχουμε κάνει στη συνέχεια, έχοντας θεωρήσει συγκεκριμένο ποσοστό λειτουργίας της αντλίας εντός της ημέρας (π.χ. 33% για 8ωρη λειτουργία), πρέπει να τροποποιηθεί η περίσσεια ενέργειας του αιολικού πάρκου πολλαπλασιάζοντας με το συντελεστή μείωσης ψ_2 ώστε να ληφθεί υπόψη το γεγονός πως αυτή η περίσσεια είναι διαθέσιμη για συγκεκριμένο διάστημα:

$$E_p = \psi_2 \cdot \max(\Pi_w - D_A, 0) \quad (7.5)$$

¹⁹ Η πλήρης παρουσίαση μπορεί να βρεθεί εδώ: <http://itia.ntua.gr/el/docinfo/1386/>

7.2. Θεώρηση-μεθοδολογία ανάλυσης και αποτελέσματα αρχικής θεώρησης

Στα πλαίσια της ανάλυσης που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα εξετάζουμε σε διαχειριστικό επίπεδο το ποσοστό διάρκειας άντλησης επί του συνόλου της ημέρας. Όπως περιγράφηκε και στην ενότητα 5.12 κατά τη βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος θεωρήθηκε ότι η άντληση πραγματοποιείται για 8 ώρες εντός της ημέρας, οπότε επιλέχθηκαν και οι τιμές $\psi_1=0,67$ και $\psi_2=0,33$ για την παραγωγή ενέργειας και την άντληση αντίστοιχα (όσον αφορά τους συντελεστές μείωσης).

Στα πλαίσια του σχεδιασμού του υβριδικού συστήματος εξετάζουμε τον αριθμό ανεμογεννητριών που απαιτείται για την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος άντλησης-ταμίευσης παράλληλα με την κατάλληλη επιλογή του ποσοστού λειτουργίας της αντλίας εντός της ημέρας. Τα σενάρια που εξετάζουμε φαίνονται στον πίνακα 7-1.

Πίνακας 7-1: Παράθεση σεναρίων σχεδιασμού υβριδικού συστήματος.

Σενάριο	Ωρες άντλησης/ ψ_2	Ωρες παραγωγής/ ψ_1
A1	8,00h/0,33	16,00h/0,67
A2	12,00h/0,50	12,00h/0,50
A3	14,40h/0,60	9,60h/0,40
A4	16,00h/0,67	8,00h/0,33

Τα αποτελέσματα των σεναρίων διακρίνονται στη συνέχεια. Για τη μετατροπή των χρονοσειρών από στήλες σε πίνακες χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος κώδικας MATLAB™:

```
clc
clear

close all

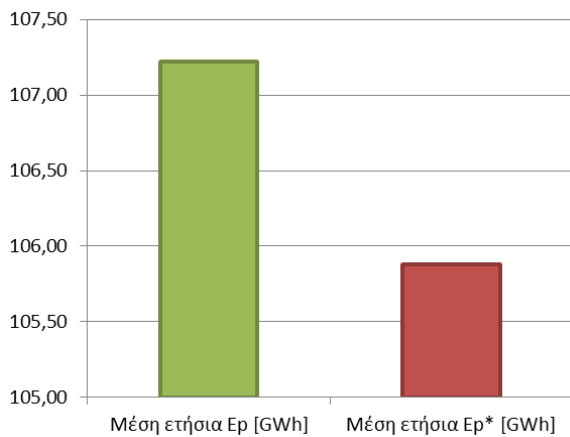
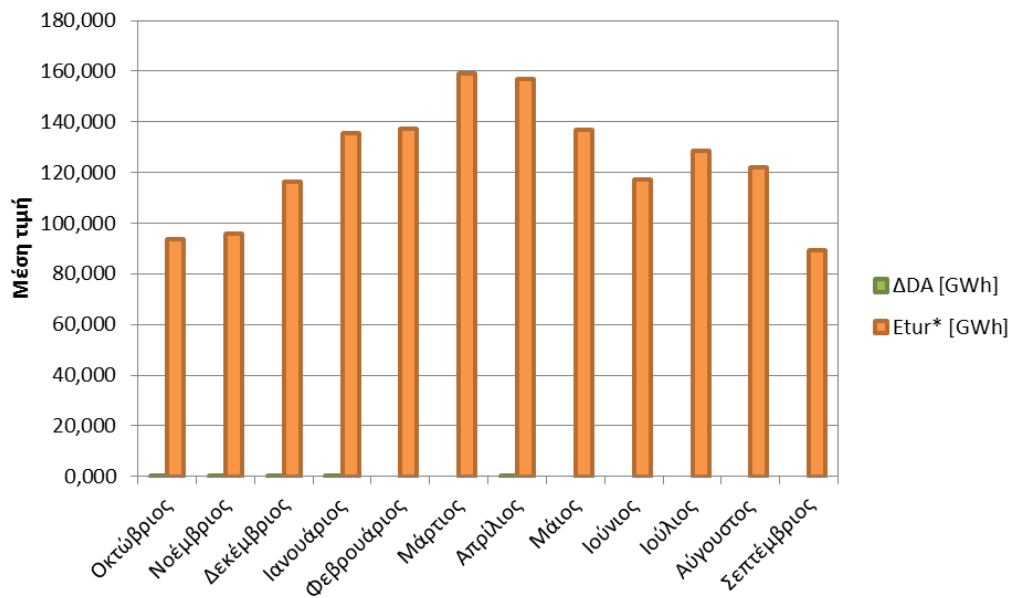
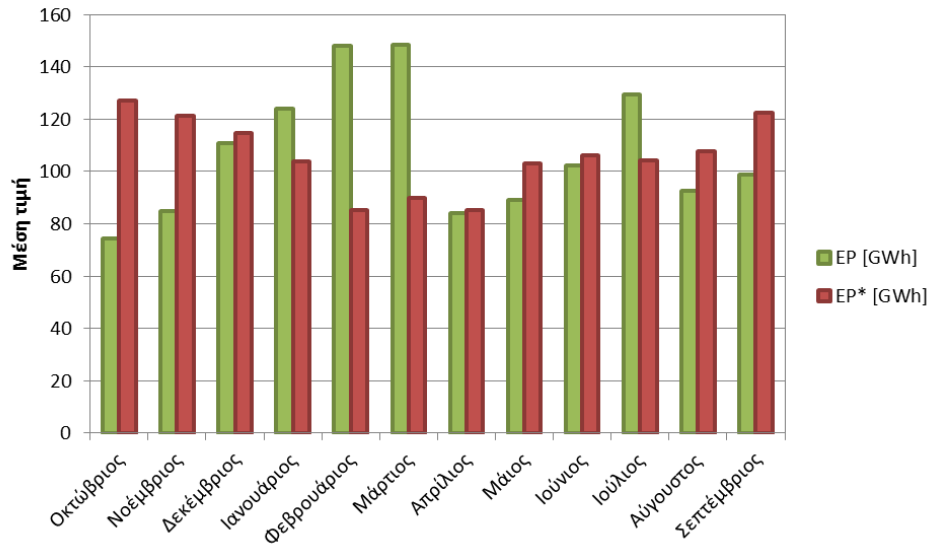
%Διάβασμα χρονοσειρών
Ew=xlsread('design4.xlsx',1,'E12:E12011');
Epr=xlsread('design4.xlsx',1,'P12:P12011');
Eturpr=xlsread('design4.xlsx',1,'Q12:Q12011');

Ewmat=reshape(Ew,12,1000);
Ewmat=Ewmat';
Eprmat=reshape(Epr,12,999);
Eprmat=Eprmat';
Eturprmat=reshape(Eturpr,12,999);
Eturprmat=Eturprmat';
```

Κάθε σενάριο παρουσιάζεται με την ακόλουθη μορφή:

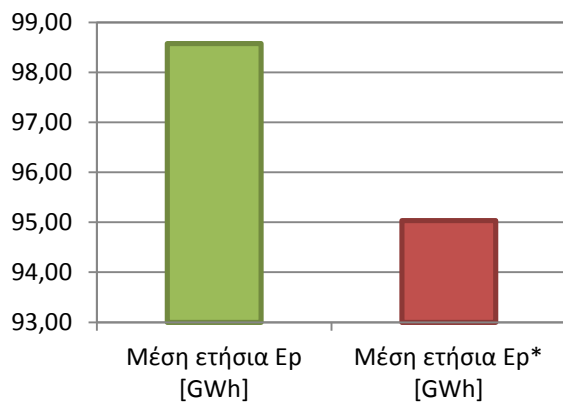
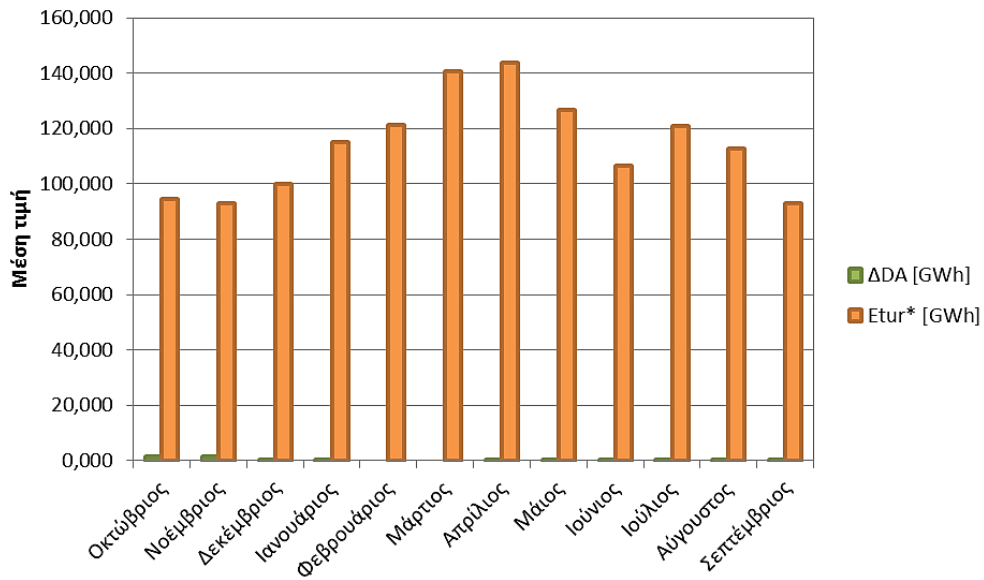
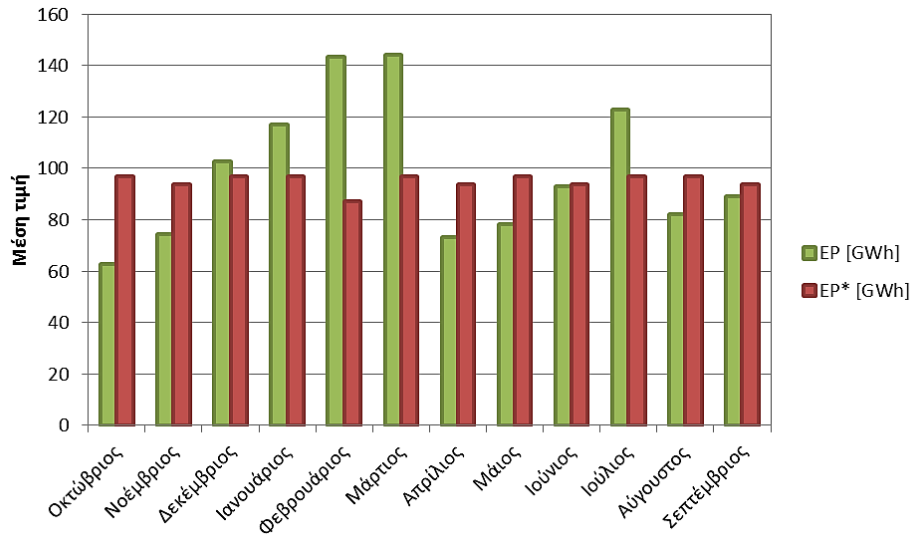
- Σύγκριση των χρονοσειρών E_p και E_p^* μέσω των μηνιαίων τιμών τους.
- Σύγκριση των χρονοσειρών ΔD_A και E_{tur}^* μέσω των μηνιαίων τιμών τους.
- Σύγκριση της μέσης ετήσιας τιμής της E_p και της E_p^* .
- Αριθμός απαιτούμενων ανεμογεννητριών κάθε σεναρίου.

Σε κάθε σενάριο παρουσιάζονται τρία διαγράμματα και ένας πίνακας.



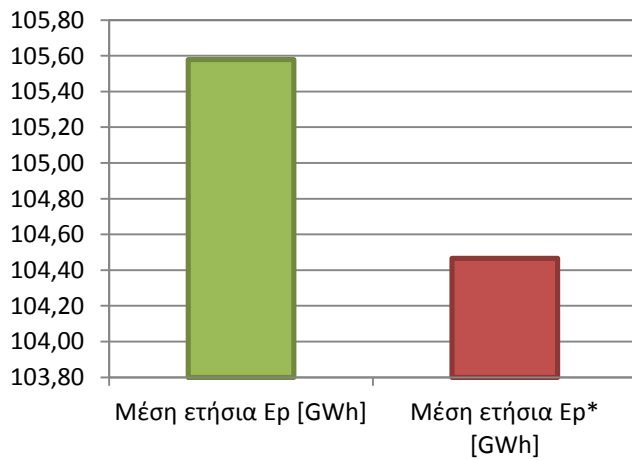
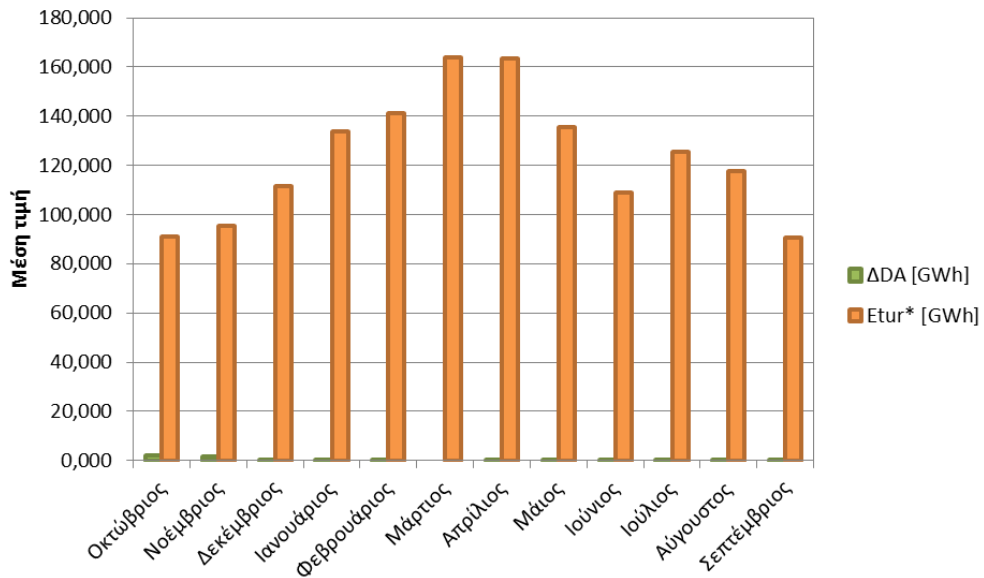
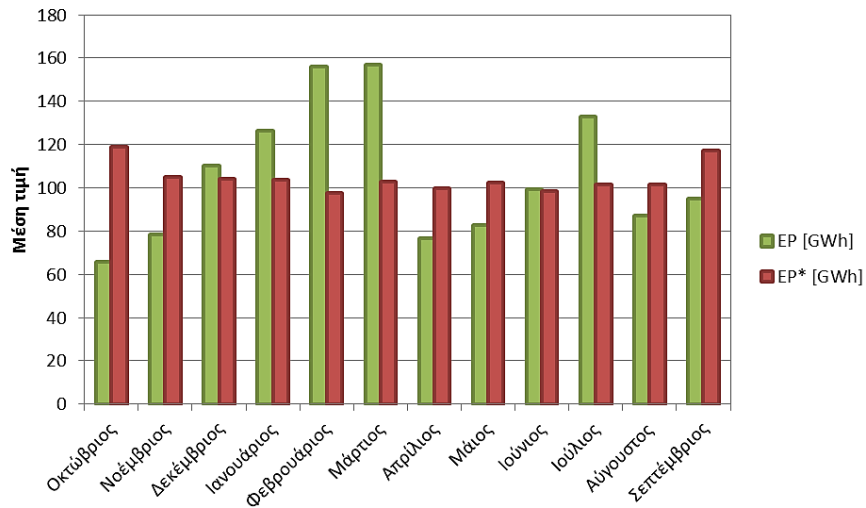
Μέση ετήσια E_p [GWh]	107,22
Μέση ετήσια E_p^* [GWh]	105,88
Αρ. ανεμογεννητριών	890

Εικόνα 7-3: Αποτελέσματα σεναρίου A1.



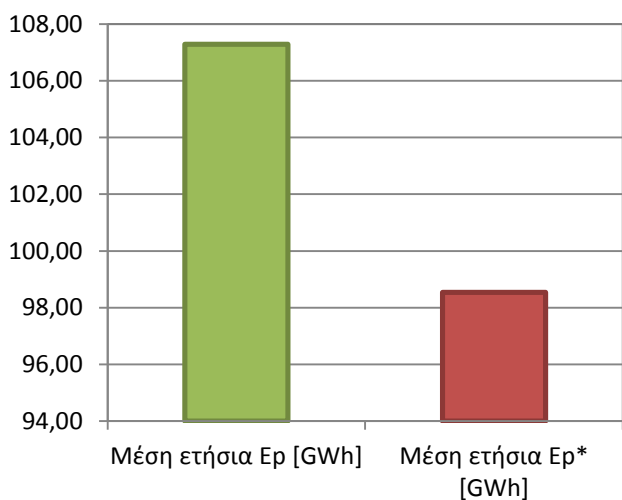
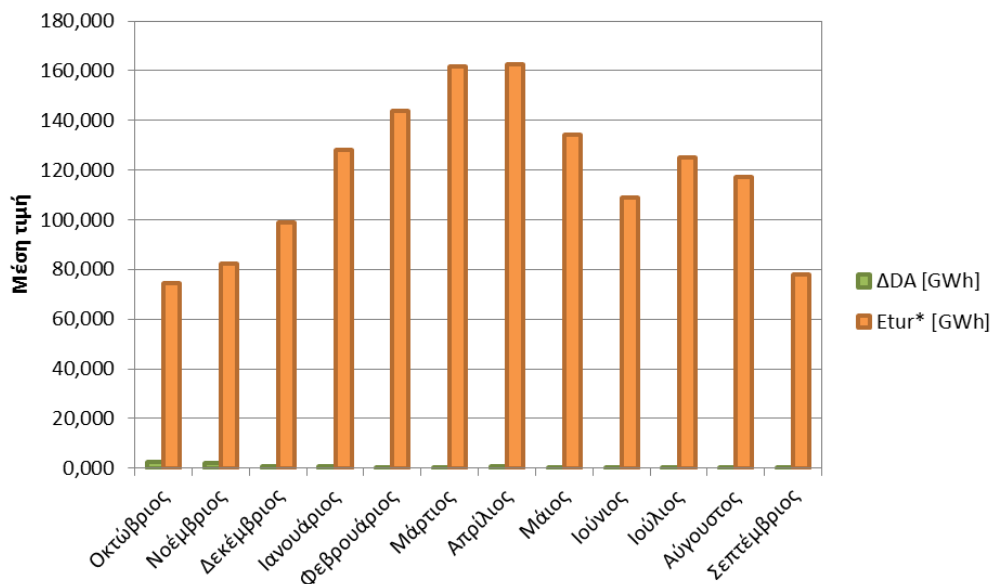
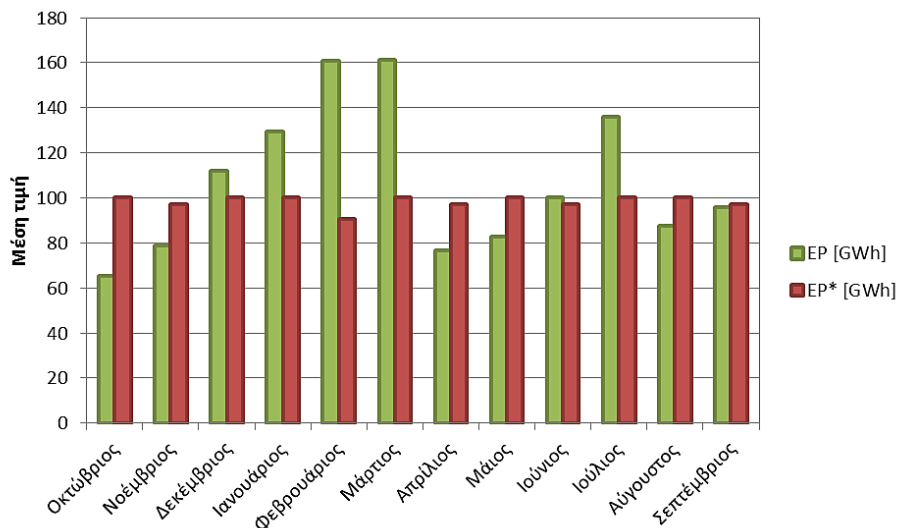
Μέση ετήσια E_p [GWh]	98,58
Μέση ετήσια E_p^* [GWh]	95,03
Αρ. ανεμογεννητριών	650

Εικόνα 7-4: Αποτελέσματα σεναρίου A2.



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

Εικόνα 7-5: Αποτελέσματα σεναρίου A3.



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

Εικόνα 7-6: Αποτελέσματα σεναρίου A4.

Στην παραπάνω παρουσίαση των αποτελεσμάτων (εικόνες 7-3 έως 7-6) παρουσιάζονται μόνο τα διαγράμματα των μέσω τιμών των αναφερόμενων μεγεθών ανά μήνα. Τα αντίστοιχα διαγράμματα των τυπικών αποκλίσεων παρατίθενται στο παράρτημα για λόγους οικονομίας του παρόντος κειμένου.

Όπως παρατηρούμε σε μέση ετήσια βάση, το περιθώριο λειτουργίας των αντλιών καλύπτεται. Στη μηνιαία κλίμακα, έχουμε διαφορές στις μέσες τιμές που οφείλονται στο γεγονός ότι δεν έχουμε ορίσει μεταβλητούς στόχους υδροηλεκτρικής παραγωγής στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ ανά μήνα. Είναι σημαντικό ότι το Υ/Η σύστημα, λόγω της κλίμακάς του, παράγει σταθερή πρακτικά ενέργεια. Συνεπώς, είναι ευέλικτο ώστε να προσαρμόζει την παραγωγή/άντληση σε μικρότερες χρονικές κλίμακες.

7.3. Τελική θεώρηση προβλήματος σχεδιασμού: Διατύπωση, λογικές υποθέσεις και αποτελέσματα

Ακριβώς επειδή η αρχική θεώρηση δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς τον τελικό σχεδιασμό γίνεται προσπάθεια μιας αναβαθμισμένης θεώρησης ως προς τον τελικό σχεδιασμό του υβριδικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, στην προηγούμενη ενότητα επιχειρήσαμε είναι να τροφοδοτήσουμε μια αστική περιοχή με ενέργεια που παράγεται σχεδόν αποκλειστικά από το αιολικό πάρκο. Κάποια αναπόφευκτα ελλείμματα καλύπτονται από την παραγωγή των στροβίλων, ενώ η περίσσεια ενέργειας κινεί τις αντλίες. Στο τέλος, μένει μια πολύ μεγάλη περίσσεια ενέργειας από το Υ/Η, που στη σχηματοποίησή μας δεν έχει συγκεκριμένο προορισμό. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα πραγματοποιείται μια διαφορετική διατύπωση του προβλήματος σχεδιασμού χωρίζοντας τη λειτουργία σε δύο περιόδους.

Θεωρούμε τέσσερις παραμέτρους:

- i. Το ποσοστό λειτουργίας των στροβίλων, α .
- ii. Το ποσοστό της ζήτησης των ωρών της ημέρας, b , ως ποσοστό της μέσης ημερήσιας ζήτησης.
- iii. Τη μέση ημερήσια ζήτηση, D .
- iv. Τον αριθμό των ανεμογεννητριών, n .

Έτσι, έχουμε δύο διακριτές περιόδους:

- a) Τις ώρες λειτουργίας των στροβίλων ως a ποσοστό του χρόνου. Σε αυτή την περίοδο θεωρούμε μειωμένη ζήτηση ίση με:

$$D_{energy}^1 = b \cdot D \quad (7.6)$$

Σε αυτή την περίοδο, αν Π_w είναι η παραγωγή των n ανεμογεννητριών, θα έχουμε παραγωγή ενέργειας ίση με:

$$E_{total} = a \cdot \Pi_w + E_{tur}^* \quad (7.7)$$

Το έλλειμμα ενέργειας αυτής της περιόδου είναι:

$$E_{def} = \min(E_{total} - D_{energy}^1, 0) \quad (7.8)$$

Το παραπάνω έλλειμμα λαμβάνει αρνητικό πρόσημο όταν η E_{total} είναι μικρότερη της D_{energy}^1 .

- b) Τις ώρες λειτουργίας της αντλίας ως ποσοστό $(1-a)$ του χρόνου. Σε αυτή την περίοδο η αστική ζήτηση ενέργειας είναι:

$$D_{urban} = (1-b) \cdot D \quad (7.9)$$

Η συνολική ζήτηση ενέργειας θα είναι:

$$D_{energy}^2 = D_{urban} + E_p^* \quad (7.10)$$

Η παραγωγή ενέργειας, εφόσον οι στρόβιλοι δε λειτουργούν, είναι:

$$E_{total} = (1-a) \cdot \Pi_w \quad (7.11)$$

Το αντίστοιχο έλλειμμα ενέργειας της περιόδου είναι:

$$E_{def} = \min(E_{total} - D_{energy}^2, 0) \quad (7.12)$$

Για το πρόσημο του ελλείμματος ισχύει ότι και στην περίοδο (a).

Και στις δύο παραπάνω περιόδους με αριθμό αναφοράς (i), έχουμε πλεόνασμα ενέργειας που ισούται με:

$$E_{exc} = \max(E_{total} - D_{energy}^i, 0) \quad (7.13)$$

Η λογική της μεθοδολογίας που προτείνεται βασίζεται στην κατάλληλη -λογική- επιλογή των τεσσάρων παραμέτρων ώστε να έχουμε ελαχιστοποίηση του μέσου ελλείμματος των δύο διακριτών περιόδων με ταυτόχρονη αύξηση της αξιοπιστίας του συνδυασμένου συστήματος στις δύο περιόδους.

Για το λόγο αυτό υπολογίζουμε την πιθανότητα αστοχίας του συστήματος στις δύο περιόδους με χρήση της συνάρτησης countif του excel (που υπολογίζει τον αριθμό n_{def} των μηνών που η ζήτηση δεν καλύπτεται από το συνδυασμένο σύστημα):

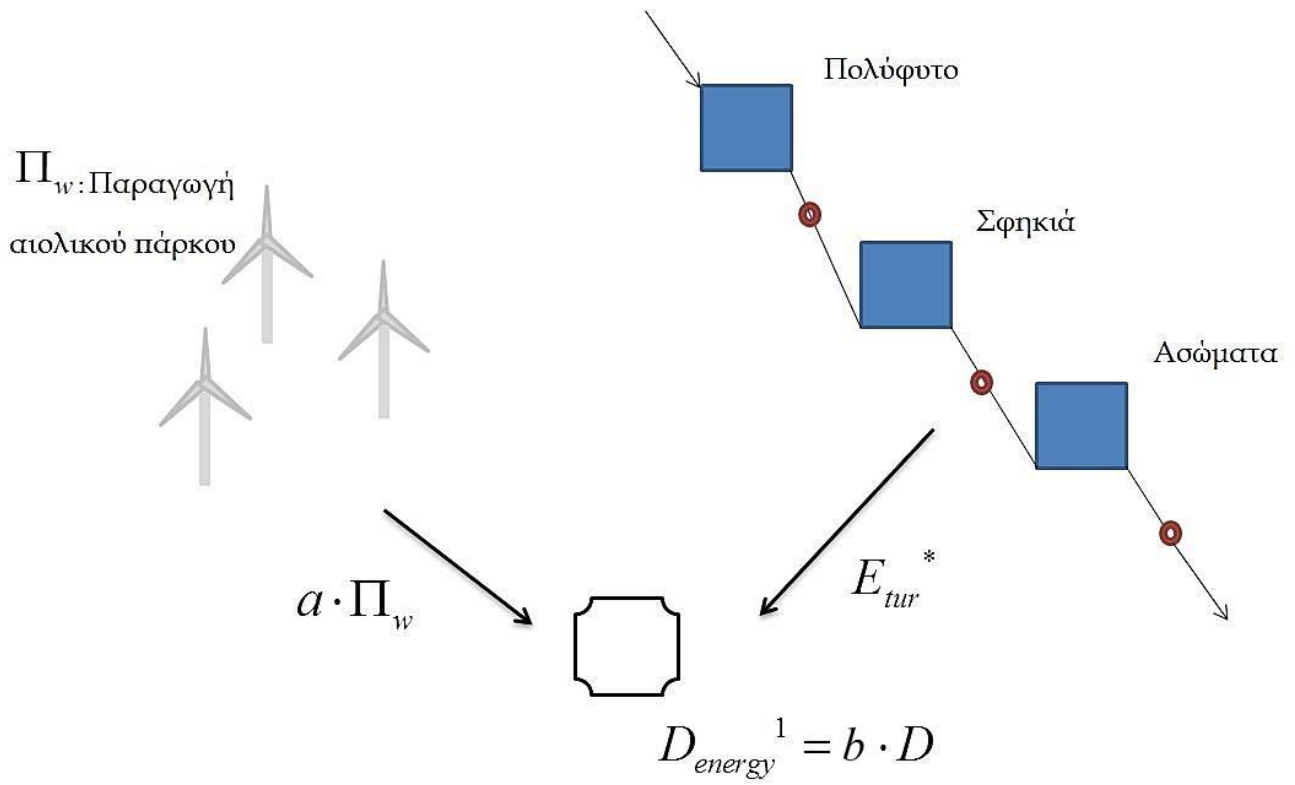
$$p_1 = \frac{n_{def1}}{12000} \cdot 100 \quad (7.14)$$

$$p_2 = \frac{n_{def2}}{12000} \cdot 100 \quad (7.15)$$

όπου ο αριθμός n_{def} υπολογίζεται ως ακολούθως:

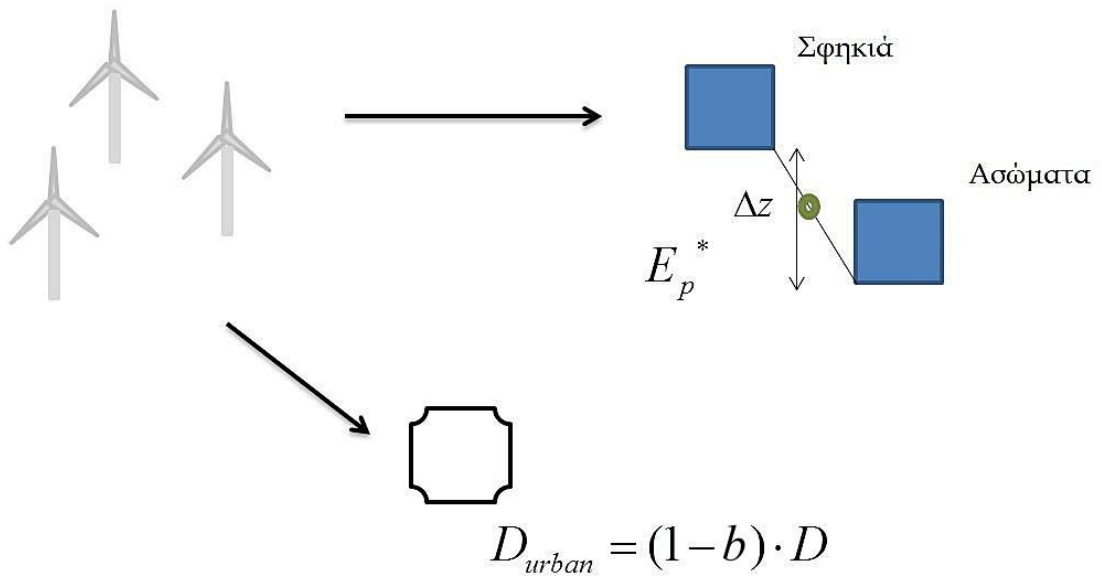
$$n_{def} = \text{countif}(E_{def} < 0) \quad (7.16)$$

Στην εικόνα 7-7 και 7-8 φαίνονται σχηματοποιημένα οι δύο περίοδοι λειτουργίας. Για λόγους απλοποίησης απεικονίζονται μόνο οι δύο ταμιευτήρες όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα άντλησης/ταμίευσης (Σφηκιά, Ασώματα) στην εικόνα 7-8.



Εικόνα 7-7: Σχηματοποίηση λειτουργίας πρώτης περιόδου.

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



Εικόνα 7-8: Σχηματοποίηση λειτουργίας δεύτερης περιόδου.

Για την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων σχεδιασμού θεωρήθηκε μέση ημερήσια ζήτηση $D = 150$ GWh, μιας και το αναβαθμισμένο πλαίσιο σχεδιασμού μπορεί να διαχειριστεί καλύτερα τις ίδιες ζητήσεις με αυτές της προηγούμενης ενότητας. Η αυξημένη ζήτηση αντιστοιχεί στο 5% της ζήτησης όλης της χώρας, οπότε αναδεικνύεται και η σημασία του αυτόνομου συστήματος ως προς τον εθνικό ενεργειακό σχεδιασμό.

Για τον σχεδιασμό καταστρώθηκαν 4 σενάρια με τις παραμέτρους που εικονίζονται στον πίνακα 7-2.

Πίνακας 7-2: Παράθεση τελικών σεναρίων σχεδιασμού υβριδικού συστήματος.

Σενάριο	Παράμετρος a	Παράμετρος b	Αρ. ανεμογεννητριών n
Y1	0,67	0,97	1200
Y2	0,50	0,87	800
Y3	0,40	0,87	750
Y4	0,33	0,81	720

Σε κάθε σενάριο παρουσιάζονται τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Η μέση μηνιαία E_{total} για την πρώτη περίοδο λειτουργίας.
- Η μέση μηνιαία D_{energy}^1 για την πρώτη περίοδο λειτουργίας.
- Η μέση μηνιαία E_{total} για την δεύτερη περίοδο λειτουργίας.
- Η μέση μηνιαία D_{energy}^2 για την δεύτερη περίοδο λειτουργίας.
- Οι πιθανότητες αστοχίας του συνδυασμένου συστήματος p_1, p_2 .
- Το μέσο έλλειμμα κάθε περιόδου $AnDef_1$ και $AnDef_2$.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται στις εικόνες 7-9 έως 7-12.

Από τις αναλύσεις καταλήγουμε σε μία λύση σχεδιασμού σύμφωνα με το σενάριο Y3. Συγκεκριμένα, επιλέγεται οι στρόβιλοι να λειτουργούν στο 40% του χρόνου, ενώ η ζήτηση της πρώτης περιόδου λειτουργίας είναι το 87% της μέσης ημερήσιας. Ο απαιτούμενος αριθμός ανεμογεννητριών είναι 750 και οι πιθανότητες p_1, p_2 είναι 0,05% και 4,96% αντίστοιχα. Έχουμε δηλαδή αξιοπιστία 99,95% για την πρώτη περίοδο λειτουργίας και 95,04% για τη δεύτερη.

Αν θεωρήσουμε πως η μέση αξιοπιστία προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε την αξιοπιστία κάθε περιόδου με την ποσοστιαία διάρκεια της κάθε μίας, έχουμε:

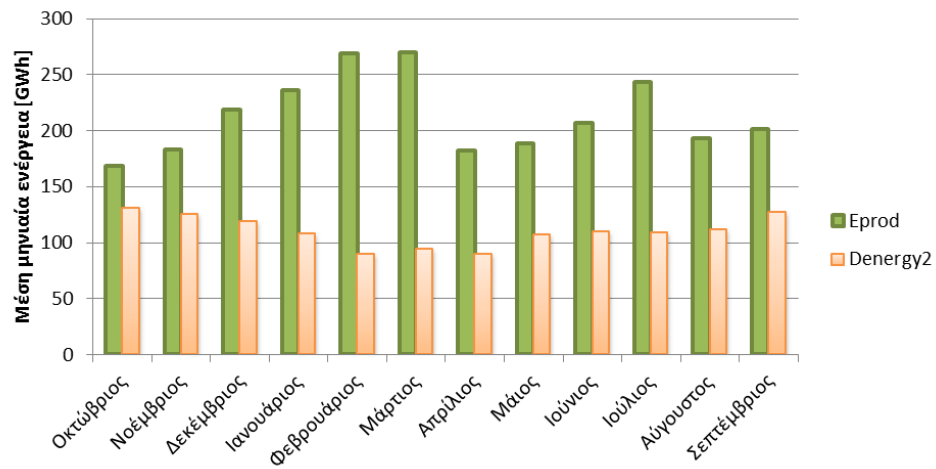
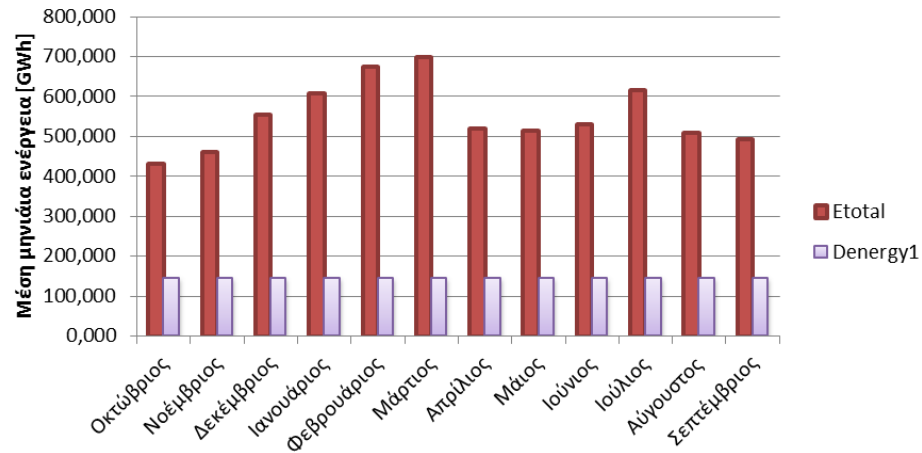
$$\bar{r} = a \cdot r_1 + (1-a) \cdot r_2 \quad (7.17)$$

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, η αξιοπιστία ως προς την κάλυψη της ζήτησης προκύπτει $\bar{r} = 97,00\%$. Εν γένει η αξιοπιστία του συνδυασμένου συστήματος προκύπτει μικρότερη από την αξιοπιστία της πρωτεύουσας ενέργειας του μοντελοποιημένου υδροσυστήματος από τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. Αυτό είναι αναμενόμενο μιας και η προσομοίωση της υδροηλεκτρικής και της αιολικής παραγωγής πραγματοποιείται σε δύο διακριτά μέρη τα οποία συνδυάζονται σε ένα κατοπινό επίπεδο. Με την ανάπτυξη του συνδυασμένου πλαισίου διαχείρισης και προσομοίωσης αυτή η προβληματική μπορεί να αρθεί.

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

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

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

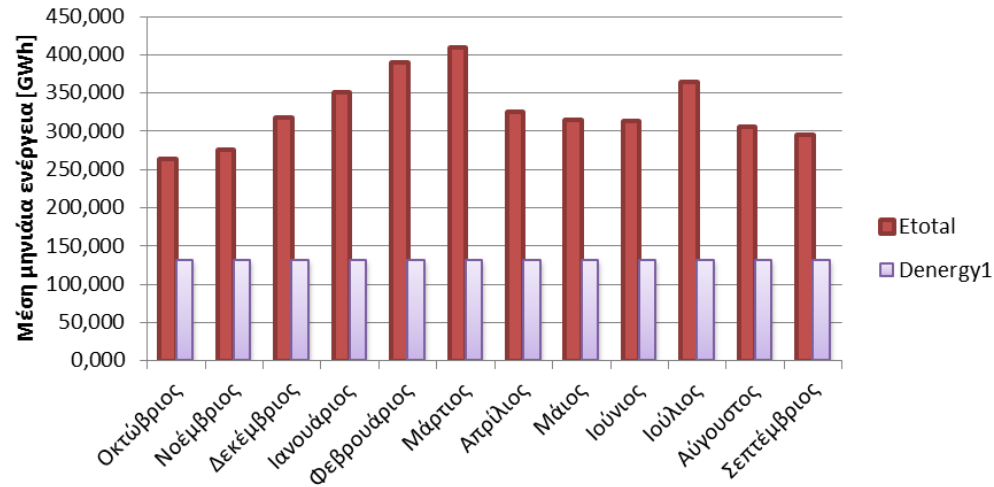


Εικόνα 7-9: Αποτελέσματα σεναρίου Υ1.

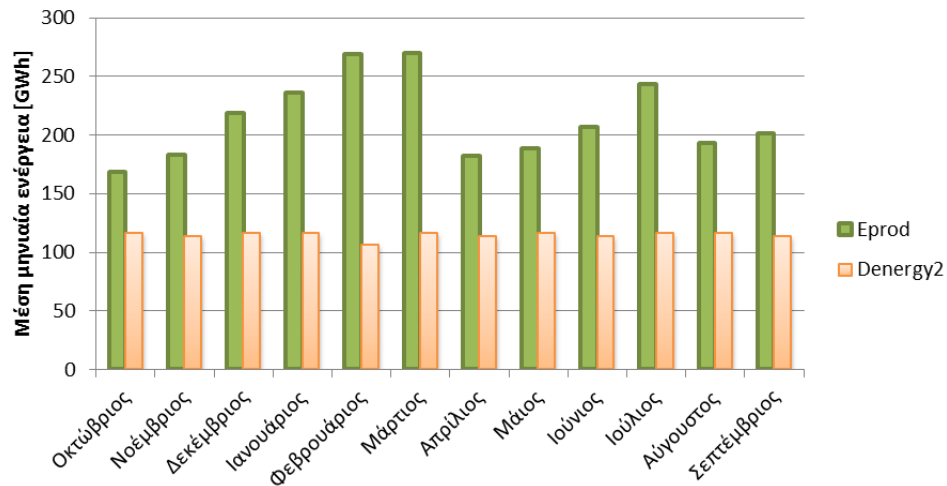
a	0,50	
b	0,87	
D [GWh]	130,3918761	150
Ζήτηση	1η περίοδος	Ημερήσια

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

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



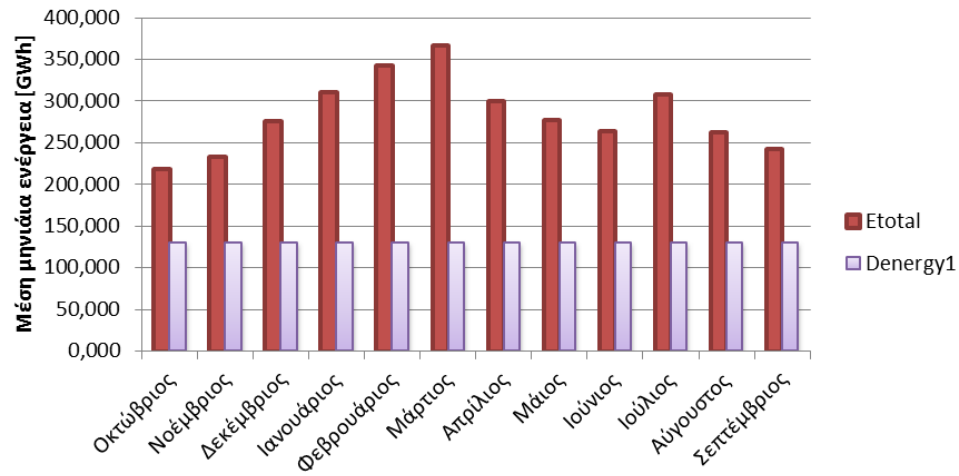
Εικόνα 7-10: Αποτελέσματα σεναρίου Υ2.



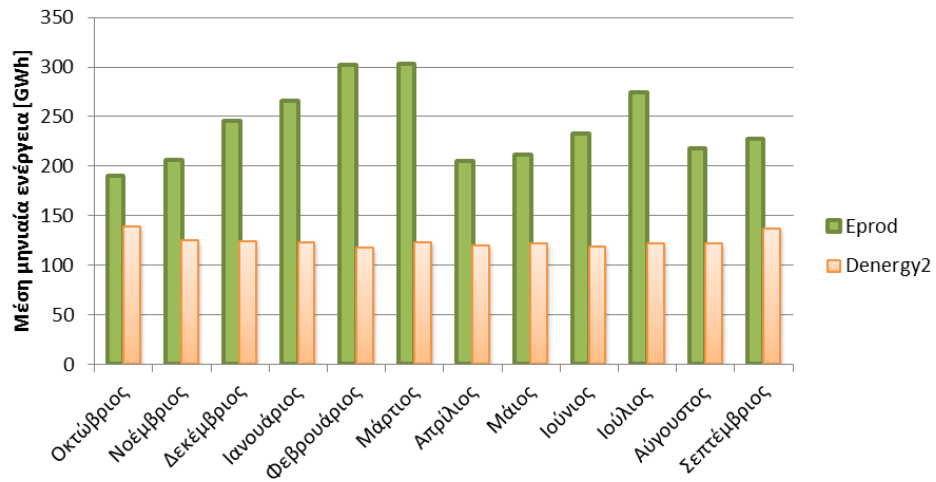
a	0,40	
b	0,87	
D [GWh]	130,0203809	150
Ζήτηση	1η περίοδος	Ημερήσια

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

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



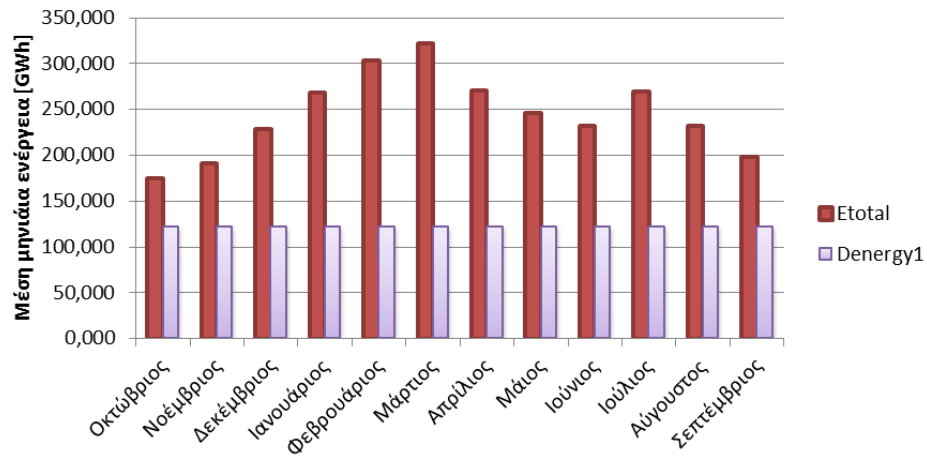
Εικόνα 7-11: Αποτελέσματα σεναρίου Υ3.



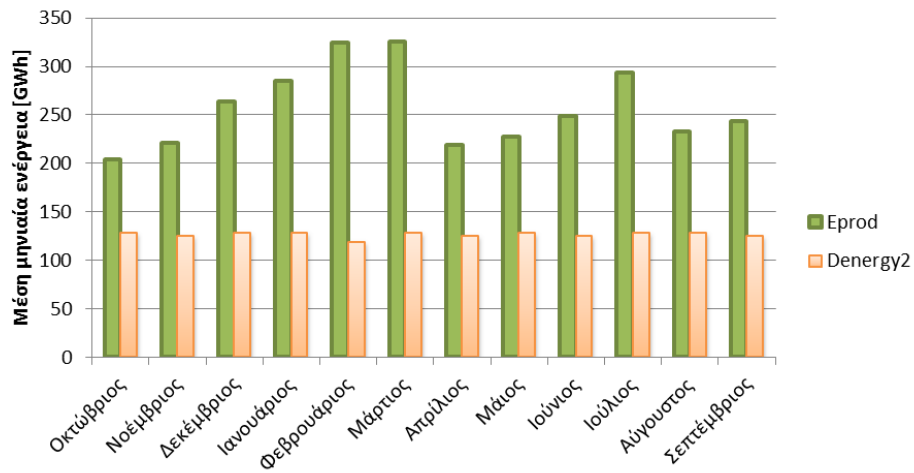
a	0,33	
b	0,81	
D [GWh]	122,1050484	150
Ζήτηση	1η περίοδος	Ημερήσια

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

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



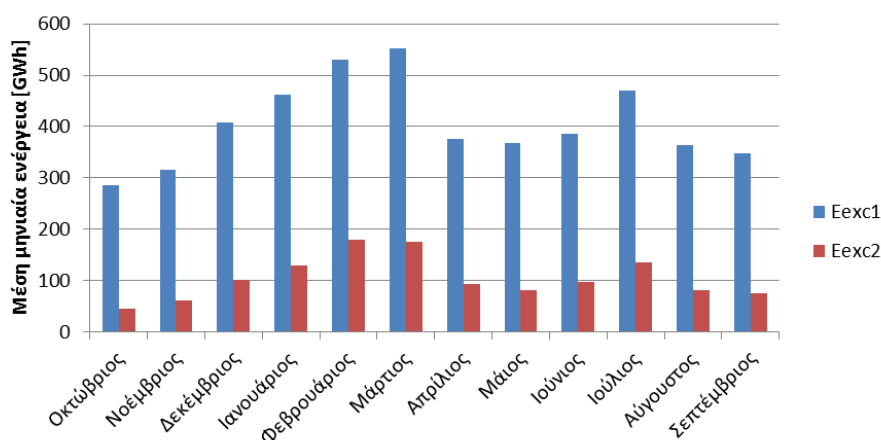
Εικόνα 7-12: Αποτελέσματα σεναρίου Υ4.



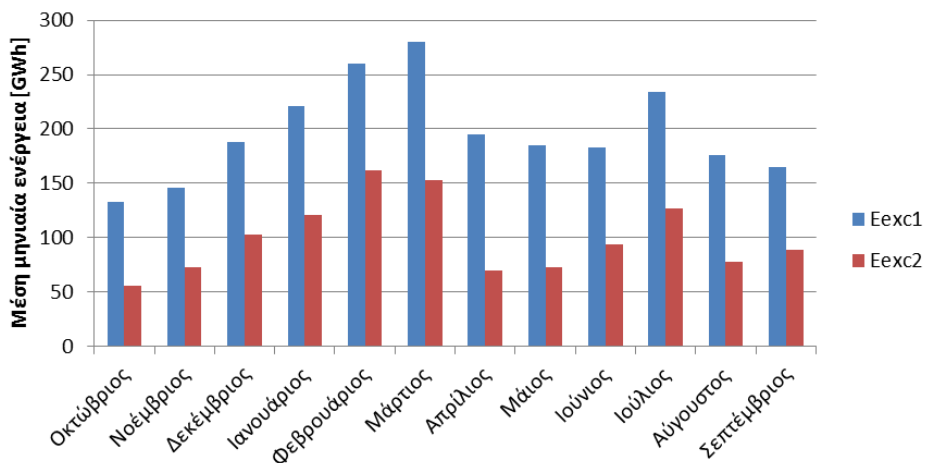
Συνολικότερα, παρατηρείται πως με την μείωση του ποσοστού λειτουργίας των στροβίλων μπορεί ταυτόχρονα να αυξάνεται η ζήτηση της 2^{ης} περιόδου λειτουργίας με ταυτόχρονη μείωση του απαιτούμενου αριθμού των ανεμογεννητριών. Η αύξηση του αριθμού των ανεμογεννητριών σε σχέση με την πρώτη θεώρηση σχεδιασμού είναι εύλογη μιας και διατηρείται η ζήτηση της αστικής περιοχής ενώ παράλληλα αξιοποιείται με αποδοτικότερο τρόπο η ενέργεια που παράγεται από τους στροβίλους του υδροσυστήματος.

Παρατηρούμε από τα γραφήματα της παραγόμενης ενέργειας και της ζήτησης κάθε περιόδου λειτουργίας για κάθε επιμέρους σενάριο, πως έχουμε περίσσεια ενέργειας πολύ μικρότερη και με καλύτερη μηνιαία κατανομή συγκριτικά με την αρχική μεθοδολογία σχεδιασμού.

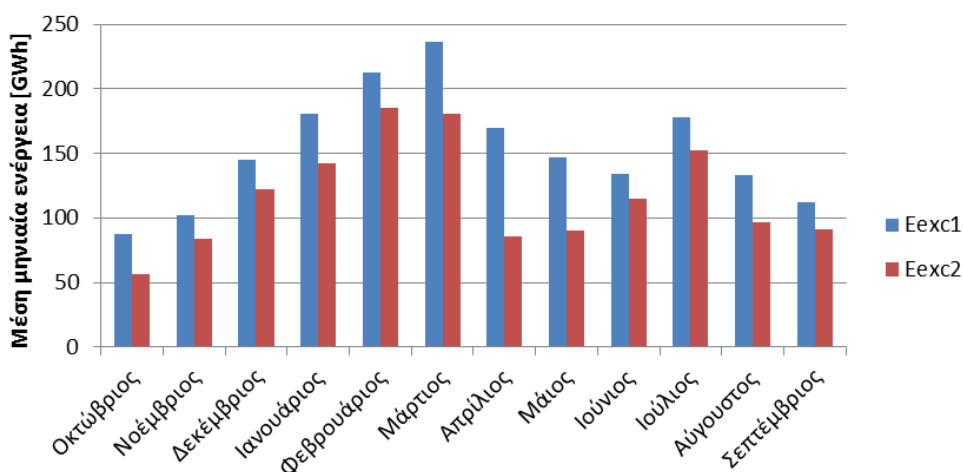
Στις εικόνες 7-13 έως και 7-16 παρατηρούμε σε μορφή ραβδωτών διαγραμμάτων την περίσσεια ενέργειας ανά μήνα για κάθε περίοδο λειτουργίας (1, 2) και ανά σενάριο σχεδιασμού (Υ1-Υ4).



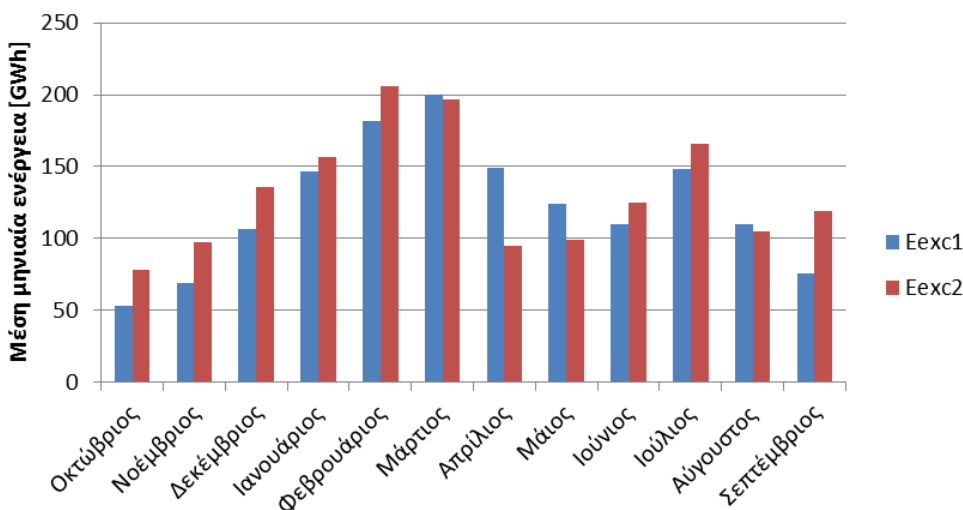
Εικόνα 7-13: Περίσσεια ενέργειας για το σενάριο Υ1.



Εικόνα 7-14: Περίσσεια ενέργειας για το σενάριο Υ2.



Εικόνα 7-15: Περίσσεια ενέργειας για το σενάριο Y3.



Εικόνα 7-16: Περίσσεια ενέργειας για το σενάριο Y4.

Μάλιστα παρατηρούμε πως όσο μειώνεται η περίοδος λειτουργίας των στροβίλων έχουμε περισσότερο κοντινές τιμές περίσσειας ενέργειας ανάμεσα στις διακριτές περιόδους λειτουργίας. Στο σενάριο Y4 είναι χαρακτηριστικό πως η περίσσεια της 2^{ης} περιόδου υπερβαίνει αυτή της 1^{ης} σε κάποιους μήνες, ενώ αντίθετα στο -βέλτιστο- σενάριο Y3 η υπέρβαση αυτή δεν πραγματοποιείται ποτέ. Οι παραπάνω απεικονίσεις είναι χαρακτηριστικές και των διακυμάνσεων της υδροηλεκτρικής και της αιολικής παραγωγής ανάμεσα στους διαφορετικούς μήνες, ενώ ταυτόχρονα αναδεικνύουν το ορθότερο της τελικής μεθοδολογίας σχεδιασμού έναντι της αρχικής.

Να σημειωθεί, επίσης, πως το σενάριο που προκύπτει ως βέλτιστο δεν προϋποθέτει την κατασκευή 750 ανεμογεννητριών στην περιοχή του Κιλκίς, απλώς λαμβάνει τα ανεμολογικά δεδομένα από αυτή την περιοχή. Προφανώς οι απαιτούμενες ανεμογεννήτριες θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε διάσπαρτες και απομακρυσμένες μεταξύ τους περιοχές με κατάλληλες μετεωρολογικές συνθήκες, ενώ το σενάριο αναφέρεται σε έναν υποθετικό μέγιστο αριθμό.

8. Συμπεράσματα & προτάσεις βελτίωσης ή μελλοντικά πεδία διερεύνησης

Στο παρόν -και τελευταίο- κεφάλαιο αυτής της εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τις αναλύσεις, μαζί με κάποιες ενδεικτικές προτάσεις μελλοντικής βελτίωσης και περαιτέρω διερεύνησης. Η διάρθρωση του κεφαλαίου περιλαμβάνει τρεις άξονες:

- i. Τα συμπεράσματα από τη μοντελοποίηση του υδροσυστήματος μέσω του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ.
- ii. Τα συμπεράσματα από τη στοχαστική προσομοίωση της αιολικής παραγωγής.
- iii. Τα συμπεράσματα από το μεθοδολογικό πλαίσιο σχεδιασμού του υβριδικού συστήματος υδροηλεκτρικής-αιολικής ενέργειας.

Πέραν των συμπερασμάτων υπάρχει και ένα τελικό σκέλος με προτάσεις βελτίωσης και μελλοντικής έρευνας που προκύπτουν από τα παραπάνω συμπεράσματα.

8.1. Συμπεράσματα από την προσομοίωση του υδροσυστήματος

1. Η συνάρτηση -συνιστώσα του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ- Total Generated Firm Power οδηγεί σε υψηλότερες τιμές ενεργειακής παραγωγής του συστήματος για μεγάλα ποσοστά του χρόνου, οι οποίες έχουν και πρακτική χρησιμότητα εφόσον δίνουν μεγαλύτερη πρωτεύουσα ενέργεια. Η συνάρτηση Sum of Generated Firm Power δίνει μεγαλύτερη τιμή πρωτεύουσας ενέργειας από την Total Generated Firm Power μόνο για τον ΥΗΣ Σφηκιάς ενώ στα υπόλοιπα έργα (αλλά και στο σύνολο) η εικόνα είναι αντιδιαμετρική ,με την Total Generated Firm Power να δίνει μεγαλύτερες τιμές.
2. Μια πολιτική συνολικής διαχείρισης του υδροσυστήματος έχει πλεονεκτική θέση έναντι της κατακερματισμένης. Με άλλα λόγια, η δυναμικότητα του συστήματος μπορεί να αξιοποιηθεί με βέλτιστο τρόπο μέσω ενός κεντρικού και ενιαίου φορέα (όπως η, μέχρι πρότερα, δημόσια ΔΕΗ). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής όπου ενδιαφέρει ο σχεδιασμός του συστήματος ως σύνολο αξιοποιήθηκε η συνάρτηση Total Generated Firm Power.
3. Η εγκατάσταση ενός συστήματος άντλησης/ταμίευσης σε μια υπάρχουσα σειρά υδροηλεκτρικών έργων αυξάνει την πρωτεύουσα ενέργεια του συνόλου του συστήματος, ενώ παράλληλα δίνει αυξημένα επίπεδα αξιοπιστίας ως προς την παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας.
4. Η παρουσία στόχου άντλησης με παράλληλη εφαρμογή της συνάρτησης Total Generated Firm Power αυξάνει την πρωτεύουσα ενέργεια, ενώ έχει ισχυρή επιρροή στη μορφή της καμπύλης διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας του ΥΗΕ Σφηκιάς. Παράλληλα, ως τεχνολογία, η άντληση/ταμίευση αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο για την αποθήκευση ενέργειας και τη διείσδυση των ΑΠΕ σε μεγάλη κλίμακα²⁰.

²⁰ Ενδεικτικό για την αυξανόμενη επιρροή της τεχνολογίας άντλησης/ταμίευσης είναι το σημείωμα του γραφείου τύπου της Iberdrola: «During his speech, the Chairman of IBERDROLA highlighted that the Cortes-La Muela hydro scheme is an example of an economically and environmentally sustainable complex: "It uses available excess generation capacity to store, and produce electricity during periods of high demand", a clear example of functioning energy storage.» (Πηγή: <http://goo.gl/RtcCHb>)

5. Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ παρέχει τη δυνατότητα παραμετροποίησης και προσομοίωσης του υδροσυστήματος Αλιάκμονα αναπαριστώντας και λαμβάνοντας υπόψη την εγγενή αβεβαιότητα (στοχαστικότητα) των υπεισερχόμενων μεγεθών (βροχοπτώσεις, απορροές, εξατμίσεις). Μέσω της πολιτικής προτεραιοτήτων και κάλυψης στόχων προσφέρει ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο διαχείρισης υδατικών πόρων και χάραξης πολιτικής στα ενεργειακά ζητήματα σε τοπικό και εθνικό επίπεδο.

8.2. Συμπεράσματα από το πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης της αιολικής παραγωγής

1. Η διαφορά στην παραγόμενη ενέργεια της χρονοσειράς ταχυτήτων ανέμου στην κλίμακα του δεκαλέπτου σε σχέση με την ωριαία κλίμακα παρουσιάζει μικρές διαφορές. Οι διαφορές αυτές είναι μηδαμινές αν συνυπολογιστεί ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτείται για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών στην κλίμακα του δεκαλέπτου. Προτείνεται, επομένως, η παραγωγή χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου στην κλίμακα της ώρας.
2. Προκειμένου να παραχθούν οι συνθετικές χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου, διατηρώντας τη διαλείπουσα φύση του ίδιου του ανέμου καθώς και την έντονη δομική εξάρτηση που παρουσιάζουν οι υδρομετεωρολογικές μεταβλητές στις μικρές χρονικές κλίμακες (ωριαία εν προκειμένω) χρησιμοποιείται το μοντέλο Bartlett-Lewis. Το μοντέλο καλύπτει την αδυναμία της ικανοποιητικής προσομοίωσης της πιθανότητας απουσίας βροχόπτωσης για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.
3. Για να μπορεί το μοντέλο να λειτουργήσει για την προσομοίωση της ενεργειακής παραγωγής της ανεμογεννήτριας τροποποιούμε τον ορισμό της πιθανότητας απουσίας βροχόπτωσης. Αντί για την πιθανότητα απουσίας βροχόπτωσης (probability dry) έχουμε την πιθανότητα εμφάνισης μη αξιοποιήσιμης ταχύτητας ανέμου (την οποία ονομάζουμε πάλι probability dry χωρίς βλάβη της γενικότητας).
4. Το μοντέλο Bartlett-Lewis δίνει τη δυνατότητα αναπαραγωγής όλων των στατιστικών χαρακτηριστικών της ιστορικής χρονοσειράς ταχυτήτων ανέμου. Μόνη εξαίρεση ο συντελεστής ασυμμετρίας: η ιστορική χρονοσειρά εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές σε κάθε μήνα εξαιτίας της εγγενούς μεταβλητότητας και διακυμαινόμενης συμπεριφοράς των ταχυτήτων ανέμου στην πραγματικότητα σε σχέση με το μοντέλο (που έχει κατασκευαστεί για την παραγωγή καταιγίδων που εν γένει δεν έχουν την ίδια μεταβλητότητα με τον άνεμο). Η πιθανότητα εμφάνισης μηδενικής τιμής είναι μεγαλύτερη στη συνθετική χρονοσειρά, ακριβώς για τον ίδιο λόγο.
5. Το πρόγραμμα HYETOS-R δίνει τη δυνατότητα στοχαστικής προσομοίωσης των ταχυτήτων ανέμου αναπαριστώντας ικανοποιητικά την διαλείπουσα συμπεριφορά (intermittency) και την εγγενή ασυμμετρία τους.
6. Το πρόγραμμα MATLAB™ παρέχει εύχρηστες συναρτήσεις για το μετασχηματισμό των χρονοσειρών της ταχύτητας ανέμου, τη συνάθροιση από την κλίμακα ώρας στην ημερήσια και κατόπιν τη μηνιαία, αλλά και για την εφαρμογή της καμπόλης ισχύος στις τιμές της χρονοσειράς για την εξαγωγή της χρονοσειράς παραγόμενης ενέργειας.

8.3. Συμπεράσματα από τη μεθοδολογία σχεδιασμού του υβριδικού συστήματος

1. Στην πρώτη υποθετική λογική σχεδιασμού θεωρήσαμε ως παραμέτρους τον αριθμό ανεμογεννητριών που απαιτείται για την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος άντλησης-ταμίευσης παράλληλα με την κατάλληλη επιλογή του ποσοστού λειτουργίας της αντλίας εντός της ημέρας
2. Όπως παρατηρούμε, με βάση το πρώτο προτεινόμενο πλαίσιο σχεδιασμού, σε μέση ετήσια βάση, το περιθώριο λειτουργίας των αντλιών καλύπτεται. Στη μηνιαία κλίμακα, έχουμε διαφορές στις μέσες τιμές που οφείλονται στο γεγονός ότι δεν έχουμε ορίσει μεταβλητούς στόχους υδροηλεκτρικής παραγωγής στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ ανά μήνα. Είναι σημαντικό ότι το Υ/Η σύστημα, λόγω της κλίμακάς του, παράγει σταθερή πρακτικά ενέργεια. Συνεπώς, είναι ευέλικτο ώστε να προσαρμόζει την παραγωγή/άντληση σε μικρότερες χρονικές κλίμακες.
3. Ακριβώς επειδή η αρχική θεώρηση δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς τον τελικό σχεδιασμό γίνεται προσπάθεια μιας αναβαθμισμένης θεώρησης ως προς τον τελικό σχεδιασμό του υβριδικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, στην προηγούμενη ενότητα επιχειρήσαμε είναι να τροφοδοτήσουμε μια αστική περιοχή με ενέργεια που παράγεται σχεδόν αποκλειστικά από το αιολικό πάρκο. Κάποια αναπόφευκτα ελλείμματα καλύπτονται από την παραγωγή των στροβίλων, ενώ η περίσσεια ενέργειας κινεί τις αντλίες. Στο τέλος, μένει μια πολύ μεγάλη περίσσεια ενέργειας από το Υ/Η, που στη σχηματοποίησή μας δεν έχει συγκεκριμένο προορισμό. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα πραγματοποιείται μια διαφορετική διατύπωση του προβλήματος σχεδιασμού χωρίζοντας τη λειτουργία σε δύο περιόδους.
4. Το τελικό μεθοδολογικό πλαίσιο σχεδιασμού θεωρεί πως η ημέρα χωρίζεται σε δύο περιόδους λειτουργίας. Στην πρώτη έχουμε λειτουργία των στροβίλων με ταυτόχρονη λειτουργία του αιολικού πάρκου και το μεγαλύτερο ποσοστό της αστικής ζήτησης. Στη δεύτερη έχουμε μόνο λειτουργία της άντλησης με ταυτόχρονη παραγωγή μέσω του αιολικού που καλείται να καλύψει και τις δύο μορφές απαιτούμενης ενέργειας (περιθώριο λειτουργίας αντλίας και το μικρό ποσοστό της εναπομείνουσας ζήτησης).
5. Παρατηρείται πως με την μείωση του ποσοστού λειτουργίας των στροβίλων μπορεί ταυτόχρονα να αυξάνεται η ζήτηση της 2ης περιόδου λειτουργίας με ταυτόχρονη μείωση του απαιτούμενου αριθμού των ανεμογεννητριών. Η αύξηση του αριθμού των ανεμογεννητριών σε σχέση με την πρώτη θεώρηση σχεδιασμού είναι εύλογη μιας και διατηρείται σταθερή η ζήτηση της αστικής περιοχής ενώ παράλληλα αξιοποιείται με αποδοτικότερο τρόπο η ενέργεια που παράγεται από τους στροβίλους του υδροσυστήματος.

8.4. Προτάσεις για περαιτέρω αναλύσεις: προτεινόμενα μεθοδολογικά πλαίσια και αναδυόμενες προβληματικές

Η ανάλυση που ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία σε καμία περίπτωση δε μπορεί να θεωρηθεί ιδανική. Και τα τρία σκέλη της (υδροσύστημα, αιολική παραγωγή, συνδυασμένος σχεδιασμός) γεννούν ορισμένες κατευθύνσεις εμβάθυνσης και περαιτέρω ανάπτυξης:

- i. Οι στόχοι παραγωγής ενέργειας στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ είναι σταθεροί . Είναι αναγκαία η διεύρυνση του προγράμματος ώστε να συμπεριλάβει εποχικά μεταβαλλόμενους στόχους για την καλύτερη διαμόρφωση της πολιτικής διαχείρισης.

- ii. Δημιουργία component αντλιοστροβίλου στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ για την αποφυγή των ασυμμετριών στη σχηματοποίηση και τη μοντελοποίηση.
- iii. Παραγωγή καμπυλών διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας από τον ίδιο τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ χωρίς τη χρήση άλλων λογισμικών (όπως το excel στην εν λόγω περίπτωση).
- iv. Ανάπτυξη λογισμικού που θα εμπεριέχει και συνιστώσα μοντελοποίησης του αιολικού πάρκου (βελτιστοποιώντας τη συνολική παραγωγή ενέργειας μέσω παραμετροποίησης του αριθμού και της εγκατεστημένης ισχύος των ανεμογεννητριών). Ενδεχόμενη επέκταση του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ που θα περιλαμβάνει τη δυνατότητα υποστήριξης αποφάσεων και προσομοίωσης υβριδικών συστημάτων (π.χ. σύστημα αιολικής-υδροηλεκτρικής-ηλιακής ενέργειας).
- v. Ανάπτυξη μοντέλων στοχαστικής προσομοίωσης ανέμου στις λεπτές χρονικές κλίμακες που θα αναπαράγει πιστότερα τη διαλείπουσα συμπεριφορά και την ασυμμετρία.
- vi. Γενίκευση του προγράμματος ΚΑΣΤΑΛΙΑ ώστε να συμπεριληφθούν επιπλέον μοντέλα γέννησης συνθετικών χρονοσειρών ταχυτήτων ανέμου.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Dai, T., & Labadie, J. (2001). *River basin network model for integrated water quantity/quality management*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 127(5), 295-305.
- Dimas, P., Bouziotas, D., Efstratiadis, A., & Koutsoyiannis, D. (2013). *A stochastic simulation framework for planning and management of combined hydropower and wind energy systems*. 5th EGU Leonardo Conference – Hydrofractals 2013 – STAHY '13, Kos Island, Greece, European Geosciences Union, International Association of Hydrological Sciences, International Union of Geodesy and Geophysics.
- Dreyfus, H., & Dreyfus, S. (1986). *Mind over Machine: The Power of Human Intuition and Expertise in the Era of the Computer*. Free Press.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). *Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models*. Water Resources Research, 28(4), 1015-1031.
- Ediger, V., Hosgor, E., Surmeli, A., & Tatlidil, H. (2007). *Fossil fuel sustainability index: An application of resource management*. Energy Policy, 35(5), 2969-2977.
- Efstratiadis, A. (2012). *The necessity for large-scale hybrid renewable energy systems*. EGU Leonardo Topical Conference Series on the Hydrological Cycle 2012 “HYDROLOGY AND SOCIETY”, 14-16 November 2012, Torino, Italy.
- Faber, B., & Stedinger, J. R. (2001). *Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts*. Journal of Hydrology.
- Fredericks, J., Labadie, J., & Altenhofen, J. (1998). *Decision support system for conjunctive stream-aquifer management*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 124(2), 69-78.
- Fu, M., & Hu, J. (1997). *Conditional Monte Carlo - Gradient Estimation and Optimization*. Boston: Kluwer.
- Georgakakos, P., & Marks, D. H. (1987). *A new method for the real-time operation of reservoir systems*. Water Resources Research.
- Graham, L., Labadie, J., Hutchison, I., & Ferguson, K. (1986). *Allocation of augmented water supply under a priority water rights system*. Water Resources Research.
- Grigg, N. (1996). *Water Resources Management*. New York: McGraw-Hill.
- Israel, M., & Lund, J. (1999). *Priority preserving unit penalties in network flow modeling*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 125(4), 205-214.

- Koutsoyiannis, D. (2011). *Scale of water resources development and sustainability: small is beautiful, large is great*. Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques, 56(4) 2011, Special issue: Water Crisis: From Conflict to Cooperation.
- Koutsoyiannis, D., & Economou, A. (2004). *Evaluation of the parameterisation-simulation optimization*. Water Resources Research.
- Koutsoyiannis, D., Makropoulos, C., Langousis, A., Baki, S., Efstratiadis, A., Christofides, A., και ούκ. (2008). *Climate, hydrology, energy, water: recognizing uncertainty and seeking sustainability*. Hydrology and Earth System Sciences Discussions.
- Kuczera, W. (1989). *Fast multireservoir multiperiod linear programming models*. Water Resources Research.
- Labadie, J. (1995). *MODSIM: Technical manual river basin network model for water rights planning*. Colorado: Colorado State University.
- Latouche, S. (n.d.). *Décoloniser l'imaginaire: La Pensée créative contre l'économie de l'absurde*, Parangon. Lyon.
- Loaiciga, H., & Marino, M. (1985). *An approach to parameter estimation and stochastic control in water resources with an application to reservoir operation*. Water Resources Research.
- Loucks, D., Van Beek, E., Stedinger, J., Dijkman, J., & Villars, M. (2005). *Water Resources Systems: An Introduction to Methods, Models and Applications*. Delft: Unesco Publishing.
- Mandelbrot, B. (1965). *Une classe de processus stochastiques homothétiques a soi: application à la loi climatologique de H. E. Hurst*. Paris: C. R. Acad. Sci.
- Mays, L., & Tung, Y. (1992). *Hydrosystems Engineering and Management*. New York: McGraw-Hill.
- Nalbantis, I., & Koutsoyiannis, D. (1997). *A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems*. Water Resources Research.
- Revelle, C. (2000). *Research Challenges in environmental management*. European Journal of Operational Research.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D., & Isham, V. (1987a). *Some models for rainfall based on stochastic point processes*. Proc. R. Soc. Lond.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D., & Isham, V. (1988). *A point process model for rainfall: further developments*. Proc. R. Soc. Lond.
- Rodriguez-Iturbe, I., Febres De Power, B., & Valdes, J. (1987b). *Rectangular pulses point process models for rainfall: analysis of empirical data*. Journal of Geophysical Research, 92, 9645 – 9656.
- Rodríguez - Iturbe, I., Gupta, V., & Waymire, E. (1984). *Scale Considerations in the Modeling of Temporal Rainfall*. Water Resources Research.

- Ruiz-Jarabo, J. (2010). *ENERCON 3 MW and 7,5 MW Portfolio: E-82 E3 , E-101 and E-126*. ENERCON GmbH Sucursal en España.
- Wasimi , S., & Kitanidis, P. (1983). *Real-time forecasting and daily operation of a multireservoir system during floods by linear quadratic Gaussian control*. Water Resources Research.
- Watkins, D., & McKinney, D. (1995). *Recent developments associated with decision support systems in water resources*. U.S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991-1994.
- Winston, W. (1994). *Operations Research, Applications and Algorithms.3rd Edition*. Duxbury: Belmont.
- World Commission on Environment and Development. (n.d.). *Our common future*. WCED, United Nations.
- Αλτουσέρ, Λ. (1984). *Θέσεις*. Αθήνα: Εκδόσεις Θεμέλιο.
- Βαμβουρέλλης, Θ. (2009). *Αντλητικά συγκροτήματα σε υδροηλεκτρικά έργα για μεγαλύτερη διείσδυση αιολικής ενέργειας*. Διπλωματική εργασία, Αθήνα: ΕΜΠ.
- Βρεττός, Ε. (2010). *Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ*. Διπλωματική εργασία, Αθήνα: ΕΜΠ.
- Γεωργιόπουλος, Δ. (2008). *Αξιοποίηση Μέσου και Άνω Αλιάκμονα: Κατασκευή του Φράγματος του Υδροηλεκτρικού Έργου (ΥΗΕ) Ελαφιού*. Πανελλήνιο συνέδριο μεγάλων φραγμάτων (1ο : 2008 : Λάρισα) / ΤΕΕ - Τμ. Κεντρ. και Δοτ. Θεσσαλίας τ. 1.
- Γκόγκος, Γ. (2013). *Η εκτροπή του Αχελούου δεν λύνει τα προβλήματα νερού στη Θεσσαλία*. Οικοτριβές.
- Δήμας, Π., & Μπουζιώτας, Δ. (2013). *Ιδιωτικοποιώντας τα υδροηλεκτρικά έργα: οι επιπτώσεις στις οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές πτυχές της διαχείρισής τους*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών "Υδατικοί πόροι, υποδομές και υπηρεσίες νερού: Ιδιωτικοποίηση ή κοινωνικοποίηση?".
- Διαλυνάς, Ι. (2011). *Ανάπτυξη υπολογιστικού συστήματος για τον πολυμεταβλητό στοχαστικό επιμερισμό μηνιαίων σε ημερήσιες υδρολογικές χρονοσειρές*. Διπλωματική εργασία, Αθήνα: ΕΜΠ.
- Ευστρατιάδης, Α. (2008). *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*. Διδακτορική διατριβή. Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος-ΕΜΠ.
- Ευστρατιάδης, Α., & Κουτσογιάννης, Δ. (2004). *Κασταλία (έκδοση 2.0) - Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών*. Αθήνα: Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, 103 σελίδες.
- Ευστρατιάδης, Α., Καραβοκυρός, Γ., & Κουτσογιάννης, Δ. (2007). *Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης*. Αθήνα: ΝΑΜΑ, ΕΜΠ, ΔΕΥΑΚ, Αειφορική, ΜΔΣ.

- Ευστρατιάδης, Α., Κουτσογιάννης, Δ., & Κοζάνης, Σ. (2005). *Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών «Κασταλία»*. Αθήνα: ΝΑΜΑ, ΕΜΠ, ΔΕΥΑΚ, Αειφορική, ΜΔΣ.
- Ιωάννου, Χ. (2012). *Στοχαστική προσομοίωση και βελτιστοποίηση υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας*. Διπλωματική εργασία, Αθήνα: ΕΜΠ.
- Καλλιστώ. (2008). *Κατασκευή μέγα-φραγμάτων στον ποταμό Αλιάκμονα: Ενημερωτικό σημείωμα*. Περιβαλλοντική Οργάνωση "Καλλιστώ".
- Κάπρος, Π. (2008). *Η πετρελαϊκή κρίση και η Ευρώπη. Ελευθεροτυπία*.
- Καραβοκυρός, Γ., Ευστρατιάδης, Α., & Βαζίμας, Ι. (2007). *ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ-Έκδοση 4.0, Υπολογιστικό Σύστημα Προσομοίωσης και Βέλτιστης Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Οδηγίες Χρήσης*. Αθήνα: Marathon Data Systems και ΝΑΜΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί & Μελετητές Α.Ε.
- Καραβοκυρός, Γ., Ευστρατιάδης, Α., & Κουτσογιάννης, Δ. (2002). *Υδρονομείες: Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης υδατικών πόρων*. Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικής & Θαλάσσιων Εργων, ΕΜΠ.
- Καραγιαννίδης, Α., & Παπαϊωάννου, Ε. (2008). *Υδροηλεκτρικά Έργα της ΔΕΗ ΑΕ στον ποταμό Αλιάκμονα*. Πανελλήνιο συνέδριο μεγάλων φραγμάτων (1ο : 2008 : Λάρισα) / ΤΕΕ - Τμ. Κεντρ. και Δυτ. Θεσσαλίας τ. 1.
- Κορωνάιος, Ι. (2012). *Διδακτικές σημειώσεις του μαθήματος Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. Αθήνα: ΔΠΜΣ "Περιβάλλον & Ανάπτυξη", ΕΜΠ.
- Κοσιέρης, Π. (2011). *Ανάπτυξη υπολογιστικού συστήματος για τον μονοδιάστατο στοχαστικό επιμερισμό ημερήσιων βροχοπτώσεων σε ωριαίες*. Διπλωματική εργασία, Αθήνα: ΕΜΠ.
- Κουτσογιάννης, Δ. (1988). *Μοντέλο Επιμερισμού Σημειακής Βροχόπτωσης*. Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα: ΕΜΠ.
- Κουτσογιάννης, Δ. (2013). *Σημειώσεις μαθήματος: Στοχαστικές μέθοδοι στους υδατικούς πόρους, 9ου εξ.* Αθήνα: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.
- Κουτσογιάννης, Δ., & Ξανθόπουλος, Θ. (1999). *Τεχνική Υδρολογία*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ανδρεαδάκης, Α., Μαυροδήμου, Ρ., Χριστοφίδης, Α., Μαμάσης, Ν., Ευστρατιάδης, Α., και συν. (2008). *Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων*. Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος-ΕΜΠ.
- Μακρόπουλος, Χ. (2012). *Σημειώσεις μαθήματος: Τεχνολογία Συστημάτων Υδατικών Πόρων*, Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος-ΕΜΠ.
- Μαμάσης, Ν. (2012). *Διδακτικές σημειώσεις Ενεργειακής Τεχνολογίας*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Μαρξ, Κ. (1976). *«ΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ»*. Κριτική της πολιτικής οικονομίας - Τόμος 1 (Βιβλίο 1): «Το προτσές της παραγωγής του κεφαλαίου». Αθήνα: Σύγχρονη Εποχή.

- Μπουζιώτας, Δ. (2012). *Ανάπτυξη πλαισίου βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ – Διερεύνηση στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Οικονομάκης, Γ., & Παπαλεξίου, Γ. (2012, Ιούλιος-Σεπτέμβριος). Εξωτερικές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, νεοκλασική και μαρξιστική ανάλυση: μια θεώρηση. *Θέσεις*.
- Παπαντώνης, Δ. (2008). *Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
- Πέρα από το δίλλημα λιτότητα ή ανάπτυξη: 11 κείμενα για την αποανάπτυξη*. (n.d.). Ηλίοσποροι.
- Πετρίδης, Π. (2012, Μάϊος). Το πρόταγμα της αποανάπτυξης. *Last Tapes Mag*.
- Ρεντζής, Κ. (2013). *Αντλησοταμίευση από τη Λίμνη Τριχωνίδα*. Διπλωματική εργασία, Αθήνα: ΕΜΠ.
- Ρίπη, Κ. (2013). *Μαθηματική προσομοίωση υβριδικών συστημάτων: Το σύστημα της Ικαρίας*. Διπλωματική εργασία, Αθήνα: ΕΜΠ.
- Σαραφιανός, Δ., & Σειραγάκης, Μ. (2009). *Τεχνοοικονομική μελέτη και σύγκριση υβριδικών συστημάτων. Εφαρμογή σε αυτόνομη κατοικία.,.* Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ.
- Στεφανάκος, Ι. (2012). *Σημειώσεις μαθήματος: Υδροηλεκτρικά Έργα*, 9ο εξ. Αθήνα: Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος-ΕΜΠ.
- Στεφανάκος, Ι., & Ράμπιας, Ε. (2008). *Μέσος και άνω ρους ποταμού Αλιάκμονα. Ένα μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο ή πέντε μικρά; Περιβαλλοντικές, οικονομικές και ενεργειακές παράμετροι*. Πανελλήνιο συνέδριο μεγάλων φραγμάτων (1ο : 2008 : Λάρισα) / ΤΕΕ - Τμ. Κεντρ. και Δυτ. Θεσσαλίας τ. 1.
- Τσεκούρας, Γ. (2012). *Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση υδρομετεωρολογικών διεργασιών σχετικών με την αιολική και ηλιακή ενέργεια*. Διπλωματική εργασία, Αθήνα: ΕΜΠ.
- Τσουκαλάς, Ι. (2012). *Βελτιστοποίηση υδροσυστήματος με την χρήση εξελικτικών αλγορίθμων: Η περίπτωση του Νέστον*. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Αθήνα ΕΜΠ

Παράρτημα

Στο παράρτημα παρατίθενται κάποια στοιχεία που για λόγους συνοχής και συντομίας παραλήφθηκαν από το κυρίως κείμενο και τις βασικές ενότητες της εργασίας. Τα στοιχεία αυτά είναι:

- Τεχνικά χαρακτηριστικά των ΥΗΕ του Αλιάκμονα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του υδροσυστήματος.
- Στατιστικά χαρακτηριστικά συνθετικών και ιστορικών χρονοσειρών βροχόπτωσης, απορροής και εξάτμισης.
- Κώδικες (scripts) στις γλώσσες MATLAB™ και R που χρησιμοποιήθηκαν σε κάποιες επιμέρους αναλύσεις της εργασίας.

Τεχνικά χαρακτηριστικά των ΥΗΕ/στοιχεία ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ

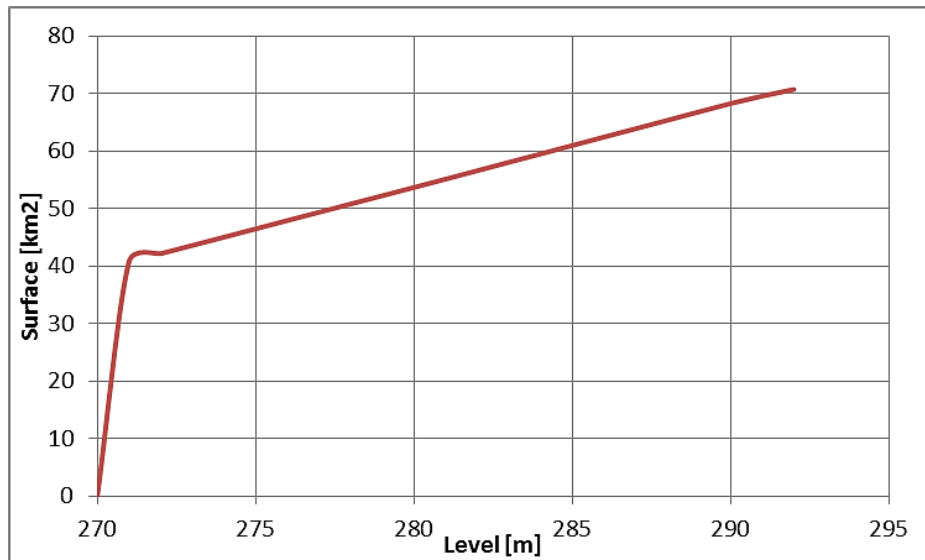
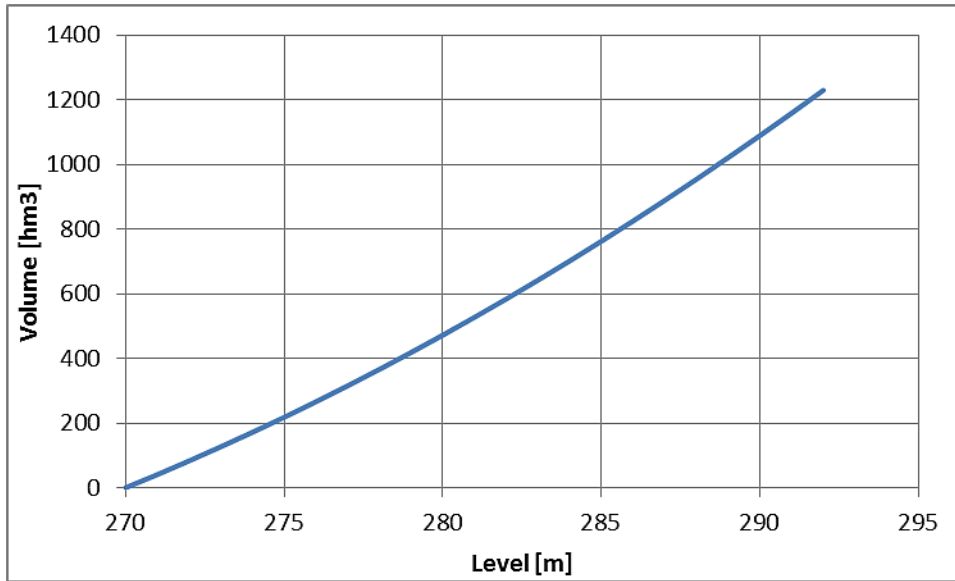
Έργο	Πολύφυτο	Σφηκιά	Ασώματα
Catchment area (km ²)	5800	172,1	67,98
Spill level (m)	291	143,0	85,5
Initial level (m)	282	136,45	83,25
Intake level (m)	270	141,0	81
Storage capacity (hm ³)	1158,57	99,96	54,04
Initial volume (hm ³)	583,72	62,12	48,08
Dead volume (hm ³)	0,00	33,99	42,56

Αντλία	Ασώματα
Inlet level (m)	81
Outlet level (m)	0
Constant DC (m ³ /s)	461
Psi (GWh/hm ⁴)	0,3043

Στρόβιλοι	Πολύφυτο	Σφηκιά	Ασώματα
Inlet level (m)	0	0	0
Outlet level (m)	146,5	81	39
Constant DC (m ³ /s)	320	630	320
Psi (GWh/hm ⁴)	0,2133	0,224	0,2268
Installed capacity (MW)	360	315	110
Number of units	3	3	2

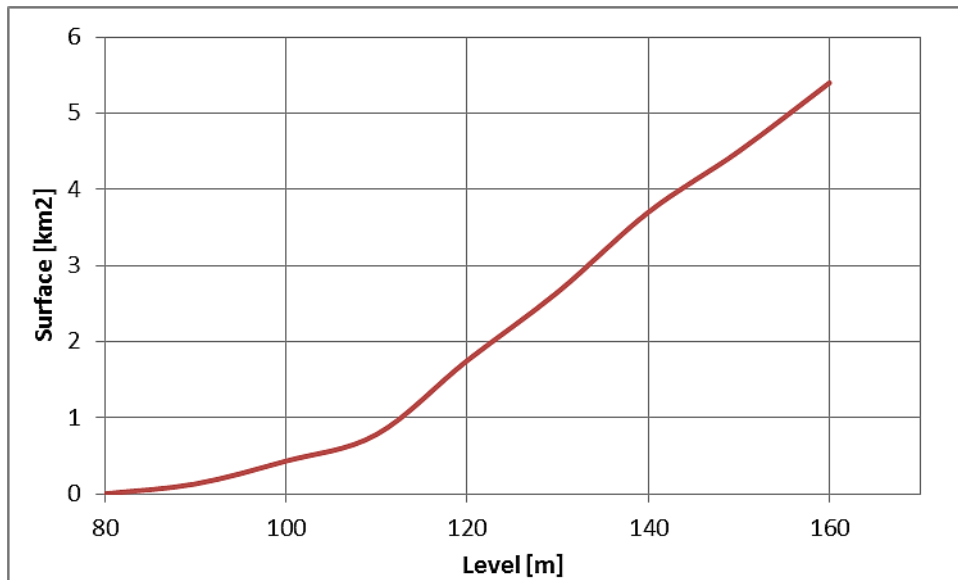
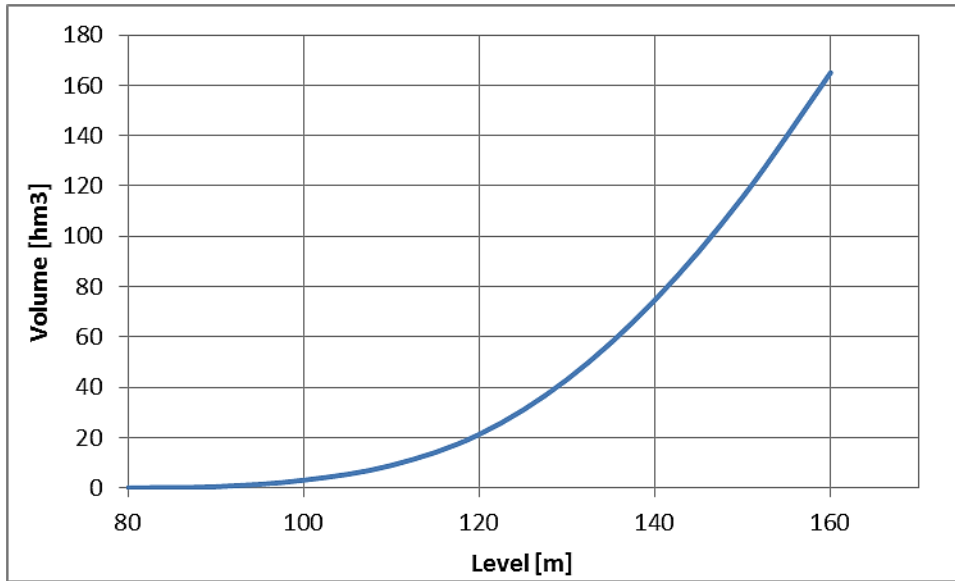
Πολύφυτο

Level [m]	Volume [hm3]	Surface [km2]
270	0	0
271	40,72	40,72
272	82,88	42,16
273	126,48	43,6
274	171,52	45,04
275	218	46,48
276	265,92	47,92
277	315,28	49,36
278	366,08	50,8
279	418,32	52,24
280	472	53,68
281	527,13	55,13
282	583,72	56,59
283	641,77	58,05
284	701,28	59,51
285	762,25	60,97
286	824,68	62,43
287	888,57	63,89
288	953,92	65,35
289	1020,73	66,81
290	1089	68,27
291	1158,57	69,57
292	1229,28	70,71



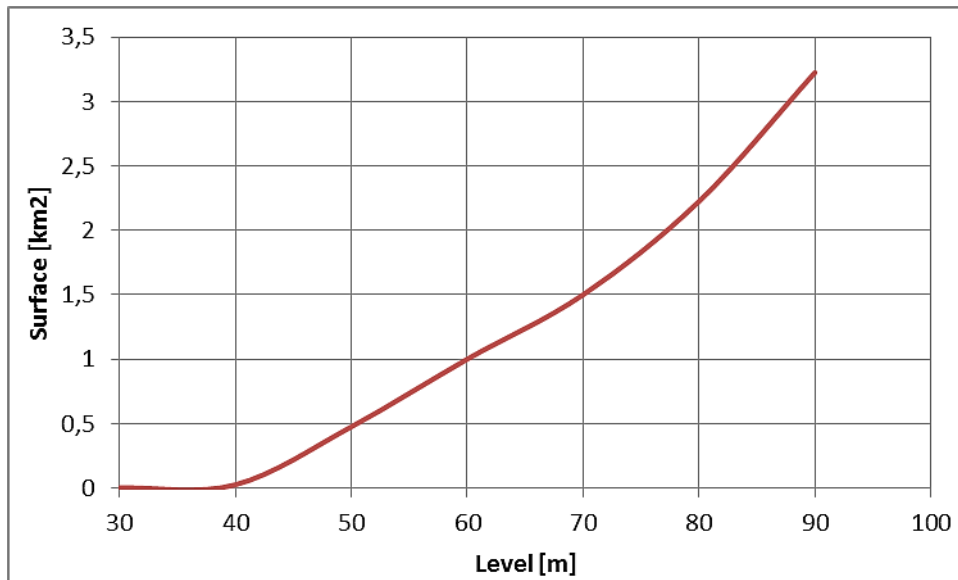
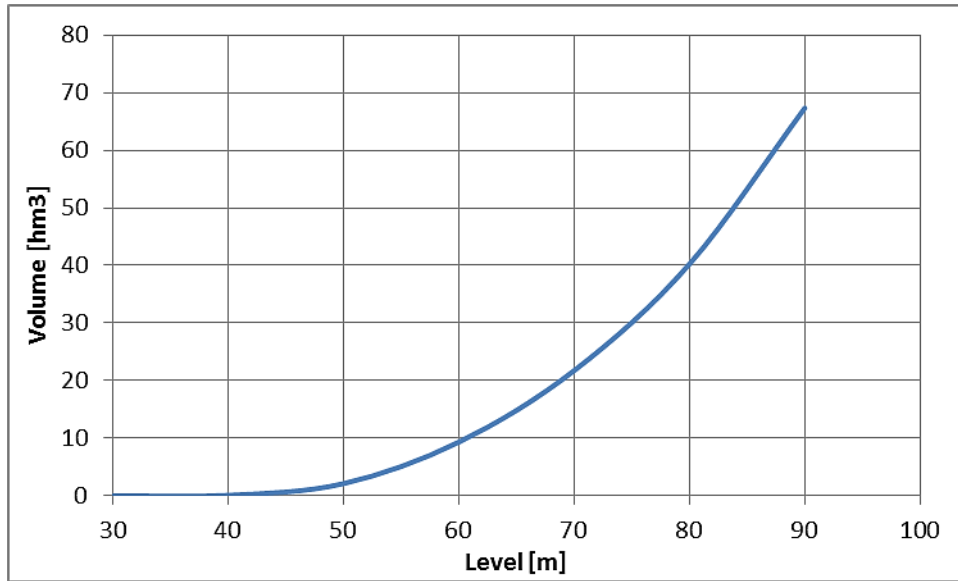
Σφηκιά

Level [m]	Volume [hm3]	Surface [km2]
80	0	0
90	0,42	0,13
100	3,02	0,43
110	8,93	0,78
120	21,23	1,75
130	43,07	2,65
140	74,68	3,7
150	115,61	4,5
160	165,05	5,4



Ασώματα

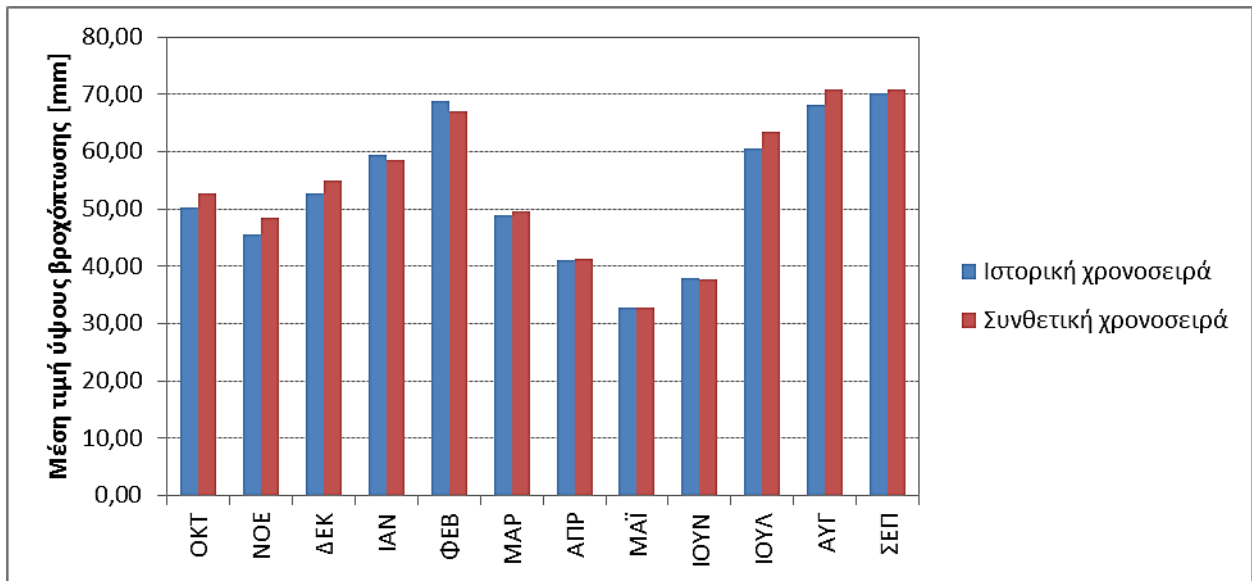
Level [m]	Volume [hm3]	Surface [km2]
30	0	0
40	0,083	0,025
50	2,113	0,475
60	9,327	1
70	21,743	1,5
80	40,249	2,225
90	67,345	3,225

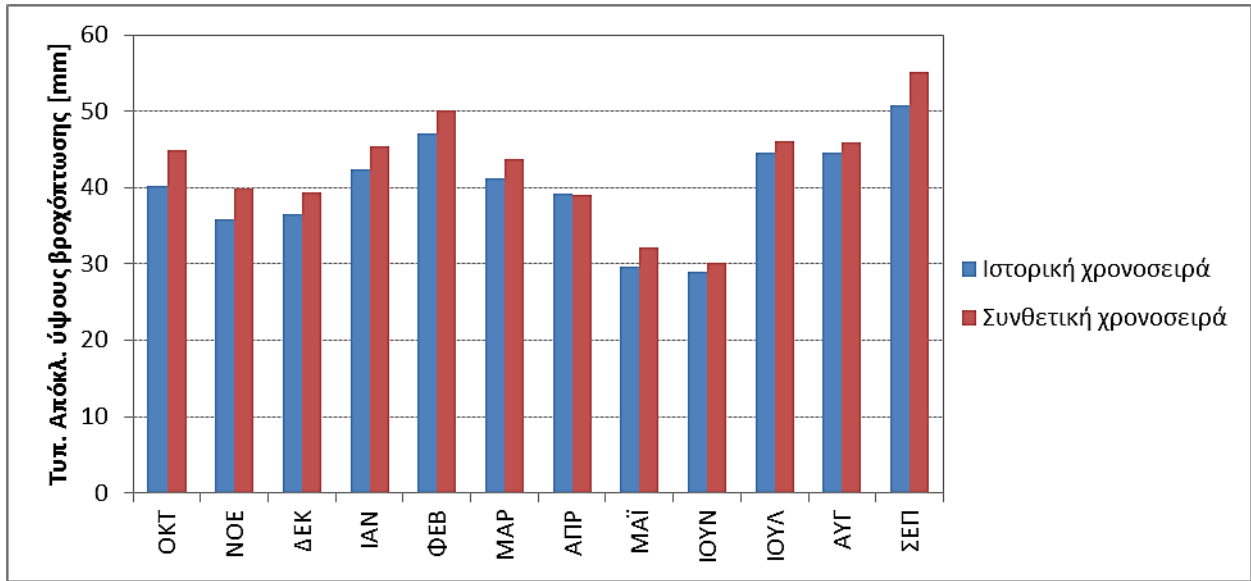


Στατιστικά χαρακτηριστικά χρονοσειρών

Τα στατιστικά παρουσιάζονται μόνο μέσω διαγραμματικής μορφής όσον αφορά τις συνθετικές χρονοσειρές. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται η σύγκριση ιστορικών και συνθετικών. Στις ιστορικές παρατίθενται και οι πίνακες με τις τιμές.

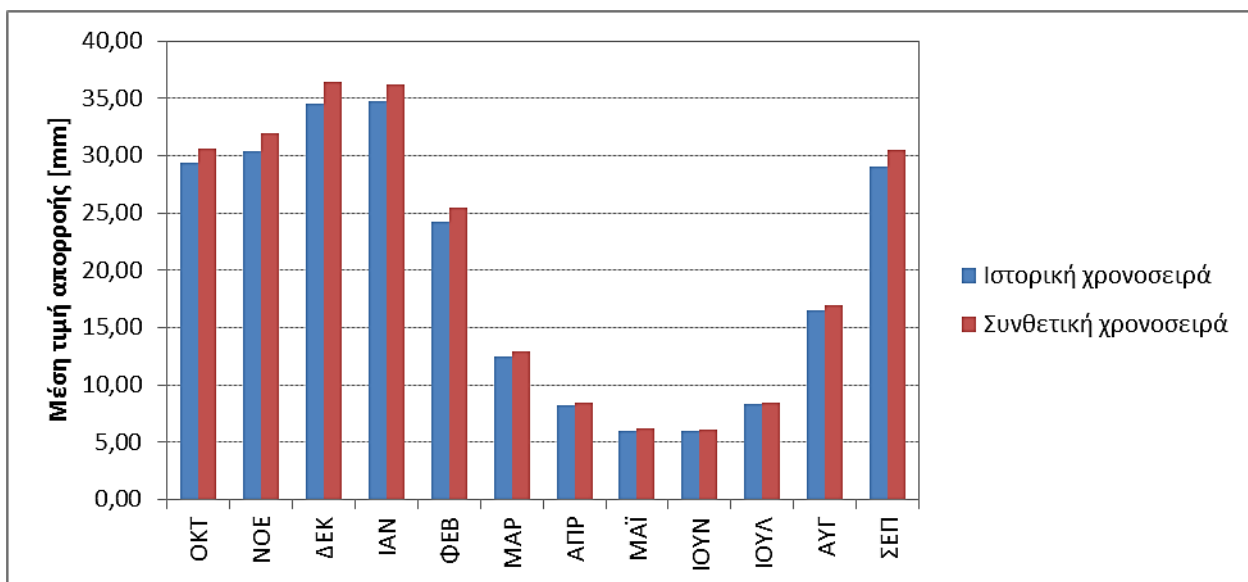
Βροχόπτωση

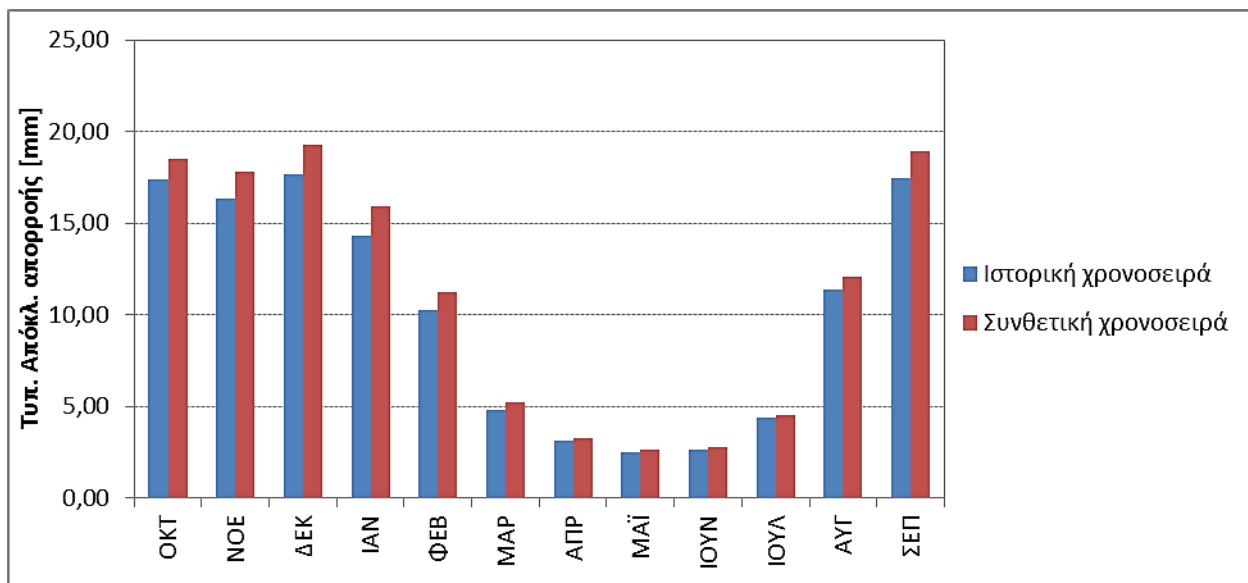




Ιστορικές													
ΥΔΡ. ΕΤ.	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1955	101,7	82,1	99,6	140,8	30,6	39,6	20,1	39,9	88,2	152,2	138	15,9	948,7
1956	73,5	150	99,1	77,9	58,2	170,1	28,8	4,3	12,1	64,2	154,3	40,1	932,6
1957	76,2	34,2	55,4	19,4	107	72,8	30,9	50	26,9	113,4	136,1	46,6	768,9
1958	97,1	50,1	86,7	127,6	50,4	24,5	23,2	10	67,3	65,3	143,2	96,4	841,8
1959	69,8	4,9	50,8	75,4	104,7	103,1	59,5	49,3	101,2	88,6	108,2	134,3	949,8
1960	78,7	35,5	116,9	181,7	140,6	102,6	33,8	0,4	58,4	71,6	113,3	159,5	1093
1961	88,6	37,5	25,5	69,4	110	50,6	104,3	1,4	12,3	65,6	49,4	106,6	721,2
1962	74,7	117,9	126,1	63,7	35,2	72,9	61,6	49,4	49	163,8	180	60,5	1054,8
1963	76,6	113,7	48,4	110,6	253,3	73,7	83	71,4	39	166,7	24	84,9	1145,3
1964	58,8	87,9	185,8	17,3	129,2	135,8	46,3	27,6	55,4	68,4	124,5	189,2	1126,2
1965	76,3	67,5	60,3	129,7	72	56	43,3	70,1	2	2,7	166	99,1	845
1966	106	35,67	82,97	22	19,8	78,3	5	7,7	36,2	63,4	127,8	85,9	670,74
1967	31,84	0	4,5	34,9	150,5	28,6	185,4	38	67,5	33,1	25,4	95	694,74
1968	52,4	29,6	14,9	28,1	180	66,8	10,5	51,8	26,4	38,2	38,6	144,3	681,6
1969	79,6	52,1	116,8	43,7	11,3	42	39,8	53,6	40	1,1	22,9	178,5	681,4
1970	47,9	42,6	50,6	26,4	58,5	24,2	76,3	9,6	45,8	88,3	9	84,9	564,1
1971	38,4	74,1	112,1	32,2	80,7	20,5	57,7	12,1	75,4	9	37,5	32,6	582,3
1972	38,7	46,9	44,9	79,3	59	41,4	180,4	62,5	33,7	153,4	8,5	6,2	754,9
1973	32,3	49,3	71,2	8	7,2	8,4	42,2	57,7	96,2	77,9	29,8	67,87	548,07
1974	43,2	82	46,6	67,3	42,4	85,4	0	9,6	32,7	39,9	62,6	5,8	517,5
1975	1,3	5,5	35,2	23,7	39,1	58,9	56,8	25,5	27,6	22,3	27,7	24,7	348,3
1976	2,2	24,5	19,8	36,7	58,8	36,7	10,3	16	9	32,7	64,7	26,8	338,2
1977	21,5	19,2	7,6	16,7	25,7	36,2	61,2	57,4	32,6	19,1	53,5	16,5	367,2
1978	32,6	19,7	34,6	98,1	24,9	10,9	1,3	14,8	88,4	62,9	17,4	63,2	468,8
1979	82,8	44,7	25,1	78	84,8	22,7	21,3	38	17,9	88,81	130,74	72,09	706,94
1980	64	13,5	54,1	42,7	91,6	47,1	1,7	2,4	30	97,2	65,8	62	572,1
1981	82,9	24,2	31,8	43,9	36	18,7	33,5	27	11,8	111,1	53,5	74,2	548,6
1982	9,1	40,6	22,5	83,2	43,6	35	9,5	158,8	61	74,8	108,7	37,7	684,5
1983	10,8	19,5	22,7	28,9	42,9	139	107,6	19,5	43,7	32,9	41,7	22,2	531,4
1984	18	24,7	59	54,5	18,7	13,7	1	46,2	27,7	13,6	51,1	17,4	345,6
1985	72,1	13,1	66,6	14,3	56,5	1,6	0,7	4,6	3,6	13,1	144	19,6	409,8
1986	35,4	64,6	40,8	22	80,7	35,6	15,4	10,7	21,7	38,1	31	38,7	434,7
1987	27,9	54,3	72	46,5	39,6	6,6	17,7	11,6	30	78,6	97,7	42,4	524,9
1988	8,2	12,7	24,5	25	12,9	24,9	2	2,1	7,2	21,2	101,3	80,6	322,6
1989	0	11,5	35,4	18,1	71,7	72,1	31	3,2	8,7	77,5	35,9	55	420,1
1990	0	11,9	10,4	33,2	57,8	20,2	3,2	47,4	15,2	30,8	49,2	96,3	375,6
1991	6,4	56,8	42,5	91,3	41,4	10,3	71,4	59,6	8	22,9	41	8,3	459,9
1992	6	0,2	12,8	79,2	51	57,5	116,4	0	15,5	56,6	45,9	33,9	475
1993	15	13	21	12,5	59	38,3	2,6	11,6	10	16,4	73,8	19,6	292,8
1994	78,6	61,5	15,9	68,9	18,7	13,2	30,5	31,1	11,6	70,4	52,3	49,9	502,6
1995	66,3	16,7	28,8	33,6	64,1	22,3	68,8	47,4	29,5	10,95	16,6	99,9	504,95
1996	36,7	31,2	31,5	26,3	53,7	12,7	34,89	42,47	67,32	62,6	82,21	39,7	521,29
1997	18,1	15,7	12,4	65,37	7,6	15,1	8,7	29,1	2	75,4	52,5	51,8	353,77
1998	4,6	28	3,9	8	102,9	9,3	2,9	13	50,7	32,4	102	37	394,7
1999	56,3	33	50,8	42,8	16,1	108,6	24,5	23,8	56,72	28,5	72,4	55,2	568,72
2000	7,5	34,8	13,4	19,7	33,4	43,7	6,1	3,6	11,8	55,8	37,2	12,7	279,7
2001	61,6	43,2	50,5	87,6	77,9	55,3	25	81,8	1,4	4	43,6	117,2	649,1
2002	41,2	2,8	51	185,6	72	6	83,6	110,2	142,7	41,2	28,6	214,4	979,3
2003	145,5	113,6	53,1	19,4	127,5	82	44,2	82,1	18,4	95,8	54,9	59,1	895,6
2004	58,1	3,4	32,1	61,2	34,3	58,5	28,2	39,4	47,8	56	65,5	61,1	545,6
2005	54,2	52,2	64,3	38,3	110,3	22,6	57	33,9	43,1	36,1	50,7	103,1	665,8
2006	40,4	79,1	78,1	100,2	67,6	62,5	65,4	2,4	30,2	49,2	8,1	3	586,2
2007	2,3	17,9	69,6	12,8	83,4	6,9	18,9	42,6	19,3	158,4	109,2	62,6	603,9
2008	3,1	58,5	32,3	82,8	40,7	18,5	36,53	15,66	81,3	34,1	71,5	184,3	659,29
2009	210,3	118,1	125,2	146,2	149,2	197,1	35,8	12	16,6	2,1	1,2	168,4	1182,2
2010	121,9	148	86,8	104,3	68,2	83,1	67,5	12,8	38,1	172	36	84,5	1023,2
2011	55,1	59,2	90,5	55,4	151,9	32	18,9	19,2	30,5	33,4	64,3	50,6	661
2012	13	55	29	90	77	6	25	22	68				385
Mean	50,23	45,51	52,7	59,52	68,86	48,94	41,02	32,71	37,97	60,63	68,11	70,17	632,96
Μέση τιμή	50,23	45,51	52,70	59,52	68,86	48,94	41,02	32,71	37,97	60,63	68,11	70,17	632,96
Τυπ. Απόκλ.	40,18926	35,788	36,59119	42,41796	47,07123	41,30634	39,27772	29,67701	29,02762	44,54878	44,62274	50,82843	236,2299

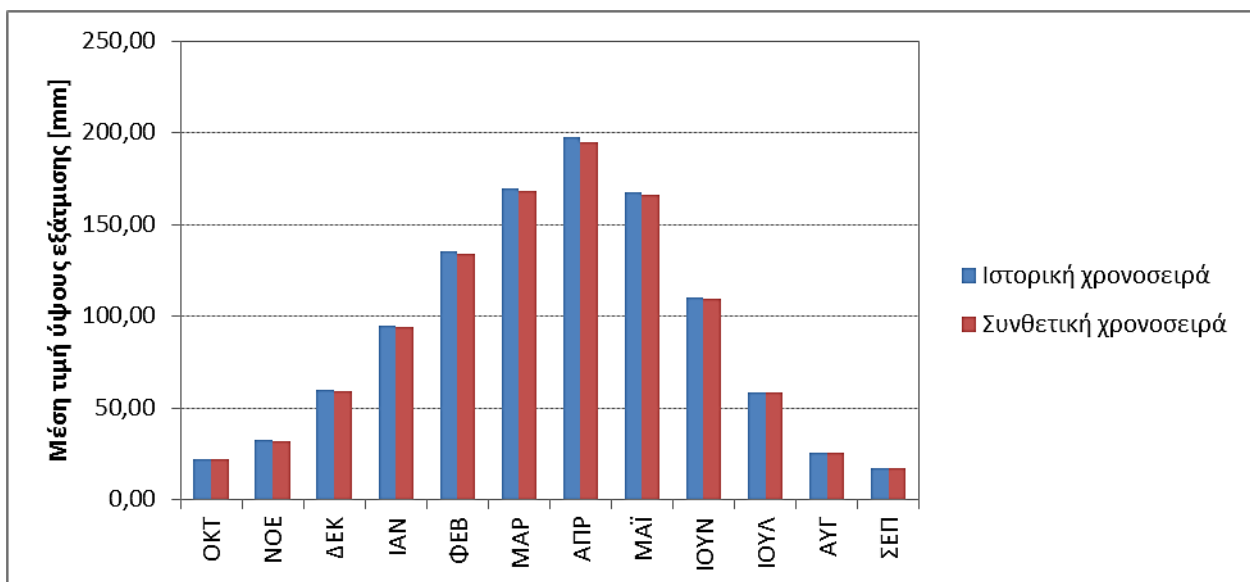
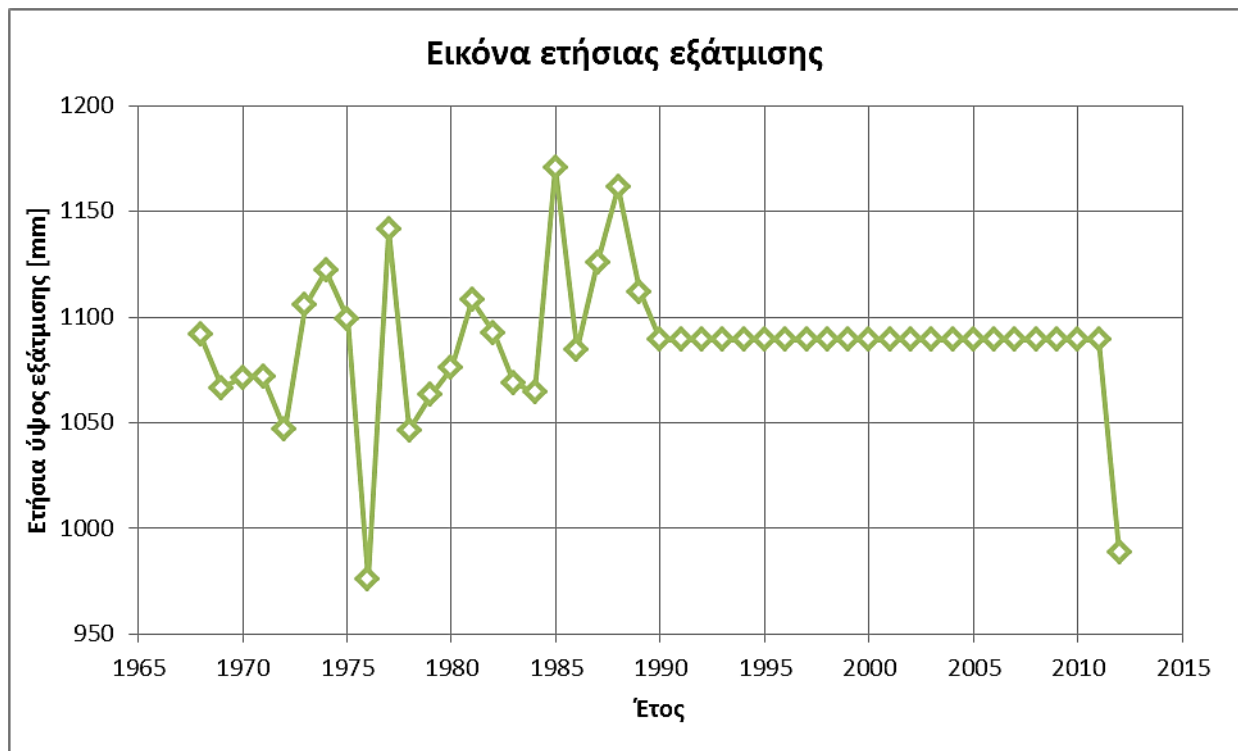
Απορροή



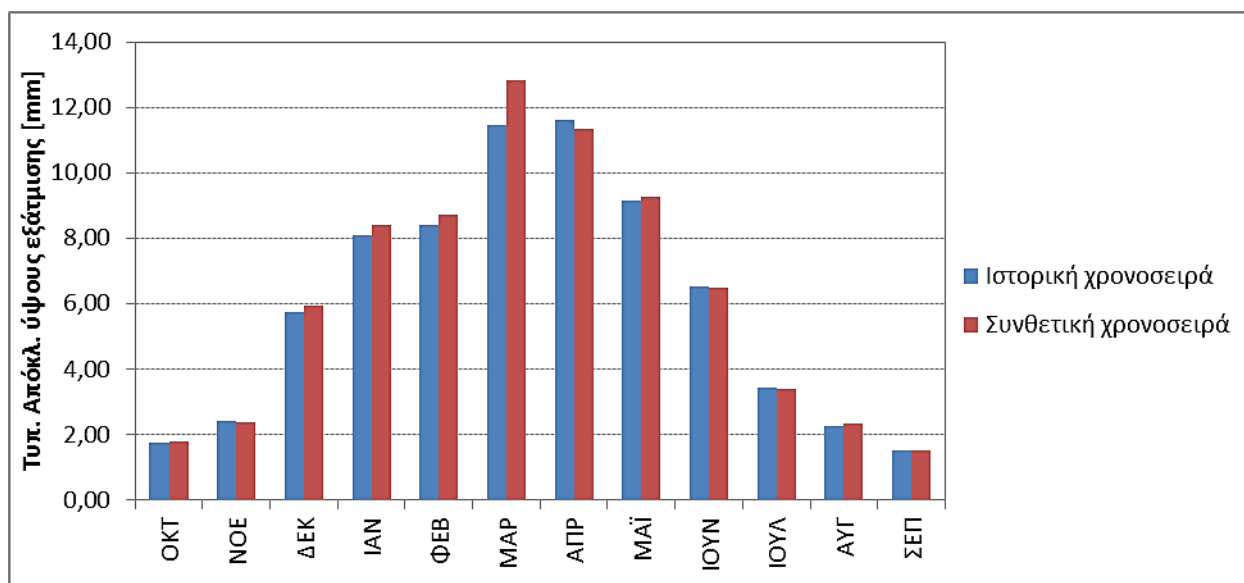


ΥΔΡ. ΕΤ.	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ
1974									7,5	16,54	30,19	14,02	68,25
1975	17,87	17,95	41,77	30,47	22,51	14,57	11,12	9,24	7,25	9,27	12,98	20,75	215,75
1976	11,86	25,79	25,65	31,8	22,76	14,89	11,61	8,87	7,06	7,87	20,77	45,79	234,72
1977	24,42	26,56	13,98	14,19	13,15	8,5	6,12	7,12	5,01	6,48	13,64	30,15	169,32
1978	18,91	52,5	33,92	55,93	26,91	13,49	6,83	5,7	7,87	6,73	10,53	36,16	275,48
1979	66,69	57,1	27,52	55,28	35,68	18,35	10,16	8,08	7,8	7,95	66,67	43,2	404,48
1980	59,22	37,42	55,65	38,43	48,38	28,21	12,38	7,65	8,23	16,67	27,37	55,87	395,48
1981	26,07	45,7	62,59	46,82	26,68	14,59	9,63	10,51	8,85	14,83	12,37	54,14	332,78
1982	34,05	27,27	8,98	24,09	15,11	13,58	12,86	8,41	8,16	4,98	11,34	37,03	205,86
1983	57,24	15,89	48,23	55,59	43,01	18,63	10,22	10,03	9,27	15,47	34,92	54,97	373,47
1984	46,92	48,04	57,81	57,45	40,42	17,39	10,04	8,67	6,27	7,61	9,71	8,81	319,14
1985	29,56	19,43	24	51,16	27,25	10,43	7,02	4,96	4,46	2,17	18,42	23,6	222,46
1986	25,23	69,46	52,44	29,15	30,25	16,97	11,06	8,27	6,31	3,57	14,44	6,08	273,23
1987	42,29	45,4	67,47	44,6	28,48	15,91	10,03	5,99	6,74	10,6	18,86	22,48	318,85
1988	12,76	15,57	23,14	19,57	15,95	7,66	4,65	2,9	4,46	3,64	10,29	25,34	145,93
1989	6,79	11,73	32,47	14,77	12,33	7,91	5,79	3,19	2,99	10,24	13,15	13,74	135,1
1990	13,79	8,78	14,77	9,82	9,29	7,5	2,44	3,9	3,14	3,23	8,26	43,87	128,79
1991	19,77	36,68	34,94	61,26	45,03	19,8	17,26	3,83	7,01	6,63	14,86	7,66	274,73
1992	9,13	8,06	8,29	33,82	14,75	8,8	8,11	4,46	2,86	10,15	13,81	17,6	139,84
1993	13,91	9,54	36,13	39,42	18,43	8,45	5,71	3,2	3,27	4,27	11,69	35,05	189,07
1994	45,27	51,35	43,08	27,47	20,38	8,85	8,49	6,57	3,7	6,17	12,67	13,98	247,98
1995	37,92	29,09	26,06	26,44	27,94	12,02	10,16	8,66	8,21	6,76	8,43	30,76	232,45
1996	28,58	41,18	41,48	42,35	25,23	11,82	9,14	7,28	8,21	11,29	19,58	31,75	277,89
1997	40,68	13,3	16,73	21,97	26,51	8,94	5,28	5,11	3,75	6,23	18,71	37,11	204,32
1998	15,61	36,81	14,54	19,7	24,2	12,92	6,05	3,5	4,62	7,87	28,73	55,86	230,41
1999	34,73	38,35	54,81	52,39	25,7	11,12	9,28	7,25	6,74	7,21	24,53	28,43	300,54
2000	22,23	37,03	30,22	25,35	16,57	10,31	7,42	4,41	2,64	6,85	7,03	7,49	177,55
2001	12,71	12,32	12,47	13,94	8,89	4,62	4,29	2,96	2,04	0,76	3,12	10,03	88,15
2002	14,14	9,89	22,51	35,28	13,07	6,48	4,99	3,17	15,13	18,54	8,45	80,39	232,04
2003	75,25	50,79	34,93	43,73	26,98	14,11	9,03	9,16	6,84	15,44	12,75	18,52	317,53
2004	44,99	35,73	48,3	36,2	37,64	17,27	9,1	6,72	7,01	11,7	14,33	14,22	283,21
2005	20,41	34,02	57,25	35,47	20,27	10,12	7,32	4,35	5,07	5,84	6,26	41,87	248,25
2006	42,34	40,74	69,79	46,37	30,02	13,7	10,32	7,72	6,56	8,74	8,51	8,78	293,59
2007	14,07	11,68	15,34	22,22	12	8,26	4,2	2,52	2,66	5,98	25,69	14,4	139,02
2008	12,28	11,33	16,16	18,98	12	6,56	2,94	0,55	2,49	2,68	6,61	25,74	118,32
Mean	29,34	30,37	34,51	34,75	24,23	12,43	8,27	6,03	6,01	8,31	16,56	29,02	234,69
Μέση τιμή	29,34	30,37	34,51	34,75	24,23	12,43	8,27	6,03	6,01	8,31	16,56	29,02	234,69
Τυπ. Απόκλ.	17,39	16,37	17,64	14,29	10,29	4,79	3,10	2,52	2,63	4,41	11,34	17,43	83,42

Εξάτμιση



Η σταθερή εικόνα της εξάτμισης κάποιων ετών οφείλεται στη συμπλήρωση δεδομένων που ήταν κενά χρησιμοποιώντας αυτά της προηγούμενης χρονιάς. Η εξάτμιση από τους ταμιευτήρες αποτελεί υδρολογική μεταβλητή μικρής σημασίας, γι αυτό και δεν επιλέχθηκε να ακολουθηθεί συνθετότερη προσέγγιση.



Ιστορικές														
ΥΔΡ. ΕΤ.	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΕΤΟΣ	
1968	19,76	34,87	64,14	110,05	146,16	150,05	211,83	155,43	107,78	54,97	22,65	14,07	1091,76	
1969	17,67	30,4	45,82	94,55	151,44	162,72	176,12	168,53	105,08	60,83	33,81	19,53	1066,5	
1970	23,24	34,48	61,06	98,73	118,27	162,64	179,83	172,78	114,48	59,35	28,35	18,04	1071,25	
1971	23,69	29,23	52,13	91,2	143,84	174,47	175,26	178,44	98,68	61,03	26,79	16,99	1071,75	
1972	21,64	28,29	69,33	88,42	142,37	187,58	174,04	152,25	91,79	46,4	27,01	17,69	1046,81	
1973	16,91	31,32	48,58	91,67	154,38	177,58	199,7	160,93	113,17	63,5	26,55	21,48	1105,77	
1974	25,59	37,76	62,47	83,52	136,94	166,5	209,59	175,34	112,51	66	27,16	18,52	1121,9	
1975	20,59	33,78	64,85	105,55	137,12	169,47	193,25	156,17	120,2	59,62	24,85	13,78	1099,23	
1976	25,66	31,44	57	93,87	117,44	116,82	177,99	147,61	107,28	61,13	23,34	16,22	975,8	
1977	22,26	40,98	69,17	103,04	146,14	175,37	213,38	171,84	98,95	59,34	26,66	14,34	1141,47	
1978	18,42	28,44	63,98	74,23	122,68	182,2	206,63	170,24	93,52	50,25	19,18	16,83	1046,6	
1979	18,87	32,08	67,58	81,11	140,92	170,72	192,18	153,93	104,86	58,51	25,26	16,98	1063	
1980	21,02	35,26	56,15	89,6	107,81	164,75	208,78	173,17	114,8	58,42	27,75	18,33	1075,84	
1981	22,05	29,61	68,1	104,92	122,7	188,3	191,48	159,85	111,66	65,13	23,18	21,09	1108,07	
1982	25,38	30,11	61,04	83,99	128,26	188,94	199,5	164,28	115,82	54,12	22,7	18,43	1092,57	
1983	22,72	31,64	69,29	108,56	147,72	149,31	181,84	155,54	104,35	57,46	24,76	15,34	1068,53	
1984	22,05	31,18	52,24	73,94	140,43	174,18	208,72	143,66	111,79	64,27	25,57	16,69	1064,72	
1985	22,76	29,58	47,71	103,66	141,47	190,29	220,23	188,12	121,15	58,96	28,92	18,1	1170,95	
1986	23,99	26,95	48,44	109,65	126,27	158,41	187,77	186,93	119,18	60,1	21,22	15,83	1084,74	
1987	24,38	29,92	47,55	94,99	128,52	180,92	214,93	182,24	132,89	49,49	24,43	15,8	1126,06	
1988	20,84	34,34	62,75	89,75	142,37	179,84	236,02	188,17	115,45	59,33	19,55	12,9	1161,31	
1989	19,27	37,71	71	117,45	129	161,14	183,09	178,69	113,07	59,04	25,97	16,53	1111,96	
1990	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
1991	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
1992	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
1993	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
1994	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
1995	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
1996	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
1997	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
1998	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
1999	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2000	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2001	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2002	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2003	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2004	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2005	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2006	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2007	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2008	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2009	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2010	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2011	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1089,38	
2012	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	988,63	
Mean	21,76	32,24	59,56	95,11	135,1	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1087,15	
Μέση τιμή	21,76	32,24	59,56	95,11	135,10	169,65	197,37	167,46	110,38	58,51	25,26	16,98	1087,15	
Τυπ. Απόκλ.	1,74	2,41	5,75	8,08	8,42	11,46	11,62	9,13	6,53	3,41	2,26	1,52	32,58	

Κώδικες (scripts) MATLAB™

1. Σχέση παρεμβολή Στάθμης-Επιφάνειας για το Πολύφυτο

```
clc
clear

close all

%Polyfyto
surface=xlsread('isozygio_polyfyto1.xls','N4:N26');
level=xlsread('isozygio_polyfyto1.xls','J4:J26');

paremv=polyfit(level,surface,6);
```

2. Μετατροπή μητρώου τιμών απορροής Πολυφύτου σε στήλη

```
clc
clear

A=xlsread('Runoff_Polyfyto','Polyfyto','B17:M54');
A=transpose(A);
A=A(:);
```

3. Υπολογισμός αιολικής παραγωγής και μετατροπές χρονοσειρών (συνάθροιση στις διάφορες κλίμακες)

```
clc
clear

close all

%%Διάβασμα χρονοσειρών από το excel
oct=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'E18:E744017');
nov=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'F18:F720017');
dec=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'G18:G744017');
jan=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'H18:H744017');
feb=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'I18:I672017');
mar=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'J18:J744017');
apr=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'K18:K720017');
may=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'L18:L744017');
jun=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'M18:M720017');
jul=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'N18:N744017');
aug=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'O18:O744017');
sep=xlsread('synthetic_monthcolumn-compare.xlsx',2,'P18:P720017');

%%Μετατροπή σε στήλη
all=vertcat(oct,nov,dec,jan,feb,mar,apr,may,jun,jul,aug,sep);

%%Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας
turb=xlsread('kilkis_anemos.xlsx',2,'B4:C28');
windspeed=turb(:,1);
power=turb(:,2);
pcurve=polyfit(windspeed,power,6);

%oct
```

```

octsize=size(oct);
for i=1:octsize
    if oct(i)<=2
        octenerghour(i)=0;
    else
        octenerghour(i)=polyval(pcurve,oct(i));
    if octenerghour(i)<0;
        octenerghour(i)=0;
    end
end
end
octenerghour=octenerghour';
octenergmat=reshape(octenerghour,24,31000);
octmat=sum(octenergmat);
octcol=octmat';
octdaily=reshape(octcol,31,1000);
octmonthenerg=sum(octdaily);
octmonthenerg=octmonthenerg';

%nov
novsize=size(nov);
for i=1:novsize
    if nov(i)<=2
        novenerghour(i)=0;
    else
        novenerghour(i)=polyval(pcurve,nov(i));
    if novenerghour(i)<0;
        novenerghour(i)=0;
    end
end
end
novenerghour=novenerghour';
novenergmat=reshape(novenerghour,24,30000);
novmat=sum(novenergmat);
novcol=novmat';
novdaily=reshape(novcol,30,1000);
novmonthenerg=sum(novdaily);
novmonthenerg=novmonthenerg';

%dec
decsize=size(dec);
for i=1:decsize
    if dec(i)<=2
        decenerghour(i)=0;
    else
        decenerghour(i)=polyval(pcurve,dec(i));
    if decenerghour(i)<0;
        decenerghour(i)=0;
    end
end
end
decenerghour=decenerghour';
decenergmat=reshape(decenerghour,24,31000);
decmat=sum(decenergmat);
deccol=decmat';
decdaily=reshape(deccol,31,1000);
decmonthenerg=sum(decdaily);
decmonthenerg=decmonthenerg';

%jan
jansize=size(jan);

```

```

for i=1:jansize
    if jan(i)<=2
        janenerghour(i)=0;
    else
        janenerghour(i)=polyval(pcurve,jan(i));
    if janenerghour(i)<0;
        janenerghour(i)=0;
    end
end
end
janenerghour=janenerghour';
janenerghmat=reshape(janenerghour,24,31000);
janmat=sum(janenerghmat);
jancol=janmat';
jandailymat=reshape(jancol,31,1000);
janmonthenerg=sum(jandailymat);
janmonthenerg=janmonthenerg';

%feb
febsize=size(febsize);
for i=1:febsize
    if feb(i)<=2
        febenerghour(i)=0;
    else
        febenerghour(i)=polyval(pcurve,feb(i));
    if febenerghour(i)<0;
        febenerghour(i)=0;
    end
end
end
febenerghour=febenerghour';
febenerghmat=reshape(febenerghour,24,28000);
febmat=sum(febenerghmat);
febcol=febmat';
febdailymat=reshape(febcol,28,1000);
febmonthenerg=sum(febdailymat);
febmonthenerg=febmonthenerg';

%mar
marsize=size(mar);
for i=1:marsize
    if mar(i)<=2
        marenerghour(i)=0;
    else
        marenerghour(i)=polyval(pcurve,mar(i));
    if marenerghour(i)<0;
        marenerghour(i)=0;
    end
end
end
marenerghour=marenerghour';
marenerghmat=reshape(marenerghour,24,31000);
marmat=sum(marenerghmat);
marcol=marmat';
mardailymat=reshape(marcol,31,1000);
marmonthenerg=sum(mardailymat);
marmonthenerg=marmonthenerg';

%apr
aprsize=size(apr);
for i=1:aprsize

```

```

    if apr(i) <= 2
        aprenerghour(i) = 0;
    else
        aprenerghour(i) = polyval(pcurve, apr(i));
    if aprenerghour(i) < 0;
        aprenerghour(i) = 0;
    end
end
end
aprenerghour = aprenerghour';
aprenergmat = reshape(aprenerghour, 24, 30000);
aprmat = sum(aprenergmat);
aprcol = aprmat';
aprdailymat = reshape(aprcol, 30, 1000);
aprmonthenerg = sum(aprdailymat);
aprmonthenerg = aprmonthenerg';

%may
maysize = size(may);
for i = 1:maysize
    if may(i) <= 2
        mayenerghour(i) = 0;
    else
        mayenerghour(i) = polyval(pcurve, may(i));
    if mayenerghour(i) < 0;
        mayenerghour(i) = 0;
    end
end
end
mayenerghour = mayenerghour';
mayenergmat = reshape(mayenerghour, 24, 31000);
maymat = sum(mayenergmat);
maycol = maymat';
maydailymat = reshape(maycol, 31, 1000);
maymonthenerg = sum(maydailymat);
maymonthenerg = maymonthenerg';

%jun
junsiz = size(jun);
for i = 1:junsiz
    if jun(i) <= 2
        junenerghour(i) = 0;
    else
        junenerghour(i) = polyval(pcurve, jun(i));
    if junenerghour(i) < 0;
        junenerghour(i) = 0;
    end
end
end
junenerghour = junenerghour';
junenergmat = reshape(junenerghour, 24, 30000);
junmat = sum(junenergmat);
juncol = junmat';
jundailymat = reshape(juncol, 30, 1000);
junmonthenerg = sum(jundailymat);
junmonthenerg = junmonthenerg';

%jul
julsize = size(jul);
for i = 1:julsize
    if jul(i) <= 2

```



```

        julenerghour(i)=0;
    else
        julenerghour(i)=polyval(pcurve,jul(i));
    if julenerghour(i)<0;
        julenerghour(i)=0;
    end
end
end
julenerghour=julenerghour';
julenergmat=reshape(julenerghour,24,31000);
julmat=sum(julenergmat);
julcol=julmat';
juldailymat=reshape(julcol,31,1000);
julmonthenerg=sum(juldailymat);
julmonthenerg=julmonthenerg';

%aug
augsize=size(aug);
for i=1:augsize
    if aug(i)<=2
        augenerghour(i)=0;
    else
        augenerghour(i)=polyval(pcurve,aug(i));
    if augenerghour(i)<0;
        augenerghour(i)=0;
    end
end
end
augenerghour=augenerghour';
augenergmat=reshape(augenerghour,24,31000);
augmat=sum(augenergmat);
augcol=augmat';
augdailymat=reshape(augcol,31,1000);
augmonthenerg=sum(augdailymat);
augmonthenerg=augmonthenerg';

%sep
sepsize=size(sep);
for i=1:sepsize
    if sep(i)<=2
        sepenerghour(i)=0;
    else
        sepenerghour(i)=polyval(pcurve,sep(i));
    if sepenerghour(i)<0;
        sepenerghour(i)=0;
    end
end
end
sepenerghour=sepenerghour';
sepenergmat=reshape(sepenerghour,24,30000);
sepmat=sum(sepenergmat);
sepcol=sepmat';
sepdailymat=reshape(sepcol,30,1000);
sepmonthenerg=sum(sepdailymat);
sepmonthenerg=sepmonthenerg';

totalmonthenergy=vertcat(octmonthenerg,novmonthenerg,decmonthenerg,janmonthenerg,
febmonthenerg,marmonthenerg,aprmonthenerg,maymonthenerg,junmonthenerg,julmonthene
rg,augmonthenerg,sepmonthenerg);
sorttotal=sort(totalmonthenergy,'descend');

```

```

october=reshape (oct,744,1000);
november=reshape (nov,720,1000);
december=reshape (dec,744,1000);
january=reshape (jan,744,1000);
february=reshape (feb,672,1000);
march=reshape (mar,744,1000);
april=reshape (apr,720,1000);
mayma=reshape (may,744,1000);
june=reshape (jun,720,1000);
july=reshape (jul,744,1000);
august=reshape (aug,744,1000);
september=reshape (sep,720,1000);

windseries=[october;november;december;january;february;march;april;mayma;june;jul
y;august;september];

windser=windseries(:);
windsizer=size(windser);

for i=1:windsizer
    if windser(i)<=2
        windpower(i)=0;
    else
        windpower(i)=polyval(pcurve,windser(i));
    if windpower(i)<0;
        windpower(i)=0;
    end
end
end

windpower=windpower';
windpowermat=reshape(windpower,24,365000);
windmat=sum(windpowermat);
windcolumn=windmat';
winddailymat=reshape(windcolumn,365,1000);

windoct=winddailymat(1:31,:);
windnov=winddailymat(32:61,:);
winddec=winddailymat(62:92,:);
windjan=winddailymat(93:123,:);
windfeb=winddailymat(124:151,:);
windmar=winddailymat(152:182,:);
windapr=winddailymat(183:212,:);
windmay=winddailymat(213:243,:);
windjun=winddailymat(244:273,:);
windjul=winddailymat(274:304,:);
windaug=winddailymat(305:335,:);
windsep=winddailymat(336:365,:);

octmonth=sum(windoct);
novmonth=sum(windnov);
decmonth=sum(winddec);
janmonth=sum(windjan);
febmonth=sum(windfeb);
marmonth=sum(windmar);
aprmonth=sum(windapr);
maymonth=sum(windmay);
junmonth=sum(windjun);
julmonth=sum(windjul);

```

```

augmonth=sum(windaug);
sepmonth=sum(windsep);

monthpowermat=[octmonth;novmonth;decmonth;janmonth;febmonth;marmonth;aprmonth;may
month;junmonth;julmonth;augmonth;sepmonth];
monthpowercol=monthpowermat(:);
monthpowersort=sort(monthpowercol,'descend');

```

Κώδικας (script) στην R (πρόγραμμα HYETOS-R) για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου

```
# Dimas-hourly wind statistics for all months -----
```

```
# January
```

```
mean1 = 2.165;var1 =12.732 ;cov1lag1 =11.723;pdr1 =0.382
```

```
7.391827e+00 8.261645e-01 4.456091e-01 7.186698e+00 1.449900e-01 1.784053e+01 1.459837e-10
1.171600e+04 9.379016e-08
```

```
# February
```

```
mean1 =2.735 ;var1 = 14.417;cov1lag1 =13.144;pdr1 =0.302
```

```
9.167775e+00 1.523723e+00 6.519729e-01 6.004525e+00 2.215090e-01 1.920068e+01 2.533862e-11
1.231000e+04 8.908877e-08
```

```
# Mars
```

```
mean1 =2.560 ;var1 = 13.797;cov1lag1 =12.360;pdr1 =0.299
```

```
6.252787e+00 2.367624e+00 6.266007e-01 3.777593e+00 6.466887e-01 3.179728e+01 3.733833e-10
1.080700e+04 9.917161e-08
```

```
# April
```

```
mean1 = 2.103;var1 = 10.287;cov1lag1 =9.082;pdr1 =0.328
```

7.427909e+00 1.859469e+00 4.262041e-01 5.437252e+00 2.799146e-01 2.004280e+01 1.358785e-10
1.142900e+04 9.563813e-08

May

mean1 = 1.986;var1 =8.675 ;cov1lag1 =7.491;pdr1 =0.311

1.369970e+01 2.078231e+00 6.589450e-01 5.405645e+00 2.253121e-01 1.768656e+01 2.966030e-10
1.111600e+04 9.902312e-08

June

mean1 = 2.181;var1 = 9.766;cov1lag1 =8.489;pdr1 =0.294

7.363562e+00 2.063602e+00 3.099876e-01 5.778638e+00 1.947742e-01 1.697876e+01 6.847412e-11
1.081100e+04 9.870654e-08

July

mean1 = 2.468;var1 = 10.505;cov1lag1 =9.238;pdr1 =0.244

4.748794e+00 2.384059e+00 1.999860e-01 5.933577e+00 2.092510e-01 1.586465e+01 1.500841e-10
1.334800e+04 9.530713e-08

August

mean1 = 2.123;var1 = 8.386;cov1lag1 =7.216;pdr1 =0.253

1.022153e+01 2.398952e+00 4.201529e-01 5.692337e+00 1.918640e-01 1.519992e+01 1.512444e-10
1.433200e+04 9.935244e-08

September

mean1 = 2.150 ;var1 = 9.485;cov1lag1 =8.296;pdr1 =0.287

7.635786e+00 2.043836e+00 3.559341e-01 5.726804e+00 2.138217e-01 1.694128e+01 2.461268e-10
1.089900e+04 9.530360e-08

October

mean1 = 1.694 ;var1 =9.092 ;cov1lag1 =8.247;pdr1 =0.380

7.652295e+00 1.405237e+00 8.330520e-01 4.375875e+00 6.220004e-01 2.875277e+01 3.816168e-10
1.116900e+04 9.994308e-08

November

mean1 =1.815 ;var1 = 10.869;cov1lag1 = 9.960;pdr1 =0.383

5.434372e+00 1.188870e+00 5.436542e-01 5.136113e+00 5.311559e-01 2.800987e+01 7.198797e-11
1.074700e+04 9.324099e-08

December

mean1 = 1.985;var1 = 12.132;cov1lag1 =11.131;pdr1 =0.423

5.626259e+00 1.049543e+00 4.338522e-01 6.107600e+00 3.035728e-01 2.291844e+01 1.669824e-10
1.020300e+04 9.035695e-08

Random parameter Bartlett-Lewis model equations -----

Mean

modmean<-function(a,l,v,k,f,mx,h=1) {

 x <- (h*l*mx*v*(1+k/f))/(a-1)

 return(x)

}

Variance

modvar <- function(a,l,v,k,f,mx,h=1) {

 A <- (2*l*(1+k/f)*(mx^2)*(v^a))/((f^2)*((f^2)-1)*(a-1)*(a-2)*(a-3))

 B <- (2*(f^2)-2+k*f)*(f^2)*((a-3)*h*(v^(2-a))-v^(3-a))+((v+h)^(3-a))

```

C <- k*(f*(a-3)*h*(v^(2-a))-(v^(3-a))+((v+f*h)^(3-a)))
D <- A*(B-C)
return(D)
}

```

Covariance

```

modcov <- function(a,l,v,k,f,mx,h=1,lag=1) {
  A <- (l*(1+k/f)*(mx^2)*(v^a))/((f^2)*((f^2)-1)*(a-1)*(a-2)*(a-3))
  B <- (2*(f^2)-2+k*f)*(f^2)*((v+(lag+1)*h)^(3-a))-2*((v+lag*h)^(3-a))+((v+(lag-1)*h)^(3-a))
  C <- k*((v+(lag+1)*h*f)^(3-a))-(2*((v+h*lag*f)^(3-a)))+((v+(lag-1)*h*f)^(3-a))
  D <- A*(B-C)
  return(D)
}

```

Probability dry

```

modpdr <- function(a,l,v,k,f,h=1) {
  mt <- ((1+(f*(k+f))-(0.25*f*(k+f)*(k+4*f))+((f/72)*(k+f)*(4*(k^2)+27*k*f+72*(f^2))))*v)/(f*(a-1))
  G00 <- ((1-k-f+1.5*k*f+(f^2)+0.5*(k^2))*v)/(f*(a-1))
  A <- (f+(k*(v/(v+(k+f)*h))^(a-1)))/(f+k)
  D <- exp(l*(-h-mt+G00*A))
  return(D)
}

```

Objective Function -----

```

objfuction <- function(x) {

```

```

a <- x[1];l <- x[2];v <- x[3];k <- x[4];f <- x[5];mx <- x[6]
w1<-1;w2<-1;w3<-1;w4<-1
S1 <- w1*abs((modmean(a,l,v,k,f,mx,h=1)/mean1)-1)+
w2*abs((modvar(a,l,v,k,f,mx,h=1)/var1)-1)+
w3*abs((modcov(a,l,v,k,f,mx,h=1)/cov1lag1)-1)+
w4*abs((modpdr(a,l,v,k,f,h=1)/pdr1)-1)

if(is.infinite(S1)) {S1<-10000000000000}
if(is.na(S1)) {S1<-10000000000000}

return(S1)
}

# Evolutionary Nelder-Mead Optimization method -----

eas2 <- function(n,m,xmin,xmax,xlow,xup,fn,maxeval=1500,ftol=1.e-
07,ratio=0.99,pmut=0.9,beta=2,maxclimbs=5) {

# generate initial population

mvector <- 1:m

pop <- mat.or.vec(nr=m,nc=n)

for (i in 1:n) { pop[,i] <- xmin[i]+runif(m,0,1)*(xmax[i]-xmin[i]) } # initial population

fpop <- apply(pop,1,fn) # fitness of initial population

neval <- m # number of function evaluations

iter <- 0 # number of iterations taken by the algorithm

temperature <- max(fpop) - min(fpop) # temperature of initial population

```

```

# define initial values for counters

expans <- 0

inscontract <- 0

outcontract <- 0

shrink <- 0

uphills <- 0

mutations <- 0

acmutations <- 0

reflections <- 0

maxfp <- max(fpop)

minfp <- fn(pop[which.min(fpop),])

meanfp <- mean(fpop)

temp <- temperature

## Main loop ##

repeat {

  iter <- iter+1 # number of iterations taken by the algorithm

  # compute statistics of the population

  meanpop <- apply(pop,2,mean) # mean

  sdpop <- apply(pop,2,sd) # standard deviation

  # generate a simplex, selecting its vertices randomly from the actual population

  sn <- sample(mvector,size=n+1) # coordinates of simplex vertex

  s <- pop[sn,] # simplex

  fns <- fpop[sn] # function value of each vertex of simplex

```



```

# determine the highest (worst) and the lowest (best) point of simplex
s1position <- which.min(fns) # highest (worst) point of simplex
sn1position <- which.max(fns) # lowest (best) point of simplex

# check temperature according to annealing schedule parameter, beta
if( temperature > beta*( max(fns)-min(fns) ) ) { temperature <- beta*(max(fns)-min(fns)) }

# determine the randomized worst point, according to the criterio  $xw = \max f(x) + \text{rnd} * T$ 
gsfunction <- fns[-s1position]+runif(n,min=0,max=1)*temperature
wposition <- which.max(gsfunction)
wpoposition <- sn[-s1position][wposition]
w <- s[-s1position,][wposition,] # randomized worst point
fnw <- fns[-s1position][wposition] # function value of randomized worst point

# Compute the centroid of the simplex
g <- (apply(s,2,sum)-w)/n

# make a reflection step
r0 <- g+(0.5 + runif(1))*(g-w)
r0 <- ifelse(r0<xup,ifelse(xlow<r0,r0,xlow),xup)
fnr0 <- fn(r0)
neval <- neval+1

# check if the number of function evaluations exceeded the maximum value
if( neval >= maxeval ) {
  if(fnr0<fnw) { w<-r0;pop[wpoposition,]<-w;fpop[wpoposition]<-fnw;reflections<-reflections+1 }
}

```

```

gpop <- apply(pop,2,sum)/m # centroid of the population
# compute the mean euclidean distance between the centroid and the points of the population
eucldist <- t(apply(pop,1,function(x) (x-gpop)^2))
eucldist <- apply(eucldist,1,sum)
eucldistpop <- sqrt(eucldist)
ftolpop <- mean(eucldistpop)
break
}

```

check if the reflection point is either not accepted (no move) or $fr < fw$ (downhill move) the method follows the modified (quasi-stochastic) Nelder-Mead procedure, making contraction and expansion moves respectively

```

if ( fnr0 < fnw ) { # check if the reflected point is better than the randomized worst point of simplex (w)

```

```

if ( fnr0 < fns[s1position] ) { # the reflected point is better than the lowest (best) point of simplex (s1)

```

```

# line minimization employing subsequent random expansion steps

```

```

ns <- 1

```

```

r01 <- r0

```

```

fnr01 <- fnr0

```

```

repeat { # multiple expansion

```

```

ns <- ns+runif(1,min=0,max=1)

```

```

rs <- g+ns*(r0-g)

```

```

neval <- neval+1

```

```

if( any(rs>xup) || any(rs<xlow) ) {
  rs <- ifelse( rs < xup,ifelse(xlow < rs,rs,xlow),xup )
  fnrs <- fn(rs)
  if( fnrs<fnr01 ) { w <- rs; fnw <- fnrs } else { w <- r01; fnw <- fnr01 }
  break
}

```

```

fnrs <- fn(rs)

```

```

if( fnrs < fnr01 ) {
  if( neval >= maxeval ) {
    w <- rs
    fnw <- fnrs
    break
  } else {
    expans <- expans+1
    r01 <- rs
    fnr01 <- fnrs
  }
} else {
  w <- r01
  fnw <- fnr01
  break
}
}

```

```

pop[wpopposition,] <- w
fpop[wpopposition] <- fnw

} else { # the reflected point is not better than the lowest (best) point of simplex (s1)

# outside contraction step between xc and xr
r1 <- g+(0.25+0.5*runif(1))*(r0-g)
r1 <- ifelse(r1<xup,ifelse(xlow<r1,r1,xlow),xup)
fnr1 <- fn(r1)
neval <- neval+1

if ( fnr1<fnr0 ) {w <- r1; fnw <- fnr1; outcontract <- outcontract+1 } else { w <- r0; fnw <- fnr0; reflections
<- reflections+1 }

pop[wpopposition,] <- w
fpop[wpopposition] <- fnw

}

} else { # the reflected point is not better than the randomized worst point of simplex (w)

if( fnr0-runif(1,min=0,max=1)*temperature>fnw+runif(1,min=0,max=1)*temperature ) { # dont't accept
the reflection step and try an inside contraction step

temperature <- ratio*temperature # reduce temperature

r1 <- g-(0.25+0.5*runif(1))*(g-w)
r1 <- ifelse(r1<xup,ifelse(xlow<r1,r1,xlow),xup)
fnr1 <- fn(r1)
neval<-neval+1

if ( fnr1<fnw ) { # succesful inside contraction

```

```

inscontract <- inscontract+1

w <- r1

fnw <- fnr1

pop[wpopposition,] <- w

fpop[wpopposition] <- fnw

} else { # unsuccessful inside contraction-multiple contraction step

shrink <- shrink + 1

mcon <- 0.5*(t(t(s[-s1position,])+s[s1position,]))

fmcon <- apply( mcon,1,fn )

neval <- neval+n

pop[sn[-s1position],] <- mcon

fpop[sn[-s1position]] <- fmcon

}

} else { # accept reflection point and try some random uphill steps along the reflection direction

ns <- 1

r01 <- r0

fnr01 <- fnr0

for( i in 1:maxclimbs ) { # uphill steps

ns <- ns+runif(1)

rs <- g + ns* (r0 - g)

neval <- neval+1

if( any(rs>xup) || any(rs<xlow) ) { rs <- ifelse(rs<xup,ifelse(xlow<rs,rs,xlow),xup); fnrs <- fn(rs); if(
fnrs<fnr01 ) { w <- rs; fnw <- fnrs }; break }

fnrs <- fn(rs)

```

```

    if( fnrs<fnr01 ) { w <- rs; fnw <- fnrs ;break } else { if(neval>=maxeval) { break } else { r01 <- rs; fnr01 <-
fnrs } }
}

if( fnrs < fnr01 ) {
  uphillis <- uphillis+1
  pop[wpopposition,] <- w
  fpop[wpopposition] <- fnw
} else { # try a mutation step by generating a random point out of the range (xmean-xstdev,
xmean+xstdev)
  mutations <- mutations+1
  samplen <- sample(c(-1,1),size=n,replace=TRUE)
  a <- ifelse(xup<meanpop+sdpop,meanpop+sdpop,xup)
  b <- ifelse(meanpop-sdpop<xlow,meanpop-sdpop,xlow)
  newpoint<-ifelse(samplen>0,runif(n,min=meanpop+sdpop,max=a),runif(n,min=b,max=meanpop-
sdpop))
  newpoint <- ifelse(newpoint<xup,ifelse(xlow<newpoint,newpoint,xlow),xup)
  fnnewpoint <- fn(newpoint)
  neval <- neval+1
  if( fnnewpoint<fnr0 ) { w <- newpoint; fnw <- fnnewpoint; acmutations <- acmutations+1 } else { if(
runif(1,min=0,max=1)<pmut ) { w <- newpoint; fnw <- fnnewpoint; acmutations <- acmutations+1 } else { w
<- r0; fnw <- fnr0; reflections <- reflections+1 } }
  pop[wpopposition,] <- w
  fpop[wpopposition] <- fnw
}
}
}

# check termination criteria

```

```

if( neval >= maxeval ) { break }

# check convergence criteria

# compute the centroid of the population
gpop <- apply(pop,2,sum)/m # centroid of the population

# compute the mean euclidean distance between the centroid and the points of the population
eucldist <- t(apply(pop,1,function(x) (x-gpop)^2))

eucldist <- apply(eucldist,1,sum)

eucldistpop <- sqrt(eucldist)

ftolpop <- mean(eucldistpop)

if (ftolpop < ftol) { break }

maxfp <-c(maxfp,max(fpop))

minfp <-c(minfp,fn(pop[which.min(fpop),]))

meanfp <-c(meanfp,mean(fpop))

temp <-c(temp,temperature)

}

#windows()

#plot(temp,type="o")

#windows()

#plot(minfp,type="o")

#lines(maxfp,type="o",col="forestgreen")

#lines(meanfp,type="o",col="red3")

return(list(bestpar=pop[which.min(fpop),],bestval=min(fpop),nfeval=neval,niter=iter,ftolpop=ftolpop,pop=pop,
counters=c(expans,inscontract,outcontract,shrink,uphills,mutations,acmutations,reflections)))

```

```
}
```

```
# Interior and exterior bounds -----
```

```
# Parameters -units of parameters as they derived from theoretical equations
```

```
# x <- c(a,l,v,k,f,mx)
```

```
# a: (-)
```

```
# l: (1/hr) *24
```

```
# v: (hr) /24
```

```
# k: (-)
```

```
# f: (-)
```

```
# mx: (mm/hr) *24
```

```
xmin <- c(1.0001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001)
```

```
xmax <- c(15,0.1,20,20,1,50)
```

```
xlow <- c(1.0001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001)
```

```
xup <- c(15,0.1,20,20,1,50)
```

```
par<-eas2(n=6,m=30,xmin,xmax,xlow,xup,fn=objfuction,maxeval=20000,ftol=1.e-07,ratio=0.99,pmut=0.6,beta=2,maxclimbs=5)
```

```
results <-
```

```
c(par$bestpar[1],par$bestpar[2]*24,par$bestpar[3]/24,par$bestpar[4],par$bestpar[5],par$bestpar[6]*24,par$bestval,par$nfeval,par$ftolpop)
```

```
results
```

```
modmean(l=results[2]/24,f=results[5],k=results[4],a=results[1],v=results[3]*24,mx=results[6]/24,h=1)
```

```
modvar(l=results[2]/24,f=results[5],k=results[4],a=results[1],v=results[3]*24,mx=results[6]/24,h=1)
```



```
modcov(l=results[2]/24,f=results[5],k=results[4],a=results[1],v=results[3]*24,mx=results[6]/24,h=1,lag=1)
```

```
modpdr(l=results[2]/24,f=results[5],k=results[4],a=results[1],v=results[3]*24,h=1)
```

```
# Generate hourly synthetic wind time series -----
```

```
# January
```

```
IkariaJan<-SequentialSimul(Length=1550,BLpar=list(a=7.39183, l=0.82616, v=0.44561, k=7.18670,  
          f=0.14499, mx=17.84053,  
          sx=17.84053),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason  
=31,file="SynthBLRPM_January_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values=  
"NA",FileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=31,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TR  
UE,plot=FALSE))
```

```
# February
```

```
IkariaFeb<-SequentialSimul(Length=1400,BLpar=list(a=9.16778, l=1.52372, v=0.65197, k=6.00453,  
          f=0.22151, mx=19.20068,  
          sx=19.20068),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason  
=28,file="SynthBLRPM_February_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values  
="NA",FileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=28,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TR  
UE,plot=FALSE))
```

```
# Mars
```

```
IkariaMars<-SequentialSimul(Length=1550,BLpar=list(a=6.25279, l=2.36762, v=0.62660, k=3.77759,  
          f=0.64669, mx=31.79728,  
          sx=31.79728),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason  
=31,file="SynthBLRPM_Mars_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values="N  
A",FileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=31,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TRUE,  
plot=FALSE))
```

```
# April
```

```
IkariaApril<-SequentialSimul(Length=1500,BLpar=list(a=7.42791, l=1.85947, v=0.42620, k=5.43725,  
          f=0.27991, mx=20.04280,
```

```
      sx=20.04280),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason
=30,file="SynthBLRPM_April_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values="N
A",FileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=31,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TRUE,
plot=FALSE))
```

May

```
IkariaMay<-SequentialSimul(Length=1550,BLpar=list(a=13.69970, l=2.07823, v=0.65895, k=5.40565,
f=0.22531, mx=17.68656,
sx=17.68656),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason
=31,file="SynthBLRPM_May_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values="N
A",FileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=31,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TRUE,
plot=FALSE))
```

June

```
IkariaJune<-SequentialSimul(Length=1500,BLpar=list(a=7.36356, l=2.06360, v=0.30999, k=5.77864,
f=0.19477, mx=16.97876,
sx=16.97876),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason
=30,file="SynthBLRPM_June_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values="N
A",FileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=31,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TRUE,
plot=FALSE))
```

July

```
IkariaJuly<-SequentialSimul(Length=1550,BLpar=list(a=4.74879 ,l=2.38406, v=0.19999, k=5.93358,
f=0.20925, mx=15.86465,
sx=15.86465),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason
=31,file="SynthBLRPM_July_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values="NA
",FileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=31,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TRUE,pl
ot=FALSE))
```

August

```
IkariaAugust<-
SequentialSimul(Length=1550,BLpar=list(a=10.22153,l=2.39895,v=0.42015,k=5.69234,f=0.19186,mx=15.199
92,sx=15.19992),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason=31,fi
le="SynthBLRPM_August_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values="NA",F
ileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=31,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TRUE,plot
=FALSE))
```

September

IkariaSept<-

```
SequentialSimul(Length=1500,BLpar=list(a=7.63579,l=2.04384,v=0.35593,k=5.72680,f=0.21382,mx=16.94128,sx=16.94128),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason=30,file="SynthBLRPM_September_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values="NA",FileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=31,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TRUE,plot=FALSE))
```

October

```
IkariaOct<-SequentialSimul(Length=1550,BLpar=list(a=7.65230,l=1.40524,v=0.83305,k=4.37588,f=0.62200,mx=28.75277,sx=28.75277),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason=31,file="SynthBLRPM_October_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values="NA",FileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=31,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TRUE,plot=FALSE))
```

November

```
IkariaNov<-SequentialSimul(Length=1500,BLpar=list(a=5.43437,l=1.18887,v=0.54365,k=5.13611,f=0.53116,mx=28.00987,sx=28.00987),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason=30,file="SynthBLRPM_November_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values="NA",FileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=31,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TRUE,plot=FALSE))
```

December

```
IkariaDec<-SequentialSimul(Length=1550,BLpar=list(a=5.62626,l=1.04954,v=0.43385,k=6.10760,f=0.30357,mx=22.91844,sx=22.91844),TimeScale=1,ExportSynthData=list(exp=TRUE,FileContent=c("AllDays"),DaysPerSeason=31,file="SynthBLRPM_December_wind_1.txt"),ImportHistData=list(imp=FALSE,file="histordata.txt",na.values="NA",FileContent=c("WetDays"),DaysPerSeason=31,DailyValues=TRUE),PlotTs=FALSE,Statistics=list(print=TRUE,plot=FALSE))
```

Develop a string (full daily time series) -----

```
January <- read.table(file="SynthBLRPM_January.txt",header=FALSE,sep="")
January <- January[,1:3]
January <- as.matrix(January)
February <- read.table(file="SynthBLRPM_February.txt",header=FALSE,sep="")
February <- February[,1:3]
February <- as.matrix(February)
Mars <- read.table(file="SynthBLRPM_Mars.txt",header=FALSE,sep="")
Mars <- Mars[,1:3]
Mars <- as.matrix(Mars)
April <- read.table(file="SynthBLRPM_April.txt",header=FALSE,sep="")
April <- April[,1:3]
April <- as.matrix(April)
May <- read.table(file="SynthBLRPM_May.txt",header=FALSE,sep="")
May <- May[,1:3]
May <- as.matrix(May)
June <- read.table(file="SynthBLRPM_June.txt",header=FALSE,sep="")
June <- June[,1:3]
June <- as.matrix(June)
July <- read.table(file="SynthBLRPM_July.txt",header=FALSE,sep="")
July <- July[,1:3]
July <- as.matrix(July)
August <- read.table(file="SynthBLRPM_August.txt",header=FALSE,sep="")
August <- August[,1:3]
August <- as.matrix(August)
September <- read.table(file="SynthBLRPM_September.txt",header=FALSE,sep="")
September <- September[,1:3]
```

```

September <- as.matrix(September)

October <- read.table(file="SynthBLRPM_October.txt",header=FALSE,sep="")
October <- October[,1:3]
October <- as.matrix(October)

November <- read.table(file="SynthBLRPM_November.txt",header=FALSE,sep="")
November <- November[,1:3]
November <- as.matrix(November)

December <- read.table(file="SynthBLRPM_December.txt",header=FALSE,sep="")
December <- December[,1:3]
December <- as.matrix(December)

dailyts <- matrix(0,nrow=1,ncol=3)

for (i in 1:50) {

Jan <- January[((i-1)*31+1):(i*31),]
Feb <- February[((i-1)*28+1):(i*28),]
Mar <- Mars[((i-1)*31+1):(i*31),]
Apr <- April[((i-1)*30+1):(i*30),]
Ma <- May[((i-1)*31+1):(i*31),]
Jun <- June[((i-1)*30+1):(i*30),]
Jul <- July[((i-1)*31+1):(i*31),]
Aug <- August[((i-1)*31+1):(i*31),]
Sep <- September[((i-1)*30+1):(i*30),]
Oct <- October[((i-1)*31+1):(i*31),]
Nov <- November[((i-1)*30+1):(i*30),]
Dec <- December[((i-1)*31+1):(i*31),]

```

```

dailyts <-rbind(dailyts,Jan,Feb,Mar,Apr,May,Jun,Jul,Aug,Sep,Oct,Nov,Dec)
}

dailyts <- dailyts[-1,]

write.table(dailyts,file="Ikaria_daily_string_50years.txt",row.names=FALSE,col.names=FALSE,sep=" ")

month<-
c(rep(1,31),rep(2,28),rep(3,31),rep(4,30),rep(5,31),rep(6,30),rep(7,31),rep(8,31),rep(9,30),rep(10,31),rep(11,
30),rep(12,31))

month<-rep(month,50)

write.table(month,file="month.txt",row.names=FALSE,col.names=FALSE,sep=" ")

```

Υπολογιστές που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις και τις αναλύσεις της εργασίας

Υπολογιστής #1	
Processor:	Intel ® Core™ i5-3210M CPU @ 2.50 GHz
Installed memory (RAM):	4,00 GB (3,60 GB usable)
System type:	64-bit Operating System Windows 7 Home Premium
Hydronomeas	v. 4.4.0(.6)
HYETOS-R	v. 0.0-1
Υπολογιστής #2	
Processor:	QEMU Virtual CPU version 1.1.2 2.10 GHz (4 processors)
Installed memory (RAM):	4,00 GB
System type:	64-bit Operating System, x64-based processor
Hydronomeas	v. 4.4.0(.6)
HYETOS-R	v. 0.0-1

Ο υπολογιστής #2 αποτελεί virtual pc της υπηρεσίας Okeanos (<https://okeanos.grnet.gr/home/>).

Το MATLAB™ είναι ιδιοκτησία της Mathworks.