



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Υδρολογικά μοντέλα στείρευσης ροής ως εργαλεία πρόγνωσης
της ενεργειακής παραγωγής σε μικρά υδροηλεκτρικά έργα**

ΒΑΣΙΛΙΚΗ - ΜΑΡΙΑ ΠΑΠΑΛΑΜΠΡΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΔΡΕΑΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΑΔΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2020

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Υδρολογικά μοντέλα στείρευσης ροής ως εργαλεία πρόγνωσης της
ενεργειακής παραγωγής σε μικρά υδροηλεκτρικά έργα**

ΒΑΣΙΛΙΚΗ - ΜΑΡΙΑ ΠΑΠΑΛΑΜΠΡΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΔΡΕΑΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΑΔΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Copyright © Papalamprou Vasiliki - Maria, 2020

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author.

Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.



Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202)

Quidquid latine dictum sit, altum videtur

XX

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, Επικ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την διαρκή υποστήριξη και καθοδήγησή του. Ακόμη, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Το ειλικρινές ενδιαφέρον και ο ενθουσιασμός του με ενέπνευσαν και αποτέλεσαν για εμένα ισχυρό κίνητρο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την φίλη μου και Υποψήφια Διδάκτορα Γεωργία – Κωνσταντίνα Σακκή για την βοήθεια και τις συμβουλές της και να της ευχηθώ καλή σταδιοδρομία στην ακαδημαϊκή της καριέρα.

Ευχαριστίες οφείλω, ακόμη, στην Υποψήφια Διδάκτορα Κωνσταντίνα Ρίσβα για το υλικό που μου προσέφερε, καθώς και τις χρήσιμες υποδείξεις της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα άτομα που στάθηκαν δίπλα μου κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

*Παπαλάμπρου Βίβιαν
Αθήνα, Νοέμβριος 2020*

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες εγείρει το ενδιαφέρον των ειδικών η ενεργειακή πολιτική της Ε.Ε., η οποία αναπτύσσεται με κεντρικό άξονα την στροφή στις καθαρές μορφές ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, έχει οργανωθεί μια ενιαία ευρωπαϊκή αγορά ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την ενίσχυση της θέσης των καταναλωτών και την διευκόλυνση της μετάβασης προς καθαρές μορφές ενέργειας. Το νέο μοντέλο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, γνωστό και ως Target Model, αποτελείται από επιμέρους διακριτές αγορές (επόμενης ημέρας, ενδοημερήσια, εξισορρόπησης, προθεσμιακή) και απαιτεί σωστό προγραμματισμό των μονάδων παραγωγής ενέργειας. Υπό αυτό το καθεστώς, τα εργαλεία πρόγνωσης και προγραμματισμού της παραγόμενης ενέργειας καθίστανται αναγκαία, ώστε οι μονάδες παραγωγής ενέργειας να ανταπεξέλθουν στην νέα ανταγωνιστική αγορά. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατάρτιση ενός μοντέλου πρόγνωσης της ενεργειακής παραγωγής σε μικρά υδροηλεκτρικά έργα, με χρήση των υδρολογικών μοντέλων στείρευσης. Η πρόγνωση διακρίνεται σε μακροπρόθεσμη (σε ορίζοντα 6 μηνών) και σε βραχυπρόθεσμη (στις περιπτώσεις στείρευσης ενός πλημμυρικού επεισοδίου). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η λειτουργία των μικρών υδροηλεκτρικών έργων, καθώς λειτουργούν μεταξύ μιας ανώτατης και μιας κατώτερης παροχής και δεν διαθέτουν την δυνατότητα αποθήκευσης νερού για εκμετάλλευσή του σε επόμενο χρονικό βήμα. Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε στην λεκάνη των Κρεμαστών, για χρονοσειρά ημερήσιων εισροών.

Abstract

In recent decades, the EU energy policy, which focuses on the shift to clean energy, has been of interest to experts. In this context, a single European electricity market has been set up to strengthen the position of consumers and facilitate the transition to clean energy. The new electricity market model, also known as Target Model, consists of individual markets (day-ahead, intraday, balancing, futures) and requires proper planning of power plants. Under this regime, tools for forecasting and planning the energy produced become necessary for the power plants to cope with the new competitive market. The purpose of this thesis is to develop a model for forecasting energy production in small hydroelectric plants using hydrological recession models. The forecasting methodology is divided into long-term (over a period of 6 months) and short-term (in cases of recession of a flood episode). The operation of the small hydroelectric plants is interesting, as they operate between a maximum and a lower discharge and they do not have the possibility of storing water for its exploitation in the next time step. The methodology is applied in the Kremasta basin for a given series of daily flows.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Ερέθισμα εργασίας.....	1
1.2	Ερευνητικοί στόχοι	2
1.3	Διάρθρωση εργασίας.....	3
2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	4
2.1	Εισαγωγή στην Ενέργεια.....	4
2.1.1	Παγκόσμια Εικόνα.....	4
2.1.2	Η Ελληνική Πραγματικότητα	11
2.2	Υδροηλεκτρική Ενέργεια	13
2.2.1	Γενικά στοιχεία	13
2.2.2	Τεχνολογία Υδροηλεκτρικής Ενέργειας.....	16
2.2.3	Κατηγορίες Υδροηλεκτρικών Έργων	18
2.2.4	Υδροστρόβιλοι.....	19
2.2.5	Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα.....	20
2.2.6	Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα στην Ελλάδα.....	21
3	ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΡΟΩΝ	23
3.1	Μέθοδοι Πρόγνωσης Χαμηλών Ροών.....	23
3.1.1	Πρόγνωση χαμηλών ροών σε τοπική κλίμακα	23
3.1.2	Πρόγνωση χαμηλών ροών στην Μεσόγειο.....	24
3.1.3	Καινοτόμες ιδέες στην προσέγγιση της χαμηλής ροής.....	24
4	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	26
4.1	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	26
4.1.1	Καμπύλες στείρευσης	26
4.2	Πρόγνωση ροής ξηρής περιόδου.....	27
4.2.1	Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.....	27
4.2.2	Παραγωγή συντελεστών στείρευσης k με αβεβαιότητα.....	28
4.2.3	Παραγωγή τυχαίων σεναρίων απορροής Q	29
4.2.4	Παραγωγή τυχαίων σεναρίων παραγωγής ενέργειας.....	29
4.3	Πρόγνωση ροής σε πλημμυρικά επεισόδια.....	30
4.3.1	Διαχωρισμός Πλημμυρικών Επεισοδίων	30
4.3.2	Προσδιορισμός παραμέτρου στείρευσης.....	32
4.3.3	Παραγωγή συντελεστών στείρευσης k με αβεβαιότητα.....	33
4.3.4	Παραγωγή τυχαίων σεναρίων απορροής Q και παραγωγής ενέργειας..	34
5	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΈΡΓΟΥ.....	35
5.1	Σκοπός.....	35

5.2	Καθορισμός Περιβαλλοντικής Ροής	35
5.3	Βασικές Παραδοχές.....	36
5.4	Καμπύλη Διάρκειας Παροχής	36
5.5	Βελτιστοποίηση σχεδιασμού ΜΥΗΕ.....	37
5.6	Εκτίμηση συντελεστή απόδοσης.....	38
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ ΣΤΑ ΚΡΕΜΑΣΤΑ.....	40
6.1	Στατιστική ανάλυση παραμέτρων εφαρμογής	40
6.1.1	Στατιστική ανάλυση συντελεστών στέρησης για την ξηρή περίοδο...40	
6.1.2	Συσχέτιση συντελεστή στέρησης και αρχικής απορροής	42
6.1.3	Στατιστική ανάλυση συντελεστών στέρησης για τα πλημμυρικά επεισόδια.....	45
6.1.4	Στατιστική ανάλυση των αρχικών απορροών (βραχυπρόθεσμη πρόγνωση).....	46
6.1.5	Συσχέτιση συντελεστή στέρησης και αρχικής απορροής	48
6.2	Αποτελέσματα Προτύπου ΜΥΗΕ.....	50
6.2.1	Στατιστική ανάλυση δεδομένων	50
6.2.2	Καθορισμός Περιβαλλοντικής Ροής.....	52
6.2.3	Παράμετροι σχεδιασμού Πρότυπου Υδροηλεκτρικού Έργου.....	53
6.3	Διαγράμματα σεναρίων πρόγνωσης.....	54
6.4	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	57
6.4.1	Επίδοση μοντέλου πρόγνωσης.....	57
6.4.2	Σύγκριση κέρδους κάθε σεναρίου	57
6.4.3	Η ιδιαιτερότητα της ξηρής περιόδου	58
6.5	Συγκεντρωτικοί πίνακες αξιολόγησης των σεναρίων πρόγνωσης.....	58
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	61
7.1	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και εμπάθυνση.....	63
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Μακροπρόθεσμη πρόγνωση	68
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση.....	78
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Πλημμυρικά επεισόδια	90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 2.1: Κατά κεφαλήν Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας (kWh) (<i>IEA Statistics, 2014</i>).....	4
Γράφημα 2.2: Παγκόσμια Κατά κεφαλήν Κατανάλωση Ενέργειας ανά περιοχή (1965-2019) (<i>OurWorldInData, 2019</i>).....	5
Γράφημα 2.3: Κατά κεφαλήν Κατανάλωση Ενέργειας στην Κίνα, την Βραζιλία και την Ινδία (1965-2019) (<i>OurWorldInData, 2019</i>)	6
Γράφημα 2.4: Κατά κεφαλήν Κατανάλωση Ενέργειας στις ΗΠΑ και το Ηνωμένο Βασίλειο (1965-2019) (<i>OurWorldInData, 2019</i>)	6
Γράφημα 2.5: Κατά κεφαλήν Κατανάλωση Ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες, την Κίνα, την Βραζιλία και την Ινδία (1965-2019) (<i>OurWorldInData, 2019</i>)	7
Γράφημα 2.6: Η σχέση μεταξύ της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας και του κατά κεφαλήν ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (σε δολάρια ΗΠΑ) σε λογαριθμική κλίμακα, 1980-2003 (<i>Brown et al., 2011</i>)	7
Γράφημα 2.7: Παγκόσμια Κατανάλωση Πρωτογενούς Ενέργειας (<i>OurWorldInData, 2019</i>)	9
Γράφημα 2.8: Κατανομή παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας (2018) (<i>REN21 Secretariat, 2019</i>)	9
Γράφημα 2.9: Κατανομή της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ανά τον κόσμο (2019) (<i>OurWorldInData, 2020</i>)	10
Γράφημα 2.10: Παγκόσμια Παραγωγή Ανανεώσιμης Ενέργειας (<i>OurWorldInData, 2019</i>)	10
Γράφημα 2.11: Συνολική Τελική Κατανάλωση Καυσίμων (TFC) στην Ελλάδα, 1990 (<i>Πηγή: IEA</i>)	11
Γράφημα 2.12: Ετήσια Παραγωγή Υδροηλεκτρικής Ενέργειας, 2019 (<i>OurWorldInData, 2019</i>)	13
Γράφημα 2.13: Ποσοστό Πρωτογενούς Ενέργειας που προέρχεται από τον Υδροηλεκτρισμό, 2019 (<i>OurWorldInData, 2019</i>).....	14
Γράφημα 2.14: Ποσοστό της Παραγωγής Ηλεκτρισμού που προέρχεται από τον Υδροηλεκτρισμό, 2019 (<i>OurWorldInData, 2019</i>).....	14
Γράφημα 2.15: Η Συνολική Εγκατεστημένη Υδροηλεκτρική Ισχύς (<i>IHA, 2018</i>).....	15
Γράφημα 2.16: Εύρος εφαρμογής διάφορων τύπων στροβίλων.....	20
Γράφημα 4.1: Υδρογράφημα (<i>BBC, 2014</i>)	26
Γράφημα 4.2: Q^* και ιστορικές απορροές στην λεκάνη ανάντη του φράγματος των Κρεμαστών.....	31
Γράφημα 5.1: Υδατικό διαθέσιμο δυναμικό στην θέση των Κρεμαστών (Δεδομένα: 1967 – 2008)	36
Γράφημα 5.2: Καμπύλη Διάρκειας Παροχής (FDC)	37
Γράφημα 5.3: Καμπύλες βαθμού απόδοσης στροβίλων.....	39
Γράφημα 6.1: Ιστόγραμμα πυκνότητας του συντελεστή στείρευσης για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση και προσαρμογή της Κανονικής Κατανομής	42
Γράφημα 6.2: Πίνακας συσχέτισης μεταξύ συντελεστή στείρευσης k και αρχικής τιμής του μοντέλου Q_0 για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση.....	43
Γράφημα 6.3: Γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης και συσχέτιση της αρχικής τιμής του μοντέλου Q_0 με τον συντελεστή στείρευσης k για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση ...	43
Γράφημα 6.4: Ιστόγραμμα πυκνότητας του συντελεστή στείρευσης για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση και προσαρμογή διαφόρων γνωστών κατανομών.....	46

Γράφημα 6.5: Ιστόγραμμα πυκνότητας της αρχικής απορροής Q_0 για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση και προσαρμογή διαφόρων γνωστών κατανομών	47
Γράφημα 6.6: Πίνακας συσχέτισης μεταξύ συντελεστή στείρευσης και αρχικής απορροής του μοντέλου για την βραχυπρόθεσμη κλίμακα	48
Γράφημα 6.7: Γράφημα διασποράς συντελεστή στείρευσης και αρχικής απορροής και γραμμική γραμμή τάσης	49
Γράφημα 6.8: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) σε ιστόγραμμα των εισροών (Υδρογνώμων)	51
Γράφημα 6.9: Συχνότητα υπέρβασης (%) – Εμπειρική κατανομή (Weibull), Κανονική Κατανομή, Κατανομή Gamma- (Υδρογνώμων)	51
Γράφημα 6.10: Διάγραμμα τριών σεναρίων μακροπρόθεσμης πρόγνωσης της απορροής και πραγματικών παρατηρήσεων (1)	54
Γράφημα 6.11: Διάγραμμα τριών σεναρίων μακροπρόθεσμης πρόγνωσης της απορροής και πραγματικών παρατηρήσεων (2)	54
Γράφημα 6.12: Διάγραμμα τριών σεναρίων μακροπρόθεσμης πρόγνωσης της ενέργειας και πραγματικής παραγωγής	55
Γράφημα 6.13: Διάγραμμα τριών σεναρίων βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της απορροής και πραγματικών παρατηρήσεων	55
Γράφημα 6.14: Διάγραμμα τριών σεναρίων βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της ενέργειας και πραγματικής παραγωγής	56
Γράφημα Α. 1: Σενάρια απορροής (mm) για χαρακτηριστικά έτη	68
Γράφημα Α. 2: Σενάρια απορροής (mm) με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%,50% και 95% για χαρακτηριστικά έτη	69
Γράφημα Α. 3: Παραγωγή ενέργειας (MWh) από ιστορικές απορροές για χαρακτηριστικά έτη	70
Γράφημα Α. 4: Σενάρια παραγωγής ενέργειας (MWh) με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%,50% και 95% για χαρακτηριστικά έτη	71
Γράφημα Β. 1: Σενάρια απορροής (mm) για χαρακτηριστικά επεισόδια	78
Γράφημα Β. 2: Σενάρια απορροής (mm) με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%,50% και 95% για χαρακτηριστικά επεισόδια	79
Γράφημα Β. 3: Παραγωγή ενέργειας (MWh) από ιστορικές απορροές για χαρακτηριστικά επεισόδια	80
Γράφημα Β. 4: Σενάρια παραγωγής ενέργειας (MWh) με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%,50% και 95% για χαρακτηριστικά επεισόδια	81
Γράφημα Β. 5: Σενάρια απορροής (mm) υπό την διερεύνηση της αβεβαιότητας για την αρχική απορροή του μοντέλου	87
Γράφημα Β. 6: Σενάρια απορροής (mm) με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%,50% και 95% για χαρακτηριστικά επεισόδια υπό την διερεύνηση της αβεβαιότητας για την αρχική απορροή του μοντέλου.....	88
Γράφημα Β. 7: Σενάρια παραγωγής ενέργειας (MWh) με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%,50% και 95% για χαρακτηριστικά επεισόδια υπό την διερεύνηση της αβεβαιότητας για την αρχική απορροή του μοντέλου	89
Γράφημα Γ. 1: Ενδεικτικά πλημμυρικά επεισόδια (Παρουσιάζονται μόνο οι πτωτικοί κλάδοι)	90
Γράφημα Γ. 2: Ενδεικτικά πλημμυρικά επεισόδια	91

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικά δεδομένα για τον συντελεστή στείρευσης και την αρχική τιμή του μοντέλου Q_0 ανά έτος	40
Πίνακας 2: Στατιστικά χαρακτηριστικά του συντελεστή στείρευσης για την ξηρή περίοδο	41
Πίνακας 3: Συγκεντρωτικός πίνακας του μοντέλου του συντελεστή στείρευσης για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση	44
Πίνακας 4: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση του σφάλματος του μοντέλου πρόγνωσης του συντελεστή k για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση	45
Πίνακας 5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις παραμέτρους του μοντέλου πρόγνωσης (Q_0 , k) που προέκυψαν από βελτιστοποίηση για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο	45
Πίνακας 6: Στατιστικά χαρακτηριστικά συντελεστή στείρευσης για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση	46
Πίνακας 7: Στατιστικά χαρακτηριστικά αρχικών απορροών του μοντέλου (Q_0) για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση	47
Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων από την κατάρτιση του μοντέλου του συντελεστή στείρευσης και του σφάλματος για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση	49
Πίνακας 9: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση του σφάλματος του μοντέλου πρόγνωσης του συντελεστή k για τα πλημμυρικά επεισόδια	50
Πίνακας 10: Στατιστική ανάλυση εισροών	50
Πίνακας 11: Στατιστικά χαρακτηριστικά εισροών ανά μήνα	52
Πίνακας 12: Μέση μηνιαία απορροή (mm)	52
Πίνακας 13: Κριτήρια επιλογής περιβαλλοντικής ροής (m^3/s)	53
Πίνακας 14: Παράμετροι σχεδιασμού υδροηλεκτρικού έργου	53
Πίνακας 15: Συγκριτικός πίνακας επίδοσης των τριών σεναρίων πρόγνωσης ενέργειας για την μακροπρόθεσμη κλίμακα	59
Πίνακας 16: Δείκτης απόκλισης δυνητικού κέρδους για κάθε σενάριο πρόγνωσης ενέργειας για την μακροπρόθεσμη κλίμακα	59
Πίνακας 17: Συγκριτικός πίνακας επίδοσης των τριών σεναρίων πρόγνωσης ενέργειας για την βραχυπρόθεσμη κλίμακα	59
Πίνακας 18: Δείκτης απόκλισης δυνητικού κέρδους για κάθε σενάριο πρόγνωσης ενέργειας για την βραχυπρόθεσμη κλίμακα	60
Πίνακας Α. 1: Συγκεντρωτικός πίνακας επίδοσης του «συντηρητικού» σεναρίου πρόγνωσης ανά έτος για την μακροπρόθεσμη κλίμακα	72
Πίνακας Α. 2: Συγκεντρωτικός πίνακας επίδοσης του «μετριοπαθούς» σεναρίου πρόγνωσης ανά έτος για την μακροπρόθεσμη κλίμακα	73
Πίνακας Α. 3: Συγκεντρωτικός πίνακας επίδοσης του «επιθετικού» σεναρίου πρόγνωσης ανά έτος για την μακροπρόθεσμη κλίμακα	74
Πίνακας Α. 4: Συγκεντρωτικά έσοδα (σε μονάδες) ανά έτος	75
Πίνακας Α. 5: Συγκεντρωτική απόκλιση από δυνητικό κέρδος (σε μονάδες) ανά έτος	76
Πίνακας Β. 1: Έλλειμμα ενέργειας σε MWh σε ημερήσιο χρονικό βήμα	82
Πίνακας Β. 2: Συνολικό έλλειμμα ενέργειας σε MWh σε κάθε επεισόδιο	83
Πίνακας Β. 3: Έσοδα (σε μονάδες) σε ημερήσιο χρονικό βήμα	84
Πίνακας Β. 4: Απόκλιση από το δυνητικό κέρδος (σε μονάδες) σε ημερήσιο χρονικό βήμα	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Υδρόμυλος στην περιοχή Hama της Συρίας. (Πηγή: <i>Wikipedia</i>).....	16
Εικόνα 2.2: Τυπική Διάταξη Υδροηλεκτρικού Ταμιευτήρα (Πηγή: <i>Tennessee Valley Authority</i>)	17
Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης υδροστροβίλου – γεννήτριας (Πηγή: <i>U.S. Army Corps of Engineers</i>).....	17
Εικόνα 2.4: Στρόβιλος δράσης.....	19
Εικόνα 2.5: Στρόβιλος αντίδρασης.....	19
Εικόνα 2.6: Τυπική Διάταξη ενός ΜΥΗΕ	21

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ερέθισμα εργασίας

Την τελευταία δεκαετία απασχολεί έντονα την ερευνητική κοινότητα η ενεργειακή πολιτική της Ευρώπης, η οποία αναπτύσσεται με κεντρικούς άξονες την μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ευρωπαϊκό μίγμα. Η δέσμευση της Ελλάδας στην «πράσινη» πολιτική της ΕΕ έχει οδηγήσει στην υποχώρηση του λιγνίτη από το ενεργειακό μίγμα της χώρας και την προώθηση επενδύσεων στον χώρο της ανανεώσιμης ενέργειας. Οι επενδύσεις αυτές υπολογίζονται να φτάσουν γύρω στα 10 δισεκατομμύρια ευρώ μέχρι το 2030. Σύμφωνα με την ανάλυση του Bloomberg NEF (BNEF), το ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα αλλάξει με ταχείς ρυθμούς την τρέχουσα δεκαετία, αυξάνοντας το μέγεθός του κατά 55%, από 20 GW εγκατεστημένη ισχύ, σε 31 GW το 2030. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η Ελλάδα θα αποκτήσει 18 GW νέας παραγωγικής ισχύος, με ποσοστό τουλάχιστον 67% να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.

Παράλληλα, το ξεκίνημα του νέου μοντέλου για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, γνωστό και ως Target Model, έχει ωθήσει τους επαγγελματίες του χώρου προς την έρευνα για βελτιστοποίηση της τεχνογνωσίας και εξειδίκευση του προσωπικού, ώστε να ανταποκριθούν καλύτερα στο νέο ενεργειακό πλαίσιο. Πιο συγκεκριμένα, το νέο μοντέλο της αγοράς ηλεκτρισμού, το οποίο θα αντικαταστήσει τη σημερινή προστατευόμενη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (mandatory pool) θα αποτελείται από τέσσερις νέες διακριτές αγορές:

- Την αγορά της επόμενης ημέρας (day-ahead), που θα είναι η βασική αγορά με όλες τις συναλλαγές που έχουν σχέση με τον ημερήσιο προγραμματισμό
- Την ενδοημερήσια (intraday) αγορά
- Την αγορά της εξισορρόπησης
- Την προθεσμιακή αγορά

Με δεδομένο ότι τα επόμενα χρόνια αναμένεται να υπάρξει μεγάλη αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ, αυτές θα αρχίσουν να έχουν ιδιαίτερο και βαρύνοντα ρόλο στον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό και στην υλοποίηση του Target Model.

Αυτή η νέα ενεργειακή πραγματικότητα, λοιπόν, αποτέλεσε και το έναυσμα για αυτήν την διπλωματική εργασία. Αναπτύσσεται ένα στοχαστικό μοντέλο πρόγνωσης για την παραγωγή ενέργειας σε μικρά υδροηλεκτρικά έργα (ΜΥΗΕ) και διαρθρώνεται σε δύο άξονες: μακροπρόθεσμη και βραχυπρόθεσμη κλίμακα. Το μοντέλο αξιολογείται με υδρολογικούς, ενεργειακούς και οικονομικούς δείκτες απόδοσης.

Η μεθοδολογία αναπτύσσεται για ΜΥΗΕ, καθώς αντιμετωπίζουν μια διπλή πρόκληση. Λόγω της αμελητέας ικανότητας αποθήκευσής τους, οι μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες δεν μπορούν να προσφέρουν ρύθμιση της ροής, καθιστώντας, έτσι, τον προγραμματισμό της παραγωγής ενέργειας ιδιαίτερα δύσκολο έργο, ακόμη και για μικρούς χρονικούς ορίζοντες. Παράλληλα, δεν είναι σπάνιο

φαινόμενο να απουσιάζουν σωστές και ακριβείς μετρήσεις από τους μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Έτσι, η έλλειψη οργάνωσης, καθώς και η αδυναμία ρύθμισης της παραγόμενης ενέργειας θα φέρουν σε μειονεκτική θέση τους χειριστές των ΜΥΗΕ κατά την εισαγωγή τους στο Χρηματιστήριο Ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητη η έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

1.2 Ερευνητικοί στόχοι

Οι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

- Κατάρτιση μοντέλου πρόγνωσης των παροχών για δύο μηχανισμούς στείρευσης (ξηρή περίοδος και ύφεση πλημμυρικού επεισοδίου)
- Εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων και της αβεβαιότητας τους
- Παραγωγή «σεναρίων» παροχής με χρήση συνθετικών συντελεστών στείρευσης
- Μετατροπή των «σεναρίων» παροχής σε «σενάρια» παραγωγής ενέργειας
- Αξιολόγηση της μεθοδολογίας με υδρολογικούς, ενεργειακούς και οικονομικούς δείκτες

Δύο κρίσιμα σημεία για την επίτευξη των παραπάνω στόχων κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας υπήρξαν τα εξής:

- Ο σχεδιασμός ενός Πρότυπου Υδροηλεκτρικού Έργου με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού στην θέση σχεδιασμού
- Η αυτοματοποίηση του διαχωρισμού των πλημμυρικών επεισοδίων από ένα πλημμυρογράφημα, ώστε να καταστεί δυνατή η εφαρμογή της μεθοδολογίας για την βραχυπρόθεσμη κλίμακα

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει επτά κεφάλαια, στα οποία περιγράφεται η βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε, το θεωρητικό υπόβαθρο και η μεθοδολογική προσέγγιση του μοντέλου πρόγνωσης και των δεικτών επίδοσης. Επίσης, παρουσιάζεται η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε ιστορικά δεδομένα και σχολιάζονται εκτενώς τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 1^ο

Αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας και περιλαμβάνει το ερέθισμα και τους ερευνητικούς στόχους της εργασίας, όπως και την διάρθρωση του κειμένου.

Κεφάλαιο 2^ο

Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου, παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία για την ενεργειακή πραγματικότητα και πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται το ελληνικό ενεργειακό μίγμα. Στο δεύτερο μέρος, περιγράφεται συνοπτικά η λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων, με έμφαση στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα.

Κεφάλαιο 3^ο

Παρουσιάζεται μια σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση που περιλαμβάνει διάφορες μεθοδολογίες εκτίμησης της χαμηλής ροής.

Κεφάλαιο 4^ο

Παρουσιάζονται ορισμένες θεμελιώδεις έννοιες και στην συνέχεια διαρθρώνεται η προτεινόμενη μεθοδολογία σε δύο μέρη: μακροπρόθεσμη και βραχυπρόθεσμη κλίμακα. Ακολουθεί διερεύνηση σχετικά με την επιλογή των παραμέτρων του μοντέλου.

Κεφάλαιο 5^ο

Εξετάζεται εκτενώς ο σχεδιασμός του Πρότυπου Υδροηλεκτρικού Έργου και παρέχονται ορισμένες θεμελιώδεις έννοιες για την διαδικασία του σχεδιασμού.

Κεφάλαιο 6^ο

Παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία σε κάθε στάδιο.

Κεφάλαιο 7^ο

Παρουσιάζεται μια σύνοψη της παρούσας εργασίας και στην συνέχεια, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και ιδέες για περαιτέρω έρευνα.

Στο τέλος της παρούσας εργασίας, βρίσκεται παράρτημα με διάφορα γραφήματα και εκτενείς πίνακες αποτελεσμάτων.

2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

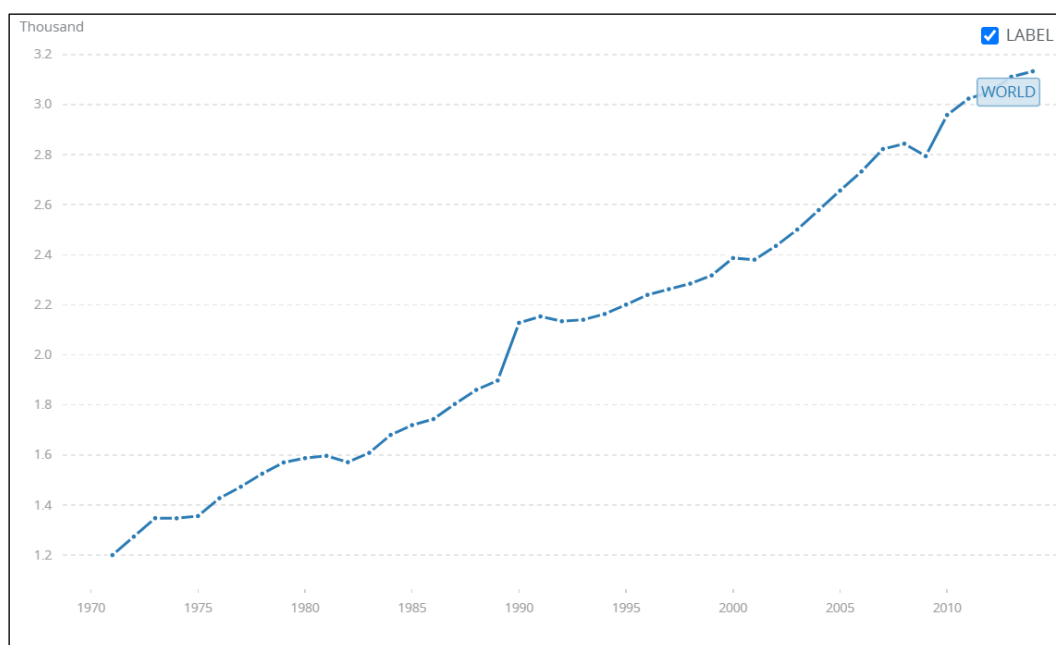
2.1 Εισαγωγή στην Ενέργεια

2.1.1 Παγκόσμια Εικόνα

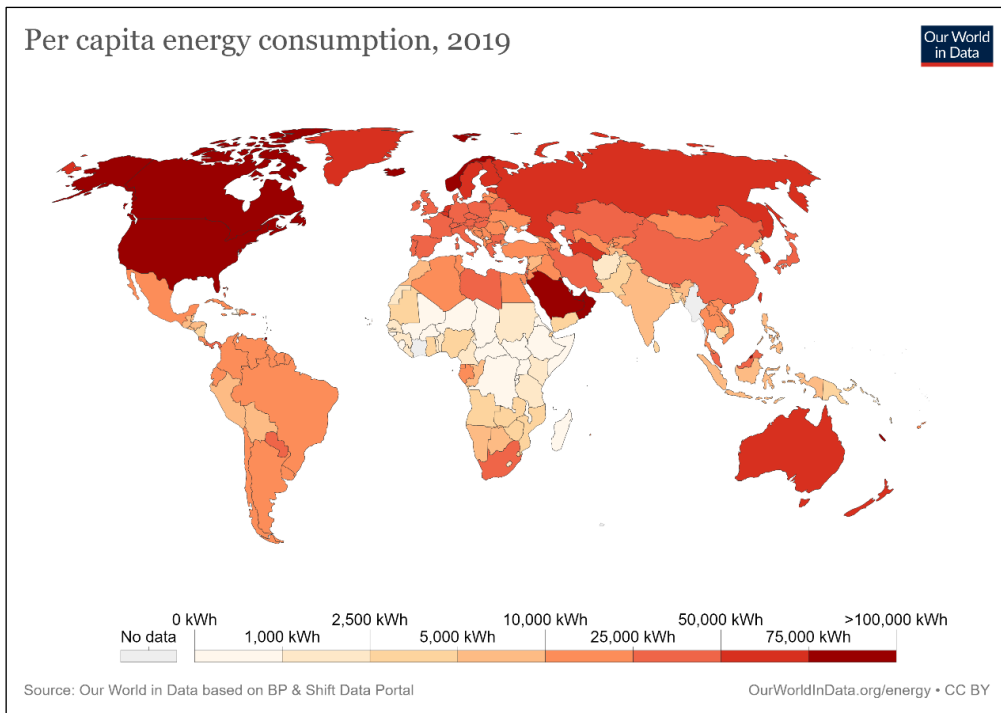
Ως Ενέργεια ορίζεται η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παράγει έργο. Η λέξη χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον Αριστοτέλη (Ηθικά Νικομάχεια) με την έννοια της «δραστηριότητας που απαιτείται για να γίνει πράξη η δυνατότητα (δύναμις)».

Η προσβασιμότητα στην ενέργεια αποτελεί βασικό πυλώνα για την ανθρώπινη ευημερία, την οικονομική ανάπτυξη και την εξάλειψη της φτώχειας και κατ'επέκτασιν την παγκόσμια ανάπτυξη. Παράλληλα, όμως, εγείρονται αυξανόμενες ανησυχίες γύρω από τα ενεργειακά συστήματα, καθώς προκαλούν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Καθώς κινούμαστε στον 21^ο αιώνα, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς. Πιο συγκεκριμένα, εκτιμάται πως η παγκόσμια μέση κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας, μεταξύ 1970-2014, αυξήθηκε κατά περίπου 45% (Γράφημα 2.1).



Γράφημα 2.1: Κατά κεφαλήν Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας (kWh) (IEA Statistics, 2014)



Γράφημα 2.2: Παγκόσμια Κατά κεφαλήν Κατανάλωση Ενέργειας ανά περιοχή (1965-2019)
(OurWorldInData, 2019)

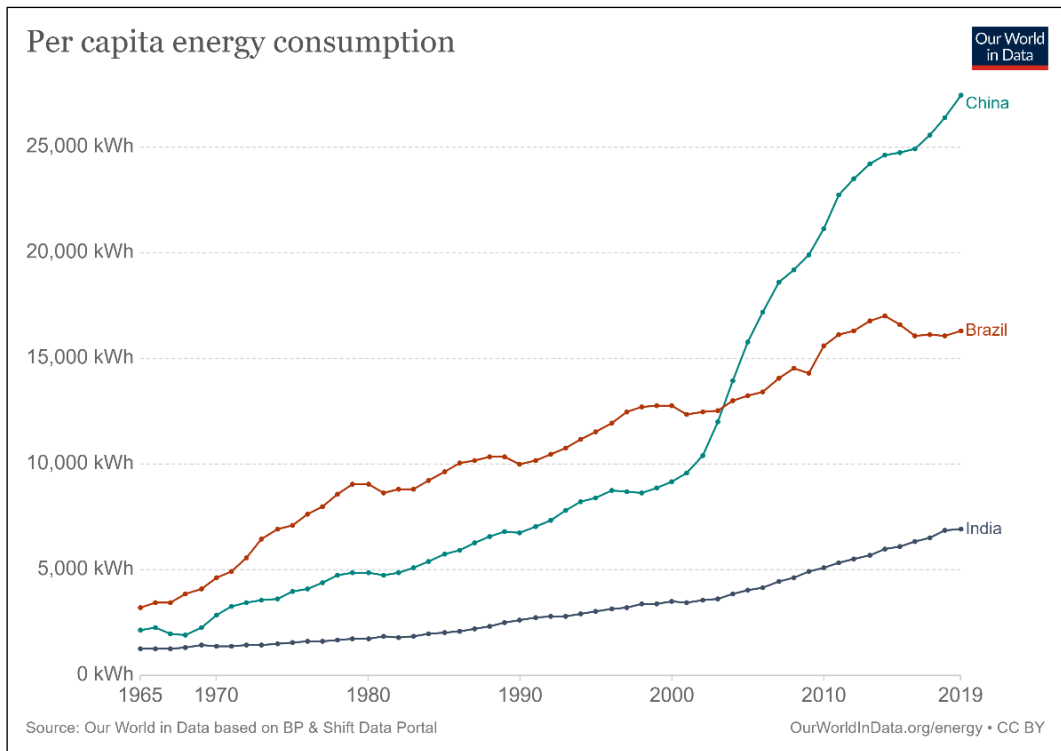
Ωστόσο, η αύξηση αυτή της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας ποικίλλει σημαντικά μεταξύ χωρών και περιοχών (Γράφημα 2.2).

Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας τις τελευταίες δεκαετίες προέρχεται από την αυξημένη κατανάλωση στις αναπτυσσόμενες χώρες μεσαίου εισοδήματος (και σε μικρότερο βαθμό, χαμηλού εισοδήματος). Σημαντική είναι η αύξηση της κατανάλωσης στις αναπτυσσόμενες χώρες BRICS¹ (ιδίως στην Βραζιλία, την Κίνα και την Ινδία). Η κατά κεφαλήν κατανάλωση στην Κίνα έχει αυξηθεί κατά σχεδόν 250% από το 2000, στην Ινδία κατά -περισσότερο από- 50% και στη Βραζιλία κατά 38% (Γράφημα 2.3).

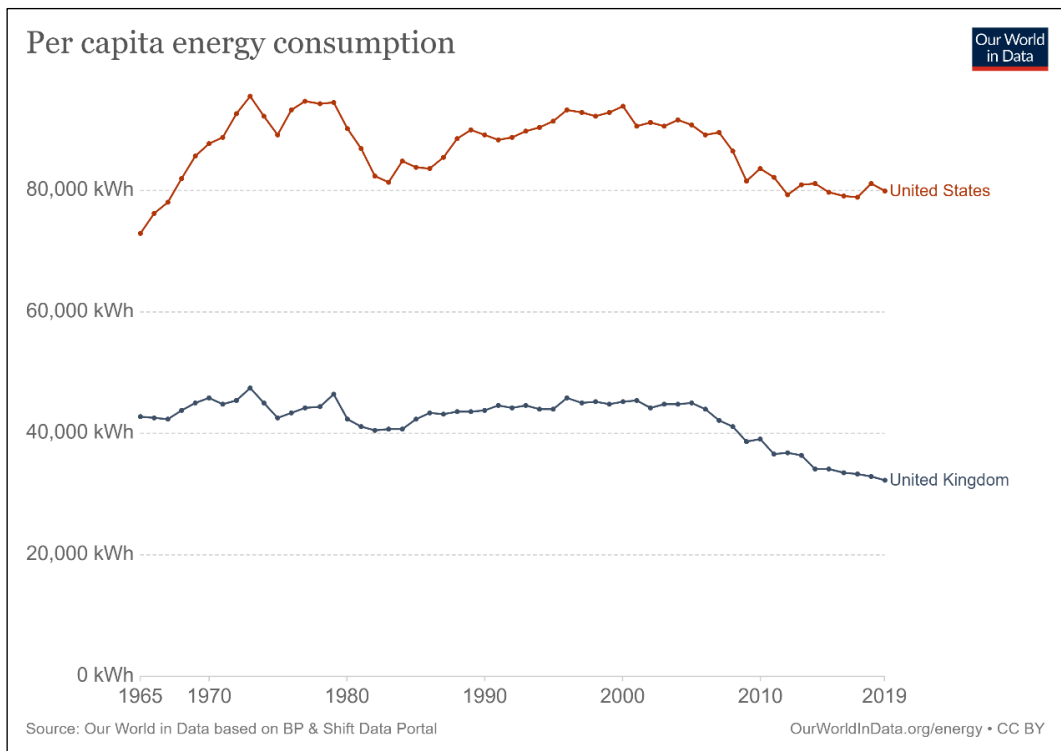
Ταυτόχρονα, στις αναπτυγμένες χώρες υψηλού κατά κεφαλήν εισοδήματος παρατηρείται αξιοσημείωτη πτώση. Όπως παρατηρούμε στο Γράφημα 2.4, στην περίπτωση των ΗΠΑ και του Ηνωμένου Βασιλείου, η κατανάλωση ενέργειας κορυφώθηκε στη δεκαετία του '70, σταθεροποιήθηκε έως τις αρχές της δεκαετίας του 2000 και από τότε, παρατηρείται πτώση. Υπολογίζεται ότι η κατανάλωση ενέργειας από το Ηνωμένο Βασίλειο έχει μειωθεί κατά 20-25%.

Παρ' όλα αυτά, η ανισότητα στην καταμερισμό της παγκόσμιας καταναλισκόμενης ενέργειας παραμένει εμφανής. Πιο συγκεκριμένα, ο μέσος πολίτης των ΗΠΑ εξακολουθεί να καταναλώνει περισσότερο από 10 φορές την ενέργεια του μέσου Ινδού, 4-5 φορές την ενέργεια του μέσου πολίτη της Βραζιλίας και 3 φορές περισσότερο από της Κίνας (Γράφημα 2.5). Ισχυρή είναι η εξάρτηση της κατανάλωσης ενέργειας από το κατά κεφαλήν εισόδημα (Γράφημα 2.6).

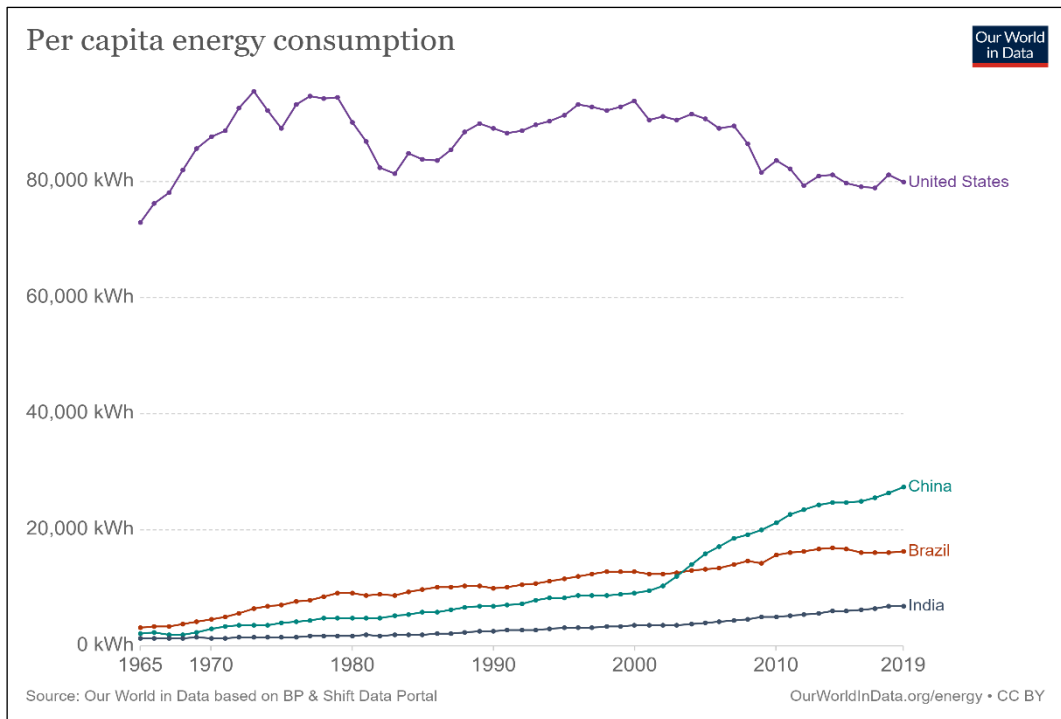
¹ Ακρόνυμο που υιοθετήθηκε για τον σύνδεσμο πέντε αναδυόμενων οικονομιών (Βραζιλία, Ρωσία, Ινδία, Κίνα και Νότια Αφρική)



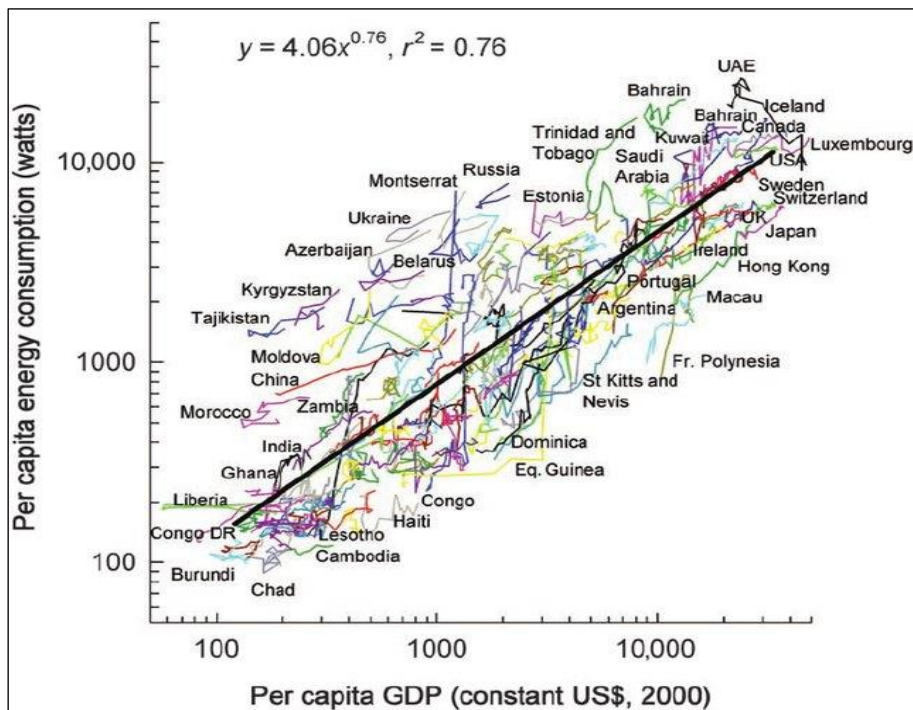
Γράφημα 2.3: Κατά κεφαλήν Κατανάλωση Ενέργειας στην Κίνα, την Βραζιλία και την Ινδία (1965-2019)
(OurWorldInData, 2019)



Γράφημα 2.4: Κατά κεφαλήν Κατανάλωση Ενέργειας στις ΗΠΑ και το Ηνωμένο Βασίλειο (1965-2019)
(OurWorldInData, 2019)



Γράφημα 2.5: Κατά κεφαλήν Κατανάλωση Ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες, την Κίνα, την Βραζιλία και την Ινδία (1965-2019) (OurWorldInData, 2019)



Γράφημα 2.6: Η σχέση μεταξύ της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας και του κατά κεφαλήν ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (σε δολάρια ΗΠΑ) σε λογαριθμική κλίμακα, 1980-2003 (Brown et al., 2011)

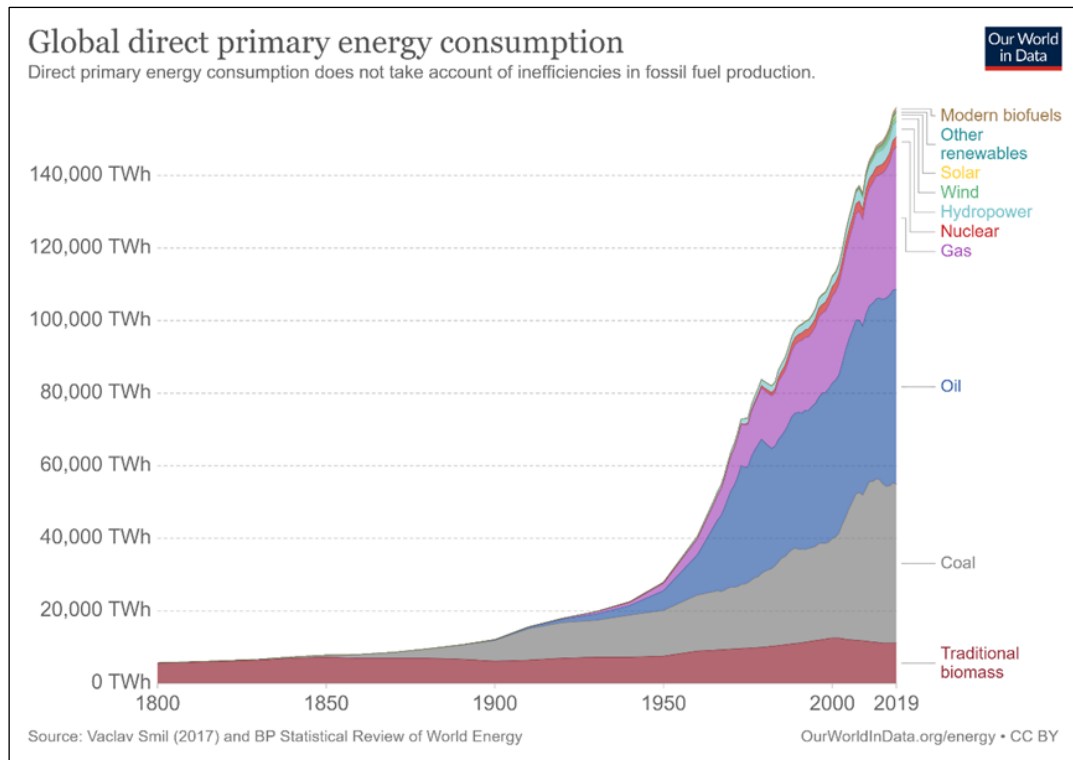
Η πλειονότητα της ενέργειας σήμερα παράγεται από ορυκτά καύσιμα, π.χ. άνθρακα, φυσικό αέριο και πετρέλαιο, αλλά η χρήση τους καθίσταται προβληματική στα πλαίσια μιας μακροχρόνιας ενεργειακής στρατηγικής εναρμονισμένης με τους παγκόσμιους στόχους για αειφόρο ανάπτυξη, καθώς παρουσιάζει δύο κυρίως μειονεκτήματα. Η σημαντικότερη επιβλαβής επίδραση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων στο περιβάλλον είναι η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα, που ευθύνεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Εκτιμάται ότι η καύση των ορυκτών καυσίμων παράγει κάθε χρόνο 21,3 εκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα (Wikipedia, 2020). Παράλληλα, η ποσότητα των ορυκτών καυσίμων είναι περιορισμένη. Υπολογίζεται ότι ο χρόνος εξάντλησης των αποθεμάτων με την πιο αισιόδοξη εκτίμηση για τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων είναι 417 έτη για το κάρβουνο, 43 για το πετρέλαιο και 167 για το φυσικό αέριο (Wikipedia, 2020). Εξαιτίας της αυξανόμενης ζήτησης ενέργειας, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις των συμβατικών μορφών, οι ειδικοί έχουν στρέψει την προσοχή τους στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες εκμεταλλεύονται την ενέργεια που παράγεται από διάφορες φυσικές διεργασίες, όπως ο άνεμος, η ηλιακή ακτινοβολία, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες.

Στο Γράφημα 2.7 απεικονίζεται πως μακροπρόθεσμα η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας έχει αυξηθεί, αλλά και πως σταδιακά έχουν ενταχθεί νέες μορφές ενέργειας.

Η στροφή στις εναλλακτικές μορφές ενέργειας ξεκίνησε περίπου από την δεκαετία του '70 με αφορμή την Πετρελαϊκή κρίση του 1973, όταν τα μέλη του Οργανισμού Αραβικών Πετρελαιοπαραγωγών Χωρών (OPEC²) διακήρυξαν εμπάργκο πετρελαίου. Το εμπάργκο συνέπεσε με την παγκόσμια αύξηση της κατανάλωσης πετρελαίου από τις βιομηχανικές χώρες και ειδικότερα την απότομη αύξηση των εισαγωγών πετρελαίου από τη μεγαλύτερη χώρα κατανάλωσης πετρελαίου στον κόσμο, τις ΗΠΑ. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 ήταν ζήτημα χρόνου να σημειωθεί σημαντική αύξηση στην τιμή του πετρελαίου λόγω της ταχύτερης αύξησης της ζήτησης στον ανεπτυγμένο και στον αναπτυσσόμενο κόσμο, της σταδιακής κάμψης της παραγωγής του αμερικανικού αργού, και της γενικότερης τάσης για αύξηση της τιμής των πρώτων υλών.

Μακροπρόθεσμα, το εμπάργκο πετρελαίου άλλαξε τη φύση της ενεργειακής πολιτικής της Δύσης, προς την κατεύθυνση της αύξησης της εξερεύνησης και της υιοθέτησης συντηρητικής στάσης απέναντι στην κατανάλωση ενέργειας. Η ενεργειακή κρίση οδήγησε σε αυξημένο ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ώθησε την έρευνα στον τομέα της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας. Μάλιστα, ο Harry Zvi Tabor, πατέρας της ηλιακής βιομηχανίας του Ισραήλ, ανέπτυξε το πρωτότυπο ενός ηλιακού θερμοσίφωνα που πλέον χρησιμοποιείται σε πάνω από το 90% των Ισραηλινών κατοικιών (Wikipedia, 2020). Παράλληλα, γεννήθηκαν προβληματισμοί γύρω από τα μέσα μαζικής μεταφοράς και προτάθηκε η αντικατάσταση των καυστήρων πετρελαίου και η επιλογή καυστήρων φυσικού αερίου ή προπάνιου για θέρμανση.

² Αποτελούμενο από τα αραβικά μέλη του OPEC, καθώς και την Αίγυπτο, τη Συρία και την Τунησία.

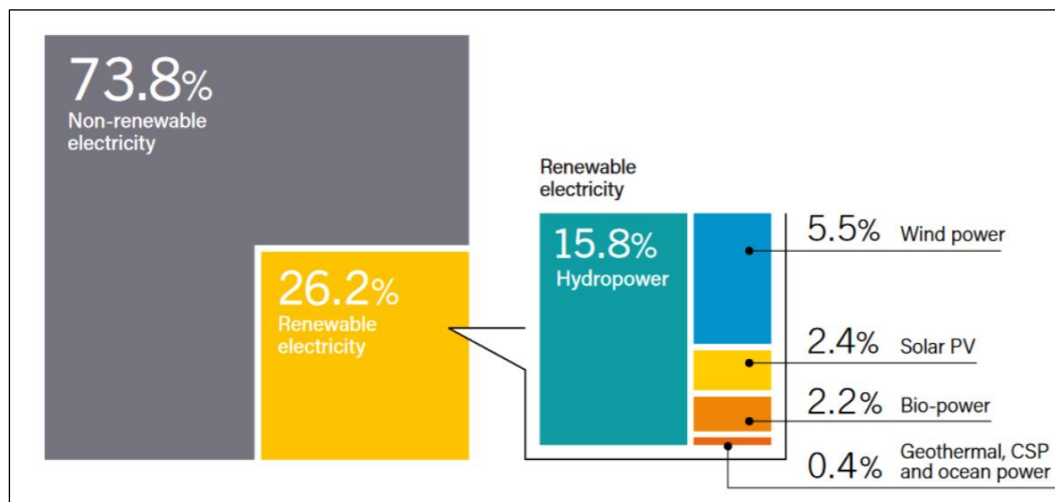


Γράφημα 2.7: Παγκόσμια Κατανάλωση Πρωτογενούς Ενέργειας (OurWorldInData, 2019)

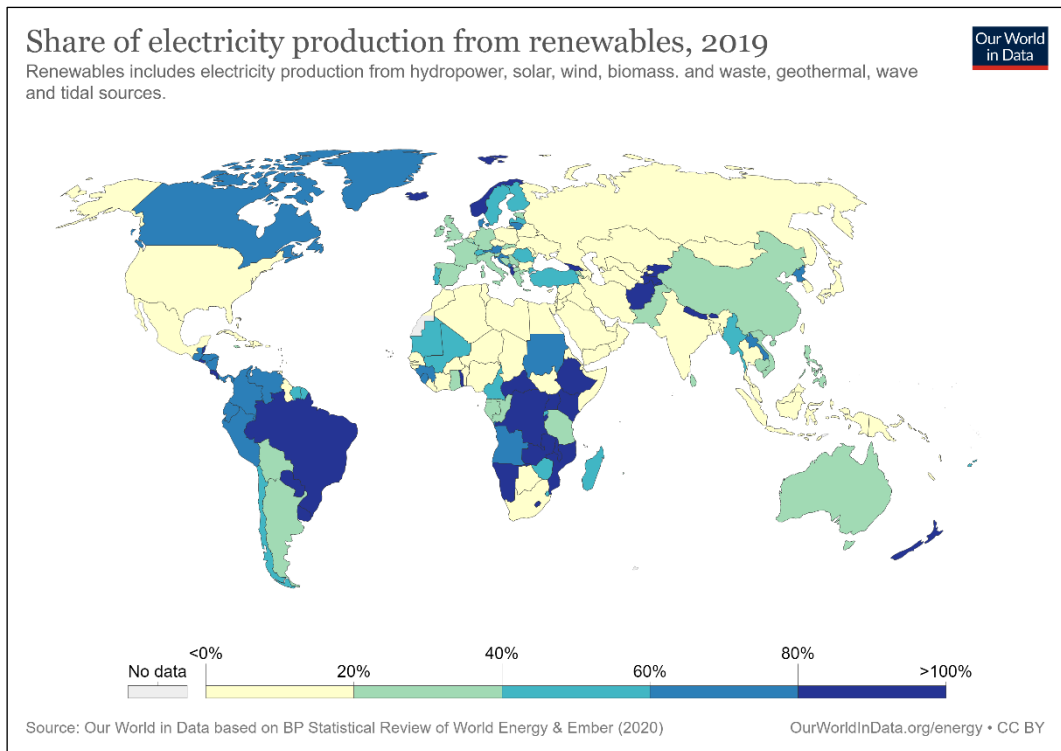
Σύμφωνα με την αναφορά της REN21 Secretariat για το έτος 2018, το ποσοστό της παγκόσμιας ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ανέρχεται σε 26,2% (Γράφημα 2.8).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει πως το ποσοστό της συνολικής παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μεταβάλλεται ανά τον κόσμο (Γράφημα 2.9).

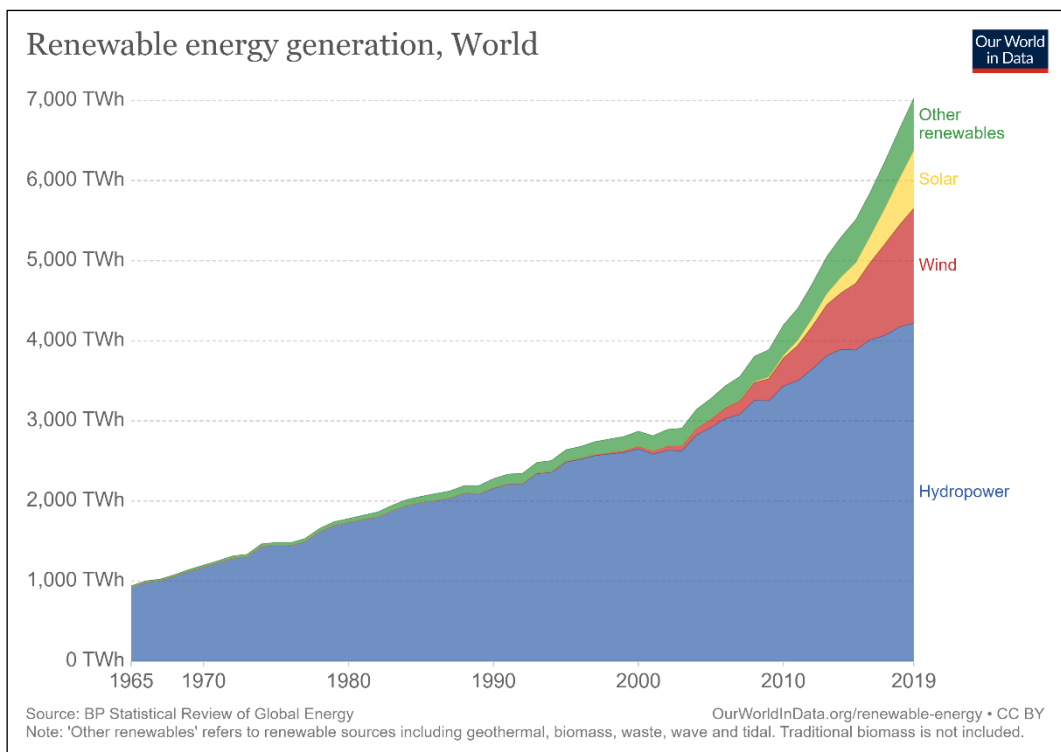
Στο Γράφημα 2.10 απεικονίζεται η παγκόσμια παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας κατά την πάροδο των χρόνων. Από τις διάφορες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, προκύπτει πως επικρατέστερη είναι η υδροηλεκτρική ενέργεια.



Γράφημα 2.8: Κατανομή παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας (2018) (REN21 Secretariat, 2019)



Γράφημα 2.9: Κατανομή της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ανά τον κόσμο (2019)
(OurWorldInData, 2020)



Γράφημα 2.10: Παγκόσμια Παραγωγή Ανανεώσιμης Ενέργειας (OurWorldInData, 2019)

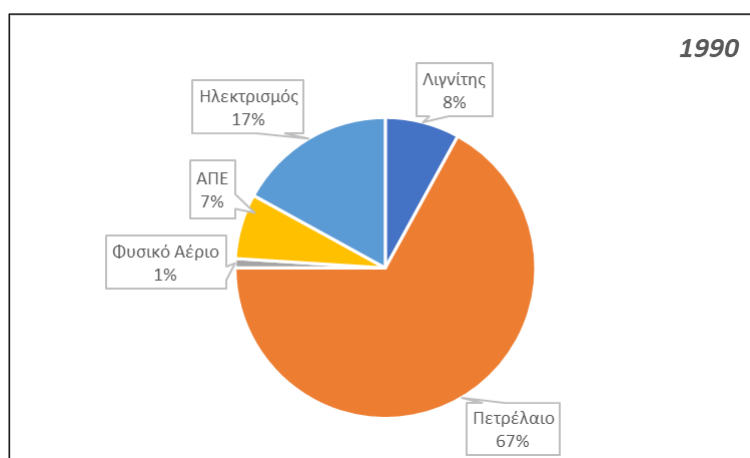
2.1.2 Η Ελληνική Πραγματικότητα

Η ενεργειακή πολιτική της Ελλάδας έχει αλλάξει ριζικά από τις αρχές τις δεκαετίας του '90. Το ελληνικό ενεργειακό σύστημα έχει διαμορφωθεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εθνικής οικονομίας, την ανάπτυξη συγκεκριμένων κλάδων, τις καταναλωτικές συνήθειες, αλλά και τις ευρωπαϊκές πολιτικές για την ενέργεια, το περιβάλλον και την ανάπτυξη. Πυλώνες της ενεργειακής στρατηγικής της Ελλάδας είναι η ευθυγράμμιση με τις ευρωπαϊκές οδηγίες για το κλίμα και την ενέργεια και η ενεργειακή ασφάλεια.

Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής, η Ελλάδα έχει δεσμευτεί να ευθυγραμμιστεί με τους στόχους του ευρωπαϊκού πακέτου «2020», ενός νομοθετικού πλαισίου με σκοπό να διασφαλίσει η Ε.Ε. ότι θα πετύχει τους στόχους της για το κλίμα και την ενέργεια έως το 2020. Ενδεικτικά, οι τρεις κύριοι στόχοι του πακέτου είναι:

- 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου
- 20% της παραγόμενης ενέργειας της Ε.Ε. να προέρχεται από ΑΠΕ
- 20% μείωση στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας

Εξετάζοντας την διαμόρφωση του ενεργειακού ισοζυγίου στην Ελλάδα το 1990 (Γράφημα 2.11), παρατηρούμε πως μεγάλο μέρος του ενεργειακού μίγματος καταλάμβανε η καύση λιγνίτη. Η αξιοποίηση του λιγνίτη αποτέλεσε στρατηγική επιλογή, παρά τις σημαντικές περιβαλλοντικές του επιπτώσεις, καθώς μέχρι και σήμερα αποτελεί το βασικό εγχώριο καύσιμο. Το κόστος μετατροπής της καύσης του λιγνίτη σε ηλεκτρική ενέργεια είναι χαμηλό συγκριτικά με άλλα καύσιμα, καθιστώντας το ανταγωνιστικό στην αγορά, όμως η επιβολή προστίμων από την Ε.Ε. λόγω της εκπομπής ρύπων, αυξάνει το κόστος παραγωγής. Παράλληλα, η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ήταν περιορισμένη, αφού υπήρχαν μόνο ορισμένα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, ενώ η χρήση φυσικού αερίου ήταν εμφανώς περιορισμένη.



Γράφημα 2.11: Συνολική Τελική Κατανάλωση Καυσίμων (TFC) στην Ελλάδα, 1990 (Πηγή: IEA)

Αντίθετα, σύμφωνα με στοιχεία του ΙΕΑ (International Energy Agency), το ενεργειακό μίγμα για τον ελληνικό χώρο το έτος 2018 διαμορφώθηκε ως εξής:

- Πετρέλαιο (46%)
- Φυσικό Αέριο (18%)
- Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (13%)
- Λιγνίτης (20%)
- Άλλα (3%)

Από την κατανομή του ενεργειακού μίγματος, είναι εμφανές ότι η Ελλάδα προσπαθεί να επιτύχει τους ενεργειακούς της στόχους, όπως θεσπίστηκαν από την Ε.Ε. για το 2020. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε σημαντική αύξηση στο μερίδιο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), η οποία προκύπτει κυρίως από την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, αιολικών πάρκων και μικρών υδροηλεκτρικών έργων. Παράλληλα, σημειώνεται μείωση στην καύση λιγνίτη, ενώ το ποσοστό του φυσικού αερίου είναι εμφανώς αυξημένο.

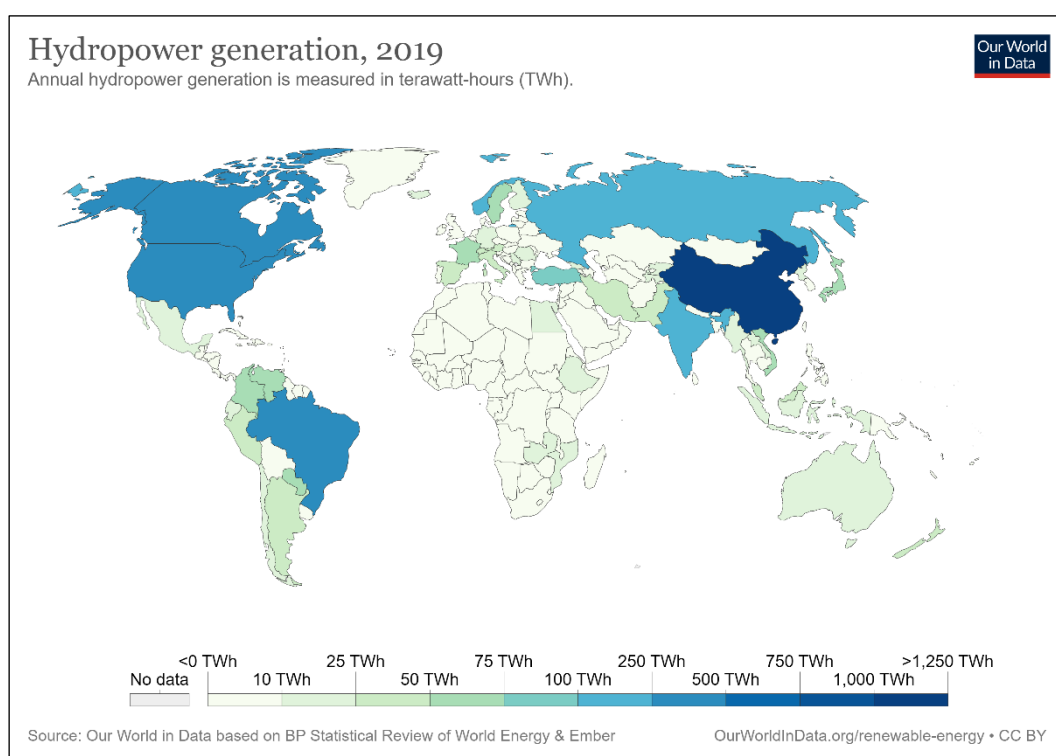
Μελετώντας σε βάθος την σύγχρονη διαμόρφωση του ενεργειακού ισοζυγίου, εύκολα μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι οι ενεργειακοί στόχοι που έχουν τεθεί, επιδρούν, προς το παρόν τουλάχιστον, αρνητικά στην εθνική οικονομία. Με μια πρώτη ματιά, η στροφή προς τις φιλικές, προς το περιβάλλον, πηγές ενέργειας είναι μια ευχάριστη εξέλιξη για τον παγκόσμιο χώρο, όμως όταν συμβαίνει σταδιακά και εναρμονίζεται με τους εγχώριους πόρους κάθε χώρας. Επεξηγηματικά, στον ελλαδικό χώρο υπάρχουν σε αφθονία οι πόροι για την ανάπτυξη των ΑΠΕ (ήλιος, νερό, άνεμος), όμως στην παρούσα φάση, η παραγωγή που προέρχεται από αυτές δεν είναι δυνατόν να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες της χώρας, χωρίς την υποστήριξη από κάποια συμβατική μορφή ενέργειας (πετρέλαιο, λιγνίτης, φυσικό αέριο). Αυτό συμβαίνει, διότι οι ΑΠΕ δεν έχουν την δυνατότητα συνεχούς παραγωγής ενέργειας, καθώς εξαρτώνται από φυσικά φαινόμενα εγγενούς μεταβλητότητας, ούτε την δυνατότητα αποθήκευσης. Παράλληλα, όμως, η ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική υποχρεώνει την Ελλάδα να μειώσει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% και μάλιστα, επιβάλλει χρηματικά πρόστιμα σε περίπτωση παρέκκλισης, καθιστώντας ουσιαστικά απαγορευτική την καύση λιγνίτη, του εγχώριου καυσίμου.

Έτσι, δεδομένου ότι η Ελλάδα δεν έχει άλλες πηγές ενέργειας, φιλικές προς το περιβάλλον, όπως για παράδειγμα η Γαλλία, η οποία έχει αναπτύξει πυρηνικά εργοστάσια, είναι αναγκασμένη να εισάγει τις ποσότητες ενέργειας που χρειάζεται. Έτσι, σήμερα η Ελλάδα εμφανίζεται ως μία από τις πλέον εξαρτώμενες από ενεργειακές εισαγωγές χώρες της ΕΕ, αφού η ενεργειακή της εξάρτηση φθάνει το 73,6% (Eurostat, 2017), τη στιγμή που ο ευρωπαϊκός μέσος όρος, επίσης υψηλός, φθάνει το 54%. Σύμφωνα με πρόσφατη έκθεση της Κομισιόν, η Ελλάδα είχε την έβδομη μεγαλύτερη ενεργειακή εξάρτηση στην ΕΕ των 28 (93,6%) και την τρίτη υψηλότερη στη νοτιοανατολική Ευρώπη μετά την Κύπρο και την Τουρκία. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η χώρα, καθώς θα αναπτύσσεται, θα εξακολουθήσει να εξαρτάται από υψηλές εισαγωγές καυσίμων, κάτι που έχει σοβαρό αρνητικό αντίκτυπο στο ισοζύγιο εξωτερικών συναλλαγών και ως γνωστό έχει επιδράσει και επιδρά ανασχετικά στις όποιες προσπάθειες τόνωσης της επιχειρηματικότητας και της οικονομικής ανάπτυξης γενικότερα.

2.2 Υδροηλεκτρική Ενέργεια

2.2.1 Γενικά στοιχεία

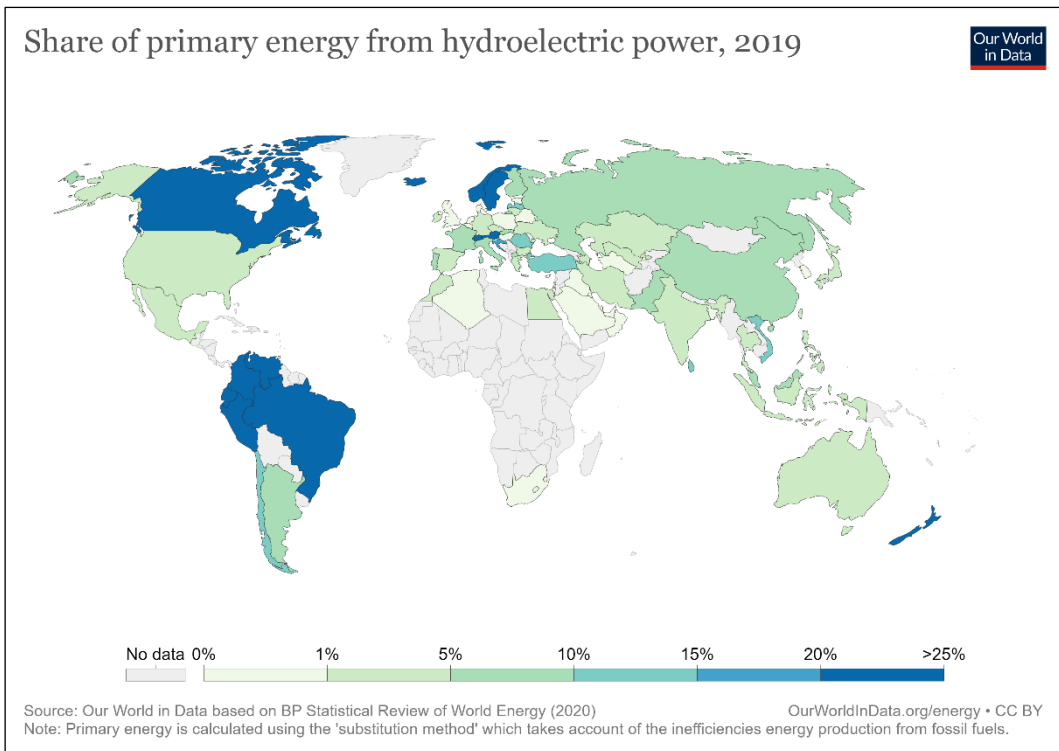
Ο υδροηλεκτρισμός αποτελεί έναν από τους παλαιότερους, και αποδοτικότερους τρόπους παραγωγής ενέργειας με αμελητέο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Η παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα από τον υδροηλεκτρισμό χρονολογείται από τον περασμένο αιώνα και εξακολουθεί να είναι η μεγαλύτερη ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, μετά από την παραδοσιακή βιομάζα. Παγκοσμίως, αντιπροσωπεύει πάνω από το 60% της ανανεώσιμης παραγωγής ενέργειας, όμως το μέγεθος της παραγωγής ποικίλλει σημαντικά ανά τον κόσμο (Γράφημα 2.12).



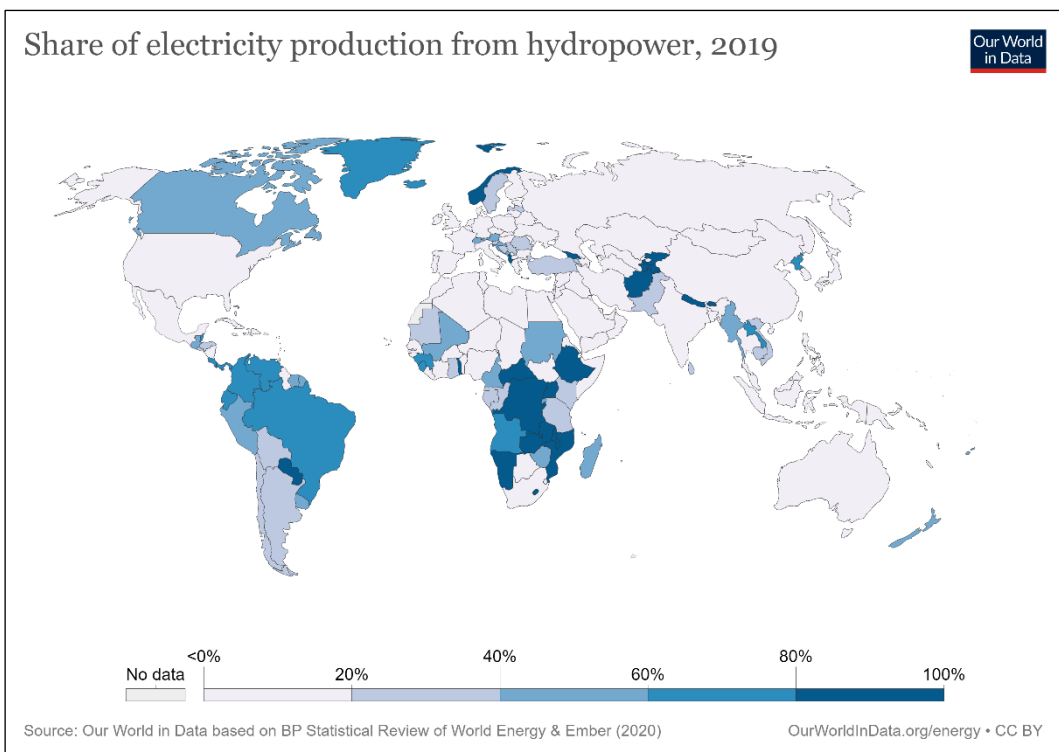
Γράφημα 2.12: Ετήσια Παραγωγή Υδροηλεκτρικής Ενέργειας, 2019 (OurWorldInData, 2019)

Στο Γράφημα 2.13 απεικονίζεται το ποσοστό της παραγόμενης πρωτογενούς ενέργειας που προέρχεται από τον υδροηλεκτρισμό. Το 2019, περίπου 7% της παγκόσμιας ενέργειας αντιστοιχεί σε υδροηλεκτρική.

Να σημειωθεί ότι τα δεδομένα είναι διορθωμένα ως προς τον βαθμό απόδοσης των ορυκτών καυσίμων. Συγκεκριμένα, ως πρωτογενής ενέργεια από μη-ορυκτές πηγές θεωρείται η ποσότητα της πρωτογενούς ενέργειας που θα χρειαζόταν για να παραχθεί η αντίστοιχη ενέργεια από ορυκτά καύσιμα.



Γράφημα 2.13: Ποσοστό Πρωτογενούς Ενέργειας που προέρχεται από τον Υδροηλεκτρισμό, 2019
 (OurWorldInData, 2019)

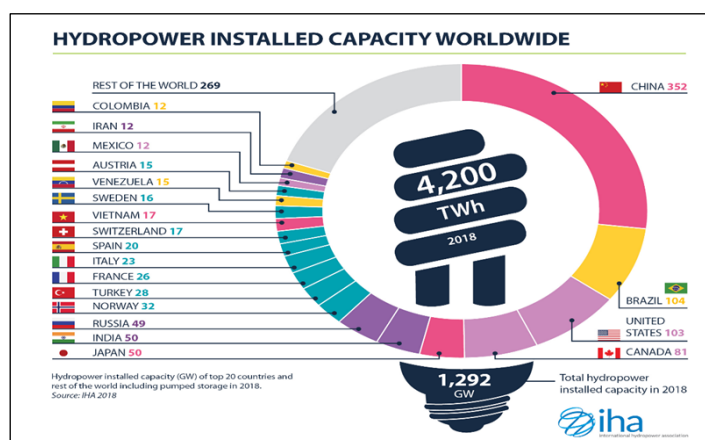


Γράφημα 2.14: Ποσοστό της Παραγωγής Ηλεκτρισμού που προέρχεται από τον Υδροηλεκτρισμό, 2019
 (OurWorldInData, 2019)

Είναι γεγονός ότι η υδροηλεκτρική ενέργεια κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το ποσοστό του ηλεκτρισμού που προέρχεται από την υδροηλεκτρική ενέργεια ανέρχεται σε 16% για το έτος 2019 (Γράφημα 2.14). Ο υδροηλεκτρισμός έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια εξάπλωση της ηλεκτρικής ενέργειας και συνέβαλε ουσιαστικά στην ενίσχυση της βιομηχανικής ανάπτυξης. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας έχει πλέον ξεπεράσει τα 1290 GW, ενώ παραμένει τεράστιο ανεκμετάλλευτο δυναμικό σε όλο τον κόσμο, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες. Το ποσοστό της δυνητικής υδροηλεκτρικής ικανότητας, που δεν έχει αναπτυχθεί, είναι 71% στην Ευρώπη, 75% στη Βόρεια Αμερική, 79% στη Νότια Αμερική, 95% στην Αφρική, 95% στη Μέση Ανατολή και 82% στην περιοχή της Ασίας και του Ειρηνικού (Wikipedia, 2020).

Στον ελλαδικό χώρο, εκτιμάται ότι έχει αξιοποιηθεί περίπου το 1/3 της διαθέσιμης και οικονομικά αξιοποιήσιμης υδραυλικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, η εγκατεστημένη ισχύς είναι λίγο κάτω από 3500 MW, ενώ από τον υδροηλεκτρισμό καλύπτεται σχεδόν το 10% των ενεργειακών αναγκών της χώρας. Οι πλουσιότερες υδρολογικές λεκάνες συγκεντρώνονται κυρίως στις βόρειες και δυτικές περιοχές της ηπειρωτικής χώρας, οι οποίες κυριαρχούνται από την οροσειρά της Πίνδου.

Ο λόγος για τον οποίο είναι τόσο διαδεδομένη είναι ότι έχει σαφώς περισσότερα πλεονεκτήματα από άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Αρχικά, είναι ανταγωνιστική ως προς το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, παρόλο που το αρχικό κόστος κατασκευής μπορεί να είναι υψηλό. Παράλληλα, είναι αρκετά αξιόπιστη και ευέλικτη σε σύγκριση με άλλες ανανεώσιμες πηγές. Μπορεί να παρέχει ενέργεια φορτίου βάσης, ενέργεια αιχμής, στρεφόμενη εφεδρεία και αποθήκευση ενέργειας. Μπορεί να καλύπτει λεπτό προς λεπτό διακυμάνσεις του φορτίου γρηγορότερα και με μεγαλύτερο εύρος και ευελιξία από ότι τα συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Όσον αφορά την αποθήκευση, είναι ένα ιδανικό συμπλήρωμα για τις μεταβλητές και απρόβλεπτες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και έτσι, συνδυάζεται καλά με άλλες πηγές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ταμιευτήρες των φραγμάτων μπορούν επίσης να βοηθήσουν στον έλεγχο των πλημμυρών και να χρησιμοποιηθούν παράλληλα για παροχή νερού στις γύρω κοινότητες.



Γράφημα 2.15: Η Συνολική Εγκατεστημένη Υδροηλεκτρική Ισχύς (IHA, 2018)

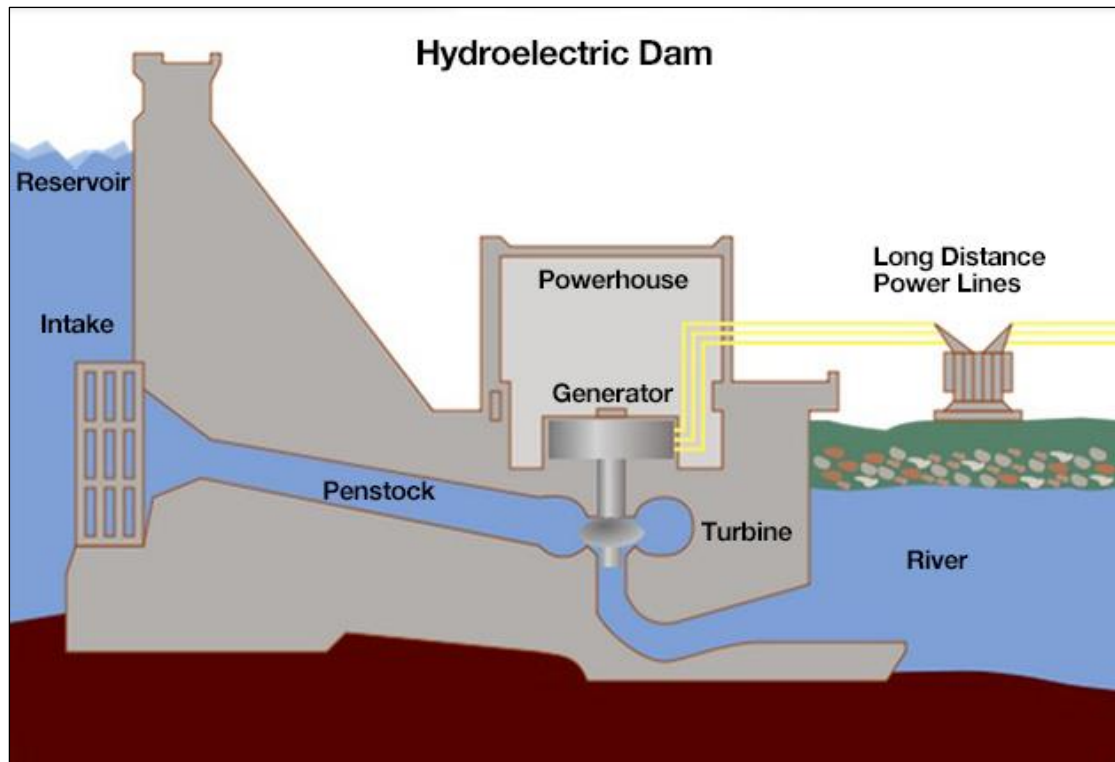
2.2.2 Τεχνολογία Υδροηλεκτρικής Ενέργειας

Ως υδροηλεκτρική ενέργεια αναφέρεται η εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του τρεχούμενου νερού με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρισμού. Από την αρχαιότητα, η υδραυλική ενέργεια, προερχόμενη από πολλά είδη υδρόμυλων ή υδροτροχών, έχει χρησιμοποιηθεί για άρδευση και λειτουργία διάφορων μηχανικών συσκευών, όπως για παράδειγμα στα ελαιοτριβεία, στα πριονιστήρια (υδροπρίονα), στους κλωστοϋφαντουργικούς μύλους και στους γερανούς αποβάθρων.

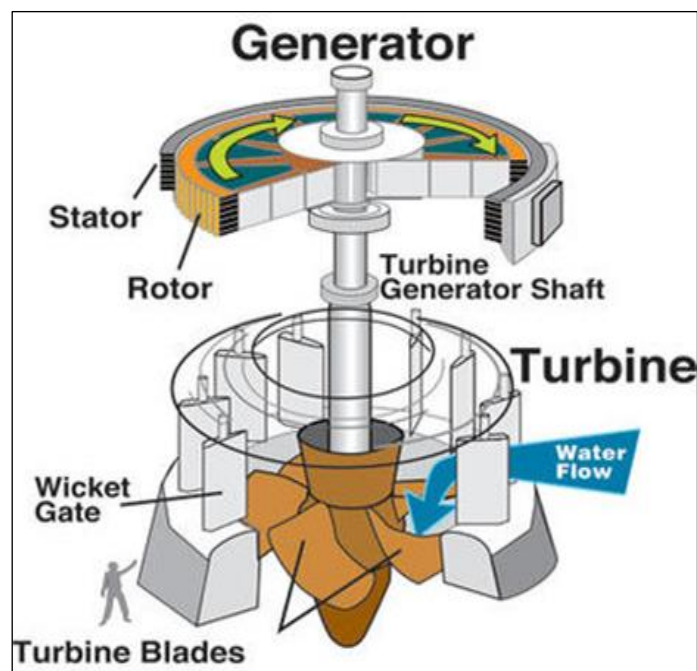


Εικόνα 2.1: Υδρόμυλος στην περιοχή Hama της Συρίας. (Πηγή: Wikipedia)

Η παραγωγή ηλεκτρισμού από την υδραυλική ενέργεια βασίζεται σε ένα σύνολο μετασχηματισμών της υδροδυναμικής ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια (Εικόνα 2.2). Σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό (ΥΗΣ), το νερό αποθηκεύεται, αρχικά, σε υψομετρική διαφορά από ένα επίπεδο αναφοράς και έχει μια δυναμική ενέργεια που μετατρέπεται σε υδραυλική ενέργεια, καθώς το νερό ρέει σε χαμηλότερες περιοχές. Στη συνέχεια, η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική, χρησιμοποιώντας υδροδυναμικές μηχανές (στρόβιλοι). Συγκεκριμένα, ένας υδροστρόβιλος μετατρέπει την ενέργεια του νερού μέσω συνεχούς ροής του νερού και σταθερής περιστροφικής κίνησης. Ο μετασχηματισμός της ενέργειας του διερχόμενου ρευστού υπό συνεχή τροφοδοσία σε μηχανική ενέργεια γίνεται στο περιστρεφόμενο μέρος της μηχανής, που ονομάζεται ρότορας, μέσω ώθησης. Η ροπή κίνησης μεταφέρεται στον άξονα του ρότορα, ο οποίος συνδέεται με τον άξονα της ηλεκτρικής γεννήτριας, ο οποίος μετατρέπει τη μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική ενέργεια χαμηλής τάσης (Εικόνα 2.3). Απαραίτητη είναι τέλος, η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό υψηλής τάσης μέσω ενός μετασχηματιστή, προκειμένου να τροφοδοτηθεί το ηλεκτρικό δίκτυο.



Εικόνα 2.2: Τυπική Διάταξη Υδροηλεκτρικού Ταμιευτήρα (Πηγή: Tennessee Valley Authority)



Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης υδροστροβίλου – γεννήτριας (Πηγή: U.S. Army Corps of Engineers)

2.2.3 Κατηγορίες Υδροηλεκτρικών Έργων

Τα υδροηλεκτρικά έργα, σε αδρές γραμμές, διακρίνονται σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες με φράγμα επί του ποταμού και σε μικρά υδροηλεκτρικά έργα (ΜΥΗΕ), χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης. Η κατασκευή υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα εξυπηρετεί στην αποθήκευση της απορροής της ανάντη λεκάνης, και έτσι, καθίσταται δυνατή η αναρρύθμιση της ροής του ποταμού. Αυτό είναι σημαντικό, καθώς η ροή ενός ποταμού διέπεται από έντονη μεταβλητότητα σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Παράλληλα, η συσσώρευση του συνόλου της απορροής που παράγεται στην ανάντη λεκάνη δημιουργεί υψομετρική διαφορά, λόγω της ανύψωσης της στάθμης του ταμιευτήρα και έτσι, αυξάνεται το ανάντη ενεργειακό υψόμετρο. Αντίθετα, τα ΜΥΗΕ κατασκευάζονται είτε επί του ποταμού, για εκμετάλλευση της τοπικής υψομετρικής διαφοράς και καταστροφή ενέργειας, είτε εκτός του ποταμού (Run-off-River, RoR), με εκτροπή τμήματος της διερχόμενης παροχής σε κατάντη θέση, όπου υπάρχει ικανή υψομετρική διαφορά.

Ακόμη, τα ΥΗΕ μπορούν να χαρακτηριστούν με βάση την εγκατεστημένη ισχύ (P). Ως εγκατεστημένη ισχύς θεωρείται η μέγιστη ωφέλιμη ισχύς που μπορεί να διατεθεί από τον ΥΗΣ. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Μικρά έργα, $P < 15 \text{ MW}$
- Μεγάλα έργα, $P > 15 \text{ MW}$

Πιο σπάνια, κατηγοριοποιούνται με βάση τα όρια των 100 kW και 1 MW, ως mini και micro, αντίστοιχα.

Άλλα κριτήρια τυποποίησης των υδροηλεκτρικών έργων είναι το ύψος πτώσης, η χρονική κατανομή της παραγόμενης ενέργειας και οι χρήσεις του ταμιευτήρα.

Ενδεικτικά, με βάση το ύψος πτώσης (H) διακρίνονται σε:

- Έργα μικρού ύψους, $H < 30 \text{ m}$
- Έργα μεσαίου ύψους, $30 < H < 200-300 \text{ m}$
- Έργα μεγάλου ύψους, $H > 200-300 \text{ m}$

Με βάση την χρονική κατανομή της παραγόμενης ενέργειας σε:

- Έργα βάσης (συνεχής λειτουργία στροβίλων)
- Έργα αιχμής (λειτουργία στροβίλων τις ώρες αιχμής της ζήτησης)
- Έργα αντιστρεπτής λειτουργίας (παραγωγή ενέργειας τις ώρες αιχμής της ζήτησης, άντληση τις ώρες περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας)

Τέλος, τα υδροηλεκτρικά έργα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την σκοπιμότητα εκμετάλλευσης. Ενδεικτικά, με βάση τις χρήσεις νερού που εξυπηρετεί το ΥΗΕ διακρίνεται σε:

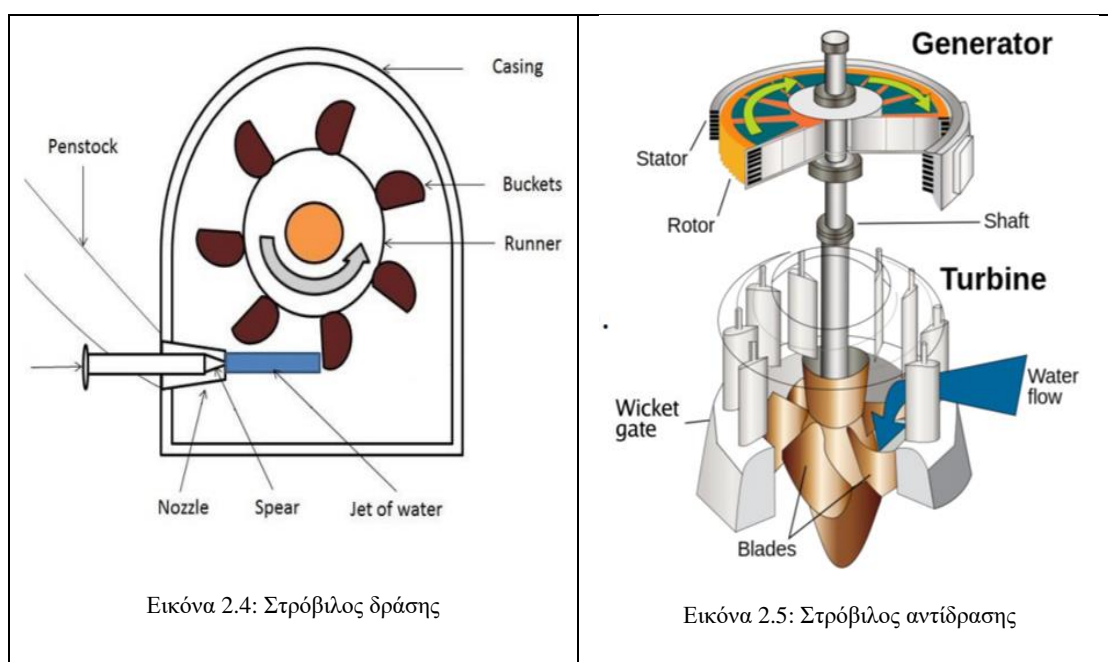
- Έργα απλού σκοπού (αποκλειστική λειτουργία για παραγωγή Υ/Η ενέργειας)
- Έργα πολλαπλού σκοπού (αξιοποίηση του νερού για άρδευση, ύδρευση)

2.2.4 Υδροστρόβιλοι

Οι υδροστρόβιλοι αποτελούν συσκευές μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας σε περιστροφική κινητική ενέργεια ενός άξονα, οριζόντιου ή κατακόρυφου. Η επιλογή των στρόβιλων που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του έργου, όπως το διαθέσιμο ύψος πτώσης, και το μέγεθος της απορροής στην θέση του έργου.

Οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

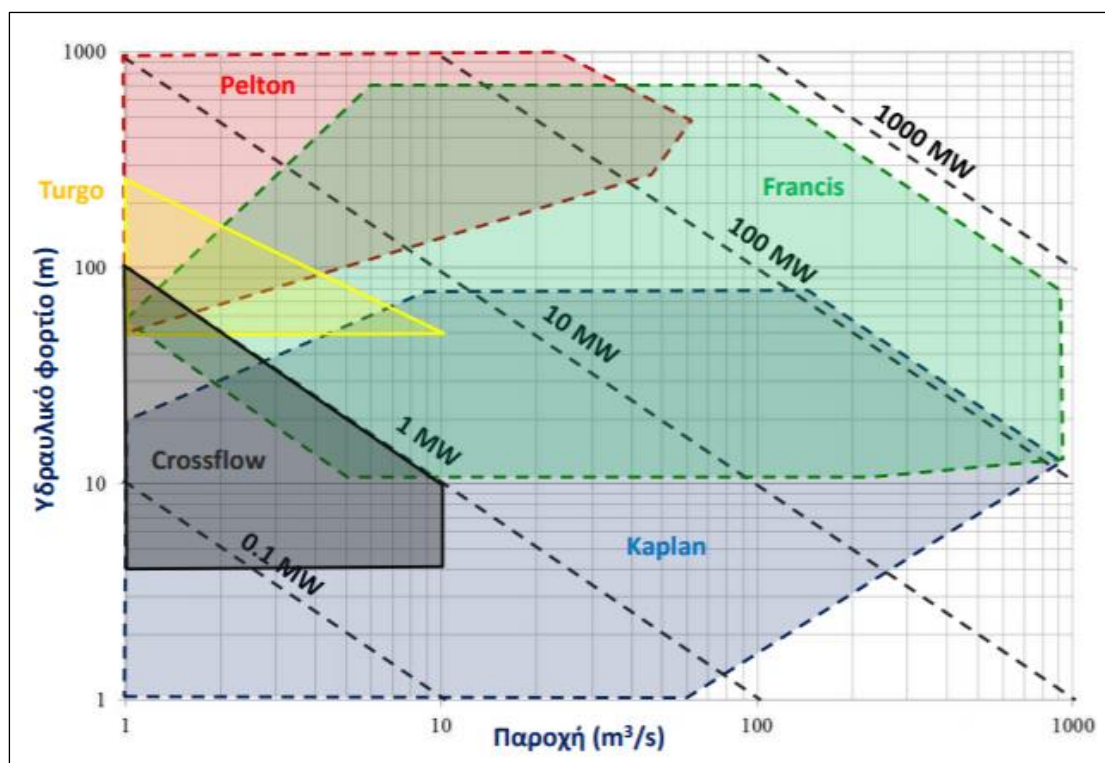
- Στρόβιλοι δράσης, οι οποίοι εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του νερού και λειτουργούν με πίεση ίση με την ατμοσφαιρική (Εικόνα 2.4)
- Στρόβιλοι αντίδρασης, οι οποίοι λειτουργούν υπό πίεση (Εικόνα 2.5)



Κάθε στρόβιλος λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος ροών. Η μέγιστη ροή, που αναφέρεται επίσης ως ονομαστική, καθορίζεται από την ισχύ ισχύος του στρόβιλου, ενώ η ελάχιστη κυμαίνεται από 10-30% της μέγιστης. Κάτω από αυτήν την τιμή, η ικανότητα του στρόβιλου να παράγει ηλεκτρική ενέργεια είναι αμελητέα. Το εύρος εφαρμογής των διαφόρων τύπων στρόβιλων φαίνεται στο Γράφημα 2.16.

Οι συνηθέστεροι τύποι στρόβιλων για υδροηλεκτρικές εφαρμογές είναι οι Pelton, Francis και Kaplan. Οι υδροστρόβιλοι Pelton ανήκουν στην κατηγορία των στρόβιλων δράσης και αποτελούν από τους αποδοτικότερους στρόβιλους. Ενδείκνυνται για ΥΗΕ με μεγάλο ύψος πτώσης και σχετικά μικρές παροχές. Οι στρόβιλοι Francis και Kaplan είναι και οι δύο στρόβιλοι αντίδρασης. Οι πρώτοι αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο για μεγάλα ΥΗΕ και είναι κατάλληλοι για σχετικά μέτρια ύψη πτώσης και αρκετά μεγάλο εύρος παροχών.

Αντίθετα, οι στρόβιλοι Kaplan ενδείκνυνται για μικρά ύψη πτώσης και μεγάλες παροχές. Είναι κατάλληλοι για χαμηλά φράγματα σε μεγάλα ποτάμια και για ΜΥΗΕ σε υδραγωγεία.



Γράφημα 2.16: Εύρος εφαρμογής διάφορων τύπων στρόβιλων

2.2.5 Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα

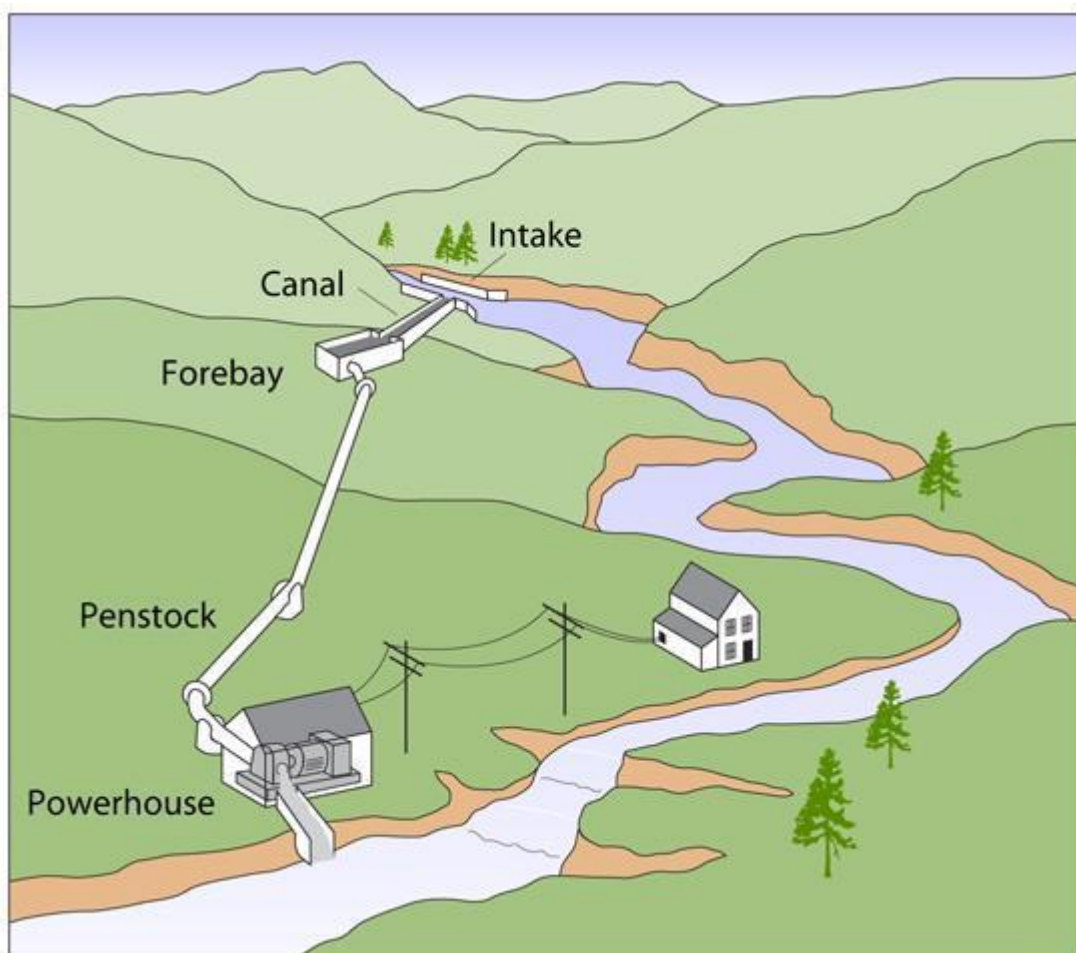
Για να χαρακτηριστεί ένα υδροηλεκτρικό έργο ως «μικρό» (ΜΥΗΕ), σύμφωνα με την Ελληνική Νομοθεσία, δεν θα πρέπει η εγκατεστημένη ισχύς του να ξεπερνά τα 15 MW. Το όριο αυτό μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με την χώρα, όμως τυπικά κυμαίνεται από 10-30 MW. Ενδεικτικά, στον Καναδά, την Κίνα και την Νέα Ζηλανδία το όριο έχει τεθεί στα 50 MW, στην Αμερική στα 30 MW, ενώ στην Ταϊλάνδη, ομοίως με την Ελλάδα, στα 15 MW.

Τα ΜΥΗΕ μπορούν να διακριθούν περαιτέρω ως προς την ονομαστική τους ισχύ σε:

- micro (< 0,1 MW)
- mini (0,1-1 MW)
- μικρό (1-10 MW)

Ένας τυπικός Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός (ΜΥΗΣ) εκμεταλλεύεται τη δυναμική ενέργειας του νερού με μετατροπή της αρχικά σε κινητική ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Η εγκατάσταση ενός ΜΥΗΣ αξιοποιεί την υψομετρική διαφορά της φυσικής πτώσης των νερών και μέσω ενός υπό πίεση υδραυλικού συστήματος, διοχετεύει το νερό σε ένα στρόβιλο. Ένα ΜΥΗΕ, συνήθως διαθέτει απλά μία ορεινή υδροληψία, ή και ένα μικρό ταμιευτήρα, για περιορισμένη ρύθμιση της ροής.

Στην Εικόνα 2.6 απεικονίζεται η τυπική διάταξη ενός ΜΥΗΕ εκτροπής.



Εικόνα 2.6: Τυπική Διάταξη ενός ΜΥΗΕ

2.2.6 Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα στην Ελλάδα

Είναι γεγονός ότι υπάρχει μια διηλεκτική αμφισβήτηση σχετικά με το αν η υδροηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να θεωρείται ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η κατασκευή ταμιευτήρα και συναφών έργων μεγάλης κλίμακας, όπως αναφέρθηκε, διαταράσσουν το οικοσύστημα του ποταμού και δυνητικά μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντολογικές ανησυχίες, καθώς και το γενικότερο ευρωπαϊκό πλαίσιο σχετικά με την «καθαρή» ενέργεια, πολλοί στρέφουν το ενδιαφέρον τους στα ΜΥΗΕ. Τέτοια έργα δεν προκαλούν σημαντικές οπτικές επιπτώσεις ούτε την μαζική αντίθεση των ενδιαφερόμενων, διότι δεν περιλαμβάνουν έργα μεγάλης κλίμακας συλλογής και αποθήκευσης νερού ούτε την κατασκευή μεγάλων φραγμάτων, συνεπώς είναι αρκετά συμβατά με το περιβάλλον.

Τα τελευταία χρόνια, στην Ελλάδα, η κατασκευή ΥΗΕ μεγάλης κλίμακας έχει περιοριστεί σημαντικά. Μάλιστα, το τελευταίο μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο που ολοκληρώθηκε ήταν το ΥΗΕ του Ιλαρίωνα στον Αλιάκμονα με ονομαστική ισχύ 159 MW. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1991, διακόπηκε το 1996, για να ξαναρχίσει το 2003. Το έργο λειτούργησε τελικά το 2014 (Μαμάσης και Κουτσογιάννης, 2019). Αντίθετα, λειτουργούν 110 ΜΥΗΕ σε όλη την Ελλάδα, συνολικής εγκατεστημένης

ισχύος 228 MW, 61 εκ των οποίων έχουν προσφορά σύνδεσης, συνολικής ισχύος 199 MW. Η ονομαστική τους ισχύ κυμαίνεται, συνήθως, από 0,5 ως 3,0 MW.

Καθώς το επενδυτικό ενδιαφέρον για τις ΜΥΗ μονάδες έχει γίνει ιδιαίτερα έντονο κατά την τελευταία πενταετία, η αναζήτηση νέων τοποθεσιών έχει στραφεί στις λιγότερο ανεπτυγμένες περιοχές. Στον ελλαδικό χώρο, οι πλουσιότερες υδρολογικές λεκάνες συγκεντρώνονται κυρίως στις βόρειες και δυτικές περιοχές της ηπειρωτικής χώρας, οι οποίες κυριαρχούνται από την οροσειρά της Πίνδου. Σήμερα, υπάρχουν υπό ανάπτυξη 28 έργα στη Θεσσαλία, 29 στη Δυτική Μακεδονία και 9 στην Πελοπόννησο.

Για την ελληνική ενεργειακή πολιτική, η επικείμενη ανάπτυξη του κλάδου των ΜΥΗΕ μπορεί να λειτουργήσει ευεργετικά στην εθνική οικονομία. Καθώς το μόνο εγχώριο καύσιμο της Ελλάδας είναι ο λιγνίτης, και ταυτόχρονα, οι πιέσεις του πακέτου «20-20-20» για μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα εντείνονται, η στροφή της χώρας στις ΑΠΕ είναι μονόδρομος. Οι πόροι για παραγωγή ηλιακής, αιολικής και υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι άφθονες στην χώρα μας, σε αντίθεση με το φυσικό αέριο, το οποίο αποτελεί προϊόν εισαγωγής.

3 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΡΟΩΝ

3.1 Μέθοδοι Πρόγνωσης Χαμηλών Ροών

Η χαμηλή απορροή ενός ποταμού είναι ένα εποχικό φαινόμενο και αναπόσπαστο στοιχείο του καθεστώτος ροής κάθε ποταμού (Smakhtin, 2001). Ως χαμηλή απορροή μπορεί να χαρακτηριστεί η μειωμένη παροχή του νερού σε ένα ποτάμι κατά τη διάρκεια μιας παρατεταμένης ξηρής περιόδου (Hisdal *et al*, 2004). Οι χαμηλές ροές επηρεάζονται από ποικίλους παράγοντες, όπως την σύσταση και τη διηθητικότητα του εδάφους, τα υδρολογικά χαρακτηριστικά και την έκταση των υδροφορέων, τα ποσοστά της εξατμοδιαπνοής από τη λεκάνη, τα είδη της υπάρχουσας βλάστησης, την τοπογραφία της περιοχής, τις κλιματικές συνθήκες, καθώς και τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως είναι η αλλαγή των χρήσεων γης. Αξίζει να σημειωθεί πως οι χαμηλές ροές διαφέρουν από τα φαινόμενα ξηρασίας, καθώς αναφέρονται σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Συγκεκριμένα, τα φαινόμενα ξηρασίας εμφανίζουν παρατεταμένες περιόδους ροών που είναι συστηματικά χαμηλότερες σε σχέση με τη συνήθη δίαυτα του ποταμού, σε αντίθεση με τις διαχρονικές εποχιακές περιόδους χαμηλής ροής, που δεν οφείλονται σε ξηρασίες, αλλά στις συνήθεις υδροκλιματικές διεργασίες της λεκάνης απορροής (Smakhtin, 2001).

Η εμφάνιση χαμηλών ροών επηρεάζει ιδιαίτερα τις αγροτικές δραστηριότητες, την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, την πλωτότητα του ποταμού, την αλιεία και άλλες οικιακές ή οικονομικές δραστηριότητες (Lefèvre, 1974). Έτσι, διαφαίνεται το σοβαρό αντίκτυπο του φαινομένου στην κοινωνία εξαιτίας του ιδιαίτερα σημαντικού ρόλου του σε ποικίλα θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων, ειδικά κατά την εκδήλωσή του στην διάρκεια της ξηρής περιόδου κάθε έτους. Οι αυξημένες ανάγκες για νερό σε συνδυασμό με την περιορισμένη διαθεσιμότητά του κατά την διάρκεια των ξηρών μηνών αποτελούν μείζον υδρολογικό πρόβλημα. Παράλληλα, όμως, η αξιόπιστη πρόγνωση των χαμηλών ροών εξυπηρετεί και στην επίτευξη άλλων διαχειριστικών στόχων, όπως η διατήρηση της ποιότητας του υδάτινου περιβάλλοντος, η ορθολογική χρήση του αποθέματος νερού των ταμιευτήρων, ο σωστός σχεδιασμός των υδροηλεκτρικών έργων, η εκτίμηση της περιβαλλοντικής ροής και η προστασία των ενδιαιτημάτων. Καθίσταται αναγκαία, επίσης, και στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Οδηγίας - Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60) που απαιτεί την αξιολόγηση της κατάστασης των υδάτινων σωμάτων και τον καθορισμό περιβαλλοντικών περιορισμών για τον σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Έτσι, προκειμένου να εναρμονιστούν με την Ευρωπαϊκή Οδηγία, αρκετές χώρες έχουν αναπτύξει, σε εθνικό επίπεδο, διαδικασίες για την πρόβλεψη των χαμηλών ροών, όπως η Αγγλία (Institute of Hydrology, 1980; Gustard *et al.*, 1992), η Σουηδία (Aschwanden and Kan, 1999) και η Αυστρία (Laaha and Blöschl, 2007).

3.1.1 Πρόγνωση χαμηλών ροών σε τοπική κλίμακα

Οι μέθοδοι πρόβλεψης των χαμηλών ροών διακρίνονται, σε αδρές γραμμές, σε στατιστικές και σε μοντέλα φυσικής βάσης (process-based). Με τον όρο αυτό, εννοείται η μεθοδολογία, κατά την οποία εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά της χαμηλής ροής σε όρους μεγέθους, διάρκειας και συχνότητας και εξάγονται οι αντίστοιχοι

δείκτες, ώστε να χρησιμοποιηθούν στην κατάστροψη διαχειριστικών σχεδίων. Τα τελευταία χρόνια, το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη μεθοδολογιών που εφαρμόζονται σε τοπικό επίπεδο και προσπαθούν να συσχετίσουν τα χαρακτηριστικά της χαμηλής ροής και τις ιδιότητες της λεκάνης απορροής μελέτης (regionalization approach), και πιο σπάνια, γίνεται χρήση υδρολογικών μοντέλων (Engeland and Hisdal, 2009). Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ερευνητικές υπό καθεστώς έλλειψης δεδομένων για την ροή, καθώς είναι γεγονός ότι στις μικρές λεκάνες δεν πραγματοποιούνται μετρήσεις (Vogel and Kroll, 1992; Ludwig and Tasker, 1993; Smakhtin *et al.*, 1995; Smakhtin, 2001; Yu *et al.*, 2002; Kroll *et al.*, 2004; Laaha and Blöschl, 2006; Longobardi and Vallini, 2008; Castiglioni *et al.*, 2009; Eslamian *et al.*, 2010; Castiglioni *et al.*, 2011; Tsakiris *et al.*, 2011). Στα πλαίσια αυτής της προσέγγισης, έχει αποδειχθεί πως ταξινομώντας τα χαρακτηριστικά της χαμηλής ροής μιας ευρύτερης περιοχής, είναι δυνατή η διαίρεσή της σε ομοιογενείς υποπεριοχές για τις οποίες ισχύουν διαφορετικές υδρολογικές διεργασίες (Laaha and Blöschl 2006; Vezza *et al.*, 2010). Το παραπάνω μεθοδολογικό πλαίσιο έχει εφαρμοστεί, κυρίως, σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από υγρό κλίμα, πλην ορισμένων εξαιρέσεων (Longobardi and Vallini, 2008; Mehaiguenne *et al.*, 2012).

3.1.2 Πρόγνωση χαμηλών ροών στην Μεσόγειο

Η αναγκαιότητα πρόγνωσης των χαμηλών ροών κατά την ξηρή περίοδο καθίσταται ακόμη πιο κρίσιμη σε περιοχές με ξηρό κλίμα, ειδικά όταν η ζήτηση σε νερό είναι αυξημένη. Σύνηθες φαινόμενο αποτελεί αυτό στις Μεσογειακές λεκάνες, καθώς χαρακτηρίζονται από ελάχιστες βροχοπτώσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, με αποτέλεσμα η ξηρή περίοδος να διαρκεί, κατά βάση, από τον Απρίλιο έως τον Οκτώβριο, ενώ παράλληλα αυτούς τους μήνες οι ανάγκες για αστική και αρδευτική χρήση είναι οι μέγιστες. Μια εκτεταμένη ανάλυση έχει γίνει για 25 λεκάνες της Μεσογείου από τους Risva *et al.* (2018), ενώ οι Bangash *et al.* (2012) ερεύνησαν την βασική ροή σε λεκάνες της Ισπανίας, τυπικές για τον Μεσογειακό χώρο, με περιορισμένα δεδομένα ροής.

Παρατηρείται, επίσης, πως τα υδροκλιματικά χαρακτηριστικά των προαναφερθέντων λεκανών δεν περιορίζονται γεωγραφικά μόνο στην Μεσόγειο, καθώς στην πραγματικότητα τα χαρακτηριστικά του Μεσογειακού κλίματος εμφανίζονται και σε άλλες περιοχές στον κόσμο, όπως στην περιοχή της Καλιφόρνια, στην Δυτική και Νότια Αυστραλία, στην Νότια Αφρική και σε τμήμα της παράκτιας Χιλής (Merheb *et al.*, 2016).

3.1.3 Καινοτόμες ιδέες στην προσέγγιση της χαμηλής ροής

Τα περισσότερα μοντέλα που προτείνονται για την πρόγνωση των χαμηλών ροών μπορούν να θεωρηθούν κατά βάση υδρολογικά. Ύστερα από βιβλιογραφική ανασκόπηση, έγινε εμφανές ότι υπάρχουν πολύ λίγες μελέτες που συγκρίνουν την απόδοση των υπαρχόντων μοντέλων, ώστε να γνωρίζουμε τα προτερήματα, αλλά και τις αδυναμίες τους. Η χρήση ενός υδρολογικού μοντέλου για αυτόν τον σκοπό αποτελεί μια πρόκληση, καθώς η εκτίμηση της βασικής ροής εξαρτάται από την περιοχή, την εποχή και τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης (lead time). Οι Demirel *et al.* (2013) εξέτασαν τον ρόλο πέντε δεικτών (βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή, υπόγεια αποθήκευση νερού, αποθήκευση χιονιού και αποθήκευση λιμνών) στην λεκάνη απορροής του Ρήνου και διαπίστωσαν πως το μέγεθος τους ποικίλλει ανάλογα με το

χρόνο στέρησης (lead time). Σαφώς, η δυνατότητα εφαρμογής υδρολογικών μοντέλων εξαρτάται με τον τρόπο με τον οποίο αυτές οι διαδικασίες λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο. Υπάρχουν ορισμένες τεχνικές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ένα υδρολογικό μοντέλο, ώστε να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα των προβλέψεων του και ταυτόχρονα, να μειωθεί η αβεβαιότητα του μοντέλου (Demirel *et al.*, 2013; Georgakakos *et al.*, 2004; Velázquez *et al.*, 2011).

Παράλληλα, ολοένα και πιο συχνά προσεγγίζεται η πρόγνωση των χαμηλών ροών με μοντέλα που βασίζονται στα δεδομένα (data-driven models), όπως τα νευρωνικά δίκτυα. Για παράδειγμα, οι Štravs and Brilly (2007) έχουν αναπτύξει ένα μοντέλο μηχανικής εκμάθησης (machine learning) με lead time 7 ημερών και πεδίο εφαρμογής την περιοχή της Σλοβενίας για να χρησιμοποιηθεί σε επιχειρησιακή βάση για την καθημερινή διαχείριση του νερού σε περιόδους χωρίς βροχή. Οι Nicolle *et al.* (2014), επίσης, χρησιμοποίησαν εναλλακτικά μοντέλα για πληθώρα ποταμών στην Γαλλία, θεωρώντας βραχυπρόθεσμο (7-ημέρες) και μακροπρόθεσμο (30-ημέρες) ορίζοντα πρόβλεψης. Να σημειωθεί πως οι παραπάνω προσεγγίσεις αναφέρονται σε μικρούς χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης, οι οποίοι επιτρέπουν την συνεχή ενημέρωση των παραμέτρων του μοντέλου, ώστε να ταιριάζει καλύτερα στα νέα δεδομένα.

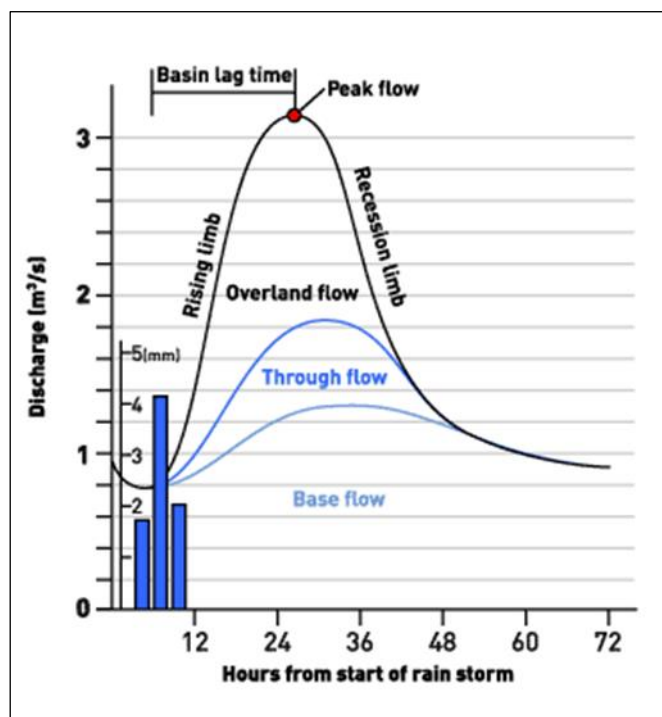
4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την κατάρτιση μοντέλων πρόγνωσης της ενεργειακής παραγωγής με χρήση των υδρολογικών μοντέλων στείρευσης. Η ανάλυση αυτή διακρίνεται σε δύο χρονικές κλίμακες, μακροπρόθεσμα – στο πλαίσιο της ξηρής περιόδου κάθε έτους- και βραχυπρόθεσμα – στο πλαίσιο της απόκρισης του έργου σε μεμονωμένα πλημμυρικά επεισόδια διάρκειας κάποιων ημερών. Η περιοχή που αξιοποιήθηκε για τη ανάπτυξη της μεθοδολογίας είναι η λεκάνη απορροής ανάντη του φράγματος Κρεμαστών.

4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

4.1.1 Καμπύλες στείρευσης

Σε αδρές γραμμές, ένα υδρογράφημα χωρίζεται στους ανοδικούς κλάδους, οι οποίοι αντικατοπτρίζουν την αύξηση στην απορροή λόγω των πλημμυρικών επεισοδίων, και τους πτωτικούς κλάδους, οι οποίοι καταδεικνύουν την καθυστέρηση στην στείρευση της λεκάνης εξαιτίας πολύπλοκων ρυθμιστικών μηχανισμών (Γράφημα 4.1).



Γράφημα 4.1: Υδρογράφημα (BBC, 2014)

Συγκεκριμένα, στο πτωτικό σκέλος του υδρογραφήματος αντανακλάται η σταδιακή εξάντληση του αποθηκευμένου νερού σε μια λεκάνη κατά τη διάρκεια περιόδων με μικρή ή καθόλου ποσότητα ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Συνεπώς, η καμπύλη στείρευσης περιγράφει κατά τρόπο ολοκληρωμένο την εκροή του ποταμού, για διάφορες χωρητικότητες της λεκάνης. Μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις ο ρυθμός στείρευσης χρησιμοποιείται και ως δείκτης αποθήκευσης της απορροής. Ποτάμια με αργό ρυθμό έχουν συνήθως μεγάλη συνεισφορά βασικής ροής που προέρχεται από

υπόγεια ύδατα ή μεγάλο τμήμα τους καταλαμβάνεται από λίμνες, ενώ ο γρήγορος ρυθμός είναι χαρακτηριστικό ποταμών που αποστραγγίζουν αδιαπέρατες λεκάνες απορροής με περιορισμένη αποθήκευση (WMO, 2008). Η ποσοτικοποίηση της καμπύλης στείρευσης αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την διαχείριση των υδατικών πόρων και συγκεκριμένα, την πρόγνωση της χαμηλής ροής. Η αριθμητική εκτίμηση των δεικτών στείρευσης συνεπάγεται την επιλογή μιας αναλυτικής έκφρασης που να ταιριάζει με την καμπύλη, τον προσδιορισμό ενός χαρακτηριστικού στείρευσης και τη βελτιστοποίηση των σχετικών παραμέτρων (Ρίσβα, 2016). Μια εκτενέστερη ανάλυση του μηχανισμού στείρευσης παρέχεται από τους Hall (1968) και Tallaksen (1995). Στην επόμενη παράγραφο, αναλύεται μια απλή μαθηματική εξίσωση που περιγράφει επαρκώς καλά τους πτωτικούς κλάδους του υδρογραφήματος.

Υποθέτουμε ότι η αποθηκευτικότητα της λεκάνης απορροής $s(t)$ είναι γραμμικώς ανάλογη της απορροής της $q(t)$, ήτοι:

$$s(t) = k q(t) \quad (4.1)$$

όπου k συντελεστής στείρευσης.

Σύμφωνα με την παραπάνω υπόθεση, η καμπύλη στείρευσης ακολουθεί την απλή εκθετική εξίσωση:

$$q(t) = q_0 \exp(-kt) \quad (4.2)$$

όπου $q(t)$ η εκτιμώμενη απορροή την χρονική στιγμή t και k ο συντελεστής στείρευσης, σε μονάδες $m^3 s^{-1}$ και d^{-1} αντίστοιχα. Η παραπάνω σχέση επιλύεται σε διακριτά χρονικά βήματα Δt που αναφέρονται στην ημερήσια κλίμακα, ενώ ως q_0 θεωρούμε την απορροή στην αρχή της προσομοίωσης.

4.2 Πρόγνωση ροής ξηρής περιόδου

4.2.1 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η εκθετική εξίσωση της καμπύλης στείρευσης για πρόγνωση είναι αναγκαίο, αρχικά, να προσδιοριστούν οι αρχικές συνθήκες απορροής q_0 και ο συντελεστής στείρευσης k . Μια καλή εκτίμηση για την αρχική απορροή αποτελεί η ελάχιστη απορροή που σημειώθηκε τις πρώτες δύο εβδομάδες του Απριλίου κάθε έτους (Ρίσβα, 2017). Η εκτίμηση αυτή αποτελεί την πιο συντηρητική, αλλά και την πιο ασφαλή προσέγγιση, καθώς η ύπαρξη πλημμυρικών επεισοδίων κατά την διάρκεια του πρώτου δεκαπενθήμερου του Απριλίου μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της ροής και συνεπώς, σε λανθασμένα αποτελέσματα. Δοσμένων των ιστορικών απορροών για την περίοδο μεταξύ 15 Απριλίου και 15 Οκτωβρίου ενός ορισμένου έτους, καθώς και της αρχικής απορροής του ίδιου έτους, ο προσδιορισμός του συντελεστή στείρευσης k ανάγεται σε ένα πρόβλημα βαθμονόμησης. Εντούτοις, η φύση του προβλήματος δημιουργεί προκλήσεις, καθώς ούτε η αρχή ούτε η διάρκεια της ξηρής περιόδου δεν μπορούν να καθοριστούν εκ των προτέρων, αφού το υδρογράφημα περιέχει, πέρα από την βασική ροή, και ανοδικούς και καθοδικούς κλάδους, που οφείλονται σε πλημμυρικά επεισόδια, που εκδηλώνονται κατά την διάρκεια της ξηρής περιόδου. Λαμβάνοντας υπόψη την ιδιαιτερότητα του

προβλήματος, είναι σκόπιμο να προσδιοριστούν η αρχή και το πέρας της ξηρής περιόδου κάθε έτους, όπως εισηγήθηκαν οι Risva *et al.* (2018), προτού αρχίσει η διαδικασία βαθμονόμησης.

4.2.2 Παραγωγή συντελεστών στείρευσης k με αβεβαιότητα

Μετά την εξαγωγή της αρχικής απορροής q_0 και του συντελεστή στείρευσης k για την ξηρή περίοδο για κάθε έτος από το ιστορικό δείγμα παρατηρήσεων της λεκάνης γίνεται η στατιστική ανάλυσή τους. Στις αναλύσεις μας στη λεκάνη του Αχελώου, παρατηρήθηκε ότι η απορροή κατά την έναρξη της ξηρής περιόδου q_0 και ο συντελεστής στείρευσης k έχουν υψηλό βαθμό συσχέτισης.

Γενικεύοντας την παραπάνω παρατήρηση, και θεωρώντας την σχέση εξάρτησης τους γραμμική, ήτοι:

$$k' = \alpha q_0 + \beta \quad (4.3)$$

προσδιορίστηκαν οι συντελεστές α και β μέσω γραμμικής παλινδρόμησης. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται εφικτή η πρόγνωση της απορροής της ξηρής περιόδου με βάση μία και μόνο παρατήρηση, ήτοι την τιμή έναρξης q_0 .

Στη συνέχεια, για δεδομένες τιμές της απορροής στην αρχή της ξηρής περιόδου κάθε έτους q_0 , υπολογίζεται, με βάση το μοντέλο που καταρτίστηκε, μια νέα τιμή για τον συντελεστή στείρευσης k' , καθώς και το σφάλμα μεταξύ των συντελεστών που προέκυψαν από τα ιστορικά δεδομένα και το μοντέλο. Στην συνέχεια, γίνεται η στατιστική ανάλυση του σφάλματος, $\varepsilon = k - k'$, και υπολογίζεται η διασπορά του, σ^2 . Εξ ορισμού, η μέση τιμή του σφάλματος ε ισούται με μηδέν, καθώς το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης είναι αμερόληπτο (για τον λόγο αυτό, η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων διέρχεται πάντοτε από τη μέση τιμή των παρατηρήσεων).

Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι να παράξουμε συνθετικές τιμές των συντελεστών στείρευσης, που υποθέτουμε ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με αυτήν του σφάλματος. Αυτό γίνεται προσθέτοντας στην τιμή του k' που εκτιμάται μέσω της σχέσης (4.3) έναν τυχαίο κανονικό θόρυβο, που διατηρεί την στατιστική δομή του σφάλματος ε , ήτοι:

$$k' = \alpha q_0 + \beta + N(0, \sigma) \quad (4.4)$$

Μέσω αυτής της διαδικασίας, καθίσταται δυνατή η παραγωγή τυχαίων σεναρίων για τον συντελεστή στείρευσης κάθε έτους, διατηρώντας, παράλληλα, τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους. Έτσι, για κάθε έτος, προέκυψε μια σειρά από 100 τυχαίους συντελεστές στείρευσης.

Να σημειωθεί πως η αρχική προσέγγιση για την παραγωγή τυχαίων σεναρίων για τον συντελεστή στείρευσης ήταν η εξής. Αρχικά, έγινε στατιστική ανάλυση στο δείγμα των συντελεστών και, αφού διερευνήθηκε ποια από τις γνωστές κατανομές ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα, παρήχθη μια συνθετική σειρά που ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή και τυπική απόκλιση αυτή του δείγματος. Το αρχικό δείγμα, εντούτοις, ήταν μικρό και έτσι, τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ήταν ευαίσθητα στις τυχαίες διακυμάνσεις κάθε έτους.

4.2.3 Παραγωγή τυχαίων σεναρίων απορροής Q

Στη συνέχεια, για κάθε συντελεστή k' , υπολογίστηκε με την χρήση της καμπύλης στέρεισης (εξ 4.2) η εκτιμώμενη απορροή για την ξηρή περίοδο, δηλαδή από τις 15 Απριλίου έως τις 15 Οκτωβρίου, με ημερήσιο χρονικό βήμα. Οι αρχικές συνθήκες απορροής q_0 θεωρήθηκαν ίδιες για όλα τα σεναρία κάθε έτους. Έτσι, προέκυψαν για κάθε έτος 100 πιθανά σεναρία απορροής για την ξηρή περίοδο. Για λόγους καλύτερης εποπτείας, σχεδιάστηκαν διαγράμματα, που απεικονίζουν ταυτόχρονα τα 100 σεναρία και τα ιστορικά δεδομένα.

Η διαδικασία αυτή, όπως είναι αναμενόμενο, ήταν ιδιαίτερα απαιτητική λόγω του μεγάλου όγκου των εξαγόμενων πληροφοριών, που καθιστούσαν δύσκολη τόσο την καλή εποπτεία των αποτελεσμάτων όσο και την εξαγωγή συμπερασμάτων με ασφάλεια. Για τον λόγο αυτό, για κάθε έτος, υπολογίστηκαν τα σεναρία με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%, 50% και 95%. Σε όρους πρόγνωσης, τα σεναρία αυτά μπορούν να μεταφραστούν ως μια *συντηρητική*, μια *μετριοπαθής* και μια *επιθετική* πρόβλεψη, αντίστοιχα. Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι πολύ σημαντική, αφού η κάθε πρόγνωση συνοδεύεται από καθορισμένο ρίσκο και έτσι, οι διαχειριστές των ΜΥΗΕ μπορούν να καταρτίσουν την στρατηγική τους για την παραγωγή και διάθεση ενέργειας, κατά την ξηρή περίοδο, με βάση την προσωπική τους ανοχή στο ρίσκο.

4.2.4 Παραγωγή τυχαίων σεναρίων παραγωγής ενέργειας

Σε ένα ΜΥΗΕ σημασία έχει κυρίως η παραγόμενη ενέργεια σε κάθε χρονικό βήμα και όχι τόσο η απορροή που φτάνει στην υδροληψία, καθώς εξ ορισμού τα ΜΥΗΕ λειτουργούν μεταξύ μιας ανώτατης και μιας κατώτερης παροχής και δεν διαθέτουν την δυνατότητα αποθήκευσης νερού για εκμετάλλευσή του σε επόμενο χρονικό βήμα. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται πως αν η πραγματική απορροή σε ένα χρονικό βήμα είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική παροχή των στροβίλων, ακόμη και στην περίπτωση που η απορροή που προκύπτει από το μοντέλο πρόβλεψης την υποεκτιμά σημαντικά, η διαφορά στην παραγόμενη ενέργεια είναι μηδενική, αρκεί η προβλεπόμενη απορροή να είναι επίσης πάνω από το όριο αυτό. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερος σημαντική, καθώς το προτεινόμενο μοντέλο πρόβλεψης βασίζεται στις καμπύλες στέρεισης και έτσι, είναι σχεδιασμένο να πιάνει με καλή ακρίβεια την βασική ροή κατά την ξηρή περίοδο, είναι όμως αδύνατον να προβλέπει τα πλημμυρικά επεισόδια. Το ίδιο συμβαίνει, αντίστοιχα, με την ροή κάτω από την ελάχιστη παροχή λειτουργίας των στροβίλων, για την οποία δεν παράγεται ενέργεια. Έτσι, απαραίτητο βήμα για την σωστή αξιολόγηση του μοντέλου είναι η μετατροπή των σεναρίων απορροής σε ενέργεια.

Για την μετατροπή της απορροής σε ενέργεια, καταρτίστηκε ένα πρότυπο ΜΥΗΕ, όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 5. Στο έργο αυτό θεωρήθηκε ότι είναι εγκατεστημένοι δύο στροβίλοι τύπου Francis, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς του καθενός, και συνεπώς τα όρια παροχής λειτουργίας τους, προέκυψαν ύστερα από βελτιστοποίηση, με βάση το δείγμα ημερήσιων παροχών της ανάντη λεκάνης, που στο παράδειγμα εφαρμογής ήταν η λεκάνη του Αχελώου, ανάντη του φράγματος των Κρεμαστών. Η ισχύς κάθε στροβίλου επιλέχθηκε κατάλληλα, ώστε να μεγιστοποιηθεί το εύρος παροχών που μπορούν να αξιοποιηθούν από το έργο.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB© μια συνάρτηση που δέχεται ως ορίσματα την εγκατεστημένη ισχύ και τον τύπο των στροβίλων, την κατώτερη και την ανώτατη παροχή λειτουργίας και την χρονοσειρά ημερήσιας παροχής και εξάγει ως αποτέλεσμα την παραγόμενη ενέργεια σε ημερήσια κλίμακα. Μελετώντας τα διαγράμματα, εύκολα διαπιστώνεται ότι η παραγόμενη ενέργεια μηδενίζεται σε ορισμένα χρονικά διαστήματα. Αυτό εξηγείται, διότι, όπως εξηγήθηκε, τα ΜΥΗΕ λειτουργούν για παροχές μεταξύ μιας κατώτατης και μιας ανώτερης τιμής και έτσι, για παροχές μικρότερες της κατώτερης, η μονάδα αδυνατεί να παράξει ενέργεια.

Σε αντιστοιχία με την παραγωγή των σεναρίων απορροής, προέκυψαν 100 σενάρια παραγωγής ενέργειας για κάθε έτος. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα σενάρια με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%, 50% και 95%. Η σύγκριση των τριών σεναρίων ενέργειας με την «πραγματική» παραγωγή ενέργειας υποδεικνύει πως η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μπορεί να προβλέψει με καλή ακρίβεια την ενέργεια για χρονιές τόσο με αυξημένη όσο και μειωμένη απορροή. Προφανώς, σε ένα τέτοιο απλό μοντέλο δεν υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης της παραπάνω ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια μεμονωμένων πλημμυρικών επεισοδίων, το οποίο προϋποθέτει συνδυασμό του με επιχειρησιακά συστήματα υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης.

4.3 Πρόγνωση ροής σε πλημμυρικά επεισόδια

Η πρόγνωση της ροής κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών είναι ιδιαίτερα απαιτητική και απαιτεί εξειδικευμένα μοντέλα πρόγνωσης των επερχόμενων καταγίδων και των πλημμυρικών φαινομένων που δύνανται να προκαλέσουν, που βασίζονται σε μετεωρολογικά φαινόμενα πραγματικού χρόνου. Από την άλλη πλευρά, μετά το πέρας ενός επεισοδίου βροχής, είναι δυνατή η έστω και αδρομερής περιγραφή της στέρησης της πλημμύρας, η οποία οφείλεται στους υδρολογικούς μηχανισμούς της λεκάνης (διεργασίες διάδευσης). Έτσι, στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται και η βραχυπρόθεσμη πρόγνωση της ροής στους πτωτικούς κλάδους των πλημμυρικών επεισοδίων. Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται παρακάτω βασίζεται στις αρχές της καμπύλης στέρησης (4.1.1).

4.3.1 Διαχωρισμός Πλημμυρικών Επεισοδίων

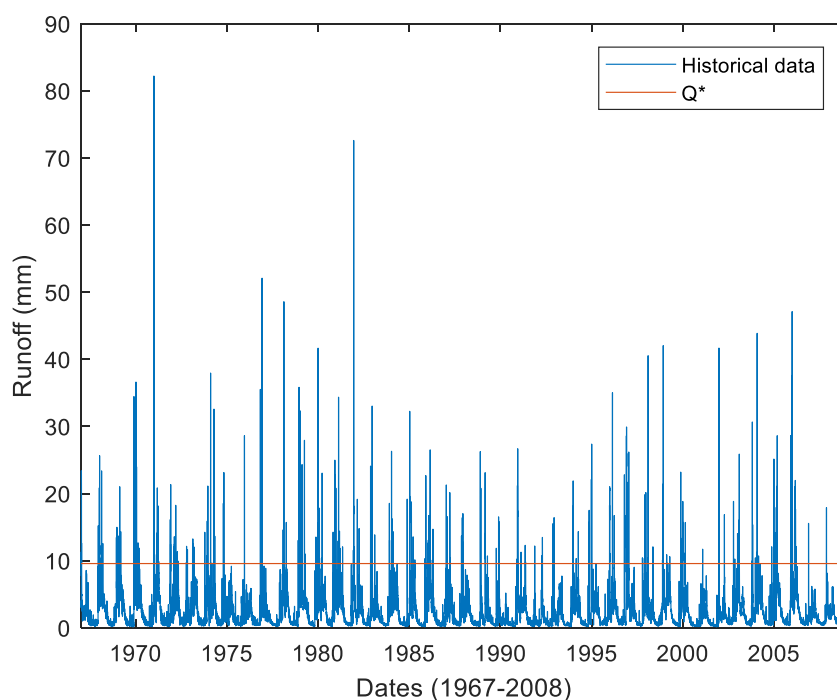
Η σημαντικότερη πρόκληση κατά την ανάπτυξη της μεθοδολογίας για την πρόγνωση της ροής σε βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα αποτέλεσε ο διαχωρισμός των πλημμυρικών επεισοδίων από το σύνολο της χρονοσειράς παροχών στη θέση μελέτης, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρωτογενή δεδομένα για την κατάρτιση του μοντέλου πρόγνωσης. Καθώς κάθε πλημμυρικό επεισόδιο είναι μοναδικό και εξαρτάται όχι τόσο από το μέγεθος της απορροής, αλλά από τις συνθήκες που επικρατούν την δεδομένη χρονική περίοδο, την απορροή στα προηγούμενα και τα επόμενα χρονικά βήματα, τις καιρικές συνθήκες, την γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης, την μορφολογία της λεκάνης απορροής και τους μηχανισμούς στέρησης της, είναι εξαιρετικά σύνθετη η αυτοματοποίηση μιας τέτοιας διαδικασίας σε προγραμματιστικό περιβάλλον.

Έτσι, καταρτίστηκαν εμπειρικά ορισμένοι «κανόνες», με βάση τους οποίους θα μπορούσε ένα σύνολο απορροών να χαρακτηριστεί ως πλημμυρικό επεισόδιο και βελτιστοποιήθηκε για την λεκάνη μελέτης.

Αρχικά, έπρεπε να οριστεί μια κατώτατη τιμή για την απορροή, ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί ως πλημμυρικό επεισόδιο. Μια πρώτη προσέγγιση ήταν να θεωρηθεί ως κατώτερο όριο η μέση τιμή των απορροών, όμως στην συνέχεια, αυτή η θεώρηση δυσκόλεψε τον διαχωρισμό των επεισοδίων, καθώς προέκυπτε πολύ μεγάλος αριθμός μικρών πλημμυρών. Έτσι, το κατώτερο όριο (Q^*) ορίστηκε με βάση την εξής σχέση:

$$Q^* = \text{mean}(Q) + k \text{ std}(Q) \quad (4.5)$$

Ο συντελεστής k είναι διαφορετικός για κάθε θέση μελέτης και προκύπτει ύστερα από βελτιστοποίηση. Στο Γράφημα 4.2 απεικονίζεται το Q^* συγκριτικά με τα ιστορικά δεδομένα στην λεκάνη των Κρεμαστών. Σκοπός αυτού του βήματος είναι μια αδρή κατηγοριοποίηση της χρονοσειράς απορροής σε εν δυνάμει πλημμυρικά επεισόδια και βασική ροή.



Γράφημα 4.2: Q^* και ιστορικές απορροές στην λεκάνη ανάντη του φράγματος των Κρεμαστών

Στη συνέχεια, απομονώσαμε τις περιπτώσεις στις οποίες οι απορροές ήταν μεγαλύτερες του Q^* για συνεχόμενα χρονικά βήματα. Ο ακριβής καθορισμός του αριθμού των συνεχόμενων χρονικών βημάτων προσδιορίστηκε ύστερα από αρκετές δοκιμές στις τέσσερις ημέρες. Η επιλογή αυτή ήταν καθοριστική, ώστε αφενός να προκύψει ικανοποιητικός αριθμός πλημμυρικών επεισοδίων για να εξάγουμε αντιπροσωπευτικά συμπεράσματα και, αφετέρου να υπάρχουν αρκετά συνεχόμενα χρονικά βήματα, ώστε να έχει νόημα η χρήση της μεθοδολογίας των καμπυλών στείρευσης, η οποία βασίζεται στην σχέση των διαδοχικών χρονικών βημάτων.

Μια ακόμη πρόκληση στον διαχωρισμό των πλημμυρικών επεισοδίων ήταν οι περιπτώσεις όπου εξαιτίας συνεχόμενων βροχοπτώσεων, τα πλημμυρικά επεισόδια παρουσίαζαν πολλαπλές κορυφές. Το φαινόμενο αυτό είναι σύνηθες κατά την μελέτη

ενός πλημμυρογραφήματος, όμως ο χειρισμός του ήταν ιδιαίτερα κρίσιμος για την διάρθρωση της μεθοδολογίας.

Στην συνέχεια, απομονώθηκε ο καθοδικός κλάδος κάθε πλημμυρικού επεισοδίου. Η διαδικασία αυτή ήταν απαραίτητη, καθώς στόχος της παρούσας εργασίας είναι να εκτιμηθεί η ενέργεια που αναμένεται να παραχθεί στους καθοδικούς κλάδους του πλημμυρογραφήματος, αφού δηλαδή εμφανιστεί η αιχμή της πλημμύρας.

4.3.2 Προσδιορισμός παραμέτρου στείρευσης

Για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο, όπως προέκυψε από την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο, εκτιμήθηκε ο συντελεστής στείρευσης k με προσαρμογή της εξίσωσης (4.2) στο δείγμα δεδομένων κάθε επεισοδίου, διατυπώνοντας ένα πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης. Όπως είναι λογικό, ως Q_0 ορίζεται η «κορυφή» (απορροή αιχμής) του πλημμυρογραφήματος, ήτοι η μέγιστη τιμή του επεισοδίου. Ως κριτήριο προσαρμογής, χρησιμοποιήθηκε το τετραγωνικό σφάλμα, το οποίο αποτελεί τυπικό μέτρο καλής προσαρμογής μη γραμμικών μοντέλων, και εκτιμάται από την σχέση:

$$\varepsilon = \sum (Q - Q_{est})^2 \quad (4.6)$$

όπου Q η παρατηρημένη τιμή της απορροής και Q_{est} η υπολογισμένη τιμή από την σχέση (4.2).

Η κατάρτιση της στοχικής συνάρτησης βελτιστοποίησης γίνεται με χρήση του λογισμικού MATLAB®. Παρακάτω παρατίθενται αποσπάσματα του κώδικα, καθώς και σχετικά σχόλια.

4.3.2.1 Υπολογισμός μέσου τετραγωνικού σφάλματος

```
function [ sq_error ] = minimize_error( k,Qt,Q0 )
for i=1:length(Qt)
    if Qt(i)~=0
        Q(i)=Q0.*exp(-k.^i);
        error(i)=(Qt(i)-Q(i)).^2;
    end
end
sq_error=(sum(error));
end
```

Στο παραπάνω τμήμα κώδικα, για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο, εκτελούνται τα εξής:

- Με βάση την εξίσωση (4.2) λαμβάνεται η υπολογισμένη τιμή της απορροής Q_i σε κάθε χρονικό βήμα
- Υπολογίζεται το τετραγωνικό σφάλμα (sq_error) μεταξύ της παρατηρημένης τιμής απορροής και αυτής που υπολογίστηκε από την εξίσωση (4.2)

4.3.2.2 Βελτιστοποίηση με βάση το μέσο τετραγωνικό σφάλμα

Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση είναι η `fminsearch` που βρίσκεται ενσωματωμένη στο MATLAB και βρίσκει το ελάχιστο ενός στοιχείου (scalar) πολλών μεταβλητών, ξεκινώντας από μια αρχική εκτίμηση. Αυτό αναφέρεται γενικά ως χωρίς περιορισμούς μη γραμμική βελτιστοποίηση.

```
options=optimset('MaxFunEvals',1000);
j=1;
for i=1:length(flood)
    Q0=flood(1,i);
    for j=1:size(flood,1)
        if flood(j,i)~=0
            Qk(j,i)=flood(j,i);
        end
    end
    flood(:,i)
    %x = fminsearch(fun,x0,options)
    k(i)=fminsearch(@(k) minimize_error(k,Qk(:,i),Q0),0.6,options);
    tot_error(i)=minimize_error(k(i),Qk(:,i),Q0);
end
```

Η συνάρτηση `fminsearch` δέχεται ως ορίσματα:

- την συνάρτηση, την οποία θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε (**fun**),
- το αρχικό σημείο (x_0), γύρω από το οποίο θα ξεκινήσουν οι δοκιμές, και
- τις επιλογές της βελτιστοποίησης (**options**).

Για το δεδομένο πρόβλημα, η συνάρτηση που θα βελτιστοποιηθεί είναι η συνάρτηση `minimize_error` (4.3.2.1) και ως αρχική τιμή ορίστηκε $k = 0,60$. Αναφορικά με τις επιλογές της βελτιστοποίησης, μέσω της συνάρτησης `optimset` ορίστηκε ο μέγιστος αριθμός των εκτιμήσεων της συνάρτησης (**MaxFunEvals**) στις 1000.

Με την παραπάνω διαδικασία προκύπτει για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο, ο συντελεστής στείρευσης k , έτσι ώστε η σχέση (4.2) να περιγράφει καλύτερα τον μηχανισμό απορροής του επεισοδίου.

Στην συνέχεια, αναπτύσσεται η μεθοδολογία για την πρόβλεψη της ενέργειας στους πτωτικούς κλάδους αυτών των πλημμυρικών επεισοδίων, σε αντιστοιχία με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την ξηρή περίοδο.

4.3.3 Παραγωγή συντελεστών στείρευσης k με αβεβαιότητα

Θεωρώντας γραμμική την εξάρτηση των συντελεστών στείρευσης k και των αρχικών απορροών Q_0 (εξ 4.3) καταρτίζεται ένα μοντέλο, το οποίο περιγράφει την σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών. Έτσι για δεδομένες τιμές των αρχικών συνθηκών, μέσω του μοντέλου, υπολογίζουμε τις τιμές του συντελεστή στείρευσης και προσδιορίζουμε το σφάλμα μεταξύ των υπολογισμένων συντελεστών και αυτών που προέκυψαν από το προηγούμενο εδάφιο (4.3.2.2), ύστερα από την βελτιστοποίηση.

Τελικά, παράγεται μια σειρά από συνθετικούς συντελεστές στείρευσης που θεωρούμε ότι ακολουθεί κανονική κατανομή και έχει μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με

αυτή του σφάλματος. Αυτή προστίθεται στην τιμή του συντελεστή στέρησης κάθε επεισοδίου και έτσι, παράγεται μια σειρά τυχαίων συντελεστών.

4.3.4 Παραγωγή τυχαίων σεναρίων απορροής Q και παραγωγής ενέργειας

Στην συνέχεια, για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο, υπολογίστηκε με την χρήση της καμπύλης στέρησης (4.2), η εκτιμώμενη απορροή σε κάθε χρονικό βήμα. Σε κάθε επεισόδιο, η απορροή υπολογίστηκε για όλους τους συντελεστές στέρησης και ως Q_0 θεωρήθηκε η μέγιστη τιμή κάθε επεισοδίου. Επιπρόσθετα, για κάθε επεισόδιο, υπολογίστηκαν τα σενάρια με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%, 50% και 95%.

Αναφορικά με την παραγωγή ενέργειας, υπενθυμίζεται ότι έχει σχεδιαστεί ένα πρότυπο υδροηλεκτρικό έργο, στο οποίο είναι εγκατεστημένοι δύο στρόβιλοι τύπου Francis. Τα λοιπά χαρακτηριστικά του έργου προέκυψαν ύστερα από βελτιστοποίηση, σύμφωνα με το διαθέσιμο υδατικό δυναμικό στην λεκάνη. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της απορροής σε ενέργεια περιγράφεται αναλυτικά στην Παράγραφο 4.2.4. Τέλος, υπολογίστηκαν τα σενάρια ενέργειας με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%, 50% και 95%.

4.3.4.1 Εισαγωγή αβεβαιότητας στην αρχική απορροή (q_0)

Είναι γεγονός ότι πολλές φορές οι μετρήσεις των παροχών παρουσιάζουν σφάλματα, τα οποία οφείλονται σε ελαττωματικό εξοπλισμό, ανθρώπινη απροσεξία και άλλους παράγοντες. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο που καταρτίστηκε υποεκτιμά σημαντικά τις ιστορικές απορροές, τόσο σε όρους παροχής όσο και ενέργειας. Οι παρατηρήσεις αυτές λειτούργησαν ως έναυσμα, ώστε να καταλήξουμε στην εξής προσέγγιση.

Ως αρχική απορροή για το μοντέλο μας, Q_0 , δεν λαμβάνεται η μέγιστη τιμή που σημειώθηκε κατά το πλημμυρικό επεισόδιο, αλλά εισάγεται ένας όρος αβεβαιότητας κατά τον προσδιορισμό της. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ότι το Q_0 προκύπτει από το άθροισμα της μέγιστης παρατηρημένης απορροής κάθε επεισοδίου και ενός τυχαίου όρου που ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή και τυπική απόκλιση, όπως ορίζονται από την στατιστική ανάλυση των κορυφών των πλημμυρικών επεισοδίων.

Στην συνέχεια, για την παραγωγή των σεναρίων απορροής, ο συνδυασμός των στοχαστικών συντελεστών στέρησης και των στοχαστικών αρχικών απορροών έγινε με τυχαίο τρόπο. Η πρωταρχική σκέψη ήταν να παραχθούν σενάρια για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς συντελεστών στέρησης και αρχικών συνθηκών, εντούτοις ο υπολογιστικός φόρτος εργασίας ενός τέτοιου εγχειρήματος ήταν απαγορευτικός στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Ύστερα, τα σενάρια πρόγνωσης της παροχής μετατράπηκαν σε πρόγνωση ενέργειας και παράλληλα, υπολογίστηκαν τόσο για την απορροή όσο και την ενέργεια, τα σενάρια με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%, 50% και 95%. Τα αποτελέσματα από την πρόγνωση της απορροής ήταν πιο αξιόπιστα, ωστόσο η πρόγνωση της ενέργειας έχει βελτιωθεί ελάχιστα.

5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΈΡΓΟΥ

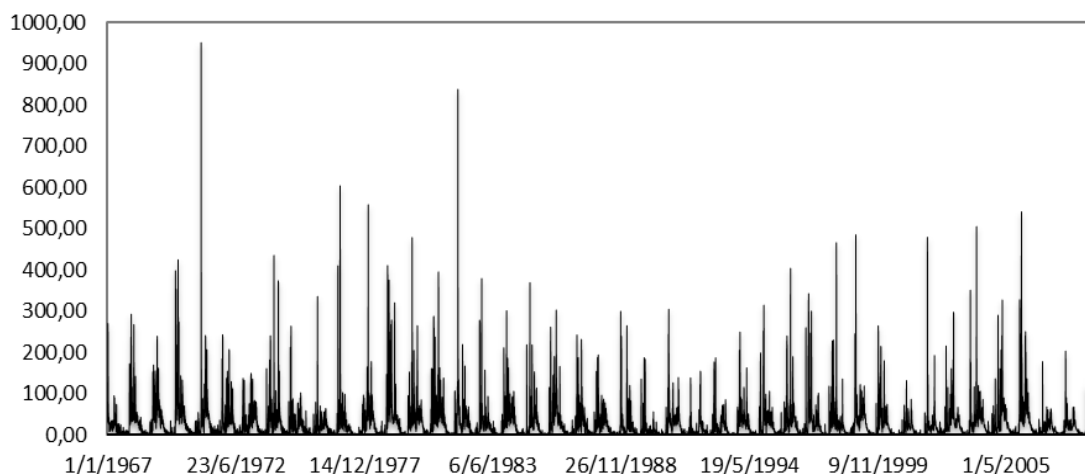
5.1 Σκοπός

Είναι γεγονός πως η σχέση βροχής-απορροής επηρεάζεται άμεσα από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (π.χ. μέγεθος λεκάνης, κλίση εδάφους, κάλυψη γης, χαρακτηριστικά εδάφους, γεωλογικά χαρακτηριστικά). Προκειμένου, λοιπόν, να εξασφαλιστεί πως τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε διάφορες λεκάνες θα είναι άμεσα συγκρίσιμα, έγιναν οι εξής υποθέσεις. Αρχικά, υποθέσαμε πως για κάθε θέση μελέτης, η λεκάνη απορροής έχει δεδομένη έκταση (1000 km²) και έτσι, χρησιμοποιήθηκε ως μέγεθος αναφοράς για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας, η ανηγμένη ως προς την έκταση παροχή, σε μονάδες ισοδύναμου ύψους νερού (mm). Παράλληλα, έπρεπε να διασφαλιστεί ότι η παραγωγή ενέργειας σε κάθε λεκάνη εφαρμογής θα γίνεται σε κοινή βάση. Έτσι, σκόπιμος κρίθηκε ο σχεδιασμός ενός Πρότυπου ΜΥΗΕ, όπως αναλύεται παρακάτω. Το ΜΥΗΕ αναφέρεται ως Πρότυπο, καθώς για κάθε λεκάνη, οι παράμετροι σχεδιασμού του βελτιστοποιούνται, ώστε να έχουμε την μέγιστη παραγωγή ενέργειας, και κατ' επέκταση την μέγιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού.

Προκειμένου να μπορεί να μεγιστοποιηθεί το αξιοποιήσιμο υδατικό δυναμικό, δεν τέθηκε άνω όριο για την εκτίμηση της ισχύος των στροβίλων, το οποίο αποτελεί βασική υπόθεση της εργασίας. Υπενθυμίζεται ότι σε νομικό επίπεδο, για να χαρακτηριστεί ένα υδροηλεκτρικό έργο ως «μικρό» θα πρέπει η συνολική ισχύς του να μην υπερβαίνει τα 15 MW. Από τεχνική ωστόσο σκοπιά, το όριο αυτό δεν έχει νόημα, συνεπώς αγνοήθηκε στον σχεδιασμό.

5.2 Καθορισμός Περιβαλλοντικής Ροής

Απαραίτητο στάδιο για τον σχεδιασμό ενός ΜΥΗΕ είναι ο ακριβής καθορισμός της περιβαλλοντικής ροής, ώστε το έργο να μην διαταράσσει το υδάτινο περιβάλλον. Η περιβαλλοντική, ή αλλιώς οικολογική, παροχή αναφέρεται στην διατήρηση μιας ελάχιστης ροής κατάντη των φραγμάτων, με στόχο την προστασία των κατάντη υδατικών οικοσυστημάτων. Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία για τα ΜΥΗΕ, ως ελάχιστη απαιτούμενη περιβαλλοντική παροχή νερού πρέπει να λαμβάνεται το μέγιστο μεταξύ του 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών (Ιούνιος – Ιούλιος – Αύγουστος) και του 50% της μέσης παροχής του Σεπτεμβρίου, αρκεί να ξεπερνούν το κατώτατο όριο των 30 L/s, εκτός αν απαιτείται τεκμηριωμένα η αύξησή της, λόγω των απαιτήσεων του κατάντη οικοσυστήματος (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2008). Έπειτα, η οικολογική παροχή πρέπει να αφαιρεθεί από τις ημερήσιες παροχές, ώστε να προκύψει το διαθέσιμο υδατικό δυναμικό στην θέση που εξετάζουμε.



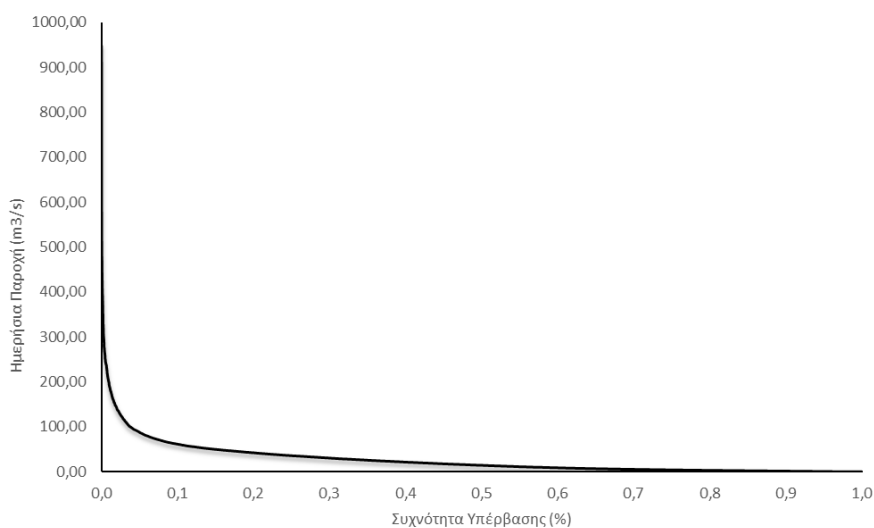
Γράφημα 5.1: Υδατικό διαθέσιμο δυναμικό στην θέση των Κρεμαστών (Δεδομένα: 1967 – 2008)

5.3 Βασικές Παραδοχές

Για τον σχεδιασμό του Πρότυπου ΜΥΗΕ έπρεπε να γίνουν κάποιες παραδοχές. Αρχικά, επιλέχθηκε το ύψος πτώσης, κοινό για όλες τις θέσεις, στα 100 m. Να σημειωθεί πως, κατά τον σχεδιασμό, έγιναν δοκιμές με διάφορα ύψη πτώσης και αυτό κρίθηκε ως βέλτιστο. Παράλληλα, έπρεπε να καθοριστεί ο τύπος και ο αριθμός των στροβίλων. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν δύο στρόβιλοι τύπου Francis, διαφορετικής ισχύος, οι οποίοι θα δουλεύουν συμπληρωματικά, ώστε να καλύπτουν, όσο το δυνατόν, μεγαλύτερο εύρος παροχών. Η χρήση στροβίλων Francis είναι ευρέως διαδεδομένη στα υδροηλεκτρικά έργα, διότι λειτουργούν καλά για μεγάλο εύρος παροχών και ύψους πτώσης, και έτσι, κρίθηκαν κατάλληλοι για την εφαρμογή μας. Η ισχύς για την μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης I_{max} και κατ' επέκταση, η ανώτερη (Q_{max}) και η κατώτατη (Q_{min}) παροχή λειτουργίας κάθε στροβίλου προέκυψαν ύστερα από βελτιστοποίηση, σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφεται παρακάτω.

5.4 Καμπύλη Διάρκειας Παροχής

Αρχικά, καταρτίστηκε η καμπύλη διάρκειας-παροχής (Flow Duration Curve ή, FDC). Αυτή ορίζεται ως το διάγραμμα των τιμών απορροής του ποταμού συναρτήσει της συχνότητας υπέρβασης, που παράγεται από την πλήρη χρονοσειρά των παρατημένων ροών. Η κατασκευή του διαγράμματος βασίζεται στην κατάταξη των ημερήσιων μετρήσεων σε φθίνουσα σειρά και τον υπολογισμό της εμπειρικής συχνότητας υπέρβασης για κάθε τιμή. Σκοπός του διαγράμματος είναι να αναδιοργανώσει αποτελεσματικά το υδρογράφημα από μια σειρά με βάση το χρόνο σε μια σειρά κατά μέγεθος, ώστε να μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί το ποσοστό του χρόνου που η απορροή έχει υπερβεί κάποια συγκεκριμένη τιμή. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ΜΥΗΕ για την εκτίμηση του δυναμικού στην θέση μελέτης. Το διάγραμμα FDC κατασκευάζεται με οριζόντιο άξονα την πιθανότητα υπέρβασης και κατακόρυφο τις τιμές της απορροής.



Γράφημα 5.2: Καμπύλη Διάρκειας Παροχής (FDC)

5.5 Βελτιστοποίηση σχεδιασμού ΜΥΗΕ

Για κάθε στρόβιλο, βελτιστοποιήθηκε η ονομαστική ισχύς του I_{max} , από την οποία προκύπτει η μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης στην οποία θα λειτουργεί. Θεωρήθηκε, επίσης, ότι και οι δύο στρόβιλοι θα εκμεταλλεύονται παροχές κατ' ελάχιστον έως 20% της παροχής που αντιστοιχεί στην ονομαστική παροχή σχεδιασμού τους.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης προϋποθέτει ένα μοντέλο προσομοίωσης, με δεδομένα εισόδου τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου (ισχύς στροβίλων, καμπύλες βαθμού απόδοσης, ύψος πτώσης) και τη χρονοσειρά παροχής.

Σε κάθε χρονικό βήμα (ημέρα), με γνωστό το υδατικό δυναμικό (παροχή που φτάνει στην υδροληψία), καθορίζεται η ποσότητα του νερού που διέρχεται από τον κάθε στρόβιλο, με βάση την ελάχιστη και την μέγιστη παροχή λειτουργίας του καθενός. Για την παροχή αυτή, υπολογίζεται ο συντελεστής απόδοσης κάθε στροβίλου, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 5.6.

Η παραγόμενη ισχύς P_1 , P_2 κάθε στροβίλου και η αντίστοιχη ενέργεια E_1 , E_2 δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P = 9.81 \eta H Q \quad (5.1)$$

$$E = \eta \gamma H V \quad (5.2)$$

Η συνολική ισχύς και αντίστοιχα, η συνολική ενέργεια προκύπτει ως άθροισμα της ισχύος και της ενέργειας κάθε στροβίλου.

Στο πέρας της προσομοίωσης, ως μεγέθη αναφοράς υπολογίζονται η μέση ετήσια ενέργεια σε GWh, το ποσοστό του χρόνου λειτουργίας της μονάδας (%) και το ποσοστό του όγκου που χρησιμοποιείται.

Το σύστημα που σχεδιάσαμε βελτιστοποιείται μεταβάλλοντας την ισχύ στην μέγιστη παροχή εκμετάλλευσης I_{max} κάθε στροβίλου, ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας.

5.6 Εκτίμηση συντελεστή απόδοσης

Ο υπολογισμός του συνολικού συντελεστή απόδοσης μιας υδροηλεκτρικής μονάδας ανάγεται στην εκτίμηση της απόδοσης των επιμέρους ενεργειακών μετασχηματισμών του συστήματος. Η πλήρης εκτίμηση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta = \eta_T \eta_E \eta_{TR} \eta_G \quad (5.3)$$

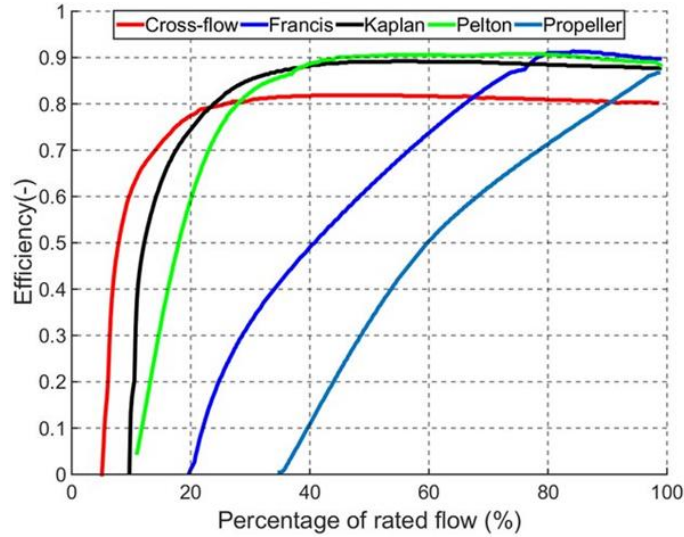
όπου,

- η_T ο συντελεστής απόδοσης των στροβίλων
- η_E ο συντελεστής απόδοσης των ηλεκτρικών δικτύων μεταφοράς
- η_{TR} ο συντελεστής απόδοσης του μετασχηματιστή
- η_G ο συντελεστής απόδοσης της γεννήτριας

Τυπικές τιμές για τους τρεις τελευταίους συντελεστές είναι 0.98, 0.98 και 0.96, αντίστοιχα.

Συνεπώς, ο υπολογισμός του συνολικού συντελεστή απόδοσης συνίσταται, κυρίως, στην εύρεση του συντελεστή απόδοσης των στροβίλων η_T . Κατά τον σχεδιασμό, συνήθως ο συντελεστής αυτός θεωρείται σταθερός, όμως στην πραγματικότητα είναι συνάρτηση του ύψους πτώσης και της παροχής και έτσι, σε κάθε χρονικό βήμα πρέπει να υπολογίζεται εκ νέου, αφού μεταβάλλονται τόσο το ύψος πτώσης (αν και στα ΜΥΗΕ κατά κανόνα είναι μικρή η μεταβολή του) όσο και (κυρίως) η παροχή. Η εγγενής μεταβλητότητα των παροχών που εκμεταλλεύεται ένα ΜΥΗΕ, δεδομένης της αδυναμίας του να αποθηκεύει νερό, προκαλεί διακυμάνσεις στην τιμή του βαθμού απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, ο βαθμός απόδοσης η_T επηρεάζεται όχι μόνο από τον τύπο στροβίλου που επιλέγεται, αλλά και από τη διερχόμενη παροχή. Συνήθως, η σχέση αυτή δίνεται από νομογραφήματα που συσχετίζουν τον συντελεστή απόδοσης με τον τύπο του στροβίλου και τον λόγο Q/Q_{max} (Anagnostopoulos & Papantonis, 2003). Το Γράφημα 5.3 απεικονίζει την ισχυρή εξάρτηση του βαθμού απόδοσης η_T από τον τύπο στροβίλου και το ύψος της ροής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα νομογραφήματα απόδοσης-ροής παρέχονται από τους κατασκευαστές των στροβίλων και καταρτίζονται εξάγοντας δεδομένα από ένα μοντέλο υπό κλίμακα. Λόγω κατασκευαστικών ατελειών δεν μπορεί να υπάρξει ταύτιση με το πρωτότυπο, και συνεπώς, τα νομογραφήματα δεν μπορούν να αποδώσουν με ακρίβεια την σχέση μεταβολής του βαθμού απόδοσης. Παρόλο που χρησιμοποιούνται εμπειρικές διορθώσεις προκειμένου να αντικατοπτρίζεται καλύτερα η απόδοση του πρωτοτύπου, η πραγματική απόδοση είναι άγνωστη, καθώς εξαρτάται από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του σταθμού και αλλαγές λόγω φθοράς, βλάβης και γήρανσης του εξοπλισμού (Paish, 2002). Παρότι η χρήση των νομογραφημάτων είναι η συνήθης πρακτική, οι αβεβαιότητες που προκύπτουν κατά την λειτουργία των υδροηλεκτρικών σταθμών την καθιστούν ανεπαρκή, οδηγώντας σε εσφαλμένες εκτιμήσεις των υδροενεργειακών μεγεθών (Sakki *et al.*, 2020).



Γράφημα 5.3: Καμπύλες βαθμού απόδοσης στροβίλων

Μια αναλυτική εκτίμηση του βαθμού απόδοσης των στροβίλων δίνεται από τους Sakki *et al.* (2020), με βάση τους οποίους η σχέση απόδοσης-ροής μπορεί να προσεγγιστεί με την παρακάτω σχέση:

$$n = n_{min} + \left(1 - \left(1 - \left(\frac{Q - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \right)^a \right)^b \right) (n_{max} - n_{min}) \quad (5.4)$$

Ο παραπάνω τύπος χρησιμοποιεί τα δύο όρια παροχής, τα αντίστοιχα όρια για τον συντελεστή απόδοσης, n_{max} και n_{min} , και δύο παραμέτρους σχήματος, a και b . Ο καθορισμός αυτών των παραμέτρων επηρεάζει την μορφή της καμπύλης, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζει την εμπειρική καμπύλη απόδοσης.

Υπό αυτό το πρίσμα, κατά την προσομοίωση του ΜΥΗΕ, χρησιμοποιήθηκε η εξής αδιαστατοποιημένη σχέση για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης:

$$n = n_{min} + \left(1 - \left(1 - \left(\frac{\frac{Q}{Q_{max}} - \varphi}{1 - \varphi} \right)^a \right)^b \right) (n_{max} - n_{min}) \quad (5.5)$$

όπου $\varphi = \frac{Q_{min}}{Q_{max}}$, που στην περίπτωση μας ελήφθη ίση με 0.20.

Καθώς η παραπάνω σχέση αποτελεί μια εκτίμηση για τον βαθμό απόδοσης των στροβίλων η_T , για την εξαγωγή του συνολικού βαθμού απόδοσης του συστήματος θα πρέπει να λάβουμε πρόσθετες απώλειες ενέργειας λόγω του μετασχηματιστή και της γεννήτριας. Χρησιμοποιείται, τυπικά, μια συνολική διόρθωση, πολλαπλασιάζοντας τα δεδομένα, με μία σταθερή τιμή που κυμαίνεται από 0.88 έως 0.97 (Sakki *et al.*, 2020).

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ ΣΤΑ ΚΡΕΜΑΣΤΑ

6.1 Στατιστική ανάλυση παραμέτρων εφαρμογής

6.1.1 Στατιστική ανάλυση συντελεστών στείρευσης για την ξηρή περίοδο

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι ετήσιες τιμές των συντελεστών στείρευσης και των απορροών Q_0 , δηλαδή οι αρχικές τιμές του μοντέλου πρόγνωσης. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των συντελεστών στείρευσης (Πίνακας 2), στην οποία βασίστηκε η δημιουργία στοχαστικών σεναρίων για τους συντελεστές k .

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικά δεδομένα για τον συντελεστή στείρευσης και την αρχική τιμή του μοντέλου Q_0 ανά έτος

Έτος	Q_0 (mm)	k
1967	1,68	0,007
1968	3,12	0,014
1969	1,72	0,009
1970	2,88	0,013
1971	5,78	0,025
1972	2,51	0,012
1973	4,26	0,018
1974	1,88	0,010
1975	2,21	0,012
1976	1,58	0,009
1977	1,15	0,009
1978	3,10	0,014
1979	3,95	0,014
1980	2,57	0,012
1981	2,76	0,013
1982	3,67	0,015
1983	2,52	0,015
1984	3,90	0,016
1985	3,59	0,018
1986	2,84	0,012
1987	3,27	0,013
1988	2,63	0,016
1989	0,99	0,006
1990	0,31	0,001
1991	2,29	0,010
1992	2,00	0,012
1993	2,68	0,015
1994	2,16	0,013
1995	2,31	0,011

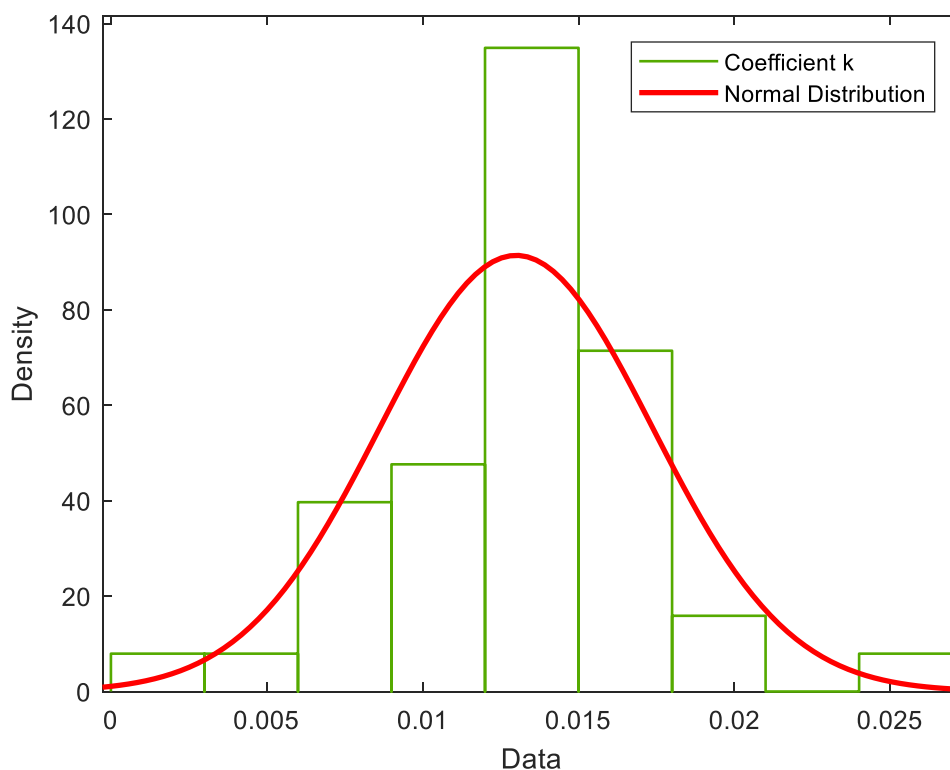
1996	4,07	0,018
1997	2,24	0,013
1998	0,70	0,006
1999	4,53	0,020
2000	2,51	0,019
2001	1,37	0,009
2002	1,35	0,007
2003	3,42	0,017
2004	3,29	0,012
2005	3,26	0,013
2006	3,95	0,016
2007	2,60	0,016
2008	2,54	0,018

Πίνακας 2: Στατιστικά χαρακτηριστικά του συντελεστή στείρευσης για την ξηρή περίοδο

Μέση Τιμή	0,013
Τυπική Απόκλιση	0,004
Συντελεστής μεταβλητότητας	0,336
Ασυμμετρία	-0,088
Κύρτωση	0,9523

Μελετώντας τα αποτελέσματα από την στατιστική ανάλυση των συντελεστών στείρευσης παρατηρούμε πως η μέση τιμή του συντελεστή είναι αρκετά μικρή, συγκριτικά με την μέση τιμή που παρουσιάζεται στα πλημμυρικά επεισόδια, όπως θα διαπιστωθεί σε επόμενη Παράγραφο. Το γεγονός αυτό εύκολα μπορεί να εξηγηθεί, αν αναλογιστούμε την φυσική ερμηνεία του συντελεστή αυτού. Καθώς ο συντελεστής στείρευσης εκφράζει την κλίση του πτωτικού κλάδου ενός πλημμυρογραφήματος, είναι λογικό η κλίση αυτή να είναι πιο ήπια κατά την ξηρή περίοδο παρά κατά την διάρκεια ενός πλημμυρικού επεισοδίου. Κατά τους ξηρούς μήνες, η απορροή ενός ποταμού -συνήθως- συνίσταται στην βασική ροή, η οποία, ως γνωστόν, «κινείται» πιο αργά σε αντίθεση με ένα πλημμυρικό επεισόδιο, όπου η κύρια συνιστώσα του πλημμυρογραφήματος είναι η επιφανειακή απορροή. Προφανώς, η κλίση του πτωτικού κλάδου του πλημμυρογραφήματος μιας λεκάνης εξαρτάται από τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της και έτσι, παρατηρούνται διακυμάνσεις μεταξύ διαφορετικών θέσεων. Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά μιας λεκάνης που διαμορφώνουν την υδρολογική της συμπεριφορά είναι η γεωλογία, η φυτοκάλυψη, η τάξη των υδατορευμάτων, η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, η μέση κλίση κ.ά.

Επίσης, στον Πίνακα 2 παρατηρείται ότι η κατανομή των συντελεστών στείρευσης είναι συμμετρική. Στο Γράφημα 6.1 παρουσιάζεται η προσαρμογή της Κανονικής Κατανομής στα δεδομένα.



Γράφημα 6.1: Ιστόγραμμα πυκνότητας του συντελεστή στείρευσης για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση και προσαρμογή της Κανονικής Κατανομής

6.1.2 Συσχέτιση συντελεστή στείρευσης και αρχικής απορροής

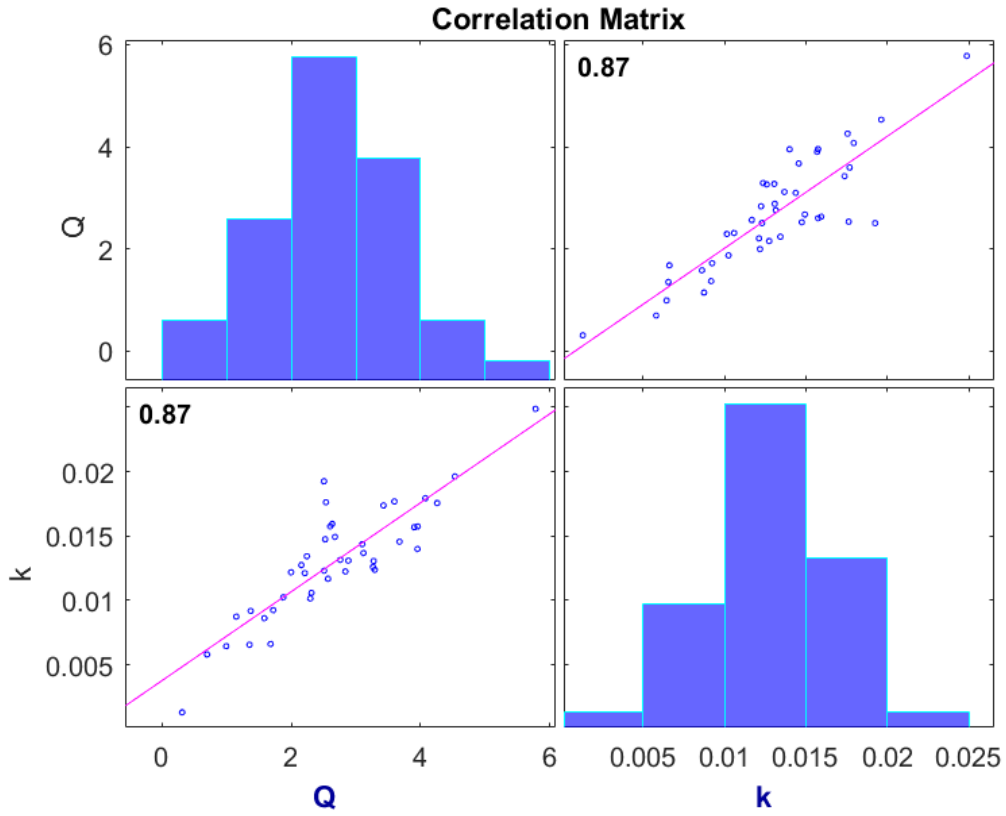
Στο Γράφημα 6.2 παρουσιάζεται ο βαθμός συσχέτισης των τιμών του συντελεστή k με την τιμή Q_0 .

Όπως φαίνεται, υπάρχει ισχυρή εξάρτηση μεταξύ των δύο μεγεθών. Συγκεκριμένα, η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R-squared είναι 0,87. Το R-squared εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας σε ένα σύνολο δεδομένων που εξηγείται από ένα στατιστικό μοντέλο.

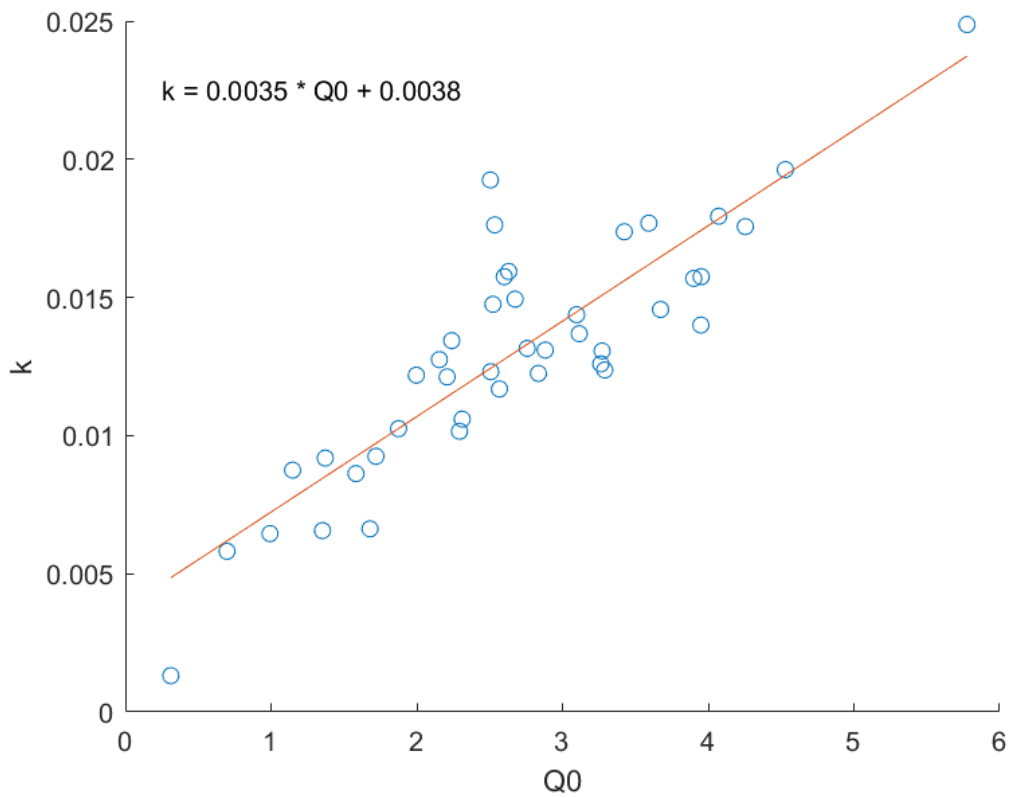
Στο Γράφημα 6.3 παρουσιάζεται το γραμμικό μοντέλο που εκφράζει την σχέση του Q_0 με το k .

Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι:

$$k = 0,0035 Q_0 + 0,0038 \quad (6.1)$$



Γράφημα 6.2: Πίνακας συσχέτισης μεταξύ συντελεστή στείρευσης k και αρχικής τιμής του μοντέλου Q_0 για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση



Γράφημα 6.3: Γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης και συσχέτιση της αρχικής τιμής του μοντέλου Q_0 με τον συντελεστή στείρευσης k για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του γραμμικού μοντέλου πρόβλεψης του k για τις διάφορες αρχικές απορροές Q_0 , καθώς και το σφάλμα που προκύπτει. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αυτού του σφάλματος.

Πίνακας 3: Συγκεντρωτικός πίνακας του μοντέλου του συντελεστή στέρησης για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση

Q_0	k	k_{model}	$error$
1,68	0,0066	0,0096	-0,0030
3,12	0,0137	0,0145	-0,0009
1,72	0,0093	0,0097	-0,0005
2,88	0,0131	0,0137	-0,0006
5,78	0,0249	0,0237	0,0011
2,51	0,0123	0,0124	-0,0001
4,26	0,0176	0,0185	-0,0009
1,88	0,0103	0,0103	0,0000
2,21	0,0121	0,0114	0,0007
1,58	0,0086	0,0092	-0,0006
1,15	0,0088	0,0077	0,0010
3,10	0,0144	0,0145	-0,0001
3,95	0,0140	0,0174	-0,0034
2,57	0,0117	0,0126	-0,0010
2,76	0,0132	0,0133	-0,0001
3,67	0,0146	0,0165	-0,0019
2,52	0,0148	0,0125	0,0023
3,90	0,0157	0,0173	-0,0016
3,59	0,0177	0,0162	0,0015
2,84	0,0123	0,0136	-0,0013
3,27	0,0131	0,0151	-0,0020
2,63	0,0159	0,0129	0,0031
0,99	0,0065	0,0072	-0,0008
0,31	0,0013	0,0049	-0,0035
2,29	0,0102	0,0117	-0,0015
2,00	0,0122	0,0107	0,0015
2,68	0,0149	0,0130	0,0019
2,16	0,0128	0,0112	0,0015
2,31	0,0106	0,0118	-0,0012
4,07	0,0179	0,0178	0,0001
2,24	0,0134	0,0115	0,0019
0,70	0,0058	0,0062	-0,0004
4,53	0,0196	0,0194	0,0002
2,51	0,0193	0,0124	0,0068
1,37	0,0092	0,0085	0,0007
1,35	0,0066	0,0085	-0,0019
3,42	0,0174	0,0156	0,0018

3,29	0,0124	0,0151	-0,0028
3,26	0,0126	0,0150	-0,0025
3,95	0,0158	0,0174	-0,0017
2,60	0,0158	0,0128	0,0030
2,54	0,0176	0,0125	0,0051

Πίνακας 4: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση του σφάλματος του μοντέλου πρόγνωσης του συντελεστή k για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση

	Σφάλμα μοντέλου
Μέση Τιμή	0,000
Τυπική Απόκλιση	0,002

6.1.3 Στατιστική ανάλυση συντελεστών στείρευσης για τα πλημμυρικά επεισόδια

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τον συντελεστή στείρευσης και την αρχική απορροή του μοντέλου για τα πλημμυρικά επεισόδια. Τα παρακάτω μεγέθη προέκυψαν από μη γραμμική βελτιστοποίηση, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην Παράγραφο 4.3.2.2. Η αρχική απορροή Q_0 ταυτίζεται με την μέγιστη τιμή κάθε πλημμυρικού επεισοδίου, ήτοι την παροχή αιχμής.

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των συντελεστών στείρευσης δίνονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις παραμέτρους του μοντέλου πρόγνωσης (Q_0 , k) που προέκυψαν από βελτιστοποίηση για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο

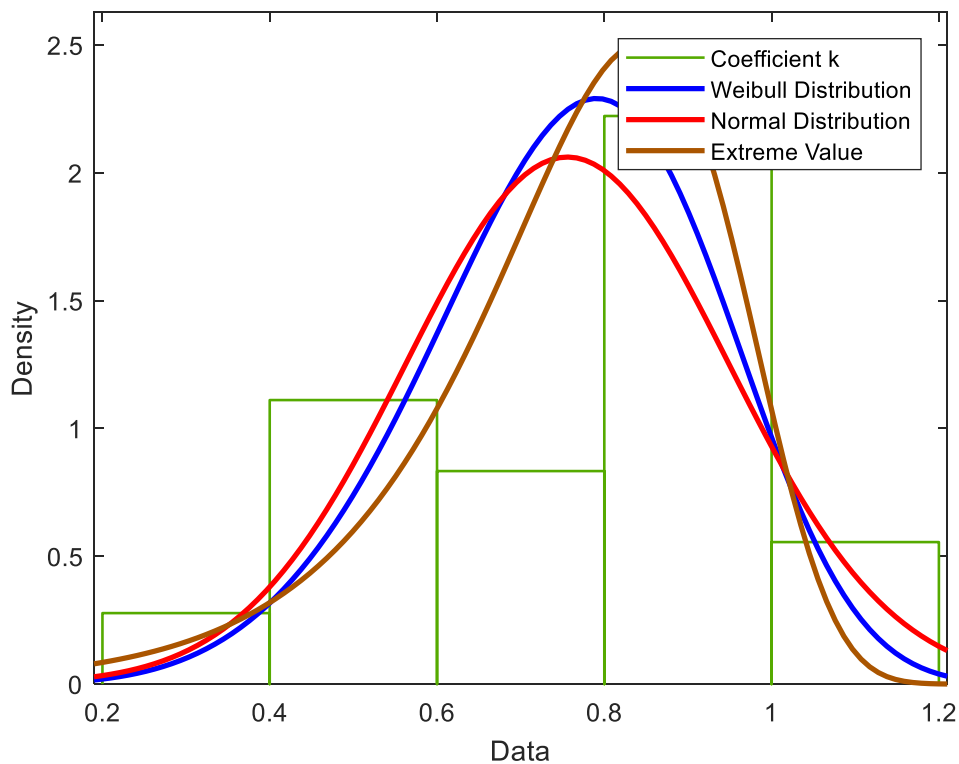
Q_0	k
25,64	0,4891
30,68	0,5825
36,61	0,8372
82,19	0,9479
32,58	0,8351
52,08	0,9196
48,58	1,0262
27,93	0,8141
41,65	0,8688
18,23	0,4977
34,35	0,7651
34,30	0,8206
32,25	0,8535
23,11	0,4378
26,68	0,8748

22,10	0,3807
42,03	0,7903
28,62	0,7961
47,10	1,0148

Πίνακας 6: Στατιστικά χαρακτηριστικά συντελεστή στείρευσης για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση

Μέση Τιμή	0,766
Τυπική Απόκλιση	0,193
Συντελεστής μεταβλητότητας	0,252
Ασυμμετρία	-0,796
Κύρτωση	-0,437

Στο Γράφημα 6.4 παρουσιάζεται η προσαρμογή διαφόρων γνωστών κατανομών στα δεδομένα. Από την στατιστική ανάλυση (Πίνακας 6) γνωρίζουμε ότι το δείγμα παρουσιάζει αρνητική συμμετρία. Παρ' ότι η Κανονική Κατανομή ίσως δεν είναι η βέλτιστη επιλογή, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα επιλέξουμε αυτήν για την συνέχεια της ανάλυσης.



Γράφημα 6.4: Ιστόγραμμα πυκνότητας του συντελεστή στείρευσης για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση και προσαρμογή διαφόρων γνωστών κατανομών

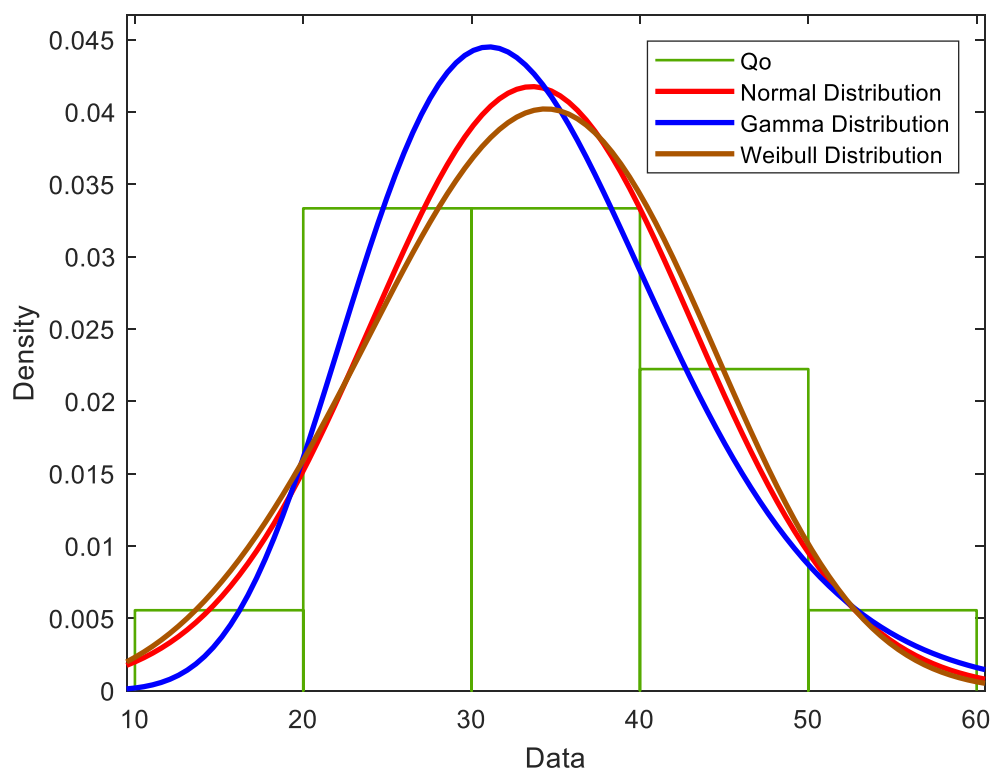
6.1.4 Στατιστική ανάλυση των αρχικών απορροών (βραχυπρόθεσμη πρόγνωση)

Κατά την ανάλυση της μεθοδολογίας για την βραχυπρόθεσμη κλίμακα, απαραίτητη κρίθηκε και η στατιστική ανάλυση των αρχικών απορροών του μοντέλου, Q_0 . Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Στατιστικά χαρακτηριστικά αρχικών απορροών του μοντέλου (Q_0) για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση

Μέση Τιμή	36,14
Τυπική Απόκλιση	14,512
Συντελεστής μεταβλητότητας	0,402
Ασυμμετρία	1,855
Κύρτωση	4,830

Μελετώντας την στατιστική ανάλυση των αρχικών απορροών που σημειώθηκαν κατά τα πλημμυρικά επεισόδια, παρατηρείται έντονη θετική ασυμμετρία. Στο Γράφημα 6.5 παρουσιάζεται η προσαρμογή διαφόρων γνωστών κατανομών στο σύνολο των δεδομένων. Η κατανομή Gamma ενδείκνυται για δεδομένα που παρουσιάζουν θετική ασυμμετρία, ωστόσο θα χρησιμοποιηθεί η Κανονική Κατανομή.



Γράφημα 6.5: Ιστόγραμμα πυκνότητας της αρχικής απορροής Q_0 για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση και προσαρμογή διαφόρων γνωστών κατανομών

6.1.5 Συσχέτιση συντελεστή στείρευσης και αρχικής απορροής

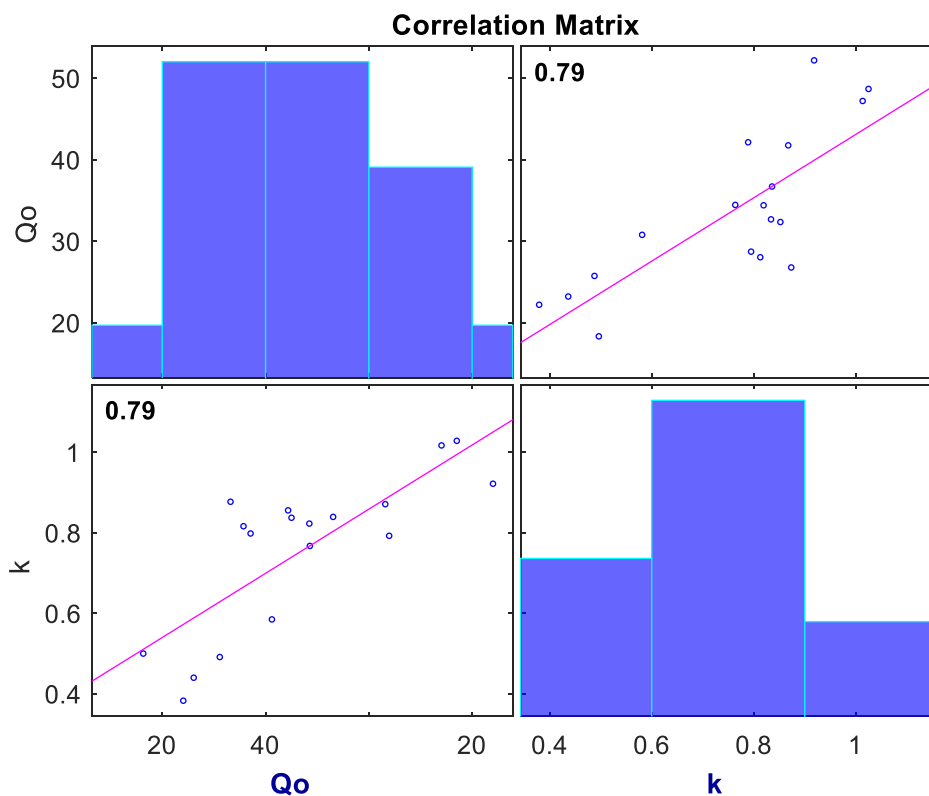
Στο Γράφημα 6.6 φαίνεται η συσχέτιση της αρχικής απορροής του μοντέλου Q_0 με τους συντελεστές στείρευσης k που υπολογίστηκαν για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο. Κατά την ανάλυση έγινε απαλοιφή ενός πλημμυρικού επεισοδίου, καθώς τα χαρακτηριστικά του αλλοίωσαν αυτά του συνόλου.

Όπως εύκολα διαπιστώνεται, υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ του Q_0 και του συντελεστή k , όμως είναι ελαφρώς μικρότερη από την συσχέτιση που διαπιστώθηκε να υπάρχει ανάμεσα στα δύο μεγέθη για την ανάλυση της ξηρής περιόδου. Συγκεκριμένα, ο βαθμός συσχέτισης (R-squared) είναι ίσος με 0,79.

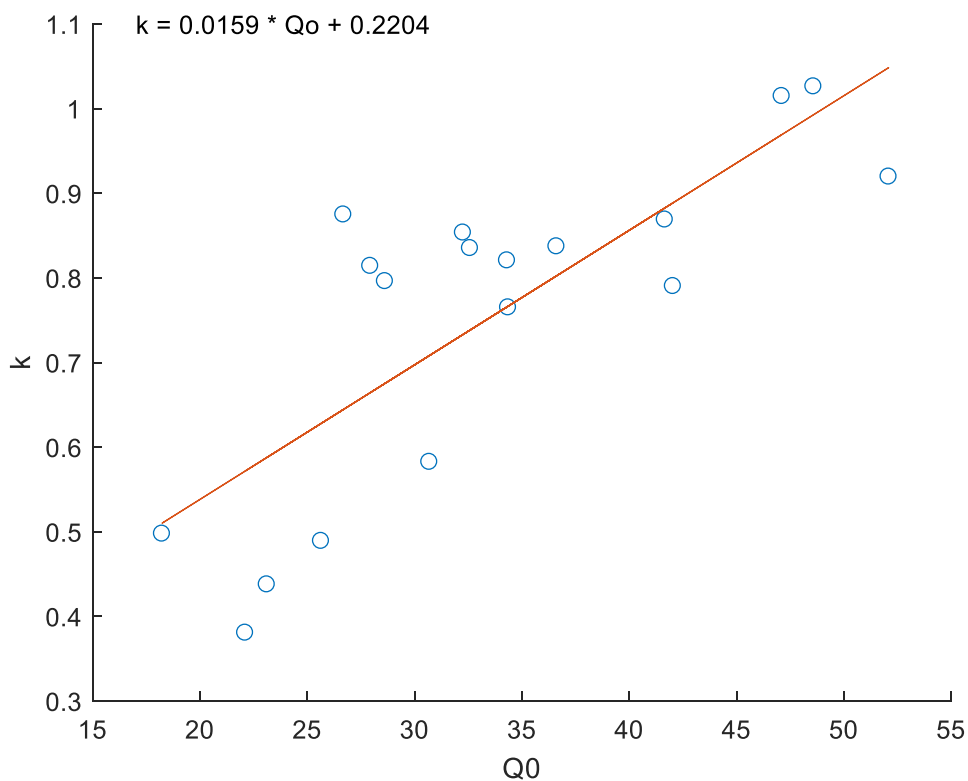
Στο παρουσιάζεται το γραμμικό μοντέλο που εκφράζει την σχέση του Q_0 με το k .

Θεωρώντας γραμμική την σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών, η εξίσωση που περιγράφει την σχέση τους είναι:

$$k = 0,0159 Q_0 + 0,2204 \quad (6.2)$$



Γράφημα 6.6: Πίνακας συσχέτισης μεταξύ συντελεστή στείρευσης και αρχικής απορροής του μοντέλου για την βραχυπρόθεσμη κλίμακα



Γράφημα 6.7: Γράφημα διασποράς συντελεστή στείρευσης και αρχικής απορροής και γραμμική γραμμή τάσης

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του γραμμικού μοντέλου πρόβλεψης του k για τις διάφορες αρχικές απορροές Q_0 , καθώς και το σφάλμα που προκύπτει. Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αυτού του σφάλματος.

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων από την κατάρτιση του μοντέλου του συντελεστή στείρευσης και του σφάλματος για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση

Q_0	k	k_{model}	$error$
25,64	0,4891	0,6041	0,1150
30,68	0,5825	0,6798	0,0973
36,61	0,8372	0,7809	0,0563
32,58	0,8351	0,7107	0,1245
52,08	0,9196	1,1217	0,2021
48,58	1,0262	1,0334	0,0072
27,93	0,8141	0,6374	0,1767
41,65	0,8688	0,8789	0,0100
18,23	0,4977	0,5080	0,0103
34,35	0,7651	0,7408	0,0242
34,30	0,8206	0,7400	0,0806
32,25	0,8535	0,7052	0,1482
23,11	0,4378	0,5695	0,1317
26,68	0,8748	0,6190	0,2558

22,10	0,3807	0,5562	0,1755
42,03	0,7903	0,8867	0,0964
28,62	0,7961	0,6478	0,1483
47,10	1,0148	0,9983	0,0165
25,64	0,4891	0,6041	0,1150

Πίνακας 9: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση του σφάλματος του μοντέλου πρόγνωσης του συντελεστή k για τα πλημμυρικά επεισόδια

	Σφάλμα μοντέλου
Μέση Τιμή	0,097
Τυπική Απόκλιση	0,065

6.2 Αποτελέσματα Προτύπου ΜΥΗΕ

6.2.1 Στατιστική ανάλυση δεδομένων

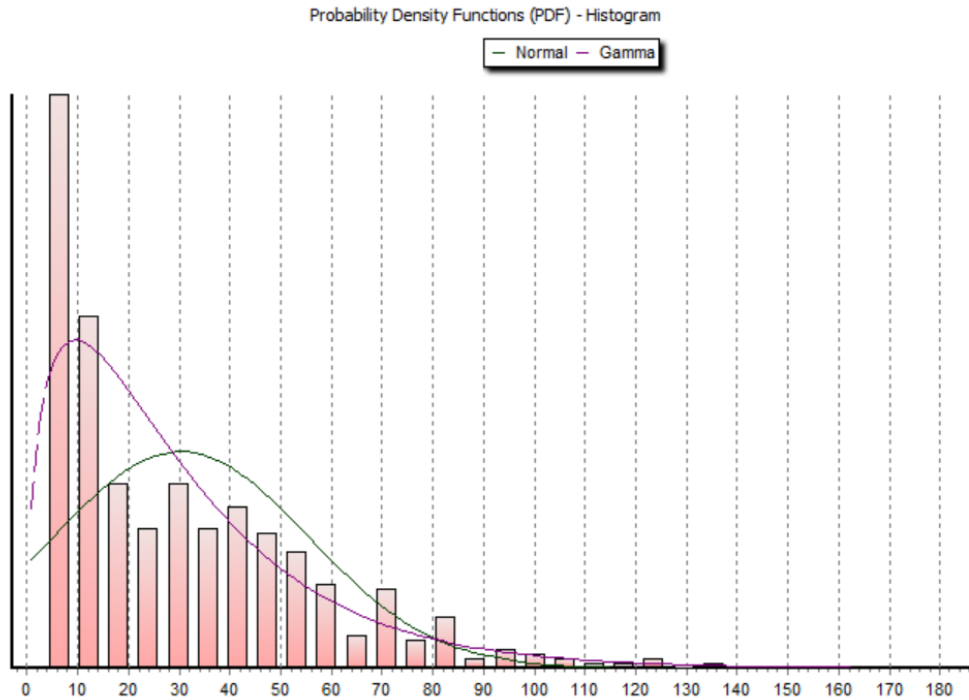
Ως ιστορικά δεδομένα για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι ημερήσιες απορροές της λεκάνης ανάντη του φράγματος των Κρεμαστών και αφορούν την περίοδο 1967-2008. Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10: Στατιστική ανάλυση εισροών

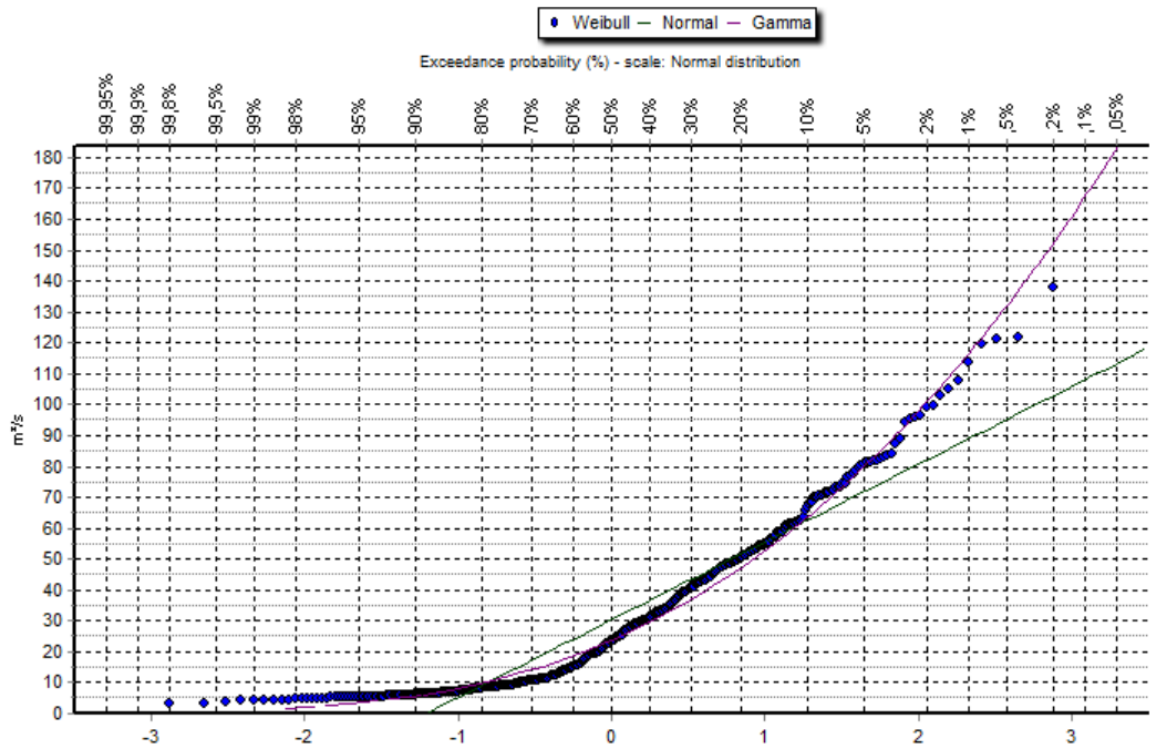
Count data ³	15341
Ποσοστό μη-μηδενικών (%)	100
Μέση Τιμή (m ³ /s)	30,24
Τυπική Απόκλιση (m ³ /s)	40,26
Τρίτη Κεντρική Ροπή	351009
Ασυμμετρία	5,38
Κυρτότητα	-3,03

Στο Γράφημα 6.8 παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) των δεδομένων και στο Γράφημα 6.9 παρουσιάζεται η συχνότητα υπέρβασης της εμπειρικής κατανομής (Weibull), καθώς και της Κανονικής κατανομής και της κατανομής Gamma.

³ Στατιστικός τύπος δεδομένων: οι παρατηρήσεις είναι μη-αρνητικοί ακέραιοι αριθμοί που έχουν προκύψει από καταμέτρηση, και όχι κατάταξη (Wikipedia, 2020)



Γράφημα 6.8: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) σε ιστόγραμμα των εισροών (Υδρογνόμεον)



Γράφημα 6.9: Συχνότητα υπέρβασης (%) – Εμπειρική κατανομή (Weibull), Κανονική Κατανομή, Κατανομή Gamma- (Υδρογνόμεον)

Πίνακας 11: Στατιστικά χαρακτηριστικά εισροών ανά μήνα

Μήνας	Μέση τιμή	Τοπική Απόκλιση	Τρίτη Κεντρική Ροπή	Ασυμμετρία	Κυρτότητα
Οκτώβριος	14,67	12,08	3445,38	1,96	3,94
Νοέμβριος	31,73	15,18	2772,33	0,79	0,74
Δεκέμβριος	57,66	31,46	18973,5	0,61	-0,03
Ιανουάριος	47,58	27,34	16373,4	0,80	0,19
Φεβρουάριος	51,27	24,78	4606,26	0,30	-0,40
Μάρτιος	48,21	20,54	5724,47	0,66	0,44
Απρίλιος	47,16	14,16	1611,83	0,57	0,70
Μάιος	29,34	10,89	697,572	0,54	-0,16
Ιούνιος	14,07	3,72	39,2632	0,76	0,57
Ιούλιος	8,6	1,84	-0,93801	-0,15	-0,66
Αύγουστος	6,72	1,24	0,22047	0,12	-0,77
Σεπτέμβριος	7,05	2,99	52,9042	1,97	5,84

6.2.2 Καθορισμός Περιβαλλοντικής Ροής

Ως ελάχιστη απαιτούμενη περιβαλλοντική παροχή νερού πρέπει να λαμβάνεται το μέγιστο μεταξύ του:

- 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών (Ιούνιος – Ιούλιος – Αύγουστος)
- 50% της μέσης παροχής του Σεπτεμβρίου
- 30 L/s.

Τα παραπάνω μεγέθη υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον Πίνακα 13 και έτσι, η περιβαλλοντική ροή προέκυψε ίση με 3,53 m³/s.

Πίνακας 12: Μέση μηνιαία απορροή (m³/s)

Μήνας	Μέση τιμή (m ³ /s)
Οκτώβριος	14,67
Νοέμβριος	31,73
Δεκέμβριος	57,66
Ιανουάριος	47,58
Φεβρουάριος	51,27
Μάρτιος	48,21
Απρίλιος	47,16
Μάιος	29,34

Ιούνιος	14,07
Ιούλιος	8,60
Αύγουστος	6,72
Σεπτέμβριος	7,05

Πίνακας 13: Κριτήρια επιλογής περιβαλλοντικής ροής (m³/s)

30% I-I-A	2,94
50% Σεπτεμβρίου	3,53
30 L/s	0,03

6.2.3 Παράμετροι σχεδιασμού Πρότυπου Υδροηλεκτρικού Έργου

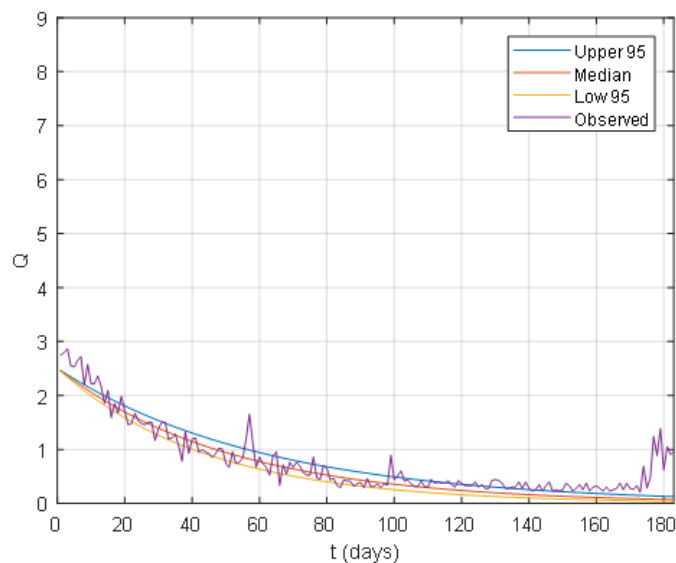
Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται οι βελτιστοποιημένοι παράμετροι του πρότυπου υδροηλεκτρικού έργου. Η διαδικασία σχεδιασμού αναλύεται στο Κεφάλαιο 5.

Πίνακας 14: Παράμετροι σχεδιασμού υδροηλεκτρικού έργου

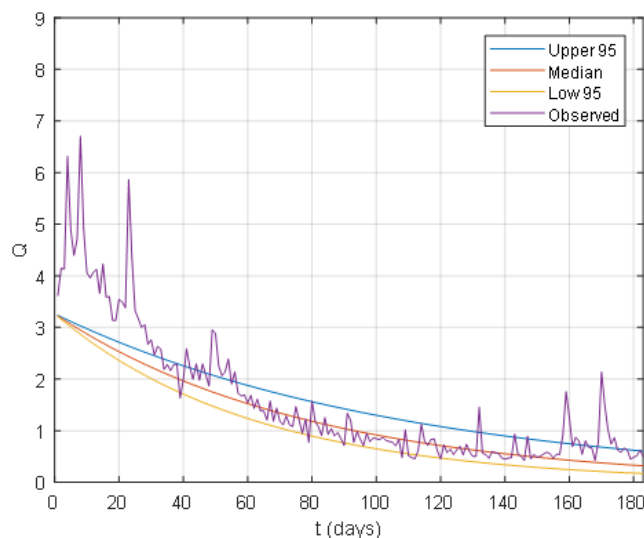
	1	2	Συνολικά
Ισχύς για ονομαστική παροχή (MW)	93,71	19,08	112,78
Βαθμός απόδοσης στη μέγιστη παροχή	0,91	0,91	-
Ονομαστική παροχή Q_{max} (m³/s)	105,29	21,43	126,72
Ελάχιστη παροχή λειτουργίας Q_{min} (m³/s)	21,06	4,29	4,29
Q_{min}/Q_{max}	0,20	0,20	-
Ποσοστό χρόνου λειτουργίας	0,403	0,367	0,737
Ποσοστό όγκου που χρησιμοποιείται (%)	74,59	16,07	90,654
Μέση ετήσια ενέργεια (GWh)	148,96	32,55	181,51

6.3 Διαγράμματα σεναρίων πρόγνωσης

Στην παρούσα υποενότητα, παρουσιάζονται για λόγους εποπτείας ενδεικτικά διαγράμματα των τριών σεναρίων πρόγνωσης παροχής και ενέργειας, όπως αυτά αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Συγκεκριμένα, στο Γράφημα 6.10 και στο Γράφημα 6.11 παρουσιάζονται τα τρία σενάρια πρόγνωσης της απορροής, καθώς και οι πραγματικές παρατηρήσεις. Παρατηρείται πως η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια την βασική ροή, όμως προφανώς δεν υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης τυχαίων πλημμυρικών επεισοδίων.

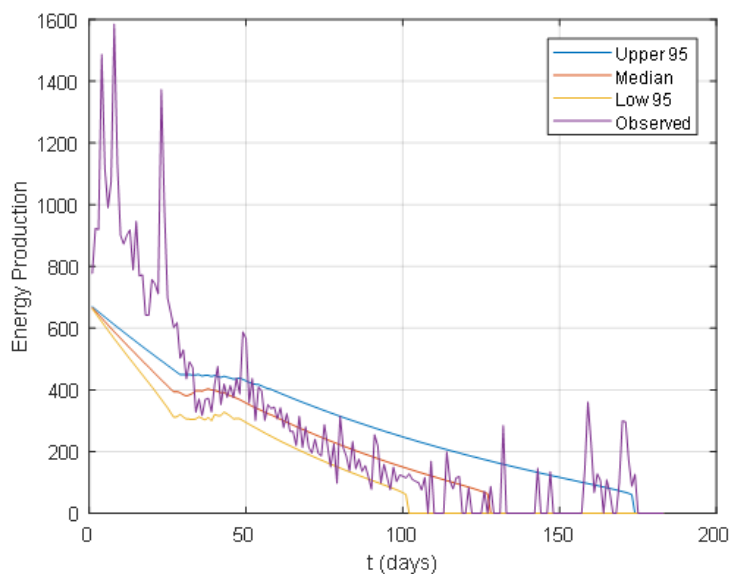


Γράφημα 6.10: Διάγραμμα τριών σεναρίων μακροπρόθεσμης πρόγνωσης της απορροής και πραγματικών παρατηρήσεων (1)



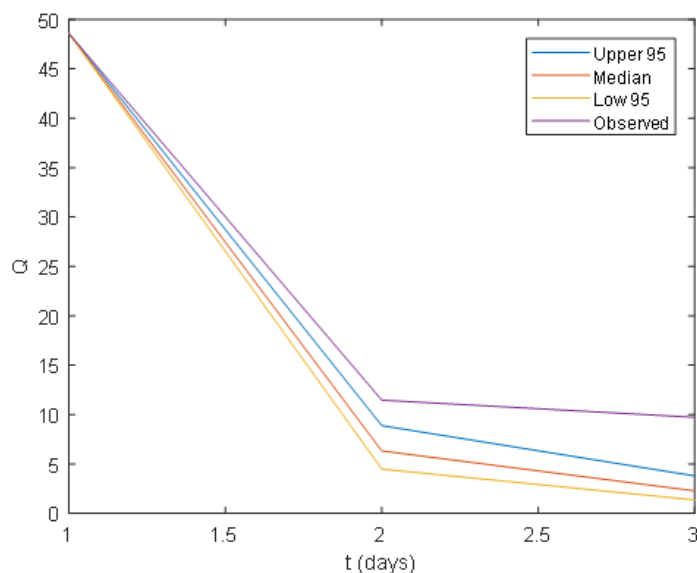
Γράφημα 6.11: Διάγραμμα τριών σεναρίων μακροπρόθεσμης πρόγνωσης της απορροής και πραγματικών παρατηρήσεων (2)

Στο Γράφημα 6.12 παρουσιάζονται τα τρία σενάρια πρόγνωσης της ενέργειας για την ξηρή περίοδο, καθώς και η πραγματική παραγωγή. Καθώς, όπως εξηγήθηκε, τα ΜΥΗΕ λειτουργούν μεταξύ μιας ανώτερης και μιας κατώτερης παροχής, η ενέργεια μηδενίζεται όταν η παρατηρημένη παροχή είναι μικρότερη της κατώτερης τιμής.



Γράφημα 6.12: Διάγραμμα τριών σεναρίων μακροπρόθεσμης πρόγνωσης της ενέργειας και πραγματικής παραγωγής

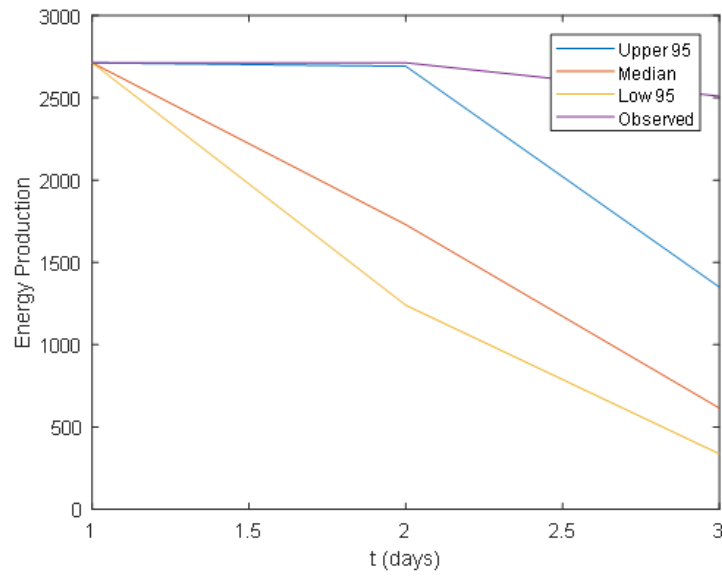
Στο Γράφημα 6.13 παρουσιάζονται τα τρία σενάρια βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της παροχής, καθώς και οι πραγματικές παρατηρήσεις. Παρατηρείται ότι τα σενάρια πρόγνωσης υποεκτιμούν την πραγματική παροχή.



Γράφημα 6.13: Διάγραμμα τριών σεναρίων βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της απορροής και πραγματικών παρατηρήσεων

Στο Γράφημα 6.14 παρουσιάζονται τα τρία σενάρια βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της ενέργειας, καθώς και η πραγματική παραγωγή. Παρατηρείται πως κατά την εκδήλωση ενός πλημμυρικού επεισοδίου, η παρατηρημένη παροχή είναι ίση με την

ανώτερη παροχή λειτουργίας του πρότυπου ΜΥΗΕ και έτσι, η παραγόμενη ενέργεια είναι μέγιστη.



Γράφημα 6.14: Διάγραμμα τριών σεναρίων βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της ενέργειας και πραγματικής παραγωγής

Περισσότερα παραδείγματα παρουσιάζονται στα Παραρτήματα Α και Β.

6.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Καθένα από τα τρία σενάρια πρόβλεψης -συντηρητικό, μετριοπαθές και επιθετικό- αξιολογήθηκε με βάση δύο κριτήρια:

1. την αξιοπιστία εκφρασμένη σε όρους ενέργειας,
2. το χρηματικό κέρδος του παραγωγού ενέργειας.

6.4.1 Επίδοση μοντέλου πρόγνωσης

Η αξιοπιστία, ως έννοια, μπορεί απλά να αποδοθεί ως η συχνότητα αστοχίας ενός συστήματος. Θεωρώντας ως σημείο ελέγχου τις ιστορικές παρατηρήσεις απορροής κάθε χρονικού βήματος, σημειώνεται πόσες φορές το μοντέλο επιτυγχάνει να προβλέψει με ακρίβεια την πραγματική ενέργεια. Βέβαια, στο πλαίσιο μιας ελεύθερης αγοράς ενέργειας, που χρησιμοποιούμε το μοντέλο για να δώσουμε μια προσφορά για την ενέργεια που θα παραχθεί σε επόμενο χρονικό βήμα, θεμιτό είναι να υποεκτιμήσουμε το μέγεθος της ενέργειας, παρά να υποσχεθούμε κάτι μεγαλύτερο, έστω κι αν αυτό δεν είναι το οικονομικά προσφορότερο. Έτσι, δεν υπολογίζεται μόνο πόσες φορές το μοντέλο κατάφερε να προβλέψει με ακρίβεια την πραγματική απορροή, αλλά και πόσες φορές προέβλεψε ίση ή μικρότερη. Ο δείκτης αυτός μπορεί να καθορίσει την αξιοπιστία -με μία διευρυμένη έννοια- του μοντέλου, δηλαδή πόσες φορές η δέσμευση στην αγορά κατάφερε να εκπληρωθεί.

Σε συνέχεια αυτής της ανάλυσης, σκόπιμο θεωρήθηκε να υπολογιστεί και το ποσοστό αστοχίας, καθώς και το μέγεθος της. Με άλλα λόγια, εκτιμήθηκε η ευαισθησία (*sensitivity*) του μοντέλου, δηλαδή στις περιπτώσεις αστοχίας, κατά πόσες μονάδες αστοχεί. Το μέγεθος αυτό έχει σημασία, καθώς διαφορετικές επιπτώσεις θα έχει -σε όρους οικονομικούς, αλλά και αξιοπιστίας στην αγορά- η αστοχία του μοντέλου κατά λίγες μονάδες ενέργειας και στην περίπτωση, σημαντικής υποεκτίμησης της ροής.

6.4.2 Σύγκριση κέρδους κάθε σεναρίου

Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για την αξιολόγηση του μοντέλου πρόγνωσης είναι η σύνδεση των αποτελεσμάτων με την πραγματική αγορά. Διερωτηθήκαμε, λοιπόν, αν ένας παραγωγός ενέργειας από ΜΥΗΕ, που επιλέξει να χρησιμοποιήσει αυτό το μοντέλο, θα έχει πραγματικό κέρδος από την χρήση του.

Προτού αρχίσει η ανάλυση της διαδικασίας, χρήσιμο θα είναι να παρουσιαστεί η κεντρική ιδέα, πάνω στην οποία διαρθρώθηκε η μεθοδολογία. Αρχικά, ορίζεται μια τιμή ορόσημο με την οποία τιμολογείται κάθε μονάδα εγγυημένης ενέργειας που παράγεται. Ως εγγυημένη ορίζεται η ενέργεια την οποία εγγυάται ο υδροηλεκτρικός σταθμός ότι μπορεί να παρέχει ημερησίως. Η ενέργεια αυτή ορίζεται και ως πρωτεύουσα. Κάθε μονάδα πρωτεύουσας ενέργειας, λοιπόν, τιμολογείται σταθερά με μια προκαθορισμένη τιμή ανά MWh, ενώ κάθε MWh πάνω από την εγγυημένη ονομάζεται δευτερεύουσα και τιμολογείται με τιμή χαμηλότερη της πρωτεύουσας. Στην περίπτωση που ο υδροηλεκτρικός σταθμός δεν καταφέρει να παράξει την εγγυημένη ενέργεια, υποχρεούται να καταβάλλει ρήτρα για την λύση του συμβολαίου, η οποία ορίζεται ως εξής. Για κάθε MWh που αδυνατεί να διαθέσει στην

αγορά υποχρεούται να πληρώσει μια τιμή X , αρκετά μεγαλύτερη από την τιμή της πρωτεύουσας ενέργειας. Πάνω στο παραπάνω σύστημα τιμολόγησης βασίστηκε η μεθοδολογία που ακολουθεί.

Θεωρούμε τρεις επενδυτές/παραγωγούς ενέργειας με διαφορετική ανοχή στο ρίσκο της επένδυσης και καθένας επιλέγει μια από τις τρεις προβλέψεις συνοδευόμενη με το αντίστοιχο της ρίσκο. Ως εγγυημένη ενέργεια θεωρούμε σε κάθε χρονικό βήμα την πραγματική απορροή. Για κάθε σενάριο πρόγνωσης υπολογίζουμε σε κάθε βήμα το κέρδος ή την απώλεια του κάθε επενδυτή. Ως τιμή για την πρωτεύουσα ενέργεια ορίστηκε η μονάδα και έτσι, η τιμή της δευτερεύουσας, όπως και η τιμή για την ρήτρα μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει με αυτήν. Σε συνέχεια της ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκαν οι ισχύουσες στην αγορά τιμές.

6.4.3 *Η ιδιαιτερότητα της ξηρής περιόδου*

Όπως είναι αναμενόμενο, η πρόγνωση της ξηρής περιόδου είναι τελείως αφερέγγυα για την ημερήσια (day-to-day) πρόγνωση, καθώς αδυνατεί πλήρως να προβλέψει τα τυχαία, αλλά γενικά μικρά, πλημμυρικά επεισόδια που εμφανίζονται κατά την διάρκεια της περιόδου αυτής. Άλλωστε, δεν είναι αυτός και ο στόχος της ανάλυσης αυτής, αφού επιθυμούμε να προβλέψουμε την ροή στο τέλος της ξηρής περιόδου, αν είναι γνωστή η παροχή του πρώτου δεκαπενθήμερου του Απριλίου. Η πρόβλεψη αυτή είναι χρήσιμη για την Προθεσμιακή Αγορά Ενέργειας. Έτσι, για την ανάλυση στην ξηρή περίοδο, πέρα από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μέρα-μέρα, υπολογίζονται τα παραπάνω μέτρα συνολικά για όλη την περίοδο. Εξετάζεται, λοιπόν, αν οι διακυμάνσεις από μέρα σε μέρα μπορούν να εξομαλυνθούν, αν διευρύνουμε την περίοδο αναφοράς της αξιολόγησης.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα της παραπάνω μεθοδολογίας αξιολόγησης παρουσιάζονται εκτενώς στα Παραρτήματα Α και Β. Στην επόμενη Παράγραφο (6.5) παρουσιάζονται συγκεντρωτικοί πίνακες για κάθε σενάριο για την μακροπρόθεσμη και βραχυπρόθεσμη πρόγνωση.

6.5 Συγκεντρωτικοί πίνακες αξιολόγησης των σεναρίων πρόγνωσης

Στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τριών σεναρίων πρόγνωσης (συντηρητικό, μετριοπαθές και επιθετικό) για την μακροπρόθεσμη κλίμακα αναφορικά με τις συνολικές αστοχίες που σημειώθηκαν, το ποσοστό αστοχίας, την αξιοπιστία και την ευαισθησία. Παρατηρείται πως το συντηρητικό σενάριο πρόγνωσης εμφανίζει την καλύτερη απόδοση. Να σημειωθεί πως, όπως εξηγήθηκε στην Παράγραφο 6.4.1, κατά την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης πρόγνωσης, θεωρήσαμε ως επιτυχία του μοντέλου την εκπλήρωση της δέσμευσης στην αγορά.

Πίνακας 15: Συγκριτικός πίνακας επίδοσης των τριών σεναρίων πρόγνωσης ενέργειας για την μακροπρόθεσμη κλίμακα

	Συντηρητικό σενάριο	Μετριοπαθές σενάριο	Επιθετικό Σενάριο
Συνολικές αστοχίες	542	1613	3784
Ποσοστό αστοχίας	7,05%	20,99%	49,23%
Αξιοπιστία	0,93	0,79	0,51
Ευαισθησία	63,10	75,46	111,04

Στον Πίνακα 16 παρουσιάζεται μια εποπτική αξιολόγηση των τριών σεναρίων μακροπρόθεσμης πρόγνωσης ενέργειας. Συγκεκριμένα, οι τιμές αξιολόγησης προκύπτουν από την αδιαστατοποίηση των κερδών που θα απέδιδε στο σύστημα το κάθε σενάριο πρόγνωσης, μετά από διαίρεση με τα κέρδη που προκύπτουν από τις πραγματικές παρατηρήσεις.

Πίνακας 16: Δείκτης απόκλισης δυνητικού κέρδους για κάθε σενάριο πρόγνωσης ενέργειας για την μακροπρόθεσμη κλίμακα

	Δείκτης απόκλισης
Συντηρητικό σενάριο	-1,35
Μετριοπαθές σενάριο	-36,66
Επιθετικό Σενάριο	-74,92
Πραγματική Ενέργεια	1,00

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται ενδεικτικά μεγέθη της επίδοσης του κάθε σεναρίου βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης. Σε αυτήν την χρονική κλίμακα, έμφαση δίνεται στην αποδοτικότητα του κάθε σεναρίου ως προς την ακρίβεια των προβλεπόμενων τιμών.

Πίνακας 17: Συγκριτικός πίνακας επίδοσης των τριών σεναρίων πρόγνωσης ενέργειας για την βραχυπρόθεσμη κλίμακα

	Συντηρητικό σενάριο	Μετριοπαθές σενάριο	Επιθετικό Σενάριο
Συνολικές αστοχίες	25	31	32
Ποσοστό αστοχίας	52,08%	64,58%	66,67%
Αξιοπιστία	0,48	0,35	0,33
Ευαισθησία	886,62	1563,11	2010,39

Στον Πίνακα 18 παρουσιάζεται μια εποπτική αξιολόγηση των τριών σεναρίων μακροπρόθεσμης πρόγνωσης ενέργειας. Και σε αυτήν την περίπτωση, οι τιμές αξιολόγησης προκύπτουν από την αδιαστατοποίηση των κερδών που θα απέδιδε στο

σύστημα το κάθε σενάριο πρόγνωσης, μετά από διαίρεση με τα κέρδη που προκύπτουν από τις πραγματικές παρατηρήσεις.

Πίνακας 18: Δείκτης απόκλισης δυνητικού κέρδους για κάθε σενάριο πρόγνωσης ενέργειας για την βραχυπρόθεσμη κλίμακα

	Δείκτης απόκλισης
Συντηρητικό σενάριο	-0,49
Μετριοπαθές σενάριο	-0,12
Επιθετικό Σενάριο	0,49
Πραγματική Ενέργεια	1,00

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία καταρτίστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο, βασισμένο στην υδρολογική διεργασία της στείρευσης, για την πρόγνωση των χαμηλών ροών, καθώς και την πρόγνωση της απορροής στον πτωτικό κλάδο ενός πλημμυρικού επεισοδίου με σκοπό, τελικά, την πρόγνωση της ενέργειας που παράγει μια μικρή υδροηλεκτρική μονάδα στις παραπάνω περιπτώσεις. Τα μοντέλα πρόγνωσης, ύστερα, αξιολογήθηκαν με βάση την επίδοσή τους, καθώς και έναν δείκτη, που υποδηλώνει τα περιθώρια κέρδους στην αγορά ενέργειας.

Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε μια μακρά χρονοσειρά εισροών στην λεκάνη του Αχελώου, στην θέση του φράγματος των Κρεμαστών και τα αποτελέσματα που προέκυψαν μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- ✓ Για την ξηρή περίοδο, διαπιστώθηκε στατιστικά ισχυρή γραμμική εξάρτηση μεταξύ της αρχικής τιμής της απορροής του προτεινόμενου μοντέλου και του συντελεστή στείρευσης με αποτέλεσμα να καταστεί δυνατή η κατασκευή στοχαστικών σεναρίων για τον εν λόγω συντελεστή k . Κατά την ανάλυση της συσχέτισης των Q_0 και k που σημειώθηκαν κατά τα πλημμυρικά επεισόδια που εντοπίστηκαν στην χρονοσειρά, παρατηρήθηκε ότι ο βαθμός συσχέτισής τους ήταν μικρότερος, παρ' όλα αυτά, επαρκής ώστε να θεωρηθούν γραμμικά συσχετισμένα.
- ✓ Τα σενάρια πρόγνωσης της παροχής της ξηρής περιόδου φαίνεται να περιγράφουν αρκετά καλά την πτωτική τάση της απορροής, όμως αδυνατούν όπως είναι λογικό να προβλέψουν μεμονωμένα πλημμυρικά επεισόδια, που εκδηλώνονται κατά τους ξηρούς μήνες. Αναφορικά με την ικανότητα πρόγνωσης των απορροών του καθοδικού κλάδου των μεμονωμένων πλημμυρογραφημάτων, παρατηρείται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, το μοντέλο πρόγνωσης υποεκτιμά σημαντικά την απορροή από το δεύτερο κιάλας χρονικό βήμα. Είναι εξαιρετικά πιθανό να οφείλεται για αυτό το γεγονός η επιλογή της αρχικής απορροής Q_0 για το μοντέλο, η οποία στην έρευνα μας, συμπίπτει με την μέγιστη τιμή του επεισοδίου.
- ✓ Όπως ήταν αναμενόμενο, το γεγονός ότι τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα παράγουν ενέργεια για ένα καθορισμένο εύρος παροχών (Q_{\min} - Q_{\max}) εξομάλυνε τις διακυμάνσεις, που παρουσιάστηκαν στην πρόγνωση της παροχής. Πιο συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις που εμφανίστηκαν πλημμυρικά επεισόδια κατά τους ξηρούς μήνες, πολλές φορές η υδροηλεκτρική μονάδα δεν ήταν ικανή να εκμεταλλευτεί όλη την παροχή, με αποτέλεσμα το σφάλμα εκτίμησης της ενέργειας να είναι μικρότερο από το αντίστοιχο σφάλμα, εκτίμησης της παροχής. Το γεγονός αυτό δεν φαίνεται να βελτιώνει την πρόγνωση της ενέργειας για τα πλημμυρικά επεισόδια, όπου στα περισσότερα η ενέργεια που θα παραγόταν σύμφωνα με τα ιστορικά δεδομένα ταυτιζόταν με την μέγιστη ενέργεια που μπορούσε να παράξει το σύστημα, ενώ τα σενάρια πρόγνωσης, από το δεύτερο χρονικό βήμα, προέβλεπαν πτώση της παραγόμενης ενέργειας. Η παρατήρηση αυτή είναι, βεβαίως, φυσική απόρροια του μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, το οποίο στηρίζεται στην

εκθετική μείωση της απορροής στον καθοδικό κλάδο ενός πλημμυρογραφήματος. Μια πρόταση για βελτίωση του μοντέλου για τα πλημμυρικά επεισόδια θα ήταν για παροχές σημαντικά μεγαλύτερες της μέγιστης παροχής λειτουργίας του υδροηλεκτρικού έργου να χρησιμοποιείται μια εναλλακτική σχέση. Βέβαια, το μοντέλο πρόγνωσης ως έχει, θα μπορούσε να φανεί χρήσιμο σε λεκάνες με χαμηλή ροή, ή σε επεισόδια μικρότερης έντασης.

- ✓ Αναφορικά με τα συμπεράσματα από τους συγκεντρωτικούς πίνακες επίδοσης κάθε σεναρίου πρόγνωσης για την ξηρή περίοδο, είναι εμφανές ότι το «συντηρητικό» σενάριο πρόγνωσης παρουσιάζει, συγκριτικά με τα άλλα δύο σενάρια, συντριπτικά μικρότερο ποσοστό αστοχίας, ενώ εμφανίζει, φαινομενικά, τον καλύτερο δείκτη κέρδους. Ωστόσο, ο αρνητικός δείκτης κέρδους υποδηλώνει ότι το μοντέλο πρόγνωσης σίγουρα δεν θα ήταν κερδοφόρο για έναν επενδυτή στην αγορά ενέργειας για ένα συμβόλαιο μελλοντικής εκπλήρωσης. Πιθανώς, το προτεινόμενο μοντέλο πρόγνωσης να έχει μεγαλύτερη χρησιμότητα στην περίπτωση ενός ταμιευτήρα ύδρευσης, ή πολλαπλών χρήσεων, αφού το μείζων ζήτημα σε έναν τέτοιο ταμιευτήρα είναι να εξασφαλίσει με ασφάλεια το νερό που έχει δεσμευτεί, παρά να μεγιστοποιήσει το κέρδος του.
- ✓ Σε αντίθεση με την «κυριαρχία» του «συντηρητικού» σεναρίου πρόγνωσης στις προβλέψεις της ξηρής περιόδου, στην βραχυπρόθεσμη κλίμακα φαίνεται να ξεχωρίζει η επίδοση του «επιθετικού» σεναρίου. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζει το καλύτερο ποσοστό αξιοπιστίας και το μικρότερο ποσοστό αστοχίας. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να τονιστεί ότι η αξιοπιστία για την πρόγνωση της ενέργειας στα πλημμυρικά επεισόδια έχει υπολογιστεί με βάση τις περιπτώσεις, όπου η προβλεπόμενη και η ιστορική ενέργεια ταυτίζονται, σε αντίθεση με την ανάλυση της ξηρής περιόδου, όπου μας ενδιέφερε, κυρίως, η προβλεπόμενη ενέργεια να είναι -τουλάχιστον- μικρότερη της πραγματικής, ώστε να εξασφαλιστεί το μέγιστο περιθώριο κέρδους. Έτσι, το ποσοστό αξιοπιστίας του «επιθετικού» σεναρίου πρόγνωσης μπορεί να χαρακτηριστεί ως αρκετά ικανοποιητικό. Παράλληλα, το «επιθετικό» σενάριο πρόγνωσης εμφανίζει και ένα εντυπωσιακό δείκτη κέρδους. Βέβαια, πρέπει να αναλογιστούμε πως και τα τρία σενάρια υποεκτιμούν την παροχή, καθώς και την ενέργεια, οπότε είναι λογικό να κυριαρχεί το «επιθετικό» σενάριο. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί διαφορετική παροχή ως αρχική απορροή του μοντέλου, το σενάριο που επικρατεί μπορεί να είναι διαφορετικό.
- ✓ Συμπερασματικά, από την παρούσα εργασία στο σύνολό της, προκύπτει πως, εισάγοντας έναν όρο αβεβαιότητας στην ντετερμινιστική εξίσωση του μηχανισμού στείρευσης μιας λεκάνης, προκύπτει ένας ενδιαφέρων τρόπος πρόγνωσης της ροής, και κατά συνέπεια, της ενέργειας σε μια θέση, και παράλληλα, ο εκφυλισμός των πολλαπλών σεναρίων με βάση την προσωπική ανοχή στο ρίσκο, μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για κάποιον επενδυτή στον χώρο της ενέργειας. Ωστόσο, είναι αναγκαία η εφαρμογή και σε άλλες λεκάνες, ώστε να εξακριβωθεί η αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας.

7.1 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και εμπάθυση

Σημεία για περαιτέρω έρευνα τα οποία προκύπτουν από την εργασία είναι τα ακόλουθα:

1. Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε διάφορες λεκάνες και συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τα διάφορα χαρακτηριστικά της, εκάστοτε, εξεταζόμενης λεκάνης.
2. Διερεύνηση εναλλακτικών ορισμών της απορροής Q_0 που χρησιμοποιείται ως αρχική απορροή για το μοντέλο της βραχυπρόθεσμης κλίμακας.
3. Ανάλυση ευαισθησίας στις τιμές της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας, καθώς και της τιμής της ρήτρας.
4. Επέκταση του μοντέλου για την πρόγνωση της παροχής στον ανοδικό κλάδο του πλημμυρογραφήματος και επέκταση της προσέγγισης και σε άλλα χρονικά βήματα, όπως π.χ. ωριαία.
5. Σύγκριση του προτεινόμενου μοντέλου πρόγνωσης με μοντέλα μηχανικής εκμάθησης, τόσο στο πλαίσιο της ακρίβειας των αποτελεσμάτων όσο και της δυνατότητας αξιοποίησής τους από τους χειριστές των ΥΗΕ.
6. Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε ένα εικονικό χρηματιστήριο ενέργειας.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

Aschwanden H, Kan C (1999) Le débit d'étiage Q347—Etat de la question. *Communications hydrologiques* 27.

Castiglioni S, Castellarin A, Montanari A (2009) Prediction of low-flow indices in ungauged basin through physiographical space-based interpolation. *J Hydrol* 378:272–280. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.032>

Castiglioni S, Castellarin A, Montanari A, Skøien JO, Laaha G, Blöschl G (2011) Smooth regional estimation of low-flow indices: physiographical space based interpolation and top-kriging. *Hydrol Earth Syst Sci* 15:715–727. <https://doi.org/10.5194/hess-15-715-2011>

Demirel MC, Booij MJ, Hoekstra AY (2013) Effect of different uncertainty sources on the skill of 10 day ensemble low flow forecasts for two hydrological models. *Water Resour Res* 49:4035–4053. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20294>

Efstratiadis A. (2014) Assessment of environmental flows under limited data availability- Case study of Acheloos River, Greece. *Hydrological Sciences Journal*, 3-4(59), σσ. 731-750

Efstratiadis A & Demetris Koutsoyiannis (2010) One decade of multi- objective calibration approaches in hydrological modelling: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 55:1, 58-78, DOI: [10.1080/02626660903526292](https://doi.org/10.1080/02626660903526292)

Engeland K, Hisdal H (2009) A comparison of low flow estimates in ungauged catchments using regional regression and the HBV-model. *Water Resour Manag* 23:2567–2586. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9397-7>

Eslamian S, Ghasemizadeh M, Biabanaki M, Talebizadeh M (2010) A principal component regression method for estimating low flow index. *Water Resour Manag* 24:2553–2566. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9567-2>

Georgakakos K, Seo, Gupta H, Schaake H, Butts M (2004) Towards the characterization of streamflow simulation uncertainty through multimodel ensembles. *Journal of Hydrology*. Volume 298, Issues 1–4, pages 222–241. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.037>

Gustard A. (1992). Low flow estimation in the United Kingdom. Institute of Hydrology

Iman R.L. and Helton, J.C. (1988) An investigation of uncertainty and sensitivity analysis techniques for computer models. *Risk analysis*, 8(1), pp.71-90.

Institute of Hydrology (1980) Low flow studies. Wallingford

Kroll C, Luz J, Allen B, Vogel R (2004) Developing a watershed characteristics database to improve low streamflow prediction. *J Hydrol Eng.* 9(2):116–125.

Laaha G, Blöschl G (2006a) A comparison of low flow regionalisation methods – catchment grouping. *J Hydrol* 323(1–4):193–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.001>

Laaha G, Blöschl G (2007) A national low flow estimation procedure for Austria. *Hydrol Sci J* 52(4):625–644. DOI: [10.1623/hysj.52.4.625](https://doi.org/10.1623/hysj.52.4.625)

Longobardi A, Vallini P (2008) Baseflow index regionalization analysis in a Mediterranean area and data scarcity. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.011> context: role of the catchment permeability index. *J Hydrol* 355(1–4):63–75.

Ludwig AH, Tasker GD (1993) Regionalization of low-flow characteristics of Arkansas streams. USGS Water Resources Investigations Report:93, 19 pp–4013

Mimikou M., Baltas, E. and Tsihrintzis, V. (2016) Hydrology and Water Resource Systems, CRC Press, Taylor and Francis Group.

Mehaiguene M, Meddi M, Longobardi A, Toumi S (2012) Low flows quantification and regionalization in North West Algeria. *J Arid Environ* 87:67–76. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.07.014>

Merheb M, Moussa R, Abdallah C, Colin F, Perrin C, Baghdadi N (2016) Hydrological response characteristics of Mediterranean catchments at different time scales: a meta-analysis. *Hydrol Sci J* 61(14):2520–2539. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1140174>

Nicolle P, Pushpalatha R, Perrin C, François D, Thiéry D, Mathevet T, Le Lay M, Besson F, Soubeyroux JM, Viel C, Regimbeau F, Andréassian V, Maugis P, Augéard B, Morice E (2014) Benchmarking hydrological models for low-flow simulation and forecasting on French catchments. *Hydrol Earth Syst Sci* 18:2829–2857. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2829-2014>

Paish O. (2002) Small hydro power: technology and current status, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(6), 537–556, [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00006-0)

Pettas A. G., P. Mavritsakis, I. Tsoukalas, N. Mamassis, and A. Efstratiadis, (2020) Empirical metric for uncertainty assessment of wind forecasting models in terms of power production and economic efficiency, European Geosciences Union General Assembly 2020, Geophysical Research Abstracts, Vol. 22, Vienna, EGU2020-8018. [doi:10.5194/egusphere-egu2020-8018](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8018),

Risva K, Nikolopoulos D, Efstratiadis A, Nalbantis I (2017) A simple model for low flow forecasting in Mediterranean streams. *European Water* 57:337–343

Risva K., Nikolopoulos, D., Efstratiadis, A. et al. (2018) A Framework for Dry Period Low Flow Forecasting in Mediterranean Streams. *Water Resour Manage* 32, 4911–4932. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2060-z>

Sakki G.-K., V. Papalamprou, I. Tsoukalas, N. Mamassis, and A. Efstratiadis (2020) Stochastic modelling of hydropower generation from small hydropower plants under limited data availability: from post-assessment to forecasting, European Geosciences Union General Assembly 2020, Geophysical Research Abstracts, Vol. 22, Vienna, EGU2020-8129. [doi:10.5194/egusphere-egu2020-812](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-812)

Sakki G.-K. (2020) Disentangling flow-energy transformations for small hydropower plants: from reverse engineering to uncertainty assessment and calibration. Diploma Thesis, Athens

Smakhtin VU (2001) Low flow hydrology: a review. *J Hydrol* 240(3–4):147–186. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)

Smakhtin VU, Watkins DA, Hughes DA (1995) Preliminary analysis of low-flow characteristics of South African rivers. *Water SA* 21(3):201–210

Štravs L, Brilly M (2007) Development of a low-flow forecasting model using the M5 machine learning method. *Hydrol Sci J* 52(3):466–477. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.3.466>

Tsakiris G, Nalbantis I, Cavadias G (2011) Regionalization of low flows based on Canonical Correlation Analysis. *Adv Water Resour* 34(7):865–872. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.04.007>

Veza P, Comoglio C, Rosso M, Viglione A (2010) Low flows regionalization in North-Western Italy. *Water Resour Manag* 24(14):4049–4074. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9647-3>

Vogel RM, Kroll CN (1992) Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water Resour Res* 28(9):2451–2458. <https://doi.org/10.1029/92WR01007>

Yu PS, Yang TC, Liu CW (2002) A regional model of low flow for Southern Taiwan. *Hydrol Process* 16(10): 2017–2034. <https://doi.org/10.1002/hyp.399>

Ελληνική

Κουτσογιάννης, Δ. (2017) Σημειώσεις Στοχαστικών Μεθόδων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2017.

Κουτσογιάννης, Δ., Ξανθόπουλος Θ (1999) Τεχνική Υδρολογία (3η Έκδοση εκδ.), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Μαμάσης Ν., Α. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης (2018) Σημειώσεις μαθήματος «Ανανεώσιμη Ενέργεια και Υδροηλεκτρικά Έργα. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Μαμάσης Ν., Α. Ευστρατιάδης (2018) Σημειώσεις μαθήματος: Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2018

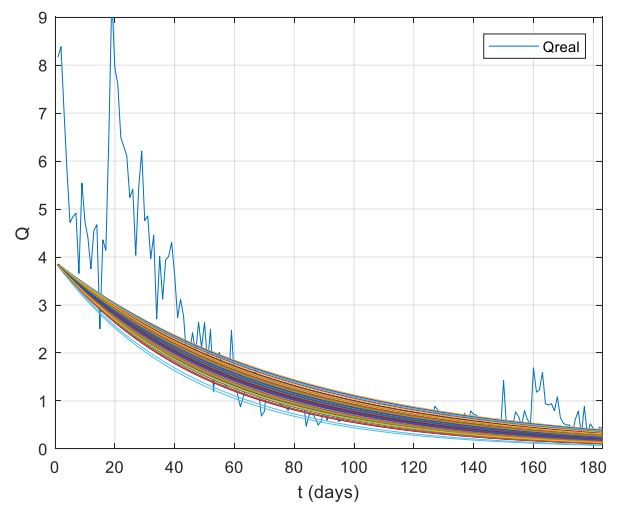
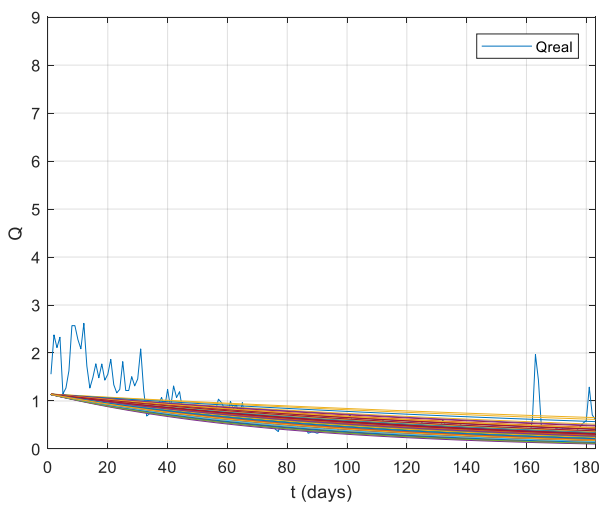
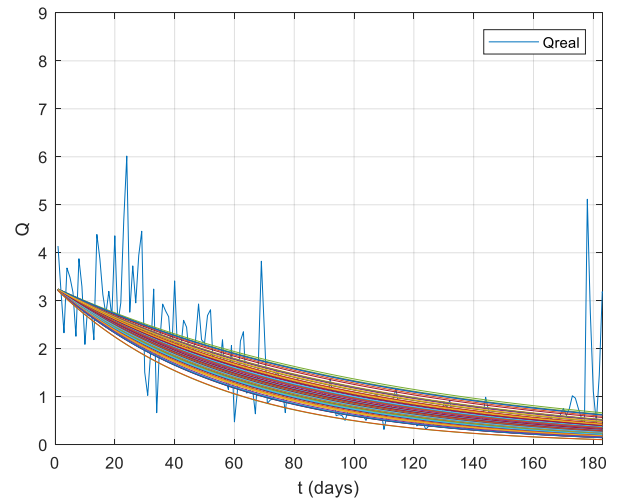
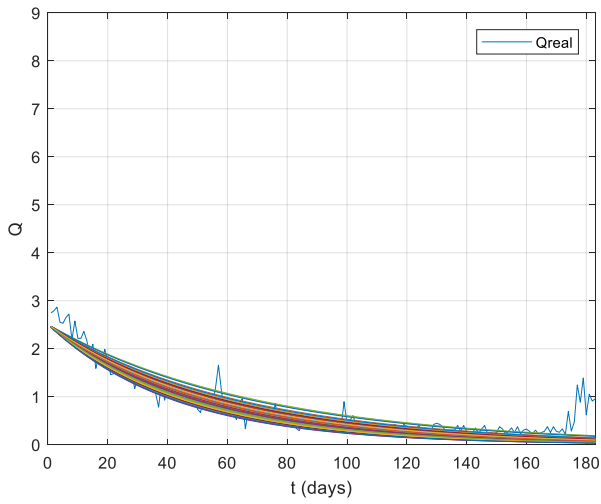
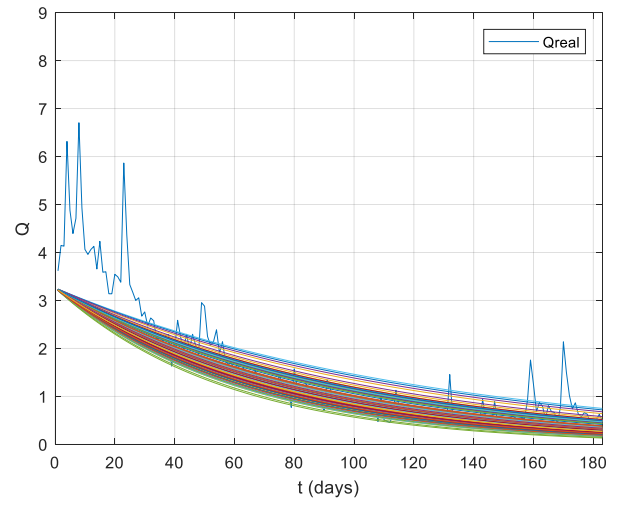
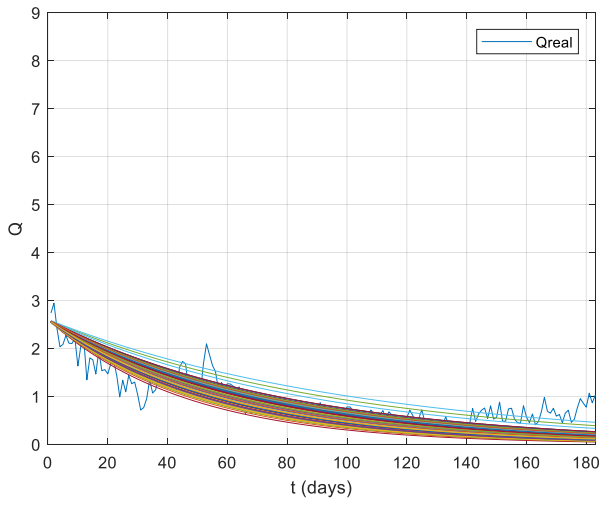
Μαστροθεόδωρος Θ. (2013) Εφαρμογή της προσομοίωσης Monte Carlo για την παραγωγή πλημμυρικών υδρογραφημάτων σε μεσογειακές λεκάνες. Διπλωματική εργασία, Αθήνα.

Μιμίκου Μ. Α, Μπαλτάς Ε. Α, (2018) Τεχνική Υδρολογία. Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα

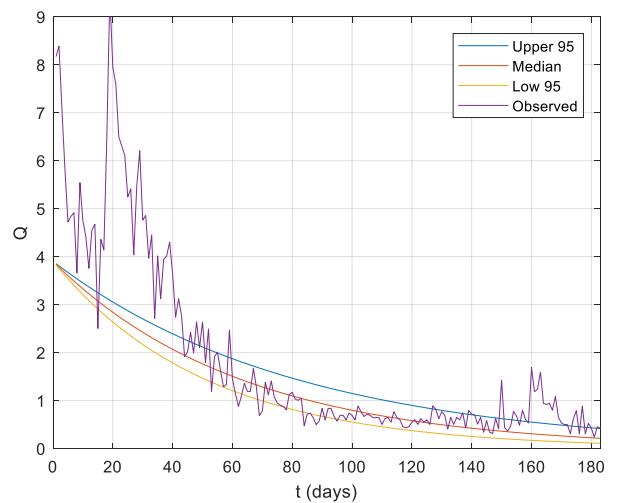
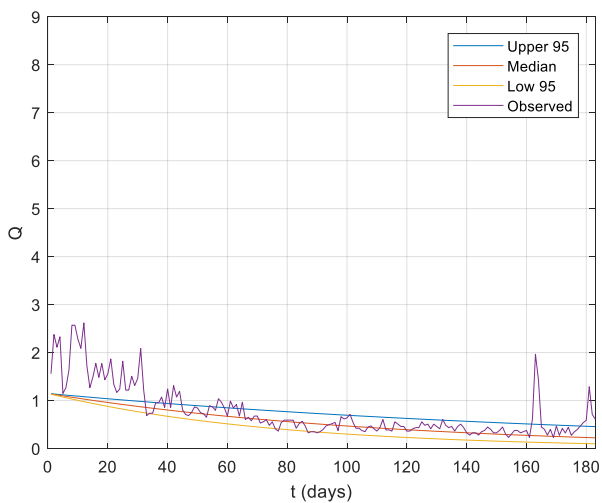
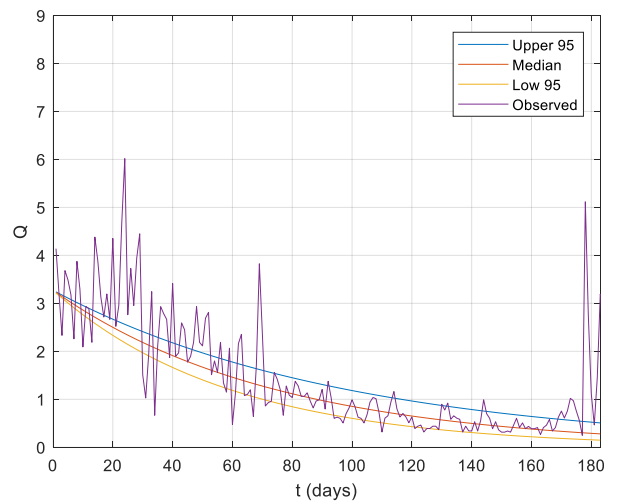
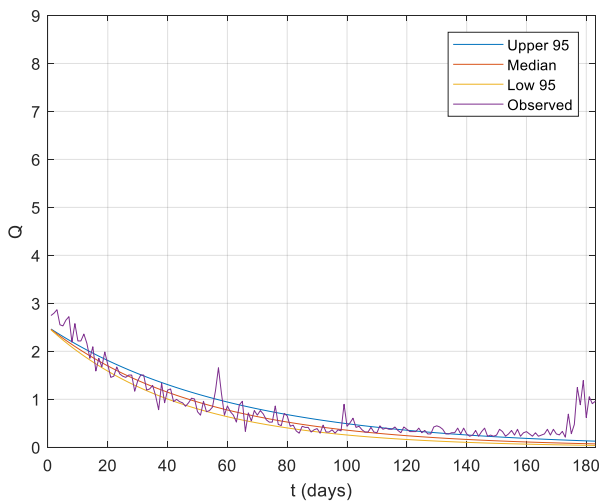
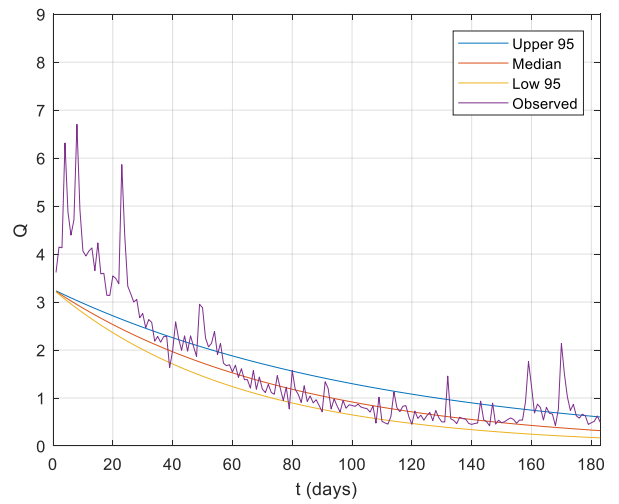
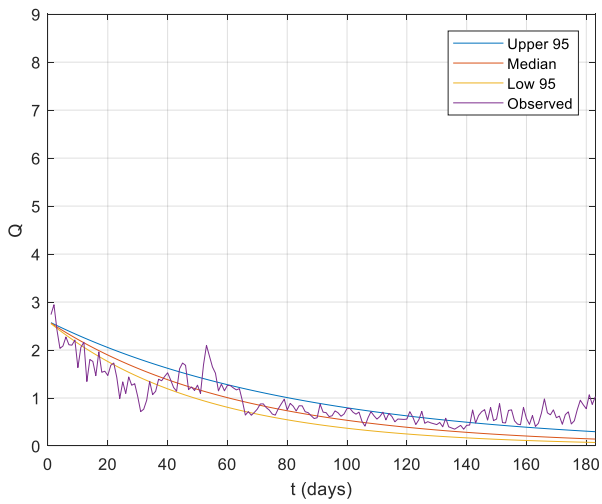
Παπαντώνης Δ.Ε. (2018) Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα

Ρίσβα Κ (2016) Ανάπτυξη μοντέλου εκτίμησης χαμηλών ροών σε λεκάνες απορροής της περιοχής της Μεσογείου. Διπλωματική εργασία, Αθήνα

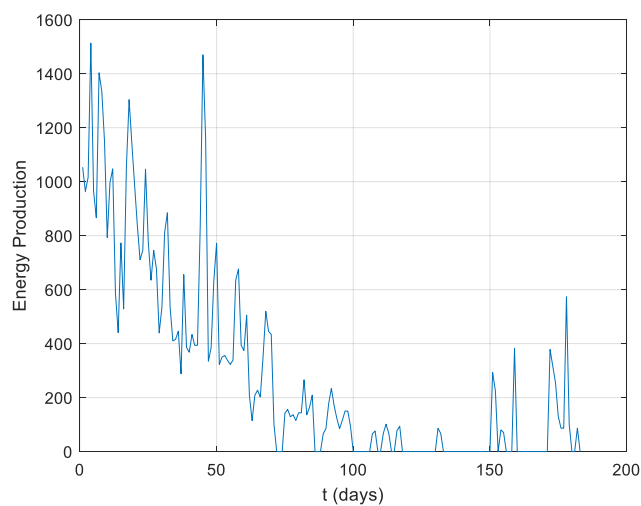
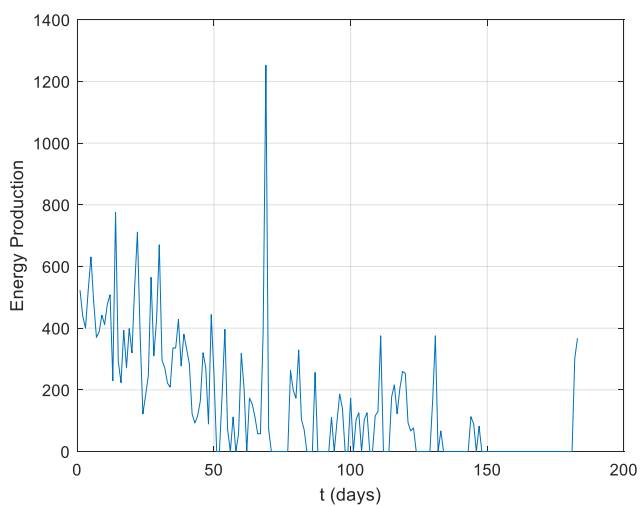
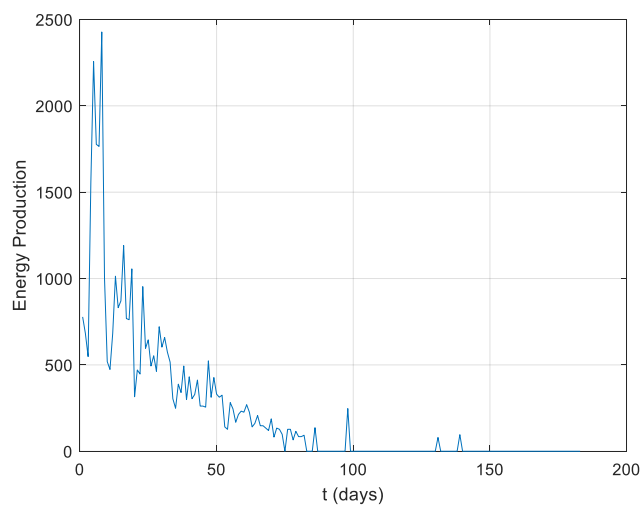
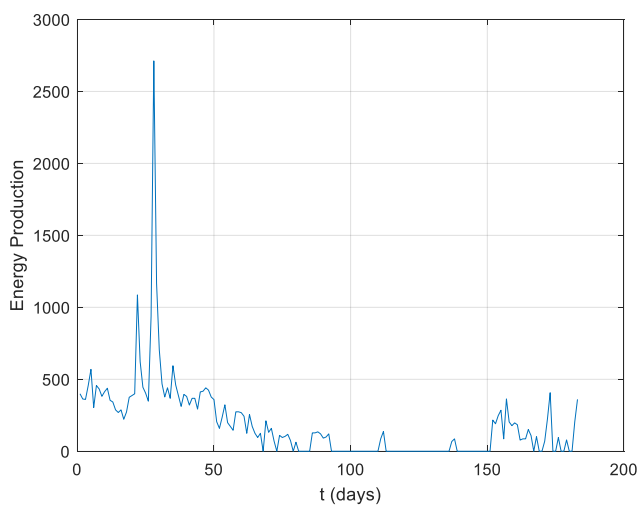
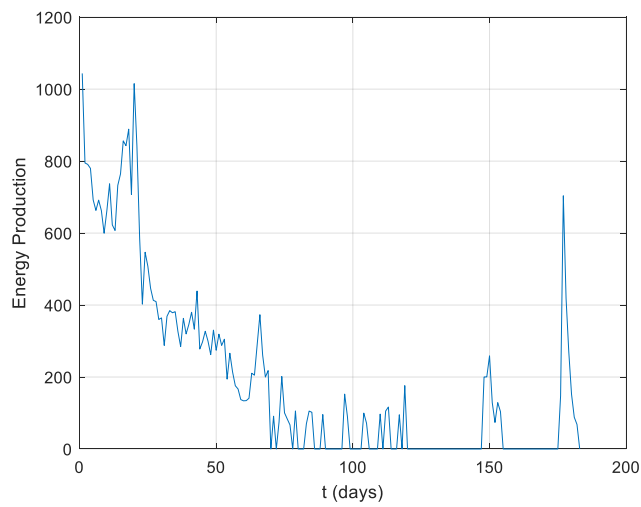
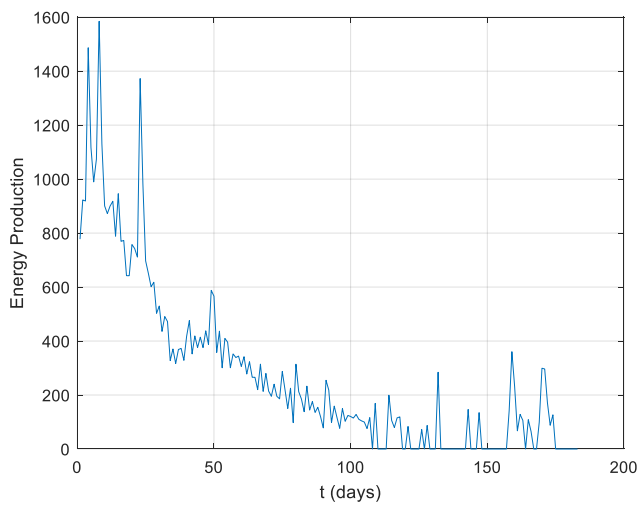
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Μακροπρόθεσμη πρόγνωση



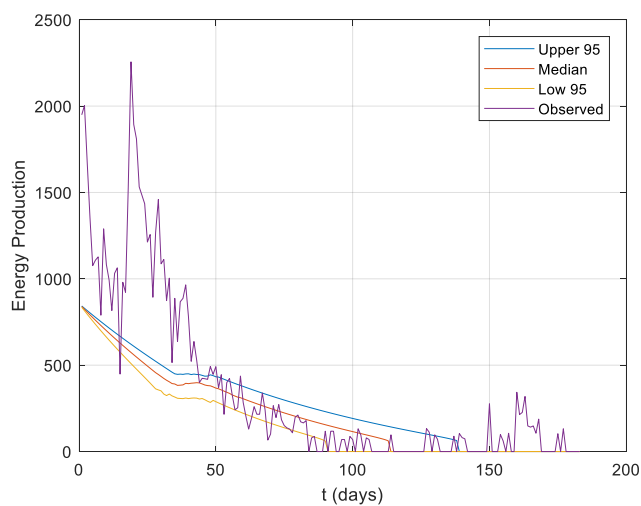
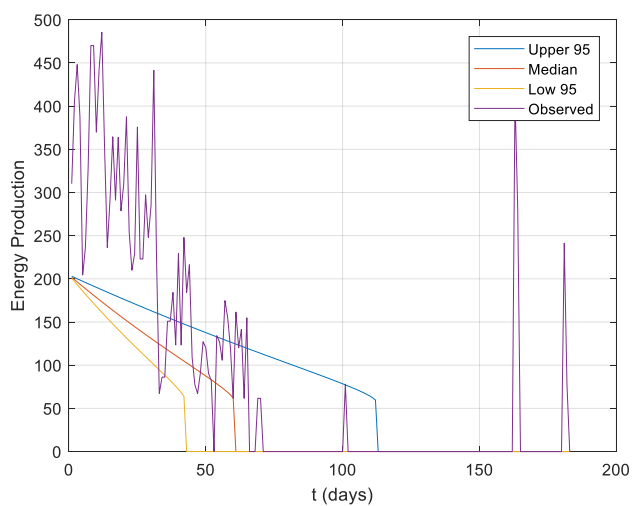
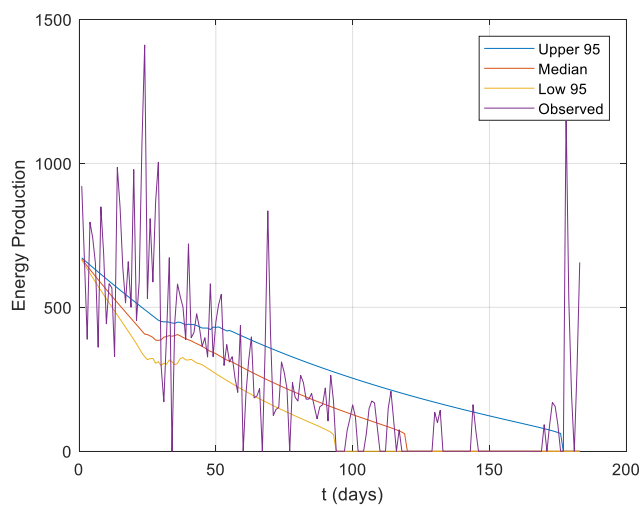
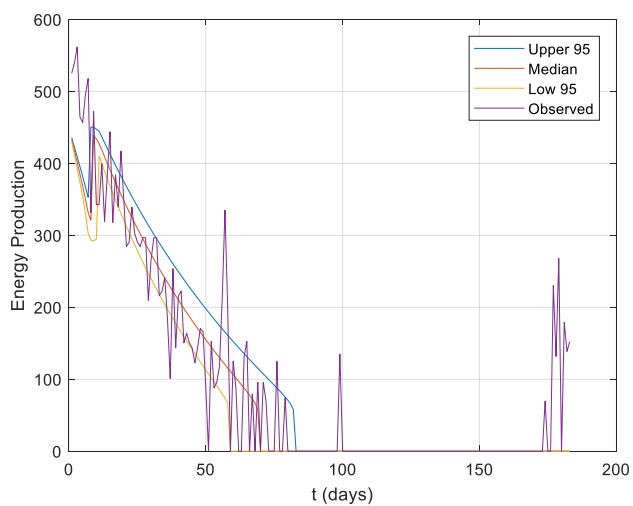
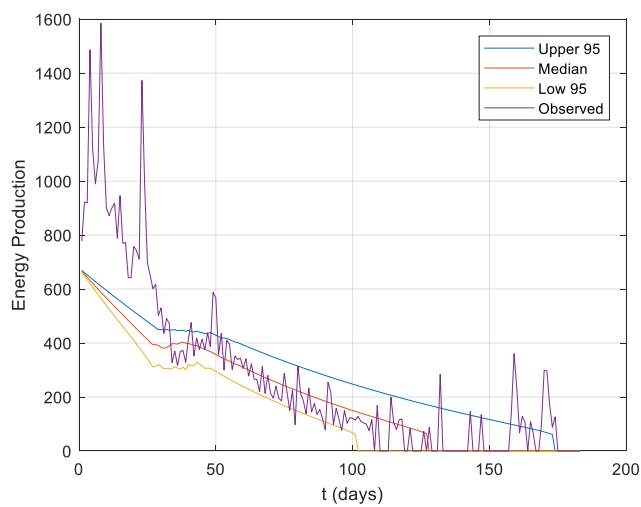
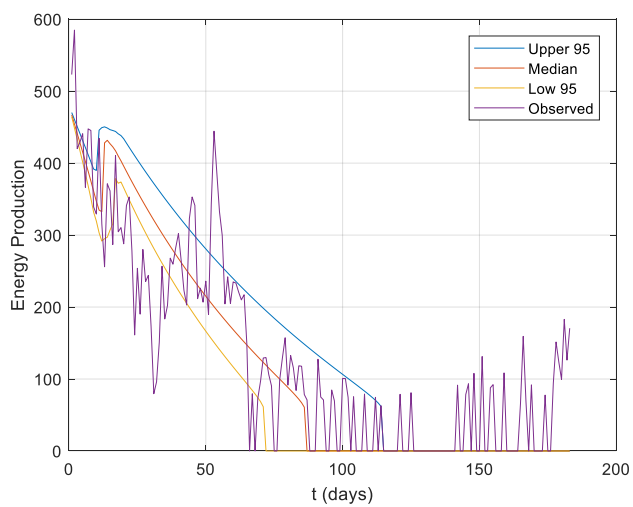
Γράφημα Α. 1: Σενάρια απορροής (mm) για χαρακτηριστικά έτη



Γράφημα Α. 2: Σενάρια απορροής (mm) με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%,50% και 95% για χαρακτηριστικά έτη



Γράφημα Α. 3: Παραγωγή ενέργειας (MWh) από ιστορικές απορροές για χαρακτηριστικά έτη



Γράφημα Α. 4: Σενάρια παραγωγής ενέργειας (MWh) με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%, 50% και 95% για χαρακτηριστικά έτη

Πίνακας Α. 1: Συγκεντρωτικός πίνακας επίδοσης του «συντηρητικού» σεναρίου πρόγνωσης ανά έτος για την μακροπρόθεσμη κλίμακα

<i>Έτος</i>	<i>Αστοχίες</i>	<i>Αξιοπιστία</i>	<i>Εναισθησία</i>
1967	14	0,92	87,49
1968	16	0,91	47,18
1969	1	0,99	86,83
1970	16	0,91	60,30
1971	33	0,82	108,56
1972	14	0,92	80,32
1973	26	0,86	76,18
1974	2	0,99	59,93
1975	35	0,81	80,87
1976	9	0,95	64,16
1977	3	0,98	11,65
1978	18	0,90	63,79
1979	14	0,92	61,22
1980	2	0,99	50,52
1981	5	0,97	47,12
1982	21	0,89	64,96
1983	29	0,84	56,57
1984	13	0,93	60,76
1985	14	0,92	48,29
1986	13	0,93	64,19
1987	14	0,92	124,58
1988	29	0,84	46,36
1989	0	1,00	-
1990	0	1,00	-
1991	4	0,98	54,34
1992	5	0,97	66,91
1993	18	0,90	63,39
1994	15	0,92	61,00
1995	11	0,94	64,28
1996	19	0,90	39,58
1997	3	0,98	72,32
1998	0	1,00	-
1999	11	0,94	35,78
2000	17	0,91	32,90
2001	4	0,98	44,60
2002	1	0,99	15,76
2003	15	0,92	35,55
2004	11	0,94	61,44
2005	4	0,98	24,91
2006	8	0,96	58,16
2007	27	0,85	67,35
2008	28	0,85	41,33

Πίνακας Α. 2: Συγκεντρωτικός πίνακας επίδοσης του «μετριοπαθούς» σεναρίου πρόγνωσης ανά έτος για την μακροπρόθεσμη κλίμακα

<i>Έτος</i>	<i>Αστοχίες</i>	<i>Αξιοπιστία</i>	<i>Εναισθησία</i>
1967	46	0,749	97,02
1968	55	0,699	82,86
1969	20	0,891	53,40
1970	49	0,732	81,40
1971	51	0,721	132,68
1972	28	0,847	78,97
1973	47	0,743	103,60
1974	13	0,929	87,13
1975	52	0,716	102,79
1976	25	0,863	75,05
1977	9	0,951	28,38
1978	49	0,732	84,32
1979	51	0,721	82,70
1980	20	0,891	80,15
1981	24	0,869	62,62
1982	57	0,689	87,18
1983	51	0,721	69,60
1984	54	0,705	79,65
1985	49	0,732	67,18
1986	52	0,716	74,33
1987	52	0,716	92,67
1988	48	0,738	69,49
1989	0	1,000	-
1990	0	1,000	-
1991	33	0,820	60,41
1992	21	0,885	70,01
1993	45	0,754	78,24
1994	35	0,809	81,53
1995	55	0,699	76,75
1996	53	0,710	72,20
1997	22	0,880	64,69
1998	0	1,000	-
1999	55	0,699	60,44
2000	36	0,803	53,99
2001	23	0,874	65,08
2002	35	0,809	66,05
2003	42	0,770	66,40
2004	44	0,760	54,07
2005	64	0,650	51,13
2006	54	0,705	49,27
2007	46	0,749	78,73
2008	48	0,738	51,98

Πίνακας Α. 3: Συγκεντρωτικός πίνακας επίδοσης του «επιθετικού» σεναρίου πρόγνωσης ανά έτος για την μακροπρόθεσμη κλίμακα

<i>Έτος</i>	<i>Αστοχίες</i>	<i>Αξιοπιστία</i>	<i>Εναισθησία</i>
1967	120	0,34	141,76
1968	106	0,42	111,86
1969	81	0,56	94,07
1970	151	0,17	133,33
1971	77	0,58	152,10
1972	80	0,56	89,63
1973	92	0,50	126,62
1974	68	0,63	97,13
1975	80	0,56	119,98
1976	94	0,49	104,39
1977	68	0,63	73,90
1978	95	0,48	131,81
1979	129	0,30	129,76
1980	74	0,60	113,80
1981	99	0,46	102,25
1982	114	0,38	135,06
1983	92	0,50	93,41
1984	85	0,54	126,83
1985	80	0,56	104,17
1986	138	0,25	109,40
1987	136	0,26	136,60
1988	83	0,55	100,10
1989	38	0,79	60,76
1990	0	1,00	-
1991	105	0,43	111,99
1992	89	0,51	103,42
1993	82	0,55	107,46
1994	78	0,57	102,87
1995	104	0,43	114,49
1996	89	0,51	106,24
1997	78	0,57	101,59
1998	0	1,00	-
1999	96	0,48	112,12
2000	66	0,64	69,23
2001	97	0,47	92,42
2002	84	0,54	88,37
2003	94	0,49	111,65
2004	126	0,31	132,28
2005	122	0,33	114,68
2006	112	0,39	94,69
2007	99	0,46	90,00
2008	83	0,55	87,94

Πίνακας Α. 4: Συγκεντρωτικά έσοδα (σε μονάδες) ανά έτος

Έτος	Συγκεντρωτικά έσοδα (σε μονάδες) ανά έτος			
	Επιθετικό Σενάριο	Μετριοπαθές σενάριο	Συντηρητικό σενάριο	Ιστορικά δεδομένα
1967	-17970,73569	-57867,68695	-83672,38173	48948
1968	25677	6634,954288	-17055,35536	36744
1969	-37711,22847	-61248,51141	-77877,20966	44717
1970	23478,91673	-3175,646185	-22863,05663	37642
1971	20232,88855	7094,506762	-8476,938608	45450
1972	-92007,05098	-114252,112	-134473,3346	70700
1973	-11306,28999	-30851,9688	-52954,91418	57114
1974	-132990,1426	-155517,4615	-174571,7904	78033
1975	3570,430644	-11610,14287	-22893,51747	27720
1976	-27038,21561	-47551,76178	-61373,44629	35670
1977	-6246,212438	-16792,88813	-25436,47698	15787
1978	-33866,54259	-48981,31543	-66862,90819	52432
1979	20305,82324	-5314,924189	-29887,51448	52841
1980	-68564,30606	-100415,6152	-124545,2318	69000
1981	-26150,57612	-47256,19133	-63508,68037	50742
1982	-1682,201806	-20601,23038	-41892,6172	53444
1983	17983,09517	2845,482987	-13817,01219	25542
1984	-36188,40997	-52068,03249	-76335,28846	64533
1985	-2922,987175	-12519,52064	-29621,30712	40605
1986	10963,25714	-10251,2559	-35464,61879	42154
1987	14476,32488	-10697,65481	-36497,15918	45590
1988	11110,58311	3238,541279	-6788,636901	23164
1989	-90040,50407	-111501,9786	-120139,4321	45675
1990	-48777,3385	-48777,3385	-48777,3385	16259
1991	-42855,3564	-68565,08312	-100420,8445	59917
1992	-21048,72126	-41153,30277	-52835,56582	37816
1993	-5116,921941	-15386,6956	-26326,03494	33186
1994	-1172,592406	-15007,868	-27455,63783	30114
1995	-20550,63185	-43668,98571	-63271,16708	45811
1996	5569,037925	-10902,26488	-29101,09546	47021
1997	-33384,51282	-47588,93763	-60165,93335	41745
1998	-98637,12797	-100752,9282	-101298,3934	34109
1999	26948,00453	13050,00953	-7123,145879	43026
2000	10802,61007	5721,324204	-1555,422948	18504
2001	-23153,32078	-33613,31941	-45066,24498	27103
2002	-66247,25687	-105966,8826	-125442,7879	56218
2003	13155,62772	-1939,039055	-15283,43699	35977
2004	-3426,300889	-36516,16882	-65859,53643	60545
2005	11430,55084	-10529,15241	-36671,08797	50616

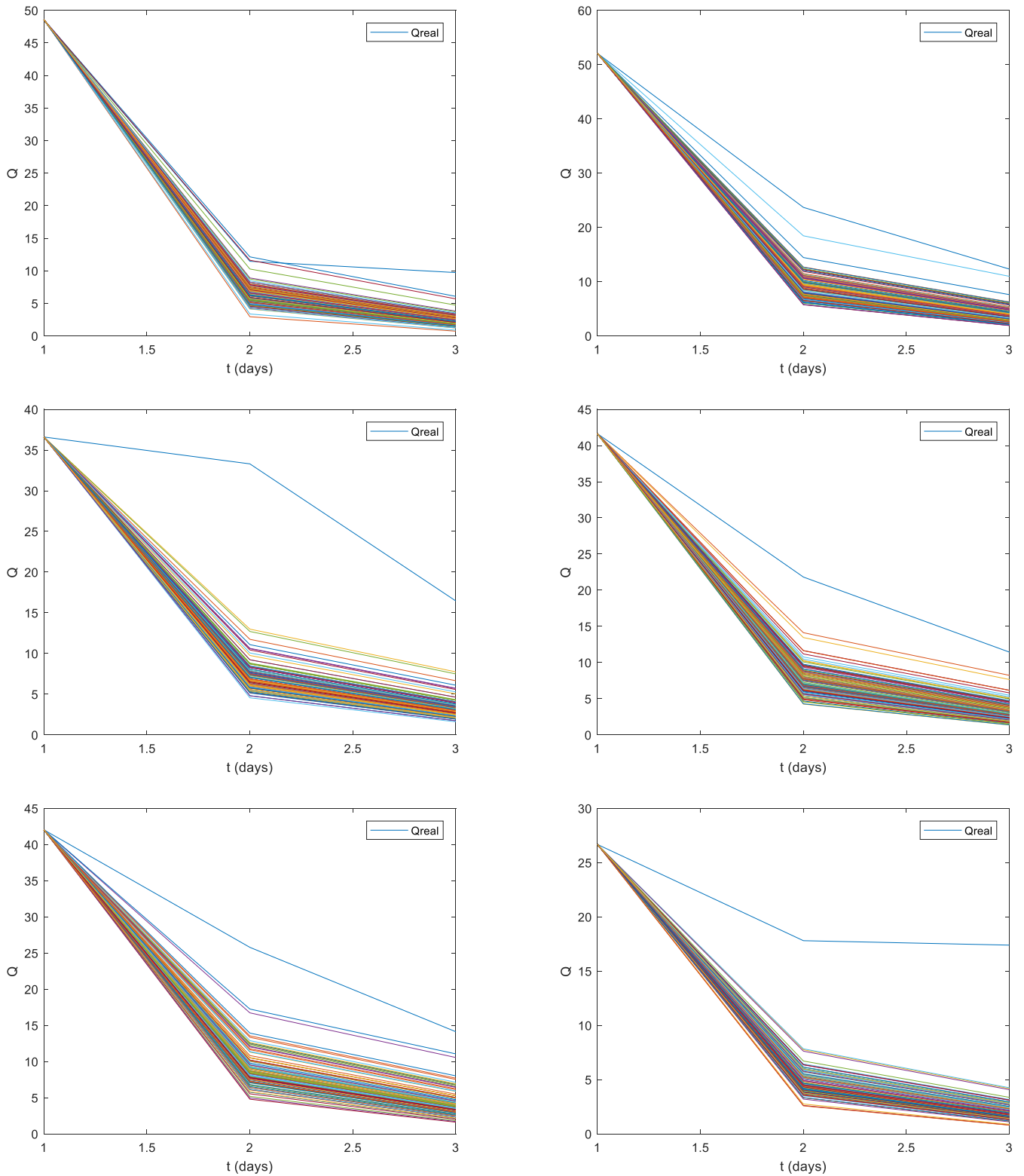
2006	16453,9824	-1382,805996	-28202,23111	49631
2007	15548,27747	2524,274584	-9506,347993	24019
2008	-11218,72799	-18809,37574	-26173,71187	27961

Πίνακας Α. 5: Συγκεντρωτική απόκλιση από δυνητικό κέρδος (σε μονάδες) ανά έτος

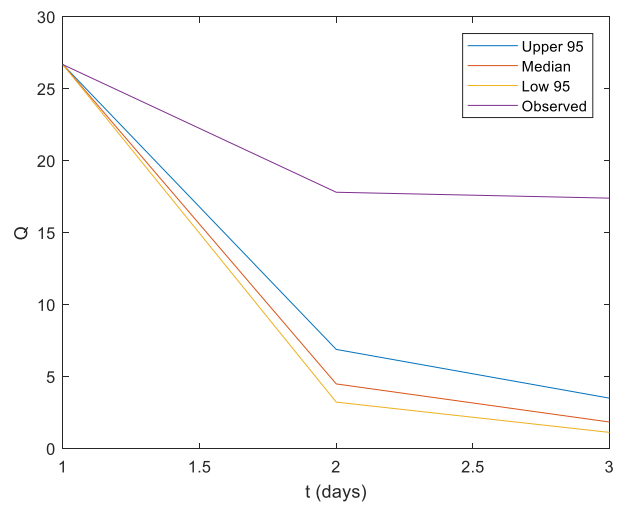
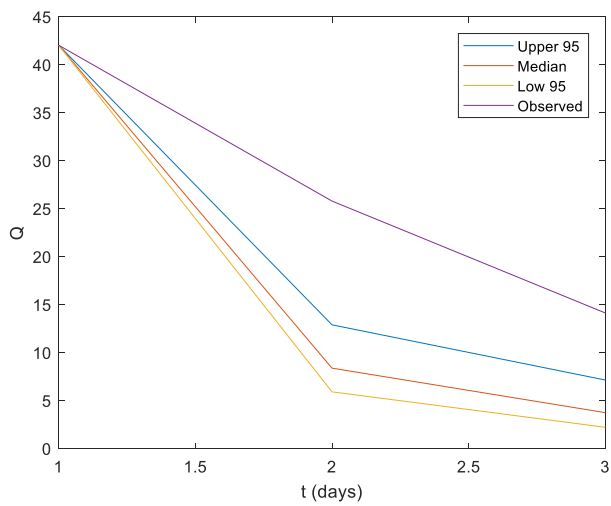
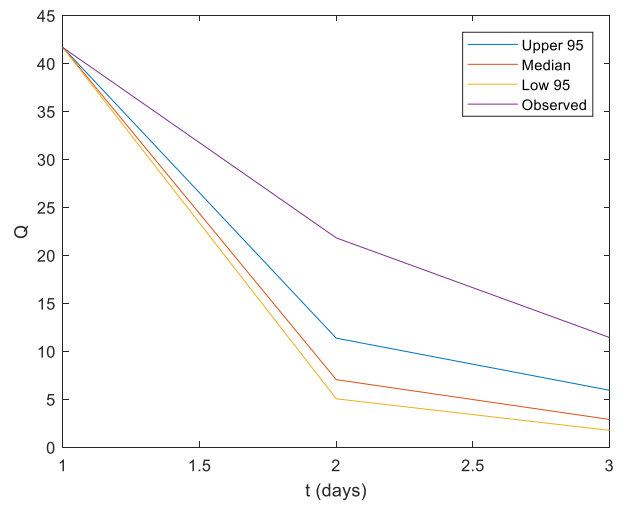
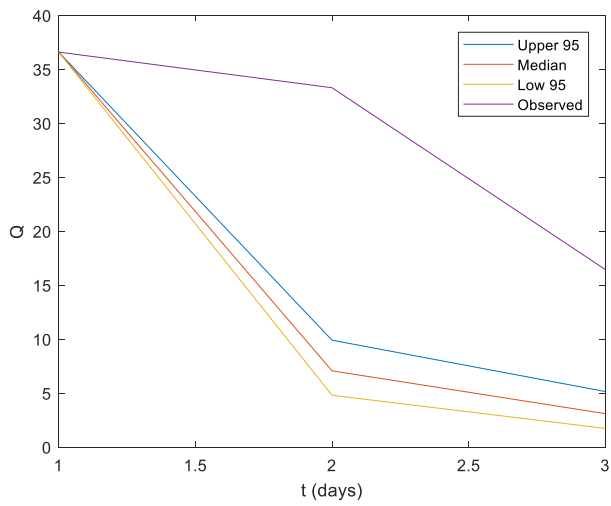
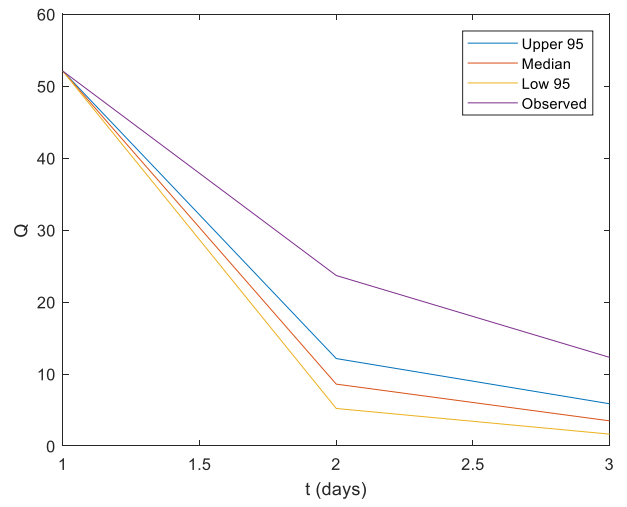
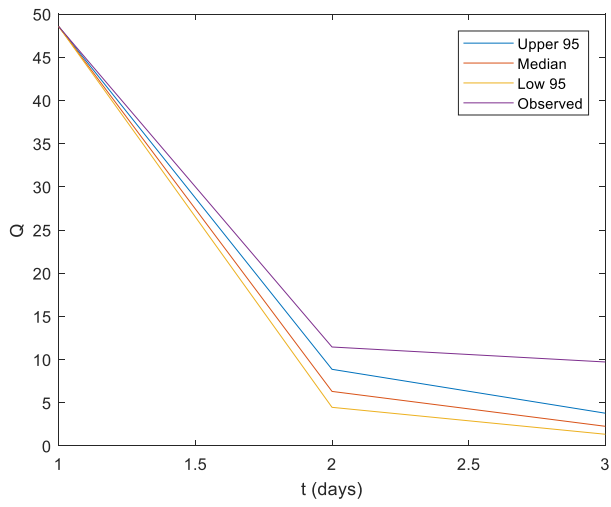
Έτος	Απόκλιση από δυνητικό κέρδος (σε μονάδες)		
	Επιθετικό Σενάριο	Μετριοπαθές σενάριο	Συντηρητικό σενάριο
1967	66919	106816	132621
1968	11067	30109	53799
1969	82428	105965	122594
1970	14163	40818	60505
1971	25218	38356	53927
1972	162707	184952	205174
1973	68420	87966	110069
1974	211023	233551	252605
1975	24149	39330	50613
1976	62708	83222	97044
1977	22033	32580	41224
1978	86299	101414	119295
1979	32536	58156	82729
1980	137564	169415	193545
1981	76893	97998	114251
1982	55127	74046	95337
1983	7559	22696	39359
1984	100721	116601	140868
1985	43528	53125	70227
1986	31191	52405	77619
1987	31113	56287	82087
1988	12053	19925	29953
1989	135716	157177	165815
1990	65036	65036	65036
1991	102772	128482	160338
1992	58865	78970	90652
1993	38303	48573	59512
1994	31286	45122	57569
1995	66362	89480	109082
1996	41452	57923	76122
1997	75129	89333	101910
1998	132746	134862	135408
1999	16078	29976	50149
2000	7701	12783	20059

2001	50256	60716	72169
2002	122465	162185	181661
2003	22822	37916	51261
2004	63971	97061	126405
2005	39185	61145	87287
2006	33177	51014	77833
2007	8471	21495	33525
2008	39179	46770	54134

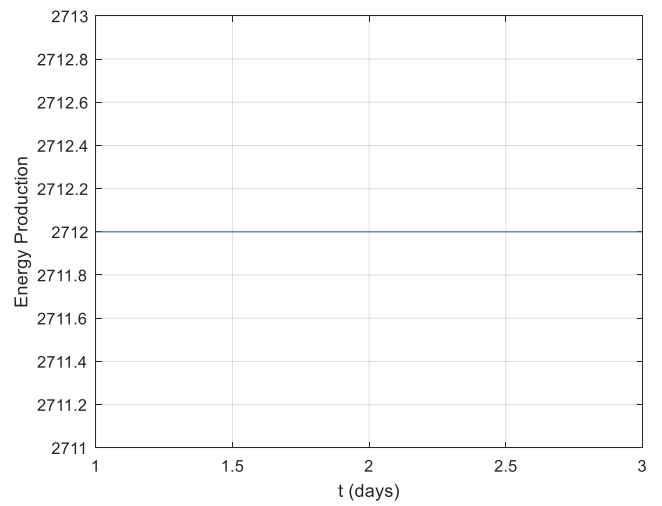
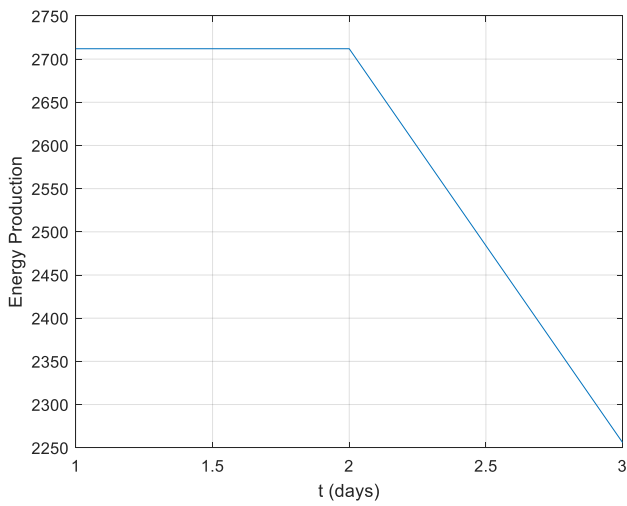
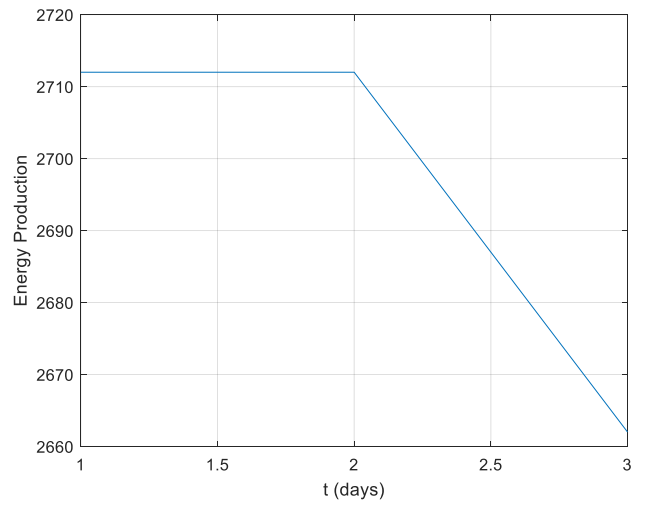
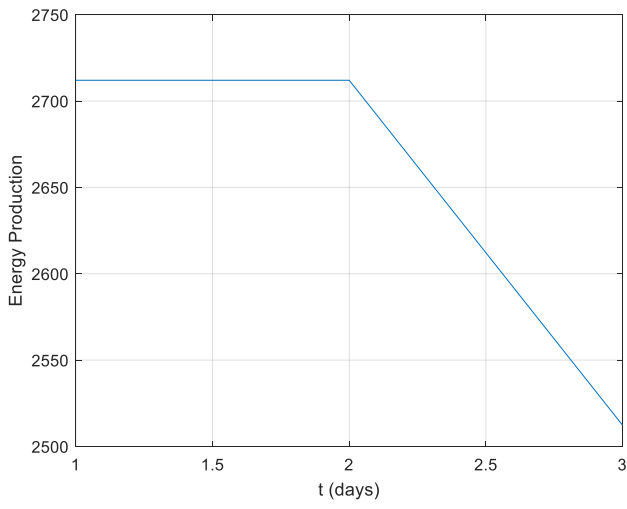
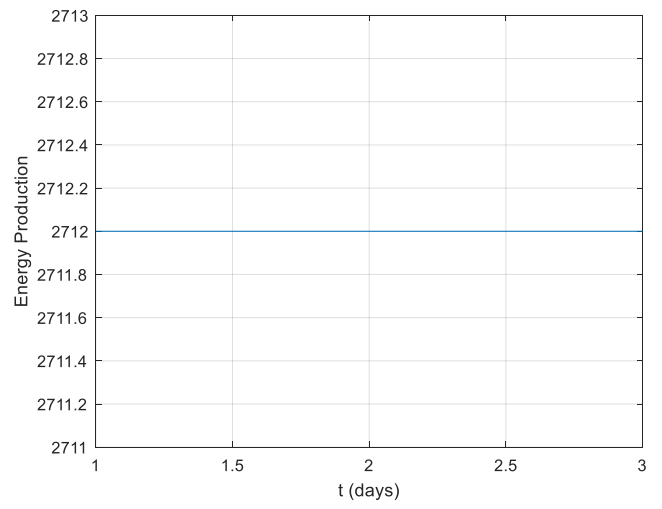
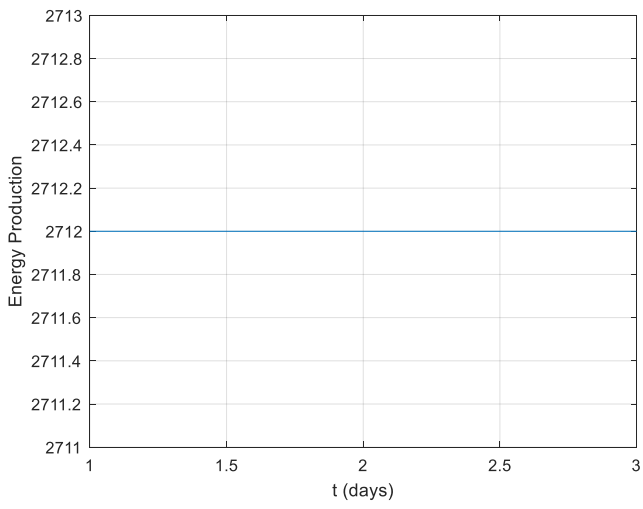
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση



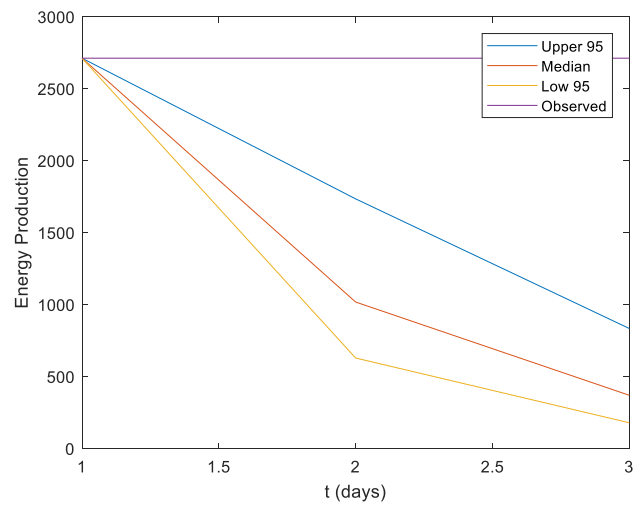
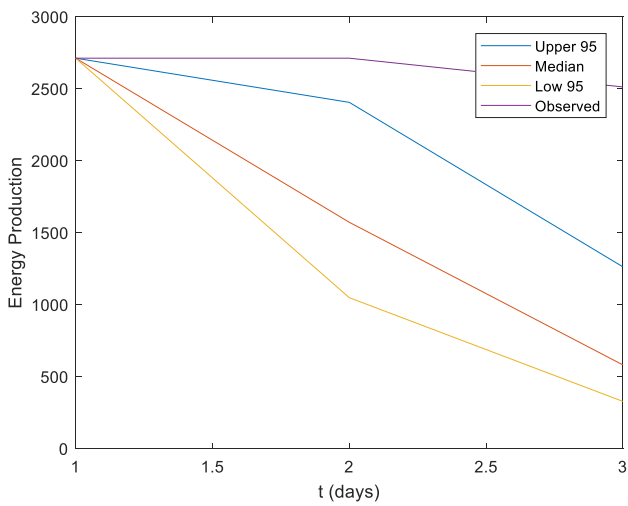
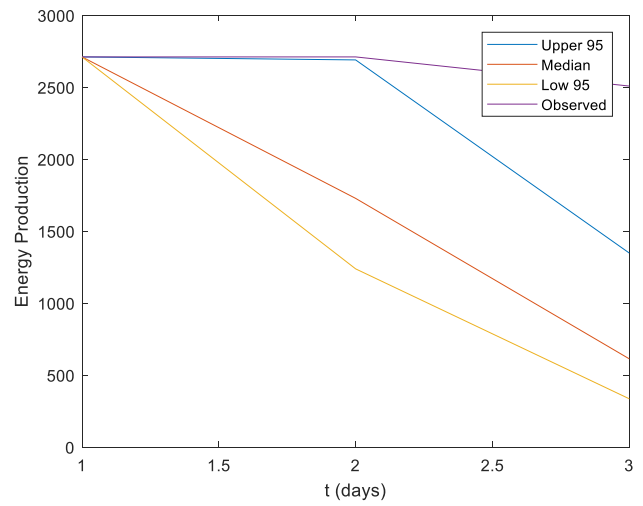
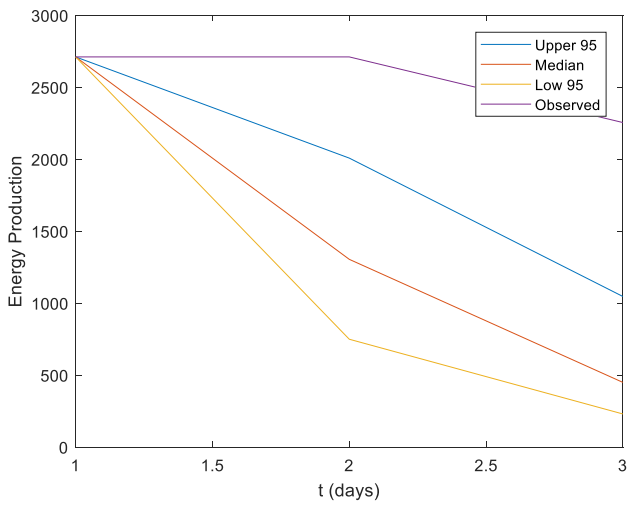
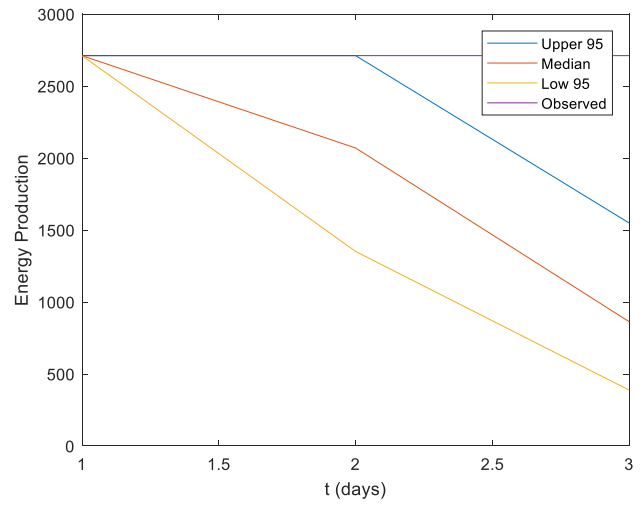
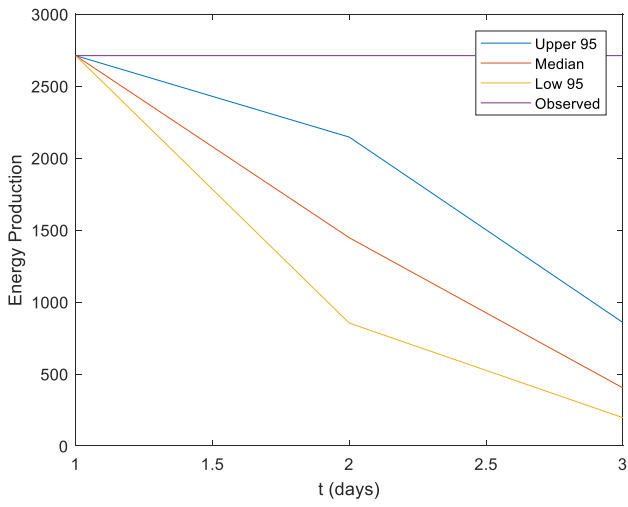
Γράφημα Β. 1: Σενάρια απορροής (mm) για χαρακτηριστικά επεισόδια



Γράφημα Β. 2: Σενάρια απορροής (mm) με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%,50% και 95% για χαρακτηριστικά επεισόδια



Γράφημα Β. 3: Παραγωγή ενέργειας (MWh) από ιστορικές απορροές για χαρακτηριστικά επεισόδια



Γράφημα Β. 4: Σενάρια παραγωγής ενέργειας (MWh) με ελίπεδο εμπιστοσύνης 5%,50% και 95% για χαρακτηριστικά επεισόδια

Πίνακας Β. 1: Έλλειμμα ενέργειας σε MWh σε ημερήσιο χρονικό βήμα

	Έλλειμμα ενέργειας (MWh)		
	Επιθετικό Σενάριο	Μετριοπαθές σενάριο	Συντηρητικό σενάριο
No.1	0	0	0
	0	463,0573461	1318,786001
	0	1515,171356	2226,653358
No.2	0	0	0
	0	1170,091949	1749,186843
	1072,499937	2182,328716	2423,850456
No.3	0	0	0
	0	0	850,1739806
	198,0440913	1566,792356	2282,05315
No.4	0	0	0
	456	1301,763902	1915,323389
	1507,571941	2237,567127	2483,407691
No.5	0	0	0
	0	683,7881822	1491,08517
	1026,715341	1988,408893	2379,686934
No.6	0	0	0
	0	1188,974353	1695,983906
	956,3853798	1832,767252	1994,464087
No.7	0	0	0
	471,8015649	1392,293124	1844,06517
	1256,058572	2046,791227	2218,441254
No.8	0	0	0
	140,3911959	1096,453689	1668,941187
	1457,160159	2181,29414	2409,842679
No.9	0	0	0
	56,04782702	1022,386679	1619,156322
	664,0985656	1706,81671	2272,194588
No.10	0	0	0
	7,201505413	876,7254318	1594,914604
	1002,631321	1725,234359	2167,357618
No.11	0	0	0
	456	1164,29082	1691,503312
	1510,397357	2150,167444	2382,383101
No.12	0	0	0
	456,3531501	1379,361181	1951,431781
	1542,650424	2288,108513	2498,889675
No.13	0	0	0
	990,2915935	1742,442293	2138,552907
	1888,921747	2388,85763	2559,134807
No.14	0	0	0
	0	479,644569	1544,85563

	762,1672678	1726,350024	2368,468663
No.15	0	0	0
	456	1274,099363	1843,122807
	1409,997089	2110,700836	2375,043337
No.16	0	0	0
	566,0318292	1265,113101	1858,156759
	1854,190226	2308,577974	2515,310791

Πίνακας Β. 2: Συνολικό έλλειμμα ενέργειας σε MWh σε κάθε επεισόδιο

	Συνολικό Έλλειμμα Ενέργειας (MWh)		
	Επιθετικό Σενάριο	Μετριοπαθές σενάριο	Συντηρητικό σενάριο
No.1	0	1978,228702	3545,43936
No.2	1072,499937	3352,420666	4173,037299
No.3	198,0440913	1566,792356	3132,227131
No.4	1963,571941	3539,331029	4398,73108
No.5	1026,715341	2672,197075	3870,772104
No.6	956,3853798	3021,741604	3690,447993
No.7	1727,860136	3439,084351	4062,506423
No.8	1597,551354	3277,747829	4078,783867
No.9	720,1463926	2729,203389	3891,35091
No.10	1009,832827	2601,959791	3762,272222
No.11	1966,397357	3314,458264	4073,886413
No.12	1999,003574	3667,469694	4450,321457
No.13	2879,213341	4131,299922	4697,687714
No.14	762,1672678	2205,994592	3913,324292
No.15	1865,997089	3384,800199	4218,166144

No.16	2420,222056	3573,691076	4373,46755
-------	-------------	-------------	------------

Πίνακας Β. 3: Έσοδα (σε μονάδες) σε ημερήσιο χρονικό βήμα

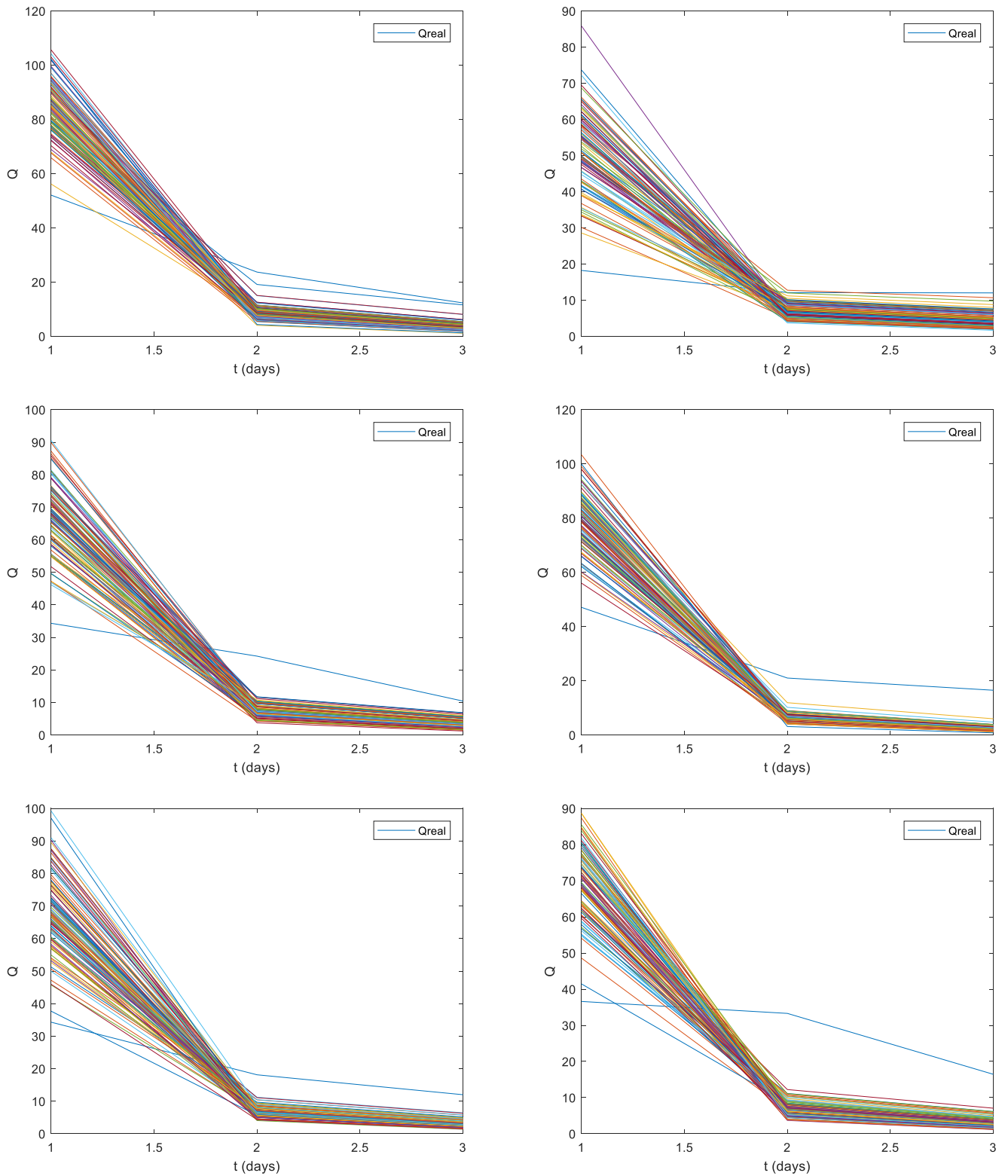
	Κέρδος (σε μονάδες)			
	Επιθετικό Σενάριο	Μετριοπαθές σενάριο	Συντηρητικό σενάριο	Ιστορικά Δεδομένα
No.1	2712	2712	2712	2712
	2712	1322,827962	-1244,358004	2712
	2712	-1833,514068	-3967,960075	2712
No.2	2712	2712	2712	2712
	2712	-798,2758484	-2535,560528	2712
	-505,4998099	-3834,986149	-4559,551368	2712
No.3	2712	2712	2712	2712
	2712	2712	161,4780582	2712
	2117,867726	-1988,377068	-4134,159451	2712
No.4	2712	2712	2712	2712
	1344	-1193,291707	-3033,970168	2712
	-1810,715822	-4000,70138	-4738,223072	2712
No.5	2712	2712	2712	2712
	2712	660,6354534	-1761,255509	2712
	-368,1460229	-3253,226678	-4427,060802	2712
No.6	2712	2712	2712	2712
	2712	-854,9230576	-2375,951717	2712
	-613,1561394	-3242,301756	-3727,392262	2256
No.7	2712	2712	2712	2712
	1296,595305	-1464,879371	-2820,195509	2712
	-1258,725213	-3630,923179	-4145,873259	2509,450501
No.8	2712	2712	2712	2712
	2290,826412	-577,3610669	-2294,823562	2712
	-1659,480476	-3831,882419	-4517,528038	2712
No.9	2712	2712	2712	2712
	2543,856519	-355,1600356	-2145,468965	2712
	719,7043032	-2408,450131	-4104,583765	2712
No.10	2712	2712	2712	2712
	2690,395484	81,82370447	-2072,743812	2712
	-495,6085336	-2663,417648	-3989,787424	2512,28543
No.11	2712	2712	2712	2712
	1344	-780,8724589	-2362,509935	2712
	-1819,19207	-3738,502333	-4435,149304	2712
No.12	2712	2712	2712	2712
	1342,94055	-1426,083544	-3142,295344	2712
	-1915,951271	-4152,325538	-4784,669026	2712

No.13	2712	2712	2712	2712
	-258,8747805	-2515,326878	-3703,658721	2712
	-2954,765242	-4454,572889	-4965,404422	2712
No.14	2712	2712	2712	2712
	2712	1273,066293	-1922,566889	2712
	425,4981966	-2467,050071	-4393,405988	2712
No.15	2712	2712	2712	2712
	1344	-1110,298089	-2817,36842	2712
	-1567,986214	-3670,097452	-4463,124958	2662,005054
No.16	2712	2712	2712	2712
	1013,904512	-1083,339303	-2862,470276	2712
	-2850,570679	-4213,733923	-4833,932374	2712

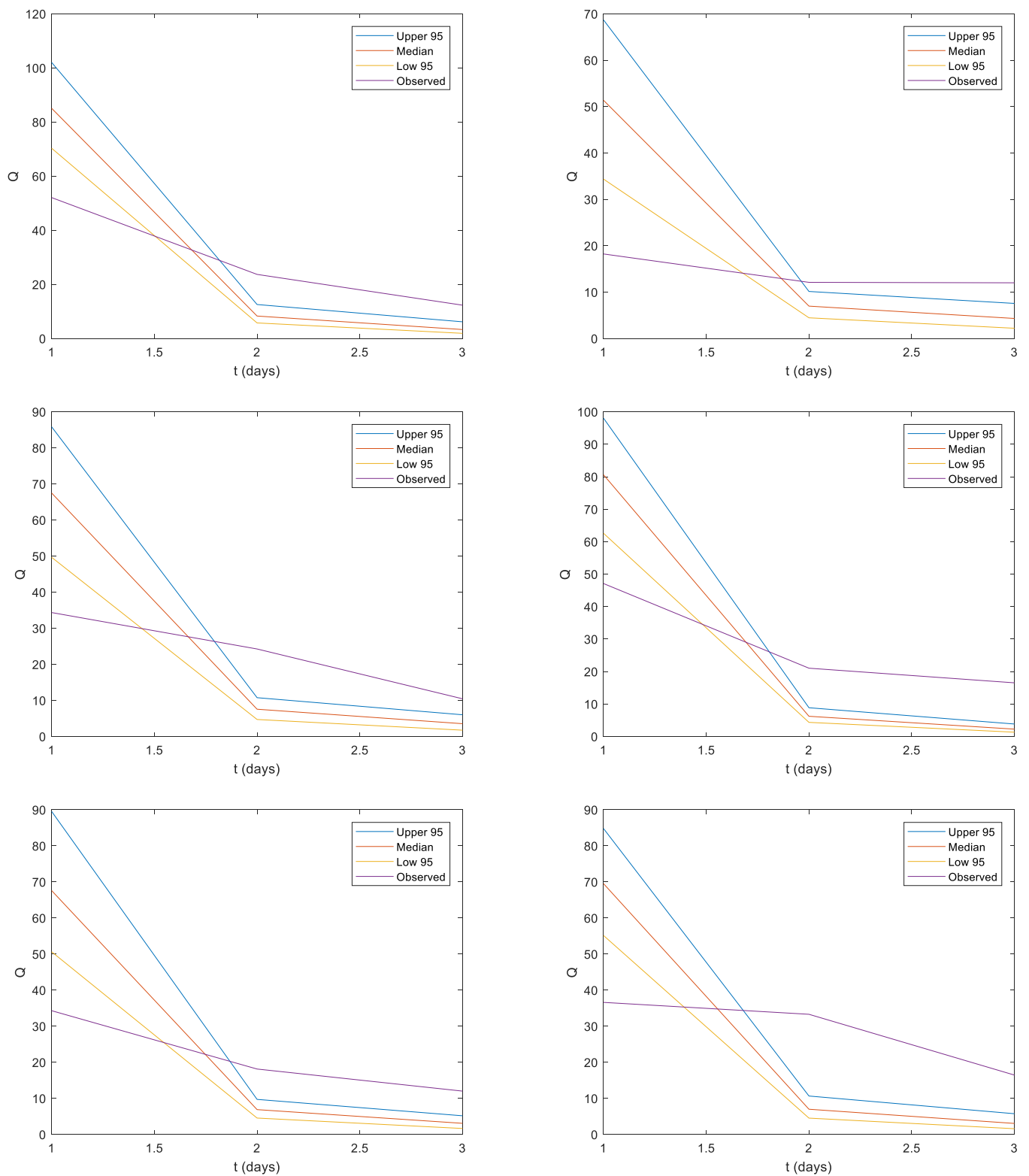
Πίνακας Β. 4: Απόκλιση από το δυνητικό κέρδος (σε μονάδες) σε ημερήσιο χρονικό βήμα

	Απόκλιση από δυνητικό κέρδος (σε μονάδες)		
	Επιθετικό Σενάριο	Μετριοπαθές σενάριο	Συντηρητικό σενάριο
No.1	0	0	0
	0	1389,172038	3956,358004
	0	4545,514068	6679,960075
No.2	0	0	0
	0	3510,275848	5247,560528
	3217,49981	6546,986149	7271,551368
No.3	0	0	0
	0	0	2550,521942
	594,1322738	4700,377068	6846,159451
No.4	0	0	0
	1368	3905,291707	5745,970168
	4522,715822	6712,70138	7450,223072
No.5	0	0	0
	0	2051,364547	4473,255509
	3080,146023	5965,226678	7139,060802
No.6	0	0	0
	0	3566,923058	5087,951717
	2869,156139	5498,301756	5983,392262
No.7	0	0	0
	1415,404695	4176,879371	5532,195509
	3768,175715	6140,37368	6655,323761
No.8	0	0	0
	421,1735876	3289,361067	5006,823562
	4371,480476	6543,882419	7229,528038
No.9	0	0	0
	168,1434811	3067,160036	4857,468965
	1992,295697	5120,450131	6816,583765

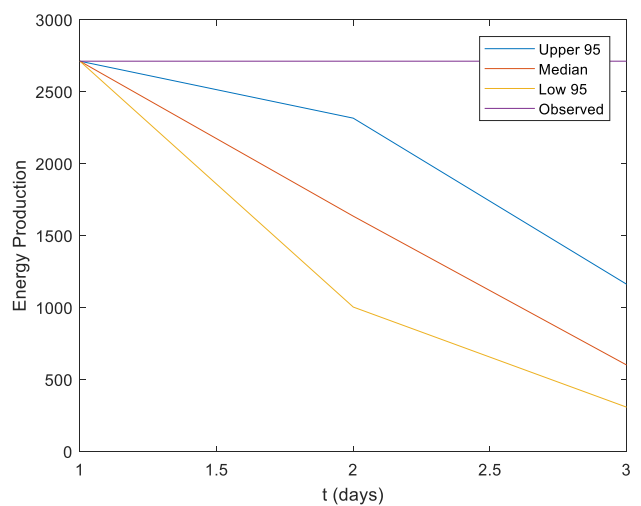
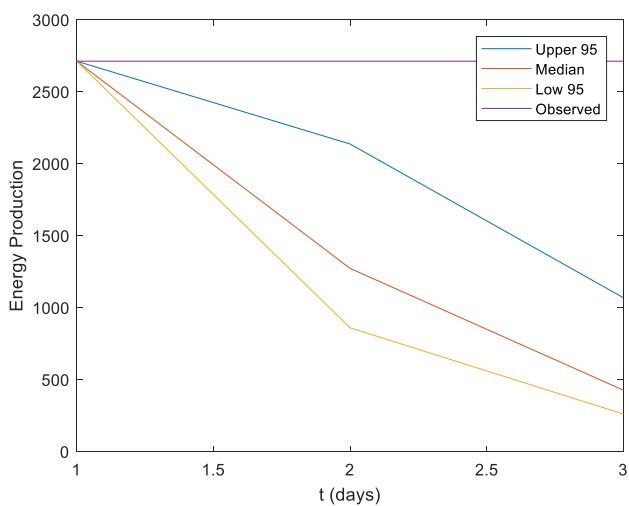
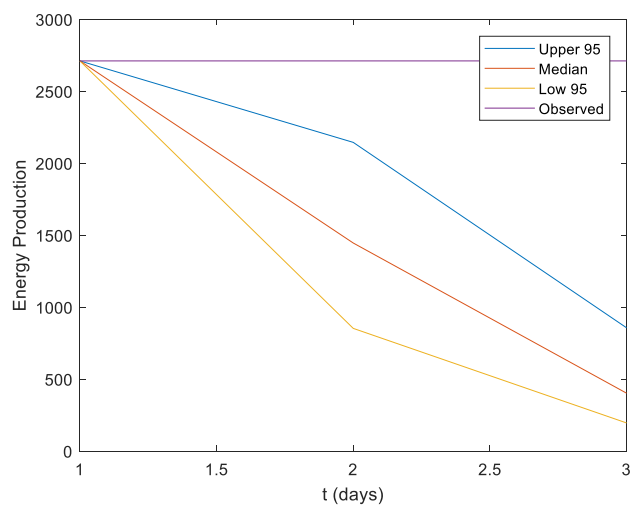
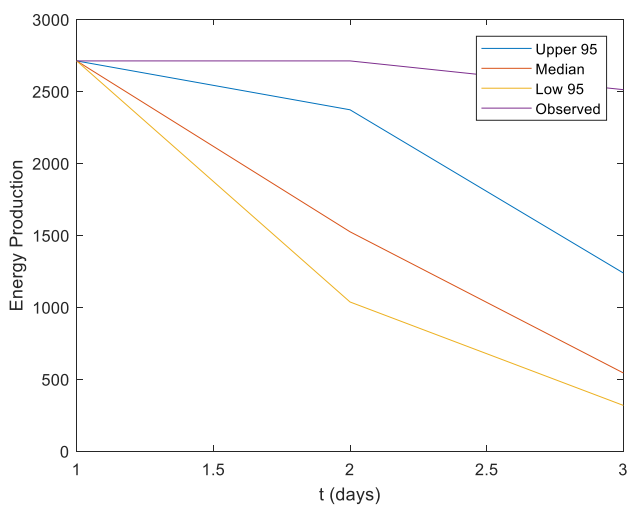
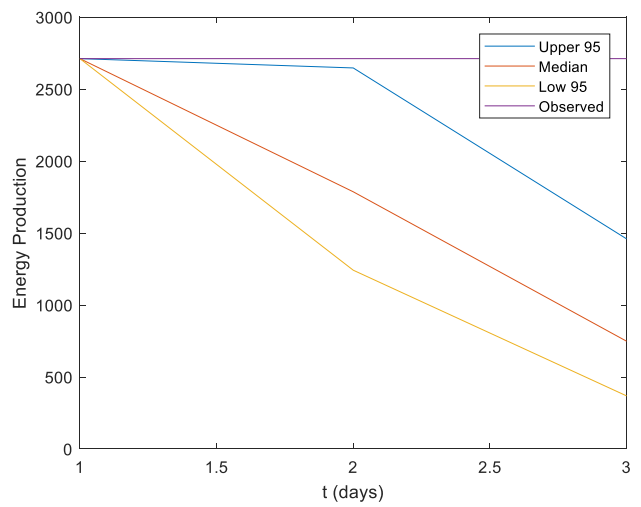
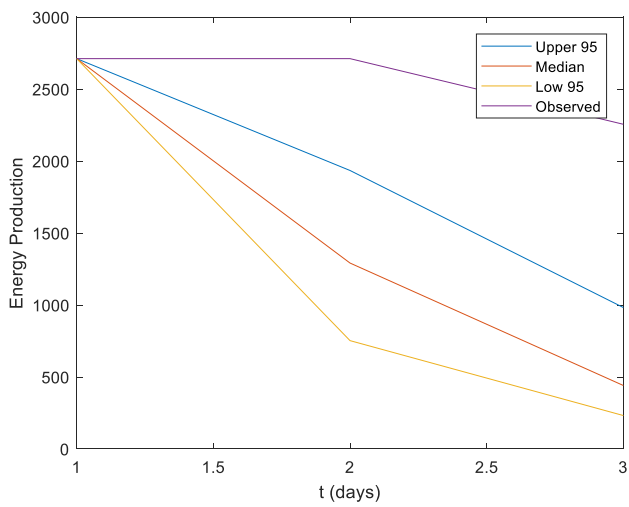
No.10	0	0	0
	21,604,516,24	2630,176,296	4784,743,812
	3007,893,964	5175,703,078	6502,072,855
No.11	0	0	0
	1368	3492,872,459	5074,509,935
	4531,192,07	6450,502,333	7147,149,304
No.12	0	0	0
	1369,059,45	4138,083,544	5854,295,344
	4627,951,271	6864,325,538	7496,669,026
No.13	0	0	0
	2970,874,78	5227,326,878	6415,658,721
	5666,765,242	7166,572,889	7677,404,422
No.14	0	0	0
	0	1438,933,707	4634,566,889
	2286,501,803	5179,050,071	7105,405,988
No.15	0	0	0
	1368	3822,298,089	5529,368,42
	4229,991,268	6332,102,507	7125,130,012
No.16	0	0	0
	1698,095,488	3795,339,303	5574,470,276
	5562,570,679	6925,733,923	7545,932,374



Γράφημα Β. 5: Σενάρια απορροής (mm) υπό την διερεύνηση της αβεβαιότητας για την αρχική απορροή του μοντέλου

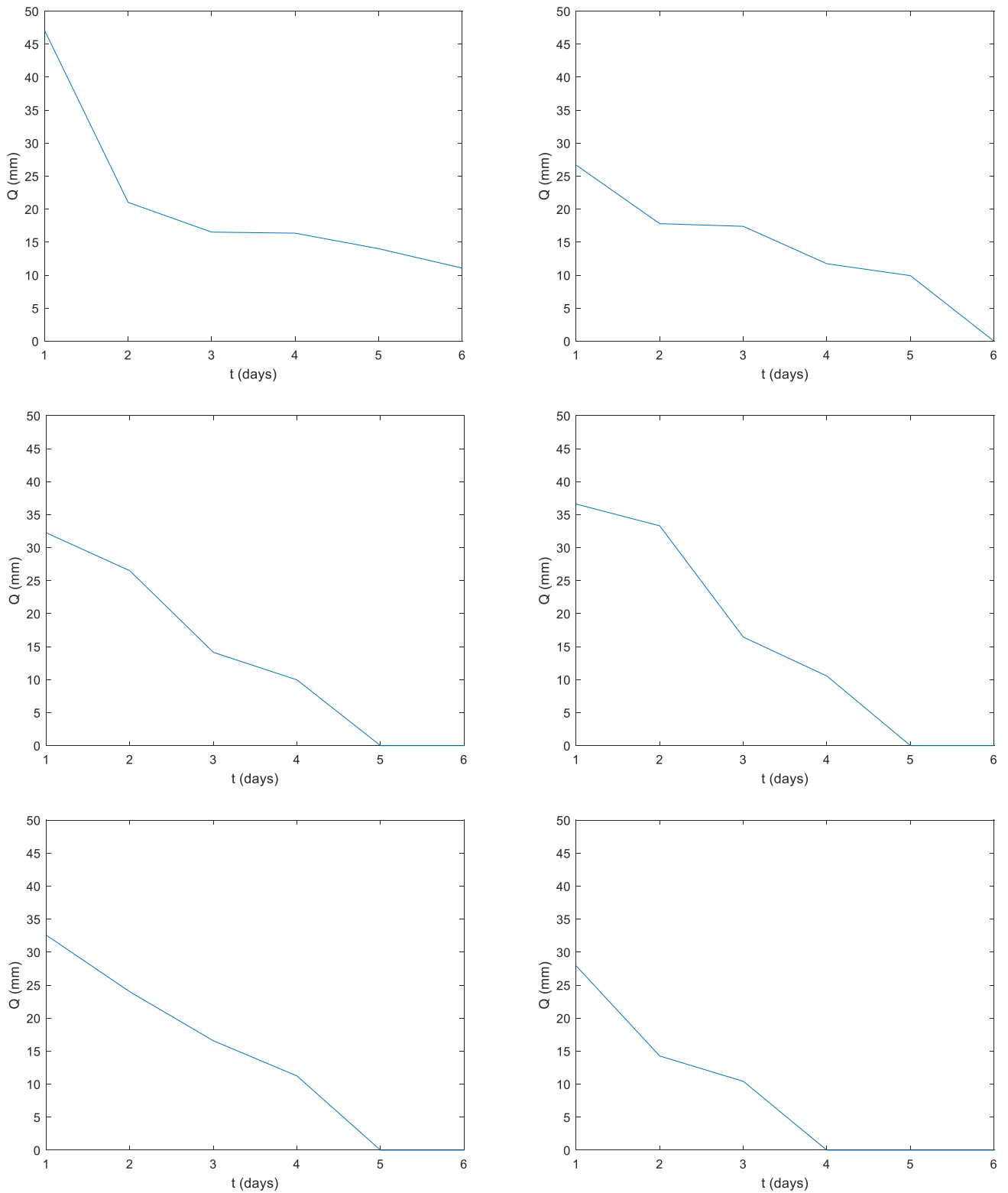


Γράφημα Β. 6: Σενάρια απορροής (mm) με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%,50% και 95% για χαρακτηριστικά επεισόδια υπό την διερεύνηση της αβεβαιότητας για την αρχική απορροή του μοντέλου

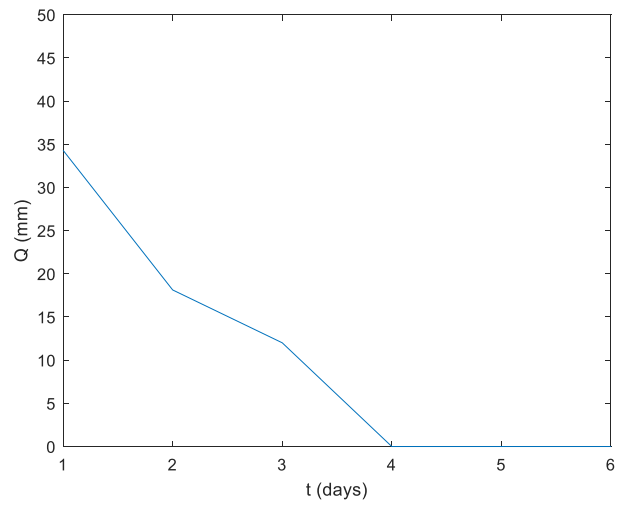
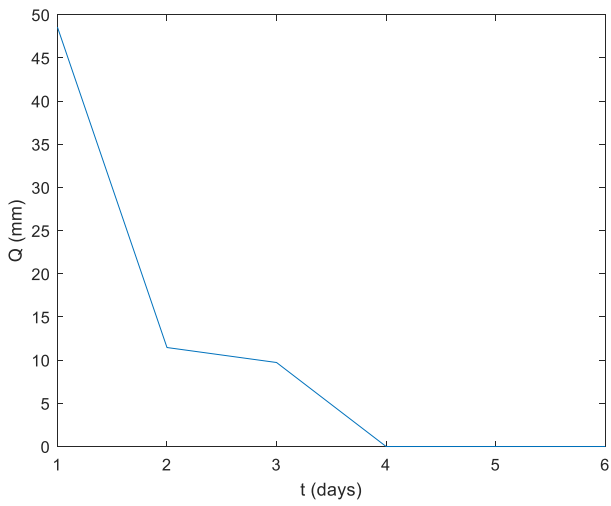
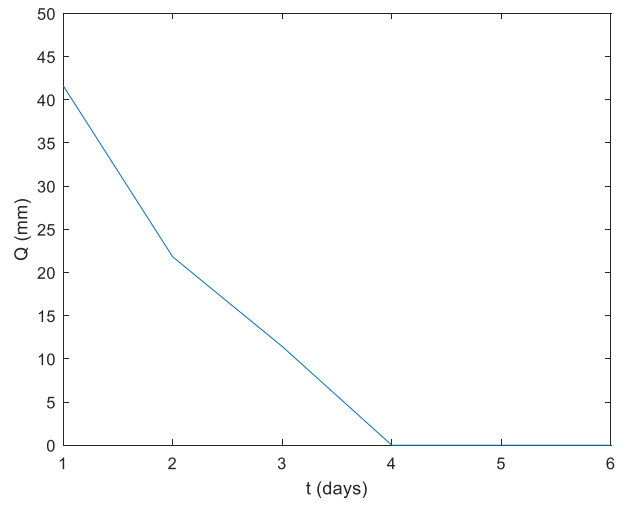
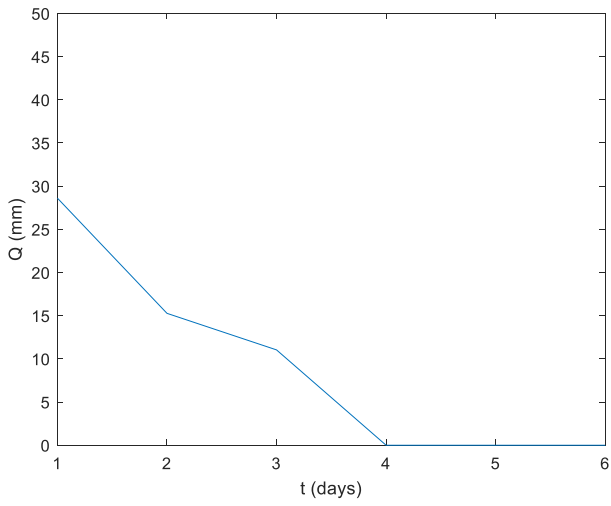
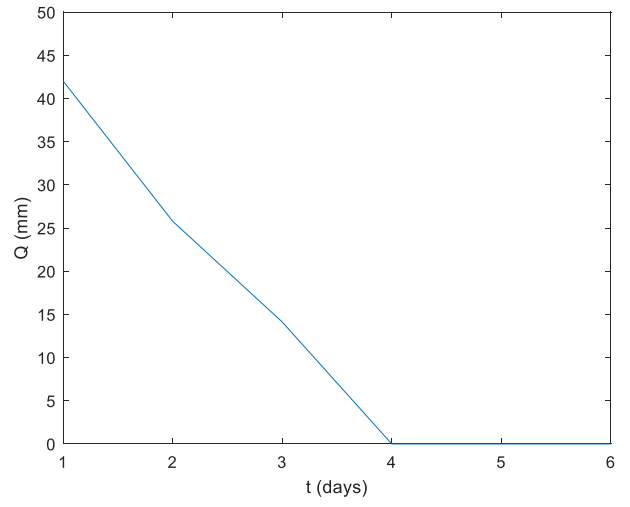
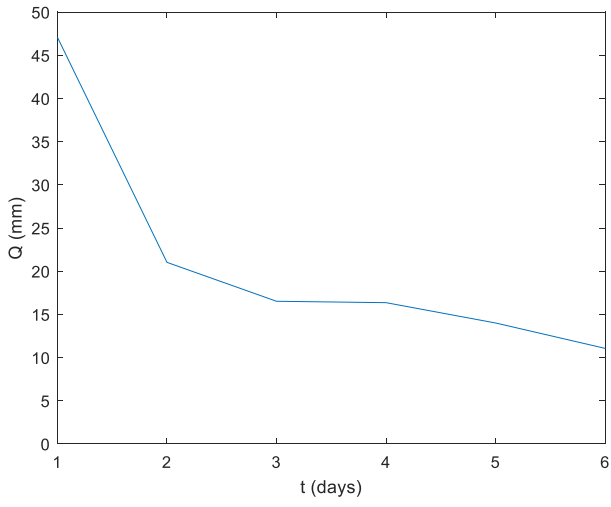


Γράφημα Β. 7: Σενάρια παραγωγής ενέργειας (MWh) με επίπεδο εμπιστοσύνης 5%, 50% και 95% για χαρακτηριστικά επεισόδια υπό την διερεύνηση της αβεβαιότητας για την αρχική απορροή του μοντέλου

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Πλημμυρικά επεισόδια



Γράφημα Γ. 1: Ενδεικτικά πλημμυρικά επεισόδια (Παρουσιάζονται μόνο οι πτωτικοί κλάδοι)



Γράφημα Γ. 2: Ενδεικτικά πλημμυρικά επεισόδια