



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Βελτιστοποίηση διαχείρισης
θυροφραγμάτων υδροηλεκτρικών
ταμιευτήρων – Εφαρμογή στο φράγμα
Αράχθου**



Ντεμίρογλου Χριστίνα

Επιβλέπων: Ευστρατιάδης Ανδρέας, Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Νοέμβριος 2020

Περιεχόμενα

Πρόλογος	13
Περίληψη	15
1. Εισαγωγή.....	17
1.1. Αντικείμενο και στόχοι.....	17
1.2. Διάρθρωση εργασίας.....	18
2. Χειρισμοί θυροφραγμάτων σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες-Ελληνική και διεθνής εμπειρία 19	
2.1. Το γενικό πρόβλημα	19
2.2. Τα φράγματα της ΔΕΗ – Ελληνική εμπειρία.....	21
2.2.1 Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ.....	21
2.2.2 Πλημμυρικά επεισόδια στον Ελλαδικό χώρο.....	26
2.3. Σύστημα υποστήριξης αποφάσεων φράγματος Dez, Ιράν	31
2.4. Διακριτοποιημένοι κανόνες διόδευσης πλημμύρας στα φράγματα Catalan και Seyhan, Τουρκία	37
2.5. Διαχείριση πλημμύρας ταμιευτήρα με αφομοίωση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο ..	39
3. Μεθοδολογικό πλαίσιο διαχείρισης πλημμυρών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες	42
3.1. Η διόδευση πλημμύρας.....	43
3.2. Υπολογιστικό σχήμα.....	44
3.3. Η σχέση στάθμης – παροχής του υπερχειλιστή.....	45

3.4.	Εφαρμογή σε προβλήματα σχεδιασμού έργων υπερχειλίσης και διαχείρισης πλημμυρών	50
4.	Η περιοχή μελέτης – Χαρακτηριστικά φράγματος	52
4.1.	Γεωγραφική και διοικητική θέση	52
4.2.	Η περιοχή μελέτης	52
4.3.	Υδροσύστημα Αράχθου	54
4.4.	Πλημμύρα 2015	55
5.	Αυτοψία στη περιοχή μελέτης	58
5.1.	Ιστορικά στοιχεία	58
5.2.	Φράγμα και συναφή έργα	58
5.3.	Σταθμός παραγωγής ενέργειας	61
5.4.	Διαχείριση πλημμυρών	71
6.	Δεδομένα και επεξεργασίες	73
6.1.	Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρα	73
6.2.	Χαρακτηριστικά μεγέθη έργων υπερχειλίσης	74
6.2.1.	Η σχέση στάθμης – παροχής του υπερχειλιστή Ogee του φράγματος Πουρνάρι I	76
6.3.	Χαρακτηριστικά θυροφραγμάτων	80
6.4.	Υδρολογικά δεδομένα	84
7.	Εφαρμογή μεθοδολογικού πλαισίου στο Πουρνάρι I	87
8.	Βελτιστοποίηση και πολυκριτηριακή ανάλυση λειτουργίας θυροφραγμάτων	100

9.	Στοχαστικό πλαίσιο βελτιστοποίησης κανόνων λειτουργίας.....	109
9.1.	Σκοπός.....	109
9.2.	Ανάλυση ιστορικών δεδομένων εισροών.....	109
9.3.	Παραγωγή συνθετικών ωριαίων πλημμυρογραφημάτων	111
9.4.	Βελτιστοποίηση λειτουργίας θυροφραγμάτων	119
10.	Αποτελέσματα.....	121
10.1.	Έλεγχος τοπικού κανόνα λειτουργίας.....	121
10.2.	Βελτιστοποίηση λειτουργίας θυροφραγμάτων με χρήση συνθετικών πλημμυρογραφημάτων.....	125
10.2.1.	Συντηρητικό σενάριο με αρχική στάθμη $z=114$ m	125
10.2.2.	Κανονικό σενάριο με αρχική στάθμη $z=114$ m	132
10.2.3.	Κανονικό σενάριο με αρχική στάθμη $z=116$ m	139
10.2.4.	Κανονικό σενάριο με αρχική στάθμη $z=118$ m	146
10.3.	Σύγκριση κανόνα λειτουργίας - χειρισμού της ΔΕΗ.....	153
11.	Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	157
11.1.	Σύνοψη και συμπεράσματα	157
11.2.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	159
	Αναφορές.....	161

Εικόνα 1: Ο μετασχηματισμός του υδρογραφήματος εισροής σε υδρογράφημα εκροής λόγω της διόδευσης (Μάρης 1980).....	19
Εικόνα 2: Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ	22
Εικόνα 3: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Αχελώου (www.ypethe.gr)	23
Εικόνα 4: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Αλιάκμονα (www.ypethe.gr).....	23
Εικόνα 5: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Αράχθου (www.ypethe.gr).....	24
Εικόνα 6: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Νέστου (www.ypethe.gr)	24
Εικόνα 7: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Πλαστήρα (www.ypethe.gr).....	25
Εικόνα 8: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Λάδωνα (www.ypethe.gr)	25
Εικόνα 9: Φυσικό σύστημα λίμνης Νησίου.....	26
Εικόνα 10: Τεχνητό σύστημα λίμνης Νησίου	28
Εικόνα 11: Υδατικό σύστημα κάτω Αχελώου.....	30
Εικόνα 12: Το φράγμα Dez, Ιράν (Google earth).....	32
Εικόνα 13: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου.....	38
Εικόνα 14: Τα φράγματα Seyhan και Catalan (Πηγή: Google Earth)	39
Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση διόδευσης πλημμυρικού κύματος (πηγή: Ευστρατιάδης και Παπανικολάου 2020).....	42
Εικόνα 16: Χαρακτηριστικά υπερχειλιστή τύπου ogee (Παπανικολάου,2017)	46
Εικόνα 17: Συντελεστής παροχής για κατακόρυφη ανάντη παρειά (Παπανικολάου 2017).....	47
Εικόνα 18: Συντελεστής παροχής συναρτήσει υδραυλικού φορτίου (Roberson et al., 1998).....	49
Εικόνα 19: Συντελεστής παροχής για κεκλιμένη ανάντη παρειά (U.S. Bureau of Reclamation, 1987)	50

Εικόνα 20: . Η λεκάνη απορροής του Αράχθου ανάντη του φράγματος Πουρναρίου (Πηγή: Κουτσογιάννης, 2010).....	53
Εικόνα 21: Υδροσύστημα Αράχθου (Google Earth).....	54
Εικόνα 22: Το γεφύρι της Άρτας, 1/2/2015 (newsbomb.gr)	56
Εικόνα 23: Επαρχιακός δρόμος (newmoney.gr)	56
Εικόνα 24: Εκροή του υπερχειλιστή του φράγματος Πουρνάρι I (orangenews.gr)	57
Εικόνα 25: Η διώρυγα του υπερχειλιστή.....	59
Εικόνα 26: Θυρόφραγμα υπερχειλιστή ogee.....	59
Εικόνα 27: Όψη υδροηλεκτρικού φράγματος Πουρνάρι I	60
Εικόνα 28: Χαρακτηριστικά μεγέθη υδροηλεκτρικού φράγματος Πουρνάρι I.....	60
Εικόνα 29: Η γερανογέφυρα των απορριμμάτων.....	61
Εικόνα 30: Ο σταθμός παραγωγής ενέργειας.....	62
Εικόνα 31: Στοιχεία στροβίλου	63
Εικόνα 32: Είσοδος στροβίλου.....	63
Εικόνα 33: Όψη στροβίλου τύπου Francis	64
Εικόνα 34: Άνω τμήμα στροβίλου.....	64
Εικόνα 35: Σύνδεση τριφασικού ρεύματος	65
Εικόνα 36: Αγωγοί λαδιών	66
Εικόνα 37: Βλάβη σε στρόβιλο του σταθμού Πουρνάρι II	67
Εικόνα 38: Ο χώρος με τις μπαταρίες	68

Εικόνα 39: Μηχανήματα παροχής αέρα.....	68
Εικόνα 40: Ενδεικτική σύνδεση της σήραγγας υδροληψίας με τον στρόβιλο.....	69
Εικόνα 41: Εργαλεία.....	69
Εικόνα 42: Ημερήσιο δελτίο.....	70
Εικόνα 43: Λυχνίες ελέγχου	71
Εικόνα 44: Καμπύλη στάθμης – παροχής εκχειλιστή φράγματος Πουρνάρι Ι (πηγή: ΔΕΗ).....	75
Εικόνα 45: Καμπύλη θεωρητικής σχέσης στάθμης - παροχής εκχειλιστή (Πηγή Κουτσογιάννης κ.ά., 2010).....	77
Εικόνα 46: Καμπύλες στάθμης-παροχής εκχειλιστή.....	79
Εικόνα 47: Παροχές εκχειλιστή με ρυθμιζόμενα θυροφράγματα (ΔΕΗ).....	81
Εικόνα 48: Το άνοιγμα των θυροφραγμάτων συναρτήσει της παροχής του εκχειλιστή για στάθμη ασφαλείας +118 m (Πηγή: ΔΕΗ, ύστερα από επεξεργασία).....	83
Εικόνα 49: Το άνοιγμα των θυροφραγμάτων συναρτήσει της παροχής του εκχειλιστή για στάθμη ασφαλείας +120 m (Πηγή: ΔΕΗ, ύστερα από επεξεργασία).....	83
Εικόνα 50: Πλημμυρογραφήματα εισροής για T=5000, 10000, 20000, και 60000 έτη (Πηγή: Μαμάσης, 2020, ύστερα από επεξεργασία).	84
Εικόνα 51: Το πλημμυρογράφημα εισροής της πλημμύρας του 2005(Πηγή: Μαμάσης, 2020, ύστερα από επεξεργασία).	85
Εικόνα 52: Δεδομένα στάθμης από τον τηλεμετρικό σταθμό στη νέα γέφυρα της Άρτας (Πηγή: OpenHi, 2020, ύστερα από επεξεργασία).	86
Εικόνα 53: Αποτελέσματα προσομοίωσης για lev=118,lev2=119,lev3=120,lev4=119,lev5=118,lev6=117.	98
Εικόνα 54: Αποτελέσματα προσομοίωσης για lev=116.5,lev2=118,lev3=121,lev4=120,lev5=117.5,lev6=116.	98

Εικόνα 55: Διάγραμμα Pareto σεναρίου 1.....	102
Εικόνα 56: Διάγραμμα Pareto σεναρίου 2.....	103
Εικόνα 57: Διάγραμμα Pareto σεναρίου 3.....	103
Εικόνα 58: Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 1ου σεναρίου για $T=5000$	105
Εικόνα 59: Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 1ου σεναρίου για $T=60000$	106
Εικόνα 60: Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 2ου σεναρίου για $T=5000$	106
Εικόνα 61 : Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 2ου σεναρίου για $T=60000$	107
Εικόνα 62: Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 3ου σεναρίου για $T=5000$	107
Εικόνα 63: Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 3ου σεναρίου για $T=60000$	108
Εικόνα 64: Διάγραμμα ημερήσιων εισροών.....	110
Εικόνα 65: Θεωρητικό και δειγματικό κλιμακόγραμμα, για τις κλίμακες από $k=1$ (ωριαία κλίμακα) μέχρι $k=8928$ (ετήσια κλίμακα)	113
Εικόνα 66: Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης.....	114
Εικόνα 67: Πλημμυρογράφημα εισόδου με αιχμή στη μέση του πλημμυρικού επεισοδίου	115
Εικόνα 68: Πλημμυρογράφημα εισόδου με αιχμή στην αρχή του πλημμυρικού επεισοδίου	115
Εικόνα 69: Πλημμυρογράφημα εισόδου με διπλή αιχμή στην αρχή του επεισοδίου.....	116
Εικόνα 70: Πλημμυρογράφημα εισόδου με διπλή αιχμή στη μέση του επεισοδίου	116
Εικόνα 71: Πλημμυρογράφημα εισόδου με διπλή αιχμή στην αρχή του επεισοδίου.....	117
Εικόνα 72: Πλημμυρογράφημα εισόδου με διπλή αιχμή στη μέση του επεισοδίου.....	117
Εικόνα 73: Πλημμυρογράφημα εισόδου με αιχμή στη μέση του επεισοδίου	118

Εικόνα 74: Πλημμυρογράφημα εισόδου με διπλή αιχμή στην αρχή του επεισοδίου.....	118
Εικόνα 75: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη.....	122
Εικόνα 76: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη.....	122
Εικόνα 77: Η ενέργεια που παράγεται για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη.....	123
Εικόνα 78: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη.....	123
Εικόνα 79: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη.....	124
Εικόνα 80: Η ενέργεια που παράγεται για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη.....	124
Εικόνα 81: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	126
Εικόνα 82: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	126
Εικόνα 83: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	127
Εικόνα 84: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	127
Εικόνα 85: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	128
Εικόνα 86: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	128
Εικόνα 87: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=1.01 έτη.....	129

Εικόνα 88: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα $T=90$ έτη.....	129
Εικόνα 89 : Χρονοσειρά συντελεστή υπερχειλίσης α για την πλημμύρα $T=1.01$ έτη.....	130
Εικόνα 90: Χρονοσειρά συντελεστή υπερχειλίσης α για την πλημμύρα $T=90$ έτη.....	130
Εικόνα 91: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για πλημμύρα $T=1.01$ έτη	131
Εικόνα 92: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για πλημμύρα $T=90$ έτη	131
Εικόνα 93: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης	133
Εικόνα 94: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης	133
Εικόνα 95: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης	134
Εικόνα 96: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	134
Εικόνα 97: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης	135
Εικόνα 98: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	135
Εικόνα 99: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα $T=1.01$ έτη.....	136
Εικόνα 100: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα $T=90$ έτη.....	136
Εικόνα 101 : Χρονοσειρά συντελεστή υπερχειλίσης α για την πλημμύρα $T=1.01$ έτη.....	137
Εικόνα 102: Χρονοσειρά συντελεστή υπερχειλίσης α για την πλημμύρα $T=90$ έτη.....	137
Εικόνα 103: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα $T=1.01$ έτη.....	138
Εικόνα 104: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα $T=90$ έτη.....	138

Εικόνα 105: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης	140
Εικόνα 106: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης	140
Εικόνα 107: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης	141
Εικόνα 108: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	141
Εικόνα 109: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	142
Εικόνα 110: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	142
Εικόνα 111: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=1.01 έτη.....	143
Εικόνα 112: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=90 έτη.....	143
Εικόνα 113 : Χρονοσειρά συντελεστή υπερχειλίσης α για την πλημμύρα T=1.01 έτη.....	144
Εικόνα 114: Χρονοσειρά συντελεστή υπερχειλίσης α για την πλημμύρα T=90 έτη.....	144
Εικόνα 115: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα T=1.01 έτη.....	145
Εικόνα 116: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα T=90 έτη.....	145
Εικόνα 117: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	147
Εικόνα 118: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης	147
Εικόνα 119: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης	148

Εικόνα 120: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	148
Εικόνα 121: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	149
Εικόνα 122: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης.....	149
Εικόνα 123: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=1.01 έτη.....	150
Εικόνα 124: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=90 έτη.....	150
Εικόνα 125 : Χρονοσειρά συντελεστή υπερχειλίσης α για την πλημμύρα T=1.01 έτη.....	151
Εικόνα 126: Χρονοσειρά συντελεστή υπερχειλίσης α για την πλημμύρα T=90 έτη.....	151
Εικόνα 127: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα T=1.01 έτη.....	152
Εικόνα 128: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα T=90 έτη.....	152
Εικόνα 129: Χρονοσειρά παροχών εισροής πλημμύρας 2005	153
Εικόνα 130: Γράφημα εισροής και στάθμης συναρτήσει του χρόνου.....	154
Εικόνα 131: Χρονοσειρά στάθμης ταμιευτήρα σύμφωνα με το χειρισμό του κ. Λέρη.....	155
Εικόνα 132: Χρονοσειρά στάθμης σύμφωνα με τον τοπικό κανόνα λειτουργίας.....	156

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρα και υπερχειλιστή.....	88
Πίνακας 2: Συντελεστές σχέσης στάθμης-παροχής υπερχειλιστή.....	94
Πίνακας 3: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την πλημμύρα σχεδιασμού των 10000 ετών και διακοπτόμενη λειτουργία των στροβίλων, για $z_{αρχ}=118$ m.	99
Πίνακας 4: Κανόνας λειτουργίας 1 ^{ου} , 2 ^{ου} και 3 ^{ου} σεναρίου.....	104
Πίνακας 5: Αποτελέσματα για πλημμυρογράφημα εισόδου $T=5000$ έτη.....	104
Πίνακας 6: Αποτελέσματα για πλημμυρογράφημα εισόδου $T= 60000$ έτη.....	105
Πίνακας 7: Στατιστικά χαρακτηριστικά ανά μήνα.....	111
Πίνακας 8: Ολικός κανόνας λειτουργίας μικρών επεισοδίων.....	125
Πίνακας 9: Ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων.....	125
Πίνακας 10: Ολικός κανόνας λειτουργίας μικρών επεισοδίων.....	132
Πίνακας 11: Ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων.....	132
Πίνακας 12: Ολικός κανόνας λειτουργίας μικρών επεισοδίων.....	139
Πίνακας 13: Ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων.....	139
Πίνακας 14: Ολικός κανόνας λειτουργίας μικρών επεισοδίων.....	146
Πίνακας 15: Ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων.....	146

Πρόλογος

Η εν λόγω διπλωματική εργασία σηματοδοτεί το πέρας της ιδιότητας μου ως φοιτήτρια στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εκπόνηση της πραγματοποιήθηκε εξολοκλήρου κατά την διάρκεια της πανδημίας Covid-19, χωρίς ωστόσο αυτό να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα, χάρη στην συνεχή στήριξη του επιβλέποντος κ. Α.Ευστρατιάδη, Επικ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. και ολόκληρης της ερευνητικής ομάδας, γεγονός που με κάνει να νιώθω τουλάχιστον ευγνώμον.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Α. Ευστρατιάδη, ο οποίος συνέβαλε στη διεύρυνση των γνωστικών μου οριζόντων, μέσω της ενασχόλησης μου με ένα τόσο καινοτόμο και πρακτικό ζήτημα. Παρόλες τις δυσκολίες και τους περιορισμούς της πανδημίας, ήταν δίπλα μου καθόλη της διάρκεια, ανά πάσα στιγμή, ενθαρρύνοντας με μπροστά στα αδιέξοδα και επικροτώντας με στις στιγμές επίτευξης των επιμέρους ερευνητικών στόχων. Είναι ένας άνθρωπος που όπως είχα διακρίνει από την αρχή, αντιμετωπίζει την εκπαιδευτική διαδικασία ως λειτουργήμα, με όσα αυτό συνεπάγεται. Αποτέλεσε και αποτελεί πρότυπο ως προς το ήθος, αλλά και πηγή έμπνευσης για τη μετέπειτα επαγγελματική μου σταδιοδρομία.

Στη συνέχεια, οφείλω να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτωρ Γιώργο Μωραΐτη, ο οποίος συνέβαλε δραστικά στην επίλυση τεχνικών προβλημάτων κατά την υπολογιστική διαδικασία και στον εμπλουτισμό της εργασίας με επιπλέον ερευνητικά συμπεράσματα, χάρη στις ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις του.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης στο Δρ. Ιωάννη Τσουκαλά και Δρ. Παναγιώτη Κοσσιέρη, για την καθοριστική συνεισφορά τους σε ένα κρίσιμο σημείο της εργασίας. Χωρίς τη συνεισφορά αυτή, αρκετά από τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν, θα απουσίαζαν.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Κουτσογιάννη και Μαμάση για τις συμβουλές τους καθόλη της διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας καθώς και για τη παροχή χρήσιμων δεδομένων.

Ένα ευχαριστώ αντιστοιχεί επίσης στον Υποψήφιο Διδάκτωρ Διονύση Νικολόπουλο, για την υποστήριξή του σε καίρια σημεία της προγραμματιστικής διαδικασίας.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γιώργο Σακκά, υπεύθυνο συντήρησης και πυρασφάλειας του φράγματος Πουρνάριου Άρτας, για την ξενάγηση στο φράγμα και για τη παροχή χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με αυτό.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένεια μου για την στήριξη τους τόσο καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου όσο και στην έναρξη του επόμενου κεφαλαίου, της επαγγελματικής μου σταδιοδρομίας.

Ντεμίρογλου Χριστίνα,

Αθήνα, Νοέμβριος 2020

Περίληψη

Τα υδροηλεκτρικά έργα που φέρουν θυροφράγματα στον υπερχειλιστή τους πλεονεκτούν, καθώς επιτυγχάνεται αύξηση του υδροδυναμικού προς όφελος της παραγόμενης ενέργειας. Ωστόσο, σε περίπτωση πλημμύρας απαιτείται ο προσεκτικός χειρισμός τους, ώστε να διατηρείται η ασφάλεια του φράγματος και των κατάντη έργων. Ο χειρισμός αυτός συνήθως γίνεται βάσει κανόνων που έχουν προκύψει από την εμπειρία και όχι από κάποια συστηματική μεθοδολογία που λαμβάνει υπόψη αφενός τη δίαιτα των πλημμυρών στη περιοχή και αφετέρου τις σύνθετες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διέλευση της πλημμύρας. Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας καινοτόμου προσέγγισης στοχαστικής προσομοίωσης και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για τη διαχείριση θυροφραγμάτων, με εφαρμογή στο ιδιαίτερα κρίσιμο φράγμα Πουρνάριου Ι του Αράχθου. Κεντρική του συνιστώσα είναι ένα αριθμητικό σχήμα διόδευσης πλημμύρας, που υλοποιεί μια υδραυλικά συνεπή μεθοδολογία κατάρτισης της σχέσης στάθμης – παροχής εκχειλιστών τύπου Ogee, και μια διαδικασία προσομοίωσης του χειρισμού των θυροφραγμάτων και των στροβίλων, με χρήση χαρακτηριστικών τιμών στάθμης κατά την άνοδο και την ύφεση της πλημμύρας. Με εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας στο φράγμα Πουρνάριου Ι, προσδιορίστηκαν κανόνες λειτουργίας καταρχήν για την πλημμύρα σχεδιασμού των 10000 ετών (τοπικός κανόνας), και ακολούθως για ένα ευρύ φάσμα πλημμυρών μικρότερου μεγέθους που παρήχθησαν συνθετικά. Με αφετηρία τον τοπικό κανόνα, δώσαμε έμφαση στη διερεύνηση της ανταγωνιστικότητας μεταξύ των κριτηρίων ενέργειας και ασφάλειας, προκειμένου να καταλήξουμε σε μια πρόσφορη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, από τις στοχαστικές αναλύσεις καταλήξαμε σε έξι κανόνες λειτουργίας, που αναφέρονται σε πλημμύρες μικρής και μεγάλης περιόδου επαναφοράς και τρία σενάρια αρχικής στάθμης. Στις αναλύσεις αυτές δόθηκε περισσότερη βαρύτητα στην οικονομικότητα (ελαχιστοποίηση ενέργειας που χάνεται λόγω υπερχείλισης), σε αντίθεση με τον τοπικό κανόνα ο οποίος είναι πολύ συντηρητικός και επικεντρώνεται στην ασφάλεια της κατασκευής και των κατάντη έργων. Ο πιο αντιπροσωπευτικός ολικός κανόνας εφαρμόστηκε για το πλημμυρικό επεισόδιο του 2005, η δε επίδοσή του αποδείχθηκε πλήρως συγκρίσιμη με τον επιτυχή χειρισμό του έμπειρου προσωπικού τη ΔΕΗ.

Abstract

Hydroelectric works are equipped with spillway gates are advantageous, since they ensure an increased hydrodynamic potential, which favors in turn the produced energy. However, in the case of a flood event, careful manipulations are essential, to assure the safety of the dam and the downstream works. These are usually employed on the basis of operation rules that are derived empirically, and not as result of a systematic methodology that accounts for the flood regime of the study area as well as the complex process that are taken into place during the flood routing. The objective of this thesis is the development of a novel approach for gate management that combines stochastic simulation and multicriteria optimization, applied to the particularly crucial dam of Pournari I, at Arachthos River. Key component is a numerical scheme for flood routing, which implements a hydraulically consistent method for extracting the flow-stage relationship through ogee-type spillways, and a simulation procedure for the manipulation of gates and turbines, using characteristic level thresholds during the rising and fallinf of a flood hydrograph. By employing the aforementioned methodologies at Pournari dam, we determined the aforementioned methodologies at Pournari dam, we determined operation rule initially for the design flood of 10000 years return period (local rule), and next for a wide spectrum of smaller floods that have been synthetically generated. Starting from the local rule, we emphasized the investigation of competitiveness between the energy and safety criteria, in order to outcome to a compromise formulation of the optimization problem. Next, from the stochastic analyses we concluded to six operation rules, which refer to flood events of small and large return period, and three initial stage scenarios. In these analyses, we gave further weight to economy (i.e. minimization of energy losses due to spill), in contrast to the local rule, which is conservative as it focuses to the safety of the dam and the downstream works. The most representative rule has been applied to the flood event of year 2005, and its performance proved to be comparative with the successful manipulations by the expertise personnel of PCC.

1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο και στόχοι

Η διαχείριση των πλημμυρών σε αντιπλημμυρικά έργα που ελέγχονται από θυροφράγματα, αποτελεί ένα ιδιαίτερα σύνθετο αντικείμενο μελέτης (Zargar et al., 2016). Το πλέον τυπικό παράδειγμα τέτοιων έργων είναι οι εκχειλιστές και τα θυροφράγματα υδροηλεκτρικών φραγμάτων, που εξυπηρετούν την μεγιστοποίηση του διαθέσιμου υδροδυναμικού, μέσω αύξησης τόσο του όγκου αποθήκευσης όσο και του ύψους πτώσης. Όπως διαπιστώνεται με τη πάροδο των ετών, το πρόβλημα γίνεται ολοένα και πιο πολύπλοκο, καθώς συχνά εγείρονται νομικές απαιτήσεις από πληγέντες στις κατάντη των φραγμάτων περιοχές, ως αποτέλεσμα εσφαλμένων χειρισμών. Η πολυπλοκότητα αυτή καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη ενός πλαισίου βέλτιστης διαχείρισης των έργων ελέγχου πλημμυρών σε ταμιευτήρες (θυροφράγματα και στρόβιλοι), ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της ενέργειας που χάνεται, η μεγιστοποίηση της παρεχόμενης ασφάλειας του ίδιου του φράγματος και των έργων υπερχειλίσης, και η ελαχιστοποίηση του πλημμυρικού κινδύνου της κατάντη αυτού περιοχής (Qin et al., 2010).

Κατά κανόνα, ο χειρισμός των θυροφραγμάτων κατά τη διάρκεια πλημμύρας βασίζεται σε κανόνες που έχουν προκύψει εμπειρικά. Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας συστηματικής μεθοδολογίας προσδιορισμού των κανόνων λειτουργίας των υπόψη έργων, που λαμβάνει υπόψη αφενός τη δίαιτα των πλημμυρών στη περιοχή ενδιαφέροντος και αφετέρου τις σύνθετες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διέλευση της πλημμύρας. Στο πλαίσιο αυτό προτείνεται μια καινοτόμος προσέγγιση στοχαστικής προσομοίωσης και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για τη διαχείριση θυροφραγμάτων, που καταλήγει σε κανόνες που χαρακτηρίζονται από απλότητα στην εφαρμογή τους και γενικότητα ως προς το φάσμα των δυνητικών καταστάσεων που μπορούν να προκύψουν στη διάρκεια ζωής του φράγματος.

Το παραπάνω μεθοδολογικό πλαίσιο εφαρμόζεται για τη περίπτωση του φράγματος Πουρνάρι Ι του ποταμού Αράχθου που ενέχει το μεγαλύτερο κίνδυνο δυνητικών καταστροφών σε

περίπτωση θραύσης, δεδομένου ότι η κοίτη του Αράχθου κατάντη του φράγματος κατακλύζεται από κτίσματα και ανθρώπινες παρεμβάσεις, οι οποίες αυξάνονται με ραγδαίο ρυθμό.

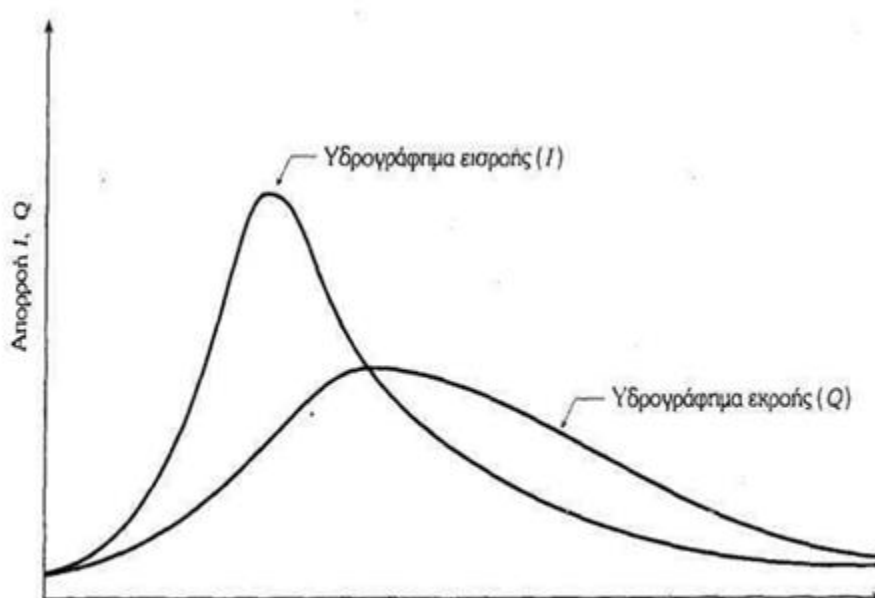
1.2. Διάρθρωση εργασίας

Αρχικά, στο **Κεφάλαιο 1** γνωστοποιούνται το αντικείμενο μελέτης και οι στόχοι της εν λόγω εργασίας. Έπειτα, στο **Κεφάλαιο 2** παρατίθενται βιβλιογραφικά στοιχεία από δημοσιεύσεις σχετικές με συστήματα λήψης αποφάσεων και μεθόδους διόδευσης πλημμύρας σε ταμειυτήρες. Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται αναλυτικά το μεθοδολογικό πλαίσιο τόσο της διόδευσης πλημμύρας όσο και η διαδικασία κατάρτισης της σχέσης στάθμης – παροχής για εκχειλιστή τύπου Ogee. Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται αναλυτικά η περιοχή μελέτης και τα χαρακτηριστικά του φράγματος ενώ στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από την επί τόπου επίσκεψη. Επιπλέον στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται τα δεδομένα για τη εφαρμογή στη περίπτωση του Πουρναρίου Ι ενώ στο **Κεφάλαιο 7** εφαρμόζεται το μεθοδολογικό πλαίσιο του Κεφαλαίου 3 στο προαναφερθέν έργο εφαρμογής. Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 8** αναλύεται η διαδικασία της βελτιστοποίησης των κανόνων λειτουργίας των θυροφραγμάτων στη περίπτωση της πλημμύρας σχεδιασμού ενώ στο **Κεφάλαιο 9** παρουσιάζεται το στοχαστικό πλαίσιο βελτιστοποίησης συνθετικών χρονοσειρών παροχής ωριαίας κλίμακας. Εν συνεχεία, στο **Κεφάλαιο 10** παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης των κανόνων λειτουργίας των θυροφραγμάτων για τις περιπτώσεις των συνθετικών πλημμυρογραφημάτων, καθώς και η σύγκριση των προαναφερθέντων κανόνων λειτουργίας με το χειρισμό της ΔΕΗ για το πλημμυρικό επεισόδιο του 2005. Τέλος, στο **Κεφάλαιο 11** συνοψίζονται τα συμπεράσματα και παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2. Χειρισμοί θυροφραγμάτων σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες-Ελληνική και διεθνής εμπειρία

2.1. Το γενικό πρόβλημα

Η διόδευση των πλημμυρών είναι ένα πρόβλημα που συναντάται σε πολλά έργα του υδραυλικού μηχανικού. Μια χαρακτηριστική απεικόνιση της διεργασίας της διόδευσης απεικονίζεται στην **Εικόνα 1**, όπου παρουσιάζεται ο μετασχηματισμός ενός υδρογραφήματος εισροής σε υδρογράφημα εκροής, το οποίο είναι πιο εξομαλυμένο.



Εικόνα 1: Ο μετασχηματισμός του υδρογραφήματος εισροής σε υδρογράφημα εκροής λόγω της διόδευσης (Μάρης 1980)

Στα φράγματα, η διόδευση πλημμυρών γίνεται μέσω του υπερχειλιστή. Στο μεγαλύτερο ποσοστό των υδροηλεκτρικών φραγμάτων, ο υπερχειλιστής περιλαμβάνει θυροφράγματα, η ύπαρξη των οποίων αποσκοπεί στην αύξηση του αποθηκευτικού όγκου καθώς και στη διατήρηση υψηλού ύψους πτώσης, με απώτερο στόχο την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας.

Αξίζει να υπογραμμιστεί το γεγονός ότι στη περίπτωση ελεύθερου υπερχειλιστή η διόδευση γίνεται με φυσικό τρόπο, ενώ στη περίπτωση εκχειλιστή με θυροφράγματα παρέχεται η

δυνατότητα διαχείρισης της πλημμύρας, με γνώμονα την ισορροπία μεταξύ οφέλους και ασφάλειας. Ωστόσο και στις δύο περιπτώσεις ακολουθείται το πρότυπο της **Εικόνα 1**.

Πιο αναλυτικά, στη περίπτωση μιας μικρής πλημμύρας, η λανθασμένη λειτουργία των θυροφραγμάτων μπορεί να επιφέρει οικονομική ζημία, καθώς το άσκοπο άνοιγμα αυτών μειώνει τόσο τον αποθηκευμένο όγκο νερού, όσο και την παραγόμενη ενέργεια. Κατά αντιστοιχία, στην περίπτωση μεγάλης πλημμύρας, η μη έγκαιρη χρήση των θυροφραγμάτων για την απελευθέρωση νερού μέσω του εκχειλιστή, μπορεί ακόμη και να οδηγήσει σε υπερπήδηση και καταστροφή του φράγματος καθώς και των κατάντη έργων.

Παραδοσιακά, οι χειριστές των φραγμάτων βασίζονταν σε νομογραφήματα και σε κανόνες λειτουργίας οι οποίοι οδηγούσαν λχ. σε άνοιγμα των θυροφραγμάτων σε συγκεκριμένη στάθμη ασφαλείας. Αξιοσημείωτος είναι ο συνδυασμός των παραπάνω, με δίκτυα υδρομετεωρολογικών μετρήσεων στην ανάντη λεκάνη. Η ΔΕΗ στο μεγαλύτερο ποσοστό των φραγμάτων της λειτουργεί κατά αυτό τον συνδυαστικό τρόπο.

Ωστόσο με τη πάροδο των ετών, αναπτύχθηκαν ηλεκτρονικά συστήματα αισθητήρων και εξελιγμένα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων DSS (Decision Support Systems) τα οποία και ακολουθούν ραγδαία ανάπτυξη.

Αξίζει να αναφερθεί ότι το 1985 ο Loucks ανέπτυξε το DSS, ακολουθώντας ένα διαδραστικό μοντέλο υδατικών πόρων και αργότερα το σύστημα αυτό αξιοποιήθηκε για τη μελέτη της ποιότητας του νερού, τη διαχείριση ταμιευτήρων, το βιώσιμο σχεδιασμό συστημάτων διανομής νερού, την πρόβλεψη ροής ποταμών, την παρακολούθηση και διαχείριση της ξηρασίας, την διανομή του νερού, τη διαχείριση πλημμυρών και την διαχείριση υδατικών πόρων σε λεκάνη απορροής ποταμού.

Απαραίτητα για τη χρήση ενός DSS είναι:

- Η δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο, για την απόκτηση πλημμυρικών δεδομένων
- Η γνώση υδραυλικής και υδρολογίας
- Οι προγραμματιστικές ικανότητες σε Η/Υ

Χαρακτηριστικές περιπτώσεις συστημάτων λήψης αποφάσεων καθώς και διόδευσης πλημμύρας σε έργα με ή χωρίς θυροφράγματα, παρουσιάζονται στις υποενότητες 2.3, 2.4 και 2.5.

2.2. Τα φράγματα της ΔΕΗ – Ελληνική εμπειρία

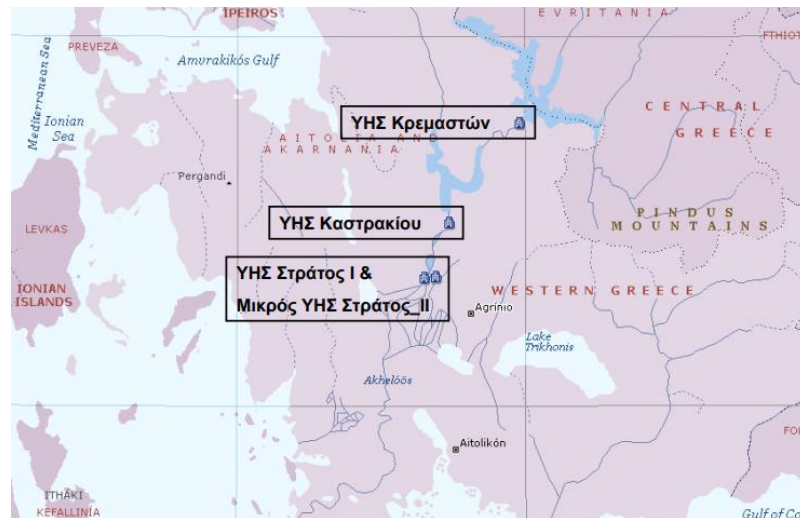
2.2.1 Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ

Η ΔΕΗ έχει συμβάλει δραστικά στην ανάπτυξη των υδροηλεκτρικών έργων, τα οποία και συμπεριλαμβάνει στο δυναμικό της. Πιο αναλυτικά, τα υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ, τα οποία απεικονίζονται και στην **Εικόνα 2** είναι τα ακόλουθα.



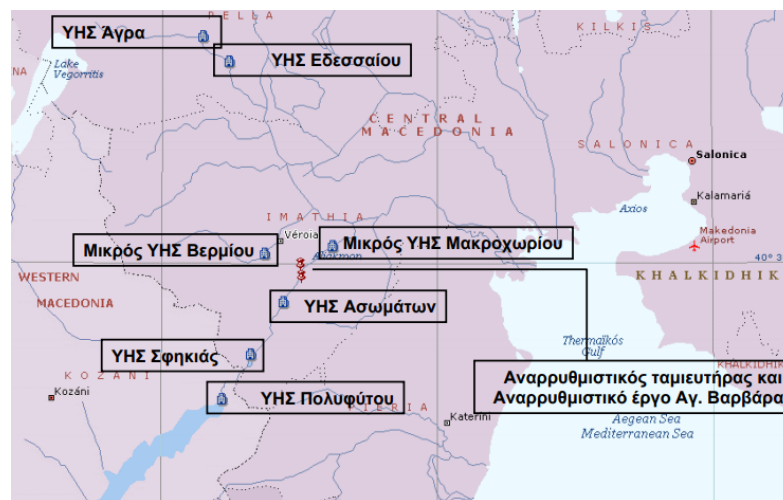
Εικόνα 2: Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ

1. Το συγκρότημα του Αχελώου (**Εικόνα 3**) που περιλαμβάνει τους σταθμούς Κρεμαστά, Καστρακί, Στράτος Ι,ΙΙ με συνολική ισχύ 913.0 MW.



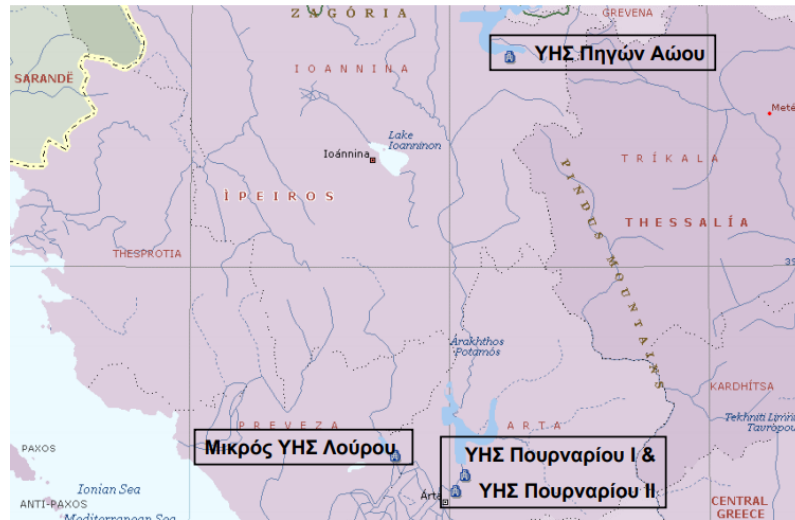
Εικόνα 3: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Αχελώου (www.ypethe.gr)

2. Το συγκρότημα του Αλιάκμονα (**Εικόνα 4**) που απαρτίζεται από τους σταθμούς Πολύφυτο, Σφηκιά, Ανώματα, Αγ. Βαρβάρα, Μακροχώρι, Βέρμιο, Άγρας, Εδεσσαίος με συνολική ισχύ 880.1 MW.



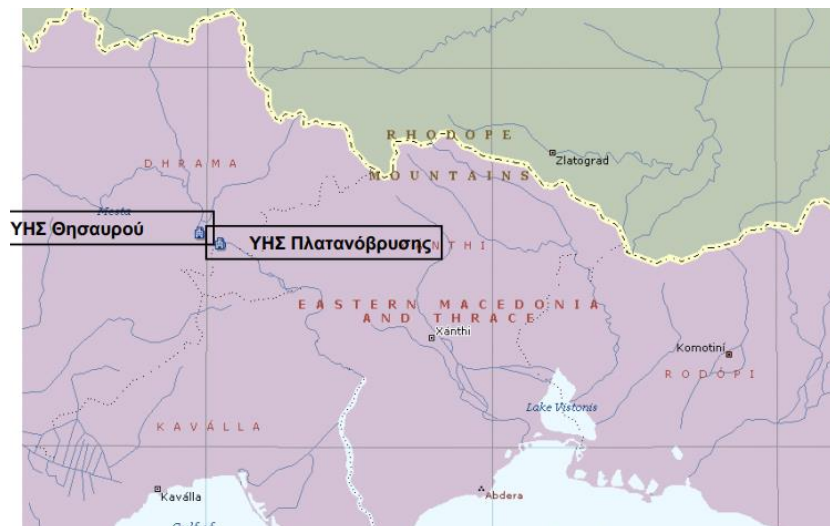
Εικόνα 4: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Αλιάκμονα (www.ypethe.gr)

3. Το συγκρότημα του Αράχθου (**Εικόνα 5**) που περιλαμβάνει τους σταθμούς Αώος, Πουρνάρι Ι,ΙΙ και Λούρος με συνολική παραγόμενη ισχύ 553.9 MW.



Εικόνα 5: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Αράχθου (www.ypethe.gr)

4. Το συγκρότημα του Νέστου (**Εικόνα 6**) που περιλαμβάνει τους σταθμούς Θησαυρός και Πλατανόβρυση με συνολική παραγόμενη ισχύ 500.0 MW.



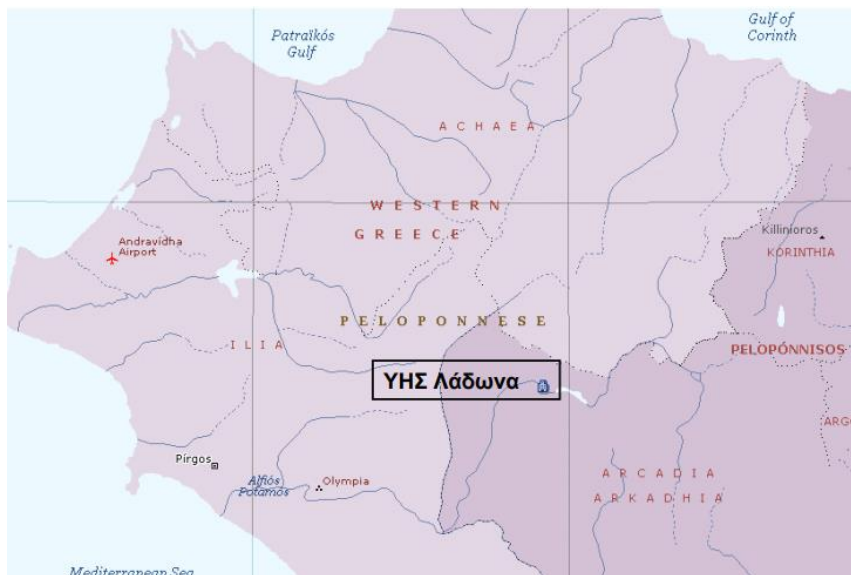
Εικόνα 6: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Νέστου (www.ypethe.gr)

5. Ο υδροηλεκτρικός σταθμός του Πλαστήρα (**Εικόνα 7**) που αντιστοιχεί σε ισχύ ίση με 129.9 MW.



Εικόνα 7: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Πλαστήρα (www.ypethe.gr)

6. Ο υδροηλεκτρικός σταθμός του Λάδωνα (**Εικόνα 8**) ο οποίος παράγει 70.0 MW.



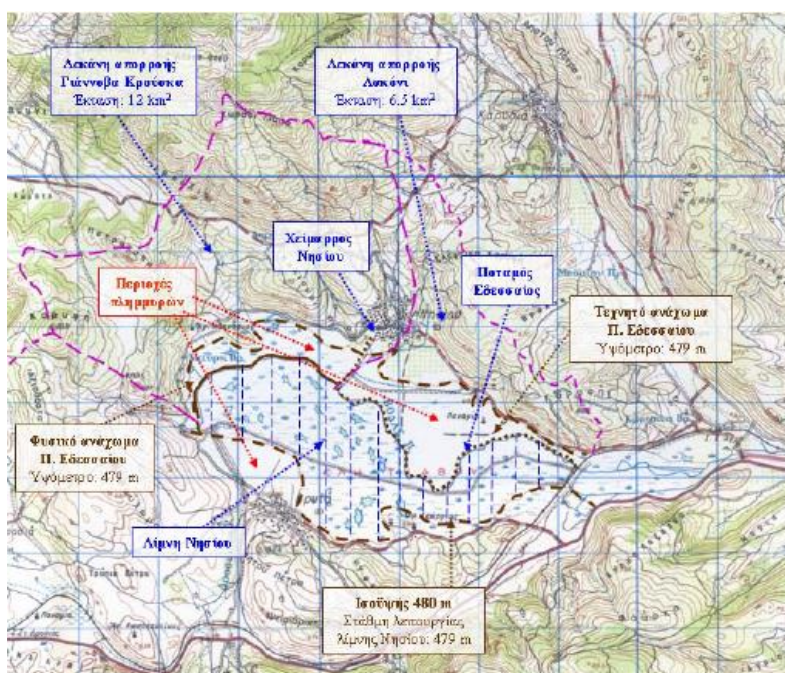
Εικόνα 8: Υδροηλεκτρικό συγκρότημα Λάδωνα (www.ypethe.gr)

7. Λοιποί μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί που παράγουν 1.2 MW.

2.2.2 Πλημμυρικά επεισόδια στον Ελλαδικό χώρο

2.2.2.i Πλημμύρα της λίμνης Νησίου 1999 και 2002

Η λίμνη Νησίου είναι ένα φυσικό σύστημα (**Εικόνα 9**) που αποτελεί πεδίο πλημμυρών και προσχώσεων του ποταμού Εδεσσαίου (Κουτσογιάννης και Μαμάσης, 2005). Το σύστημα αποστραγγίζεται αργά μέσω των μικρής παροχετευτικότητας καταβοθρών που διαθέτει και των επιφανειακών - προς τα κατάντη - ροών του ποταμού. Οι αργοί αυτοί ρυθμοί αποστράγγισης προκαλούν προσωρινή κατάκλιση της λίμνης, γεγονός που της προσδίδει αντιπλημμυρικά χαρακτηριστικά. Τα όρια της λίμνης είναι τα αναχώματα της όχθης του ποταμού Εδεσσαίου και το φυσικό έδαφος στα βόρεια και στα νότια αντίστοιχα και έχουν υψόμετρο +479 m.



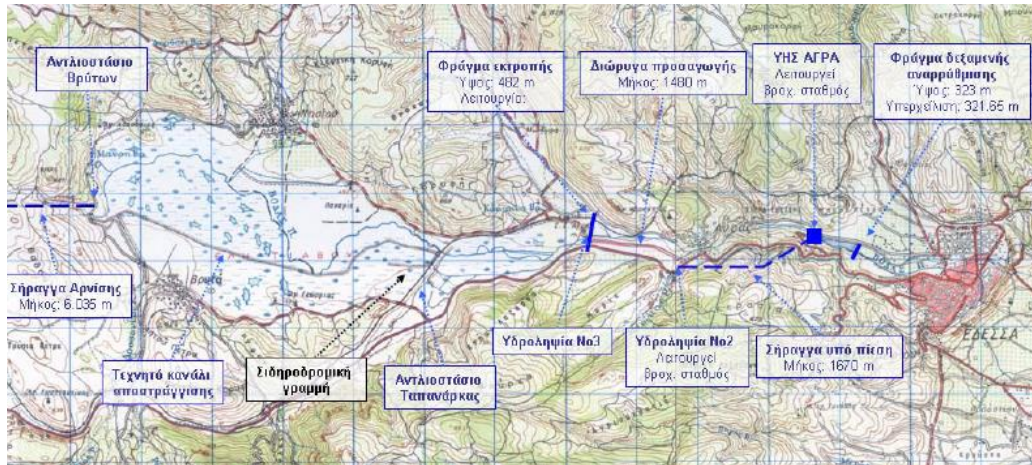
Εικόνα 9: Φυσικό σύστημα λίμνης Νησίου

Η Γιάννοβα Κρούσα είναι η περιοχή μεταξύ της Βόρειας όχθης του ποταμού Εδεσσαίου και της Δυτικής όχθης του χειμάρρου του Νησίου. Πρόκειται επί της ουσίας για μια κλειστή λεκάνη,

έκτασης περί τα 12 km² η οποία επικοινωνεί με τη λίμνη Νησίου όταν η στάθμη γίνει μεγαλύτερη από +479 m και δεν έχει αποστραγγιστική ικανότητα, γεγονός που οδηγεί σε μόνιμη κατάκλιση των χαμηλότερων τμημάτων της.

Η περιοχή Λακόνι εκτείνεται μεταξύ της Βόρειας όχθης του ποταμού Εδεσσαίου και της Ανατολικής όχθης του χειμάρρου Νησίου. Πρόκειται για μια κλειστή λεκάνη έκτασης 6.5 km², μέσου υψομέτρου +476.5 m και χωρίζεται από τη λίμνη Νησίου με τα αναχώματα της Βόρειας όχθης του ποταμού Εδεσσαίου, τα οποία όπως προαναφέρθηκε αντιστοιχούν σε υψόμετρο +479 m.

Η ΔΕΗ από το 1950 ξεκίνησε την κατασκευή πληθώρας υδροηλεκτρικών έργων με απώτερο στόχο τη παραγωγή ενέργειας. Εξέχουσας σημασίας είναι το υδροηλεκτρικό έργο της Άγρας (**Εικόνα 10**) που αξιοποιεί το δυναμικό της λίμνης Νησίου και της λίμνης Βεγορίτιδας καθώς επίσης και η σήραγγα της Άρνισσας μήκους 6 km η οποία συμβάλλει στην ενίσχυση της αβαθούς λίμνης του Νησίου, μέσω διοχέτευσης ποσότητας νερού από τη λίμνη Βεγορίτιδα που βρίσκεται σε υψόμετρο +520 m. Ωστόσο, οι απολήψεις από τη λίμνη Βεγορίτιδα έπαψαν το 1989. Πλέον στη περιοχή υπάρχει φράγμα με υψόμετρο στέψης +482 m από το οποίο ξεκινάει διώρυγα προσαρμογής μήκους 1480 m και υπό πίεση αγωγός υδατόπτωσης μήκους 440 m, έργα που αποσκοπούν στη μεταφορά νερού στον υδροηλεκτρικό σταθμό της Άγρας. Κατόπιν, το νερό συγκεντρώνεται σε αναρυθμιστική δεξαμενή όγκου 300000 m³ και έπειτα διοχετεύεται στον ποταμό Εδεσσαίο. Τέλος, κατασκευάστηκαν τεχνητά κανάλια παράλληλα στη φυσική κοίτη του ποταμού, τα οποία φέρουν αναχώματα σε υψόμετρο +479 m.



Εικόνα 10: Τεχνητό σύστημα λίμνης Νησιού

Η Έδεσσα δέχεται νερά από τη λίμνη Νησιού μέσω του υδροηλεκτρικού έργου της Άγρας, καθώς και από τη λεκάνη της Καρκαίας.

Σύμφωνα με τους κανόνες λειτουργίας της ΔΕΗ, στη περίπτωση που τα κανάλια της Έδεσσας επαρκούν για τη παροχέτευση της λεκάνης της Καρκαίας, είναι εφικτή η παροχέτευση επιπλέον ποσότητας νερού από τη λίμνη του Νησιού. Σε αντίθετη περίπτωση, δεν πραγματοποιείται παροχέτευση από της λίμνη του Νησιού με αποτέλεσμα την άνοδο της στάθμης αυτής. Έτσι, σε ενδεχόμενη βροχόπτωση, η δεξαμενή αναρρόθμισης είναι σκόπιμο να έχει στάθμη μικρότερη από +318 m, ώστε να είναι εφικτή η ανάσχεση πλημμύρας από την λεκάνη της Καρκαίας.

Κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ 17 και 20 Μαρτίου 1999 πραγματοποιήθηκαν βροχοπτώσεις συνολικού ύψους 80 mm ενώ το έδαφος ήταν ήδη κορεσμένο από προηγούμενες βροχοπτώσεις. Αυτό επέφερε καταστρεπτικές συνέπειες για τη περιοχή. Ωστόσο, όπως κρίθηκε έπειτα από τους κατάλληλους ελέγχους, οι χειρισμοί της ΔΕΗ ήταν οι προβλεπόμενοι, λαμβάνοντας υπόψη ότι η πόλη της Έδεσσας παρέμεινε ασφαλής. Οι καταστροφές περιορίστηκαν κυρίως στη περιοχή από το Βόρειο φυσικό ανάχωμα του ποταμού Εδεσσαίου και το Δυτικό ανάχωμα του χειμάρρου Νησιού, οι οποίες παρέμειναν κατακλισμένες μέχρι τον Ιούνιο.

Ένα ακόμα πλημμυρικό επεισόδιο σημειώθηκε κατά το διάστημα 1-10 Δεκεμβρίου 2002. Πραγματοποιήθηκαν εξαιρετικά ισχυρές βροχοπτώσεις συνολικού ύψους 300 mm, ενώ το έδαφος ήταν και πάλι ήδη κορεσμένο από προηγούμενες βροχοπτώσεις. Παρότι ο υδροηλεκτρικός σταθμός της Άγρας είχε λειτουργήσει από τις προηγούμενες ημέρες αποσκοπώντας στην αποφόρτιση της λίμνης Νησίου, στις 7/12/2002 παρατηρήθηκε σημαντική ανύψωση της στάθμης της λίμνης. Και πάλι, οι χειρισμοί της ΔΕΗ θεωρήθηκαν εύλογοι. Ωστόσο, οι καταστροφές περιορίστηκαν στη περιοχή από το Βόρειο φυσικό ανάχωμα του ποταμού Εδεσσαίου και το Δυτικό ανάχωμα του χειμάρρου Νησίου η οποία παρέμεινε κατακλισμένη για πάνω από ένα έτος, καθώς και στη περιοχή μεταξύ του Βορείου αναχώματος του ποταμού και του ανατολικού αναχώματος της λίμνης Νησίου.

2.2.2.i Πλημμύρα του Αχελώου 1996

Ο ποταμός Αχελώος είναι ένας από τους μεγαλύτερους ποταμούς της Ελλάδας (Κουτσογιάννης και Μαμάσης, 2005). Το μήκος του είναι ίσο με 220 km, η λεκάνη απορροής του έχει επιφάνεια ίση με 4780 km² ενώ η μέση ετήσια παροχή του ανέρχεται στα 140 m³/s. Πλημμυρικές παροχές της τάξης των 2000 m³/s δεν είναι σπάνιες.

Στο υδατικό σύστημα του συμπεριλαμβάνονται οι φυσικές λίμνες της Τριχωνίδας, της Λυσιμαχίας και του Οζερού, καθώς σε πλημμυρικές συνθήκες υπερχειλίζουν στα κατάντη του ποταμού. Το χαμηλό υψόμετρο των παρόχθιων περιοχών, οδηγεί σε επικράτηση πλημμυρικών συνθηκών σε αυτές, ακόμα και για συνηθισμένες παροχές, γεγονός που υπογραμμίζει την σημασία της κατασκευής αναχωμάτων στα σημεία αυτά.

Η ΔΕΗ αποσκοπώντας στη παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, προχώρησε στη κατασκευή των υδροηλεκτρικών φραγμάτων του Ταυρωπού, των Κρεμαστών, του Καστρακίου, του Στράτου (I και II), της Μεσοχώρας και της Συκιάς. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα έργα του Καστρακίου, του Στράτου και των Κρεμαστών έχουν κατασκευαστεί στον κύριο ρου του ποταμού και ορίζουν ένα ενιαίο σύστημα (**Εικόνα 11**).



Εικόνα 11: Υδατικό σύστημα κάτω Αχελώου

Πιο αναλυτικά, το νερό συλλέγεται στο ταμιευτήρα των Κρεμαστών, διέρχεται από τους παραπάνω τρεις υδροηλεκτρικούς σταθμούς για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τέλος παροχετεύεται στη φυσική κοίτη του Αχελώου μέσω της διώρυγας φυγής του φράγματος Στράτου, μήκους 7 km. Η εκροή του υδροηλεκτρικού σταθμού Στράτος I είναι εκείνη που παροχετεύεται στη φυσική κοίτη του Αχελώου, ενώ του Στράτος II αναρυθμίζεται από μικρό φράγμα εκτροπής και διοχετεύεται στις αρδευτικές διώρυγες. Τα νερά που συγκεντρώνονται στις εκβολές προέρχονται από τις εκροές του σταθμού του Στράτου, τη φυσική απορροή της λεκάνης κατάντη του Στράτου, τις υπερχειλίσεις του φράγματος και των φυσικών λιμνών σε περίπτωση πλημμυρών. Η κατασκευή των έργων της ΔΕΗ οδήγησε στη δημιουργία αισθήματος ασφάλειας στους κατοίκους των γειτονικών περιοχών, οι οποίοι επέκτειναν τις δραστηριότητές τους ακόμα και εντός της κοίτης του ποταμού.

Οι Υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ που προαναφέραμε, χρησιμοποιούνται κυρίως για την κάλυψη των αναγκών κατά τις αιχμές του ημερήσιου φορτίου, αλλά και ως εφεδρείες για το Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα. Τα φράγματα Κρεμαστά, Καστράκι και Στράτος φέρουν υπερχειλιστές παροχευτικότητας 3000, 3500 και 4000 m³/s επομένως το σύστημα έχει παροχή σχεδιασμού ίση με 4500 m³/s (4000 m³/s και 500 m³/s από το σταθμό του Στράτου). Χάρη στο σύστημα, η πλημμυρική αιχμή των 9800 m³/s που αντιστοιχεί σε ακραία φυσική πλημμύρα των Κρεμαστών, απομειώνεται σε 4500 m³/s δεδομένης της ανάσχεσης που πραγματοποιείται.

Κατά τη περίοδο μεταξύ 21 Νοεμβρίου και 5 Δεκεμβρίου 1996 έλαβαν χώρα έντονες βροχοπτώσεις οι οποίες συνεχίστηκαν μέχρι και τον Ιανουάριο του 1997. Στις 27 Νοεμβρίου η ωριαία παροχή αιχμής υπολογίστηκε ίση με 2000 m³/s περίπου. Η ΔΕΗ κρίθηκε ότι έκανε τους κατάλληλους χειρισμούς και αξιοποίησε τους υπερχειλιστές των τριών φραγμάτων.

Γενικά, βασικός στόχος είναι η επιδίωξη υψηλής στάθμης ώστε να εξασφαλιστεί η ικανοποίηση των υδρευτικών και των αρδευτικών αναγκών, καθώς και η επαρκής παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο η παροχή αντιπλημμυρικής προστασίας είναι ένας στόχος μείζονος σημασίας. Έτσι τα θυροφράγματα του ταμιευτήρα των Κρεμαστών παραμένουν διαρκώς ανοιχτά κατά τους χειμερινούς μήνες.

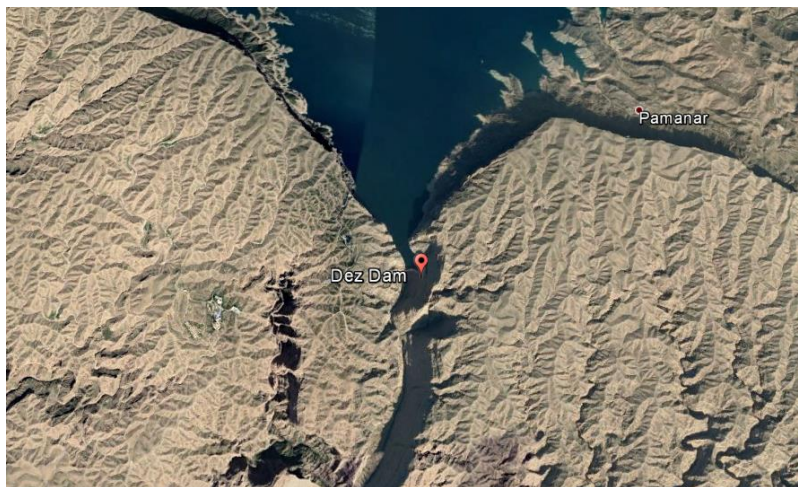
Κατά το παραπάνω πλημμυρικό επεισόδιο, τα θυροφράγματα παρέμειναν κλειστά και ο αντιπλημμυρικός σκοπός τέθηκε σε προτεραιότητα. Οι έντονες βροχές συνεχίστηκαν ενώ όταν είχαν εισρεύσει περισσότερα από 800 εκατομμύρια m³ και η στάθμη του ταμιευτήρα των Κρεμαστών είχε ανέβει κατά περισσότερο από 8 m, η ΔΕΗ έθεσε σε λειτουργία τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, χωρίς ωστόσο να ενεργοποιήσει τον υπερχειλιστή του Στράτου, ώστε να μην διοχετευθούν στον ποταμό υπερβολικά μεγάλες ποσότητες νερού. Για τα σημεία που δεν ελέγχονται από τη ΔΕΗ οι συνέπειες ήταν καταστροφικές.

2.3. Σύστημα υποστήριξης αποφάσεων φράγματος Dez, Ιράν

Στη περιοχή του νοτιοδυτικού Ιράν, και συγκεκριμένα στην επαρχία Khuzestan, απορρέουν 40000 hm³ νερού (Ghobadi & Kaboli, 2020). Ο ποταμός Dez είναι σημαντικός παραπόταμος

του ποταμού Karun και διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στη διαχείριση πλημμυρών. Προκύπτει από τη συμβολή των ποταμών Sezar και Bakhtiari και συναντά τον ποταμό Karun σε περίπου 120 km.

Το φράγμα Dez (**Εικόνα 12**) είναι τοξωτό, κατασκευασμένο από σκυρόδεμα και χρησιμοποιείται για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, ύδρευση και άρδευση. Έχει ύψος 203 m, μήκος 380 m και πλάτος στη περιοχή της στέψης ίσο με 27 m. Ο ταμιευτήρας του φράγματος έχει χωρητικότητα 3300 hm³. Διαθέτει τέσσερις σήραγγες εκροής, δύο στην ανατολική και δύο στη δυτική πλευρά, διαμέτρου 14.0 m και 12.6 m αντίστοιχα, παροχευτικότητας 3000 m³/s έκαστη, οι οποίες φέρουν συνολικά οκτώ τουρμπίνες παροχευτικότητας 240 m³/s. Επιπρόσθετα, στο μέσο του σώματος του φράγματος, και συγκεκριμένα στη στάθμη +222.7 m υπάρχουν τρία κωνικά θυροφράγματα για άρδευση με παροχευτικότητας έκαστου ίση με 60 m³/s, ενώ ο υπερχειλιστής έχει παροχευτικότητας 6000 m³/s, χαρακτηριστικό που το θέτει ίδιας κλίμακας με το έργο του Αράχθου που εξετάζουμε στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 12: Το φράγμα Dez, Ιράν (Google earth)

Στις 14 Απριλίου 2016 πραγματοποιήθηκε μια σημαντική πλημμύρα στο φράγμα Dez, η οποία προκάλεσε καταστροφές κατάντη αξίας 2500000 \$. Έτσι κρίθηκε αναγκαία η ανάπτυξη ενός συστήματος λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση πλημμυρών, καθώς έως τότε το φράγμα δεν διέθετε υποδομές για πρόβλεψη και ούτε σύστημα ειδοποίησης. Το σύστημα που αναπτύχθηκε

είναι γνωστό ως WDRFM (Web-based Decision Support system for Reservoir Flood Management).

Το σύστημα αυτό υπολογίζει τη παροντική κατάσταση του ταμιευτήρα (πριν την πλημμύρα) και προτείνει στο χειριστή τη βέλτιστη διαχείριση των θυροφραγμάτων σε περίπτωση πλημμυρικού επεισοδίου, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι κατάντη καταστροφές, λαμβάνοντας υπόψιν πολυεπίπεδη προσομοίωση και βελτιστοποίηση. Για την δημιουργία του αξιοποιήθηκαν δεκαπέντε σενάρια πλημμύρας από τις 14/4/2016 και η αποτελεσματικότητά του αποδεικνύεται από το γεγονός ότι έπειτα από σύγκριση ενός σεναρίου παραπλήσιων αρχικών συνθηκών και του πλημμυρικού συμβάντος, παρατηρήθηκε μείωση της μέγιστης ημερήσιας εκροής κατά 997.0 m³/s.

Τα Web-based decision making systems ξεπερνούν τις δυσκολίες των DSS και είναι τα πιο αποδοτικά, καθώς εμφανίζουν πλήθος πλεονεκτημάτων, όπως η δυνατότητα στιγμιαίας συλλογής δεδομένων από μια βάση δεδομένων, η διαθεσιμότητα ανά πάσα στιγμή και η ελευθερία στην επιλογή λογισμικού.

Το WDRFM (Web-based Decision support System for Reservoir Flood Management) εμφανίζει αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα όπως:

- Η παροχή λύσεων πριν την πραγματοποίηση του πλημμυρικού συμβάντος
- Η εύκολη πρόσβαση και χρήση σε όλους τους χειριστές
- Η πρόσβαση στις αναπτυσσόμενες χώρες, οι οποίες έχουν περιορισμένο όγκο δεδομένων
- Η δυνατότητα ανακοίνωσης της επερχόμενης πλημμύρας στην κατάντη περιοχή.

Βασικοί στόχοι του WDRFM είναι:

- ✓ Να είναι φιλικό στο χρήστη
- ✓ Η πρόβλεψη του πλημμυρογραφήματος εισροής βάσει μετρήσεων στον ποταμό ανάντη
- ✓ Παροχή συστήματος παρακολούθησης των συνθηκών του ταμιευτήρα
- ✓ Η δυνατότητα επιλογής του στόχου και των ορισμάτων εισόδου
- ✓ Η βελτιστοποίηση των επιπέδων ανοίγματος των θυροφραγμάτων

Σύμφωνα με το μοντέλο, στην πρώτη φάση πραγματοποιείται η πρόβλεψη του πλημμυρογραφήματος εισόδου βάσει των μετρήσεων στον ποταμό ανάντη, ενώ στη δεύτερη φάση πραγματοποιείται πολυφασική προσομοίωση και βελτιστοποίηση του υδρογραφήματος εκροής, βάσει των στόχων που έχουν οριστεί από τον χρήστη.

Πιο αναλυτικά, το κάθε υδρογράφημα εισόδου αποτελείται από τον ανερχόμενο κλάδο, ο οποίος βασίζεται στις μετρήσεις του ποταμού ανάντη, και τον καθοδικό κλάδο που περιγράφεται από τη σχέση (2.1) όπου Q_r η αιχμή του υδρογραφήματος, t_k ο χρόνος που απαιτείται μέχρι να επιτευχθεί παροχή Q_r , a συντελεστής που εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους και k συντελεστής που εξαρτάται από την επιφανειακή, την υπόγεια και την βασική ροή.

$$Q(t) = Q_r e^{-a(t-t_k)} \quad (2.1)$$

- Αν η παροχή του ποταμού ανάντη < παροχή της πλημμύρας \rightarrow κανονικές συνθήκες
- Αν η παροχή του ποταμού ανάντη > παροχή της πλημμύρας \rightarrow το υδρογράφημα εισόδου σχηματίζεται με αιχμή όση καταγράφηκε από τις ανάντη μετρήσεις

Το υδρογράφημα εισόδου προσδιορίζεται προσεγγιστικά από τη βελτιστοποίηση της στοχικής συνάρτησης και λαμβάνει υπόψη την αναλογία των $Q_{eis_{max}}$ και $Q_{ekr_{max}}$, όπου $Q_{eis_{max}}$ η μέγιστη παροχή εισροής και $Q_{ekr_{max}}$ η μέγιστη παροχή εκροής, ενώ η ακρίβεια επιβεβαιώνεται από τον χειριστή.

Με χρήση της μεθόδου Muskingum απορρίπτουμε τα υδρογραφήματα που δεν ανταποκρίνονται στη πραγματικότητα. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εξίσωση συνέχειας (2.2) όπου το απόθεμα S δίνεται από τη σχέση (2.3) στην οποία :

- k σταθερά αποθήκευσης που προσεγγιστικά ισούται με τον χρόνο που απαιτείται μέχρι το νερό να διανύσει την απόσταση από το ποτάμι μέχρι τον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της πλημμύρας
- x αδιάστατος συντελεστής που αντικατοπτρίζει την επίδραση της εισροής και της εκροής στο απόθεμα του ποταμού και λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0, 0.5]$ για φυσικά ποτάμια.

Οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται από το σύστημα αρκεί να εισάγουμε το πλημμυρογράφημα εισροής.

$$\frac{dS}{dt} = I_t - Q_t \quad (2.2)$$

$$S = k [x I_t + (1 - x) Q_t] \quad (2.3)$$

Έπειτα ακολουθεί η πολυφασική ανάλυση - βελτιστοποίηση, κατά την οποία το ύψος που αντιστοιχεί στον ωφέλιμο όγκο χωρίζεται σε επιμέρους διαστήματα. Συγκεκριμένα, όταν η στάθμη του ταμιευτήρα εξισωθεί με κάποια από τις χαρακτηριστικές στάθμες, ένας προκαθορισμένος όγκος νερού απελευθερώνεται μέσω του υπερχειλιστή, από κάθε τμήμα, ανάλογα με τον κλάδο της πλημμύρας στον οποίο βρισκόμαστε. Έτσι, το υδρογράφημα βελτιστοποιείται ανάλογα με τη στοχική συνάρτηση.

Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες ο προσδιορισμός των παραμέτρων δεν είναι εύκολος, λόγω δημιουργίας loops. Ενδεικτικά τέτοιες περιπτώσεις είναι:

- Η αύξηση στην αναλογία των $Q_{eis_{max}}$, $Q_{ekr_{max}}$ στη στοχική συνάρτηση
- Η επιλογή χαμηλής στάθμης ταμειυτήρα ενώ παράλληλα η τιμή της $Q_{eis_{max}}$ είναι αρκετά μεγάλη
- Η αρχική απόσταση της στάθμης του ταμειυτήρα μέχρι την στέψη του υπερχειλιστή να είναι πολύ μικρή και η τελική στάθμη να μην φτάνει τη στέψη του υπερχειλιστή είτε να την ξεπερνά μηδαμινά
- Η επιλογή υψηλής στάθμης ταμειυτήρα ενώ η $Q_{eis_{max}}$ είναι αρκετά μικρή.

Προς αντιμετώπιση των παραπάνω περιπτώσεων, τροποποιούμε την εκροή των θυροφραγμάτων βάσει προτεραιότητας και προ-απελευθερωτικής διαδικασίας, ενώ ως τελική και έσχατη λύση ορίζεται η ειδοποίηση των αρμόδιων για λήψη μέτρων.

Αξιοσημείωτο είναι ότι στόχος του WDRFM είναι ο έλεγχος της πλημμύρας μέσω του κατάλληλου ανοίγματος των θυροφραγμάτων χωρίς να προϋποθέτει κάποια αλλαγή της εκροής από άλλες εξόδους. Η αντιμετώπιση του πλημμυρικού συμβάντος γίνεται βάσει των παρακάτω προτεραιοτήτων:

- 1.Υπερχειλιστής / θυροφράγματα
- 2.Βήμα προς βήμα αλλαγή στις αρδευτικές εκροές
- 3.Προ-απελευθερωτική διαδικασία
- 4.Σήμα κινδύνου

Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε σε λογισμικό ASP.NET και γλώσσα C#. Οπτικοποιείται στο χρήστη με γραφήματα, κείμενα και checkboxes. Ο χρήστης εισάγει τις απαραίτητες πληροφορίες και το σενάριο και χρησιμοποιεί, ανάλογα με την εξοικείωση του έναν από τους αλγορίθμους PSO, GA, SA.

Λαμβάνοντας υπόψιν τη πολυφασική προσομοίωση, βελτιστοποιούνται τα επίπεδα ανοίγματος των θυροφραγμάτων και προσδιορίζονται οι τελικοί παράμετροι του μοντέλου.

Το WDRFM λειτουργεί αυτόματα και χρησιμοποιείται σε πολλούς ταμειυτήρες ανάλογων συνθηκών, με τροποποίηση των παραμέτρων.

Αποσκοπώντας στην βελτίωση της ακρίβειας του WDRFM προτείνονται:

- ❖ Ακριβείς μέθοδοι για το προσδιορισμό της ροής του ποταμού
- ❖ Προσδιορισμός της απορροής στη μέση λεκάνη
- ❖ Ανάπτυξη μεθόδων βελτιστοποίησης
- ❖ Σύνδεση του WDRFM με GIS για προσδιορισμό των πλημμυρικών εκτάσεων
- ❖ Σύνδεση με συστήματα forecasting

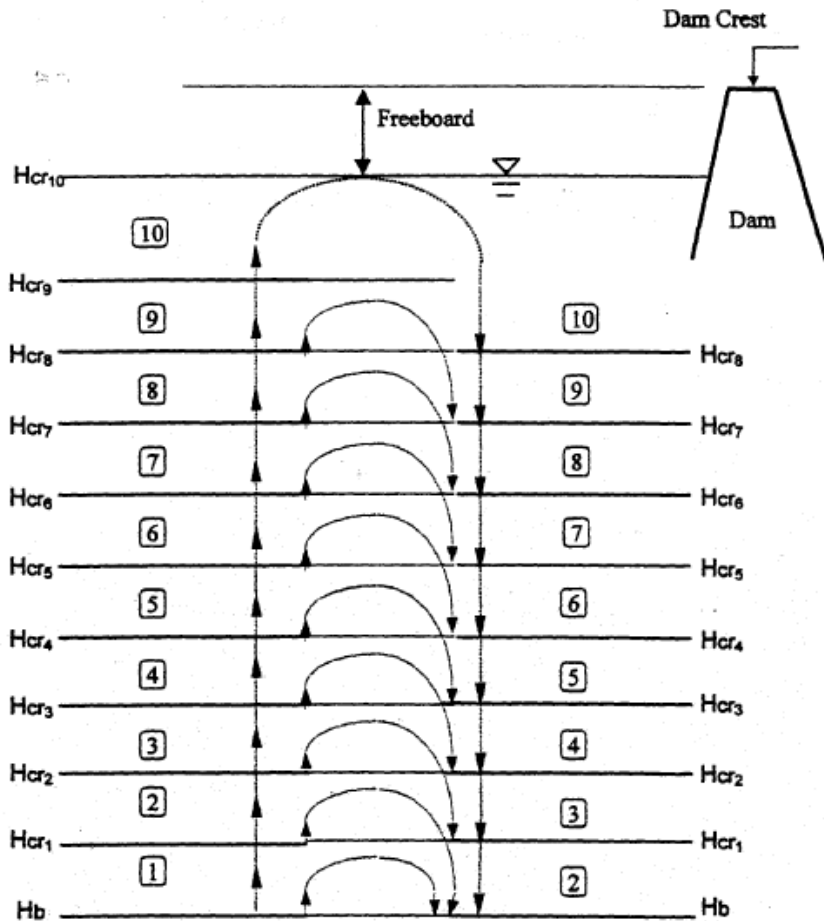
2.4. Διακριτοποιημένοι κανόνες διόδευσης πλημμύρας στα φράγματα Catalan και Seyhan, Τουρκία

Είναι ευρέως εδραιωμένη η άποψη πως η αποτελεσματική διαχείριση των θυροφραγμάτων έχει ως βάση, όχι μόνο τη μοντελοποίηση, αλλά και την ανθρώπινη λογική και εμπειρία. Γίνεται ωστόσο προσπάθεια κυριαρχίας της μοντελοποίησης (Haktanir & Kisi, 2001).

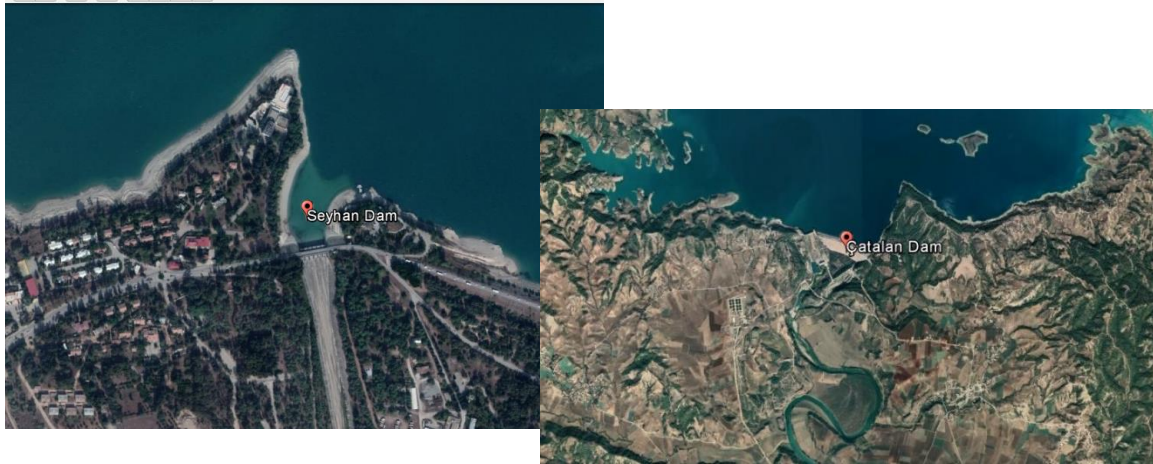
Βάσει της μέγιστης πιθανής πλημμύρας (Probable Maximum Flood - PMF), προκύπτουν υποκατηγορίες οι οποίες αντικατοπτρίζουν τις μικρότερου μεγέθους πλημμύρες 0.1 PMF, 0.2 PMF...1 PMF. Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτή η διόδευση πλημμυρών οποιουδήποτε μεγέθους και η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των θυροφραγμάτων, τόσο χωρίς την απαραίτητη ύπαρξη χειριστή, όσο και χωρίς την πρόγνωση του μεγέθους της πλημμύρας. Έτσι, κατά τη διόδευση της PMF στον ανοδικό καθώς και στον καθοδικό κλάδο του πλημμυρογραφήματος εκροής, παρατηρούνται δέκα ξαφνικά άλματα και δέκα ξαφνικές πτώσεις, αντίστοιχα, σε συγκεκριμένους χρόνους.

Η διαχείριση των θυροφραγμάτων γίνεται βάσει της στάθμης του ταμιευτήρα και της σύγκρισης αυτής ως προς κάποια βέλτιστα επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα, ορίσματα εισόδου του αλγορίθμου είναι το H_b που αντιστοιχεί στην αρχική στάθμη του ταμιευτήρα λαμβάνοντας ως πλημμύρα σχεδιασμού την PMF, το H_{cr10} που πρακτικά αντιστοιχεί στην ανώτατη στάθμη πλημμύρας ή ισοδύναμα στο υψόμετρο της στέψης απομειωμένο κατά ένα ελεύθερο όριο, τη σχέση στάθμης – αποθέματος του ταμιευτήρα και τη σχέση στάθμης – παροχής του εκχειλιστή.

Ως ορίσματα εξόδου παρέχονται τα δέκα στάδια με τις αντίστοιχες στάθμες του ταμιευτήρα $H_{cr2} \dots H_{cr9}$ τα οποία παρουσιάζονται στην **Εικόνα 13**, τα υδρογραφήματα εισροής και εκροής για τις πλημμύρες 0.1 PMF, 0.2 PMF...0.9 PMF και οι βέλτιστοι κανόνες λειτουργίας των θυροφραγμάτων.



Εικόνα 13: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου



Εικόνα 14: Τα φράγματα Seyhan και Catalan (Πηγή: Google Earth)

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόστηκε στα φράγματα Catalan και Seyhan τα οποία τροφοδοτούνται από τον ποταμό Seyhan της Ανατολικής Τουρκίας και παρουσιάζονται στην **Εικόνα 14**. Έτσι αποδείχτηκε η αποτελεσματικότητα στην εύρεση βέλτιστης διαχείρισης θυροφραγμάτων σε οποιοδήποτε φράγμα, χωρίς απαραίτητη γνώση του μεγέθους της πλημμύρας και ύπαρξη ανθρώπινης λογικής.

2.5. Διαχείριση πλημμύρας ταμιευτήρα με αφομοίωση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

Είναι γεγονός ότι οι χειρισμοί των ταμιευτήρων σε πραγματικό χρόνο βασίζονται στο συνδυασμό της μοντελοποίησης και της προσωπικής κρίσης του χειριστή (Zhang et al., 2019). Προς αντιμετώπιση του χάσματος μεταξύ των μοντέλων και των πραγματικών συνθηκών, προτείνεται μια διαδραστική μέθοδος ανθρώπου – μηχανήματος, γνωστή ως ROMEDA (Real-time Optimization Model Enhanced by Data Assimilation), η οποία βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή σε ταμιευτήρες που φέρουν σύνθετη σχέση στάθμης – αποθέματος.

Η μέθοδος αποτελείται από:

- ❖ Το μοντέλο βελτιστοποίησης → βέλτιστες απελευθερώσεις
- ❖ Τις αποφάσεις του χειριστή βάσει γνώσεων και εμπειριών
- ❖ Την προσομοίωση στάθμης – αποθέματος
- ❖ Την ενημέρωση του αποθέματος βάσει των αφομοιωμένων δεδομένων και των παρατηρήσεων

Έτσι για κάθε χρονική περίοδο, η ROMEDA προσδιορίζει τις βέλτιστες απελευθερώσεις, ο χειριστής αποφασίζει αν θα λειτουργήσει πράγματι βάσει των προτάσεων της ROMEDA και το σύστημα ενημερώνεται ανάλογα.

Αξιοσημείωτη επίσης είναι η σύγκριση της μεθόδου OPT με αυτή της ROMEDA. Η μέθοδος OPT παρέχει τις βέλτιστες στάθμες που αυτομάτως θεωρούνται ως πραγματικές και που βάσει αυτών ενημερώνεται το απόθεμα. Εν αντιθέσει, η μέθοδος ROMEDA παρέχει τις βέλτιστες στάθμες έπειτα από ενσωμάτωση ενός όγκου δεδομένων. Οι στάθμες αυτές θα είναι οι πραγματικές μόνο αν το κρίνει ο χειριστής βάσει της εμπειρίας του. Έτσι το σύστημα ενημερώνεται ανάλογα και ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα. Αξίζει να παρατηρηθεί πως η εν λόγω μέθοδος λαμβάνει υπόψιν τα σφάλματα των αφομοιωμένων δεδομένων και την αβεβαιότητα της σχέσης στάθμης – αποθέματος.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε σε φράγμα της Κίνας με λεκάνη απορροής 56000 km², μήκους 685 km και μέσου πλάτους 1.1 km, σημαντικής κλίσης. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της μεθόδου OPT και της HOR (historical operational records). Όπως αποδείχθηκε :

Η HOR μπορεί να είναι πιο περίπλοκη καθώς:

1. χρησιμοποιεί ως κριτήρια την ελαχιστοποίηση της ΥΗΕ άρα μια συγκεκριμένη στάθμη ασφαλείας
2. ο ταμιευτήρας δεν ακολουθεί τις απαιτήσεις του πλημμυρικού ελέγχου
3. η πραγματική εκροή του υπερχειλιστή διαφέρει από αυτή της βελτιστοποίησης, λόγω του περιορισμού που επιβάλλει η παροχτευτικότητα των κατάντη έργων.

Η ROMEDA περιορίζει το πλημμυρικό κίνδυνο, εκτελώντας μεγάλες απελευθερώσεις. Ωστόσο αυξάνει την παραγωγή ΥΗΕ σε σχέση με εκείνη που προκύπτει από τη μέθοδο HOR.

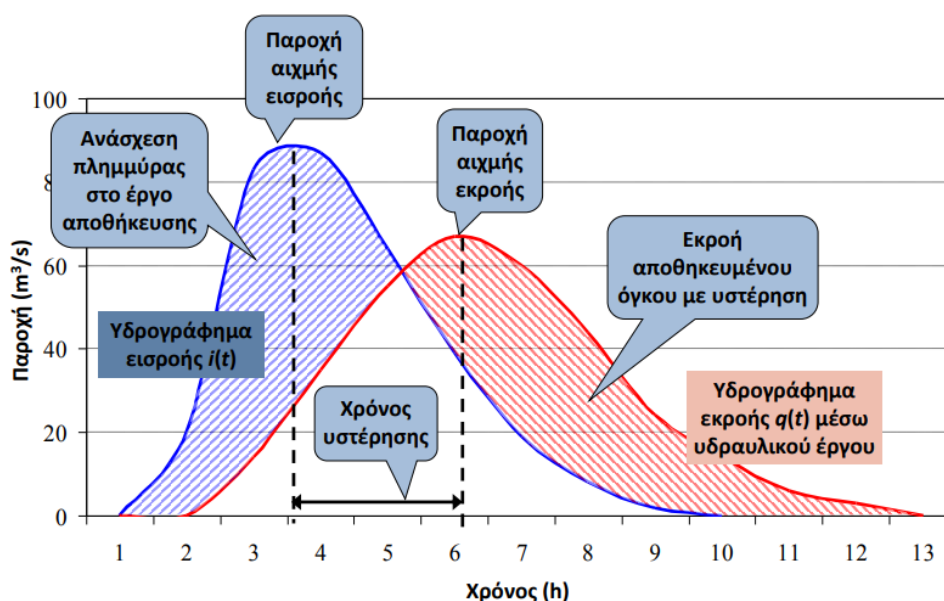
3. Μεθοδολογικό πλαίσιο διαχείρισης πλημμυρών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες

Το επιστημονικό υπόβαθρο της διόδευσης πλημμυρών, η λογική της οποίας παρουσιάζεται στην **Εικόνα 15**, είναι κοινό για όλα τα φράγματα, με μικρές τροποποιήσεις ανά περίπτωση. Στην υπολογιστική αυτή διαδικασία, δεδομένα εισόδου είναι :

1. Το πλημμυρογράφημα εισροής I_t
2. Η σχέση στάθμης – αποθέματος του ταμιευτήρα $S=S(z)$
3. Η σχέση στάθμης – παροχής του υπερχειλιστή $Q=Q(z)$
4. Οι αντίστοιχες σχέσεις στάθμης – παροχής των υπόλοιπων έργων υδροληψίας (π.χ. στρόβιλοι).

Από κατάλληλη επεξεργασία των παραπάνω προκύπτουν:

1. Το πλημμυρογράφημα εκροής από τον υπερχειλιστή
2. Η στάθμη z του ταμιευτήρα συναρτήσει του χρόνου t



Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση διόδευσης πλημμυρικού κύματος (πηγή: Ευστρατιάδης και Παπανικολάου 2020)

3.1. Η διόδευση πλημμύρας

Η διαδικασία της διόδευσης πλημμύρας (Κουτσογιάννης, 1988· Ευστρατιάδης και Παπανικολάου, 2018), βασίζεται στην εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου

$$\frac{dS}{dt} = I_t - Q_t \quad (3.1)$$

όπου :

- I_t η εισροή που προέρχεται ως επί το πλείστον από τη απορροή της ανάντη λεκάνης
- $\frac{dS}{dt}$ ο ρυθμός μεταβολής του αποθέματος
- Q_t η εκροή από τα έργα απελευθέρωσης νερού (έργα υπερχειλίσης και υδροληψίας)

Επισημαίνεται ότι στη γενική περίπτωση η εκροή (3.2) αποτελεί το άθροισμα της εκροής του υπερχειλιστή, η οποία τροποποιείται ανάλογα με την ύπαρξη ή την απουσία των θυροφραγμάτων, και της εκροής των υδροληψιών. Στη προαναφερθείσα σχέση, τα α και β είναι αδιάστατοι συντελεστές που αποσκοπούν στη ρύθμιση της εκροής λόγω της ύπαρξης θυροφραγμάτων και στον προσδιορισμό του πλήθους και του είδους των υδροληψιών που λειτουργούν, αντίστοιχα.

$$Q_t = \alpha \times Q_{\text{υπερχειλιστή}} + \beta \times Q_{\text{υδροληψιών}} \quad (3.2)$$

όπου $Q_{\text{υπερχειλιστή}}$ και $Q_{\text{υδροληψιών}}$ είναι οι παροχτευτικότητες του υπερχειλιστή και των υδροληψιών αντίστοιχα.

Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο το απόθεμα S όσο και η παροχή Q είναι συναρτήσεις της στάθμης z , γεγονός που αιτιολογεί την μη γραμμικότητα των σχέσεων.

3.2. Υπολογιστικό σχήμα

Όπως προαναφέρθηκε, σε κάθε χρονικό βήμα στόχος είναι ο υπολογισμός της στάθμης z_j και της εκροής Q_j λαμβάνοντας υπόψιν τις εισροές I_j και I_{j-1} , την εκροή Q_{j-1} και το απόθεμα S_{j-1} . Αυτό επιτυγχάνεται με επίλυση συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων της μορφής

(3.3), με επίλυση των εξισώσεων βήμα προς βήμα ή ακόμα και με μη γραμμική βελτιστοποίηση, μέθοδο την οποία και εφαρμόζουμε στη περίπτωση μας, με στοχική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του σφάλματος που δίνεται από τη σχέση

(3.4). Το πεδίο αναζήτησης τιμών στάθμης z εκτείνεται μεταξύ της στάθμης υδροληψίας z_{min} και μιας ανώτατης επιτρεπόμενης στάθμης z_{max} .

$$S(z_j) - S(z_{j-1}) = [I_{j-1} + I_j - Q(z_j) - Q(z_{j-1})] \times \frac{\Delta t}{2} \quad (3.3)$$

$$E(z) = \Sigma [S(z_j) - S(z_{j-1}) - [I_{j-1} + I_j - Q(z_j) - Q(z_{j-1})] \times \frac{\Delta t}{2}]^2 \quad (3.4)$$

όπου $Q(z_j) = \alpha \times (c \times \sqrt{2 \times g} \times L' \times H(z_j)) + \beta \times Q_{υδροληψιών}$ και όπου L' το ενεργό πλάτος του υπερχειλιστή (3.5), H το υδραυλικό φορτίο (3.6) το οποίο ισούται με το βάθος νερού ως προς τη στέψη του υπερχειλιστή προσαυξημένο κατά το ύψος της κινητικής ενέργειας και c συντελεστής παροχής που εξαρτάται από την παροχή και την γεωμετρία του Ogee.

Αξιοσημείωτος είναι ο προσδιορισμός του ενεργού πλάτους του υπερχειλιστή L' , το οποίο είναι μικρότερο από το θεωρητικό, λόγω της επίδρασης των τοπικών απωλειών που προκαλούν τα μεσόβαθρα. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τους Roberson *et al.* (1998), ισχύει η σχέση (3.5) όπου L' το ενεργό πλάτος, L το αρχικό πλάτος, N το πλήθος των μεσοβάθρων, K_p συντελεστής συστολής με τυπικές τιμές 0.01-0.02 για στρογγυλεμένες γωνίες, K_a συντελεστής συστολής με

τιμές 0.10 για κυκλικό και 0.20 για ορθογωνικό αντέρεισμα και H_e το ολικό υδραυλικό φορτίο.

$$L' = L - 2 \times (N \times K_p + K_a) \times H_e \quad (3.5)$$

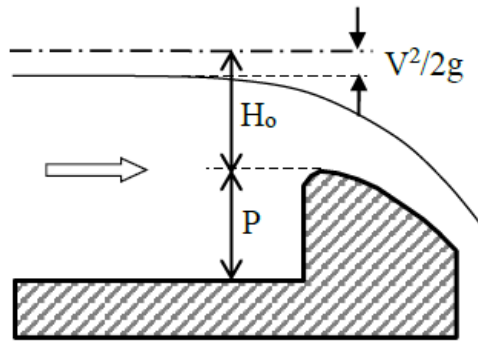
$$H = h + \frac{V^2}{2 \times g} \quad (3.6)$$

Η επίλυση πραγματοποιείται είτε n φορές για το προσδιορισμό της στάθμης σε κάθε βήμα ή μία φορά για τον υπολογισμό των στάθμεων σε όλα τα χρονικά βήματα n . Εξαίρεση αποτελεί το πρώτο βήμα όπου η αρχική στάθμη λαμβάνεται ίση με τη στέψη του υπερχειλιστή για την φάση σχεδιασμού, ενώ στη φάση διαχείρισης λαμβάνει υψηλότερες τιμές.

3.3. Η σχέση στάθμης – παροχής του υπερχειλιστή

Ένα θέμα μείζονος σημασίας είναι η κατάρτιση της σχέσης στάθμης παροχής του εκχειλιστή του εκάστοτε φράγματος, καθώς αυτή είναι απαραίτητη για την δόμηση του μοντέλου λειτουργίας του εκχειλιστή αλλά και για τη διόδευση της πλημμύρας.

Έστω ο ελεύθερος υπερχειλιστής τύπου Ogee (**Εικόνα 16**). Το ύψος της κατακόρυφης παρειάς του υπερχειλιστή συμβολίζεται με το γράμμα P , η μεταβλητή H_0 (3.6) αντιπροσωπεύει το υδραυλικό φορτίο ήτοι το ύψος του νερού από τη στέψη του υπερχειλιστή μέχρι την στάθμη του ταμιευτήρα προσαυξημένο κατά το ύψος της κινητικής ενέργειας K ενώ το ύψος της κινητικής ενέργειας από τη σχέση (3.7) (Παπανικολάου, 2017) .



Εικόνα 16: Χαρακτηριστικά υπερχειλιστή τύπου ogee (Παπανικολάου,2017)

$$K = \frac{V^2}{2 \times g} \quad (3.7)$$

Η σχετική θεωρητική σχέση στάθμης – παροχής του υπερχειλιστή είναι η (3.8) και η ταχύτητα V του νερού δίνεται από τη σχέση (3.9).

$$Q_{\theta\epsilon\omega\rho} = c(Q) \times L'(Q) \times \sqrt{2 \times g} \times H^{\frac{3}{2}} \quad (3.8)$$

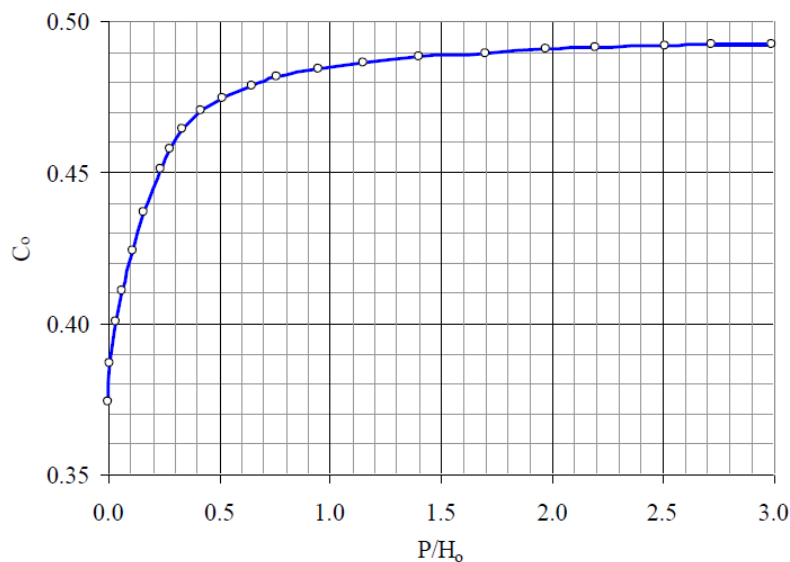
$$V = \frac{Q}{L \times (P + h)} \quad (3.9)$$

Η απλοποιημένη σχέση, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως στις μελέτες, λαμβάνει σταθερή τιμή του συντελεστή παροχής c στο διάστημα 1.7-2.3, αμελεί τις απώλειες που προκαλούν τα μεσόβαθρα λαμβάνοντας έτσι το ενεργό πλάτος του υπερχειλιστή L' ίσο με το ολικό πλάτος L και εν συνεχεία, αμελεί την επίδραση της κινητικής ενέργειας βασίζοντας όλους τους υπολογισμούς στο βάθος νερού h και όχι στο υδραυλικό φορτίο H .

Απαραίτητα δεδομένα για τον προσδιορισμό της αναλυτικής σχέσης στάθμης – παροχής εκχειλιστή τύπου Ogee, η οποία θα λαμβάνει υπόψιν την επίδραση της κινητικής ενέργειας τις απώλειες που προκαλούν τα μεσόβαθρα καθώς και την εξάρτηση όλων των μεταβλητών από

τη παροχή Q , είναι η παροχή σχεδιασμού Q_d , το ενεργό πλάτος του υπερχειλιστή L' , το θεωρητικό πλάτος αυτού L και το ύψος της κατακόρυφης παρειάς του υπερχειλιστή, P .

Αρχικά, υποθέτουμε ένα ύψος νερού h βάσει του οποίου με χρήση της σχέσης (3.9) υπολογίζεται η ταχύτητα στη διατομή εισόδου, η οποία αντιστοιχεί σε βρεχόμενη επιφάνεια διαστάσεων $L \times (P+h)$. Στη συνέχεια, από τη σχέση (3.6) υπολογίζεται το υδραυλικό φορτίο H . Λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο P/H και των αναλυτικών σχέσεων (3.10), (3.11) που προκύπτουν από το εμπειρικό διάγραμμα (**Εικόνα 17**), υπολογίζεται ο συντελεστής παροχής c_0 ενώ παρατηρείται ότι για μεγαλύτερες τιμές του P/H το c_0 τείνει στη τιμή 0.492.



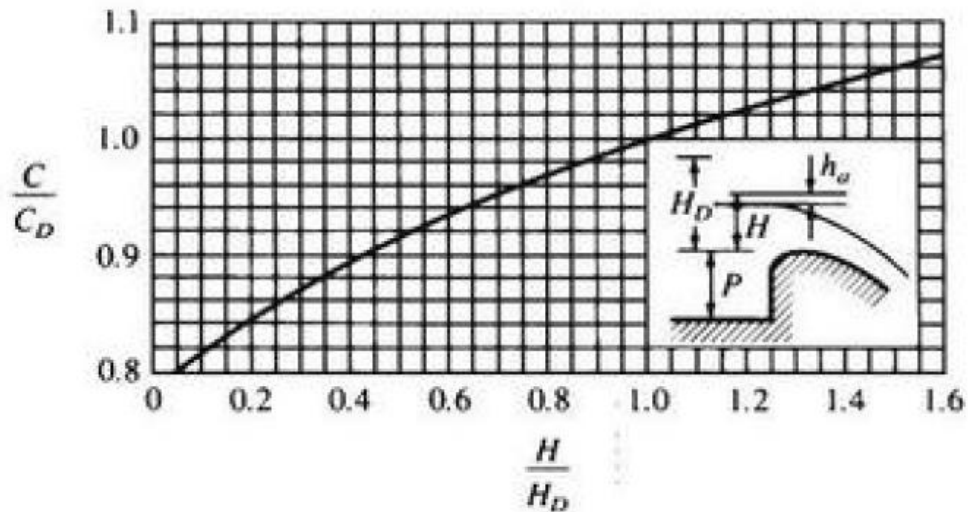
Εικόνα 17: Συντελεστής παροχής για κατακόρυφη ανάντη παρειά (Παπανικολάου 2017)

$$c = 0.7083 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 - 0.9763 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 + 0.5081 \times \frac{P}{H} + 0.3761 \quad \text{για } \frac{P}{H} < 0.5 \quad (3.10)$$

$$c = 0.0027 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 - 0.0188 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 + 0.0434 \times \frac{P}{H} + 0.4577 \quad \text{για } 0.5 < \frac{P}{H} < 2.5 \quad (3.11)$$

Ωστόσο, ο συντελεστής παροχής c παίρνει διαφορετικές τιμές για παροχή διάφορη της παροχής σχεδιασμού Q_d . Πιο αναλυτικά, για $Q > Q_d$ σημειώνεται υποπίεση στη περιοχή της στέψης, γεγονός που συνεπάγεται αποκόλληση της ροής και αύξηση του εν λόγω συντελεστή, ενώ για $Q < Q_d$ σημειώνεται υπερπίεση στη περιοχή της στέψης και μείωση του c_0 . Έτσι, γίνεται εμφανής η αναγκαιότητα διόρθωσης του c_0 βάσει του λόγου H/H_0 με χρήση της σχέσης (3.12) και του διαγράμματος της **Εικόνα 18**.

$$\frac{c}{c_0} = 0.03 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^3 - 0.14 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^2 + 0.32 \times \left(\frac{H}{H_0}\right) + 0.79 \quad (3.12)$$



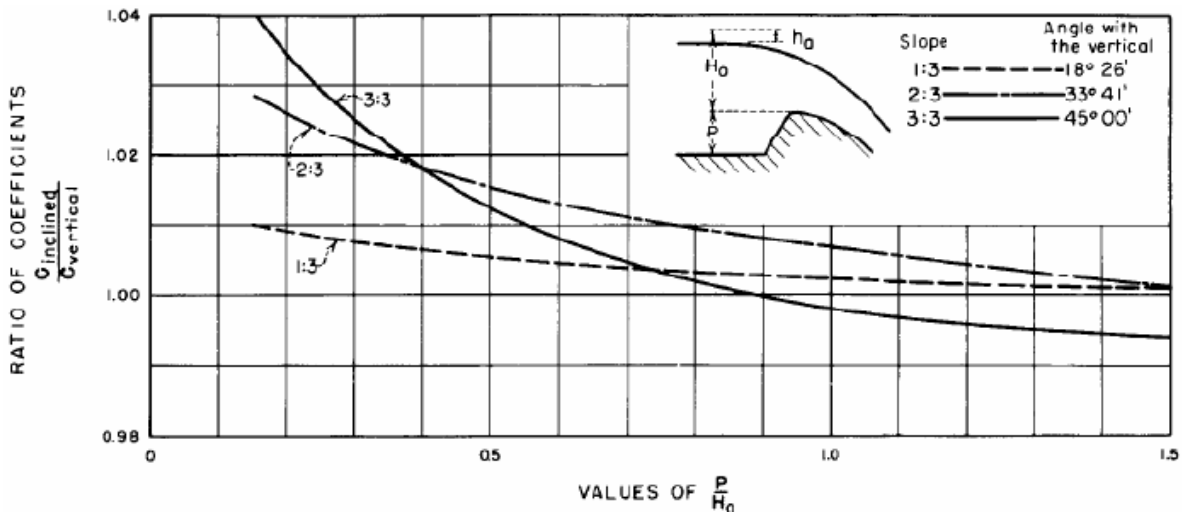
Εικόνα 18: Συντελεστής παροχής συναρτήσει υδραυλικού φορτίου (Roberson et al., 1998)

Μια επιπέον διόρθωση του συντελεστή παροχής πραγματοποιείται στη περίπτωση όπου η κλίση της ανάντη παρειάς του εκχειλιστή δεν είναι κατακόρυφη, και γίνεται βάσει του διαγράμματος (**Εικόνα 19**), στο οποίο προσαρμόστηκαν οι αναλυτικές σχέσεις (3.13), (3.14) και (3.15):

$$\frac{c_i}{c_v} = -0.0281 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 + 0.1022 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 - 0.1328 \times \frac{P}{H} + 1.057 \quad \text{για κλίση 3:3} \quad (3.13)$$

$$\frac{c_i}{c_v} = -0.0068 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 + 0.0272 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 - 0.0479 \times \frac{P}{H} + 1.0343 \quad \text{για κλίση 2:3} \quad (3.14)$$

$$\frac{c_i}{c_v} = -0.003 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 + 0.0118 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 - 0.0191 \times \frac{P}{H} + 1.0127 \text{ για κλίση } 1:3 \quad (3.15)$$



Εικόνα 19: Συντελεστής παροχής για κεκλιμένη ανάντη παρειά (U.S. Bureau of Reclamation, 1987)

3.4. Εφαρμογή σε προβλήματα σχεδιασμού έργων υπερχειλίσης και διαχείρισης πλημμυρών

Κατά τη φάση σχεδιασμού, λαμβάνονται υπόψιν πλημμυρογραφήματα μεγάλης περιόδου επαναφοράς και οι αδιάστατοι συντελεστές α και β που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.1, λαμβάνονται ίση με τη μονάδα, δηλαδή τα έργα υπερχειλίσης και υδροληψίας (π.χ. στρόβιλοι) λειτουργούν στην πλήρη παροχευτικότητα τους. Από τα παραπάνω προκύπτει η παροχή σχεδιασμού Q_d , η οποία χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό των κατάντη έργων, καθώς και για τον υπολογισμό της μέγιστης στάθμης του ταμιευτήρα, μέγεθος που αποτελεί βασικό κριτήριο στον υπολογισμό του τελικού ύψους του φράγματος και στο προσδιορισμό της ζώνης απαλλοτριώσεων.

Στη πράξη, σε μια μελέτη διαχείρισης πλημμυρών, τα πλημμυρογραφήματα έχουν περίοδο επαναφοράς που κυμαίνεται σε ένα ευρύ φάσμα. Οι συντελεστές α και β είναι παράμετροι προς βελτιστοποίηση και ο προσδιορισμός τους αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας. Οι συντελεστές αυτοί ενδέχεται να μεταβάλλονται δυναμικά συναρτήσει της στάθμης, είτε ακόμα και να λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές που εμείς έχουμε προσδιορίσει, βάσει κάποιου εύρους της στάθμης. Πρακτικά, οι δύο αυτές παράμετροι ορίζουν τους κανόνες λειτουργίας των έργων κατά τη διόδευση πλημμύρας.

Από τα παραπάνω, προκύπτουν κανόνες λειτουργίας που για μεγάλες και για μικρές περιόδους επαναφοράς, δίνουν έμφαση είτε στην ασφάλεια είτε στην οικονομία αντίστοιχα. Μεγάλη σημασία έχουν τα κριτήρια και η στοχική συνάρτηση βάσει της οποίας πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση. Τα κριτήρια αυτά, σχετίζονται στις περισσότερες περιπτώσεις με την ασφάλεια του φράγματος και τη μέγιστη τιμή που λαμβάνει η στάθμη κατά την εξέλιξη την πλημμύρας, όπως επίσης και με τον όγκο του νερού που υπερχειλίζει, ο οποίος μεταφράζεται σε ενέργεια που χάνεται και οικονομική ζημιά.

4. Η περιοχή μελέτης – Χαρακτηριστικά φράγματος

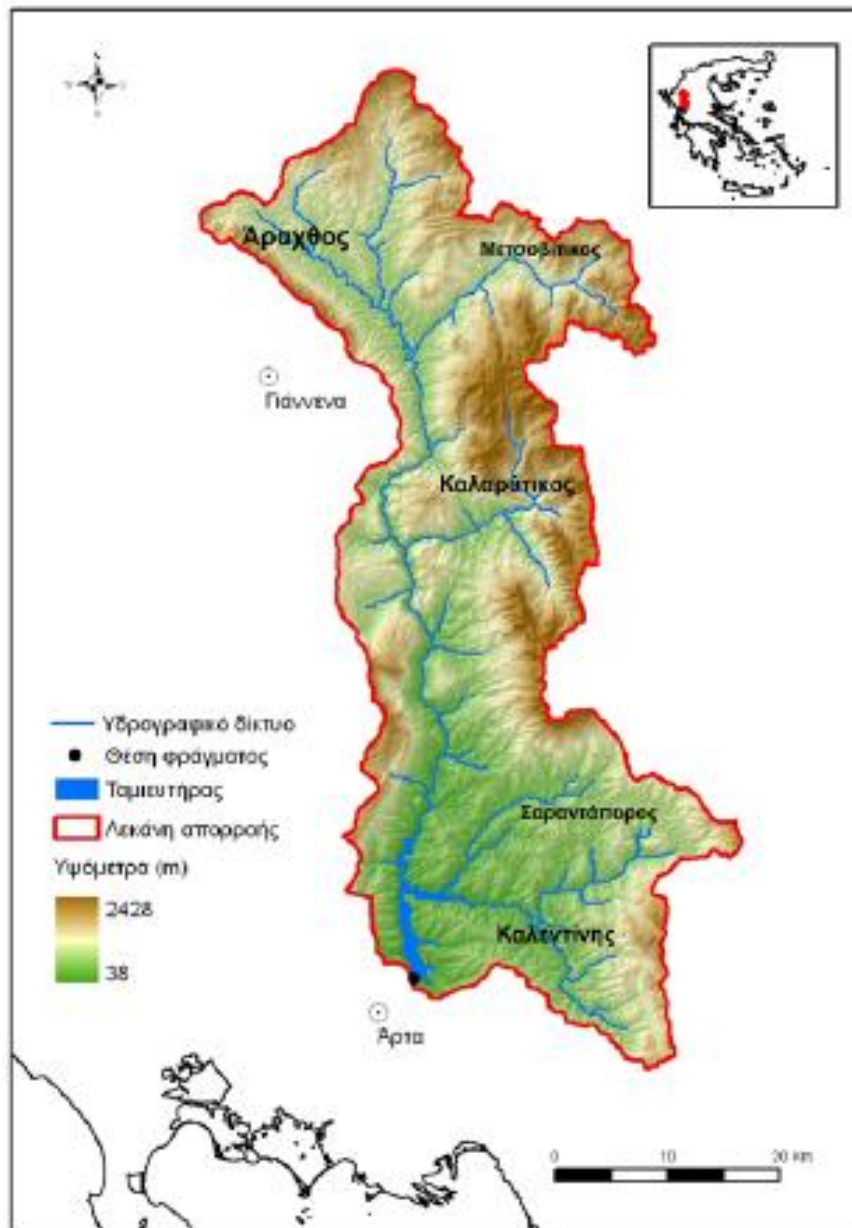
4.1. Γεωγραφική και διοικητική θέση

Το τμήμα του Αράχθου μεταξύ του φράγματος Πουρνάρι Ι και της εκβολής του στον Αμβρακικό κόλπο υπάγεται διοικητικά στους Δήμους Αρταίων και Νικολάου Σκουφά της Περιφερειακής Ενότητας της Άρτας . Ο Άραχθος εκτείνεται περιμετρικά της πόλης της Άρτας. Στην είσοδο της πόλης κατασκευάστηκε το 17ο αιώνα μ.Χ. το πασίγνωστο πέτρινο γεφύρι που αποτελεί μνημείο της πολιτιστικής κληρονομιάς της χώρας μας, ενώ η προστασία του από τις πλημμύρες του Αράχθου αποτελούν γνώμονα στον ευρύτερο αντιπλημμυρικό σχεδιασμό.

4.2. Η περιοχή μελέτης

Ο ποταμός Άραχθος πήρε το όνομα του από το ρήμα ‘αράττω’, που σημαίνει χτυπώ με δύναμη (Δρόσου, 2015). Θεωρείται ο όγδοος μεγαλύτερος ποταμός και έχει συνολικό μήκος περίπου 110 km. Πηγάζει από το όρος Λάκμος το οποίο βρίσκεται νοτιοανατολικά του Μετσόβου και εκβάλλει στον Αμβρακικό κόλπο. Η συνολική έκταση ανάντη του φράγματος είναι 1793.8 km² και το μέσο υψόμετρο της λεκάνης είναι τα +854.0 m με μέση κλίση 25%. Παραπόταμοι του Αράχθου είναι ο ποταμός Καλαρρύτικος, ο Μετσοβίτικος, ο Σαραντάπορος και ο Καλεντίνης (Εικόνα 20).

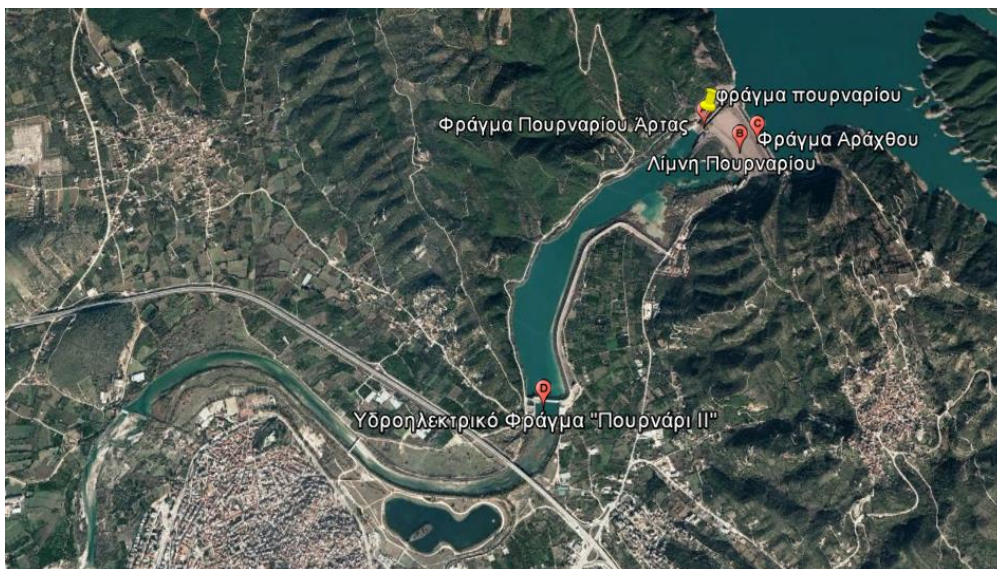
Αναφορικά με το γεωμορφολογικό ανάγλυφο, παρατηρούμε ότι στη περιοχή του ποταμού επικρατεί ο φλύσχος, ο οποίος χαρακτηρίζεται από μικρή υδατοπερατότητα και διακυμάνσεις στη παροχή Q . Παράλληλα, στη περιοχή της λεκάνης απορροής εμφανίζεται η Ιόνια ζώνη καθώς και ένα μικρό ποσοστό της ζώνης της Πίνδου και του Γαβρόβου, που χαρακτηρίζονται από ανθρακικά πετρώματα και υδροφορείς μεγάλης δυναμικότητας. Ως προς τις χρήσεις γης, περί το 25% της λεκάνης απορροής καλύπτεται από σκληροφυλλική βλάστηση, το 17% από δασώσεις και θαμνώδεις εκτάσεις και το 14% αξιοποιείται για τη γεωργία περιλαμβάνοντας φυτικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης. Κάποιες μικρότερες εκτάσεις καλύπτονται από δάση κωνοφόρων και πλατύφυλλων καθώς και από φυσικούς βοσκότοπους.



Εικόνα 20: . Η λεκάνη απορροής του Αράχθου ανάντη του φράγματος Πουρναρίου (Πηγή: Κουτσογιάννης, 2010)

4.3. Υδροσύστημα Αράχθου

Τα νερά του Αράχθου αξιοποιούνται για την υδροδότηση δύο σημαντικών υδροηλεκτρικών φραγμάτων, Πουρνάρι I και Πουρνάρι II, τα οποία απεικονίζονται στην **Εικόνα 21**.



Εικόνα 21: Υδροσύστημα Αράχθου (Google Earth)

Το ΥΗΕ Πουρνάρι I τέθηκε σε λειτουργία το 1981. Συγκεκριμένα το 1973 ξεκίνησε η κατασκευή της σήραγγας εκτροπής και οι οδοποιίες αποκατάστασης των επικοινωνιών, το καλοκαίρι του 1976 εγκαταστάθηκαν οι εργολάβοι κατασκευής του εκχειλιστή, του συγκροτήματος παραγωγής, του φράγματος και των συναφών έργων. Στο τέλος του 1980 έκλεισε η σήραγγα εκτροπής, ενώ περίπου δύο μήνες αργότερα οι μονάδες τέθηκαν σταδιακά σε εμπορική λειτουργία. Κύριοι στόχοι του εν λόγω έργου είναι η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, η άρδευση και η αντιπλημμυρική προστασία της Άρτας.

Το υδροηλεκτρικό έργο Πουρνάρι II κατασκευάστηκε κατόπιν του Πουρναρίου I. Λειτουργεί ως αναρρυθμιστικός ταμιευτήρας και αποσκοπεί στη συνεχή ροή του νερού, εξασφαλίζοντας κατά αυτό τον τρόπο την αξιοποίηση των αρδευτικών δικτύων της περιοχής. Είναι χωμάτινο, με ωφέλιμη χωρητικότητα του φτάνει τα 4.1 hm³ και ύψος 12 m. Ο υπερχειλιστής του φράγματος βρίσκεται εγκάρσια επί της κοίτης και είναι μετωπικός και ελεύθερος με πέντε φατνώματα συνολικού μήκους στέψης 140 m, με στάθμη στέψης +40.0 m και Α.Π.Σ. +46.6 m.

Στα δεξιά του υπερχειλιστή βρίσκεται ο υδροηλεκτρικός σταθμός και εν συνεχεία τα έργα υδροληψίας που αποσκοπούν στην άρδευση της περιοχής Άρτας-Πρέβεζας, παροχής μέχρι 30 m³/s. Στο κτήριο του σταθμού παραγωγής στεγάζονται τρεις μονάδες συνολικής ισχύος 31.5 MW, ενώ η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας ανέρχεται στα 45 GWh.

4.4. Πλημμύρα 2015

Η εν λόγω πλημμύρα διήρκησε από τις 31/01/2015 μέχρι τις 1/02/2015 και χαρακτηρίστηκε ως ένα από τα εντονότερα πλημμυρικά φαινόμενα στην ιστορία του Αράχθου. Οι διαχειριστές του φράγματος πραγματοποίησαν το πρώτο άνοιγμα των θυροφραγμάτων όταν η στάθμη του ταμιευτήρα έφτασε τα +120 m, γεγονός που προκάλεσε παροχή εκροής από τον υπερχειλιστή ίση με 1200 m³/s και 1700 m³/s στον ποταμό, λαμβάνοντας υπόψη τη παροχή εκροής των στροβίλων ίση με 500 m³/s. Ο χειρισμός αυτός αποτέλεσε αντικείμενο πολλών νομικών διαπληκτισμών μεταξύ της ΔΕΗ και των κατοίκων της περιοχής, καθώς να μεν απέτρεψε την ολοκληρωτική καταστροφή του φράγματος και των κατάντη περιοχών, ωστόσο οδήγησε σε μεγάλη απώλεια στη παραγωγή ενέργειας.

Βασικό πλήγμα του πλημμυρικού αυτού επεισοδίου ήταν η κατάρρευση της ιστορικής γέφυρας της Άρτας. Ένα μικρό δείγμα των καταστροφών παρουσιάζεται στις ακόλουθες εικόνες : **Εικόνα 22, Εικόνα 23, Εικόνα 24.**



Εικόνα 22: Το γεφύρι της Άρτας, 1/2/2015 (newsbomb.gr)



Εικόνα 23: Επαρχιακός δρόμος (newmoney.gr)



Εικόνα 24: Εκροή του υπερχειλιστή του φράγματος Πουρνάρι Ι (orangenews.gr)

5. Αυτοψία στη περιοχή μελέτης

Στο διάστημα 12 – 15 Ιουνίου 2020 πραγματοποιήθηκε επίσκεψη στα φράγματα Πουρνάρι Ι και ΙΙ από όπου και συλλέχθηκαν τα στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω.

5.1. Ιστορικά στοιχεία

Μέχρι το 2015, ο χειρισμός του φράγματος βασιζόταν στην εμπειρία των προηγούμενων ετών. Κατά την πλημμύρα του 2015 , η οποία παρουσιάζεται στο υποκεφάλαιο 4.4, σημειώθηκε διπλή κορυφή στη παροχή εισόδου, γεγονός πρωτοφανές το οποίο και ενσωματώθηκε στον κώδικα αλλά και στη νομοθεσία.

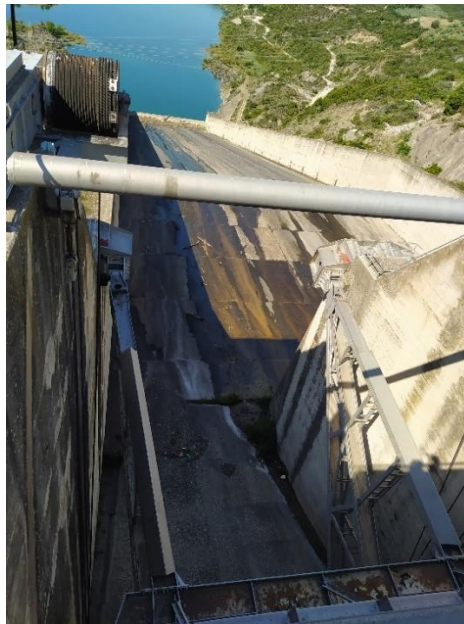
5.2. Φράγμα και συναφή έργα

Από την επί τόπου επίσκεψη στη στέψη αλλά και στο εσωτερικό του φράγματος, μας γνωστοποιήθηκε ότι:

- Η συντήρηση γίνεται μονάδα – μονάδα.
- Η διώρυγα του υπερχειλιστή (**Εικόνα 25**) όπως και τα υπόλοιπα έργα μεταφοράς του νερού, έχουν σχεδιαστεί για παροχή σχεδιασμού 6100 m³/s.
- Τα θυροφράγματα (**Εικόνα 26**) έχουν διαστάσεις 12.5×12.5 m και σε περίπτωση βλάβης η λειτουργία τους εξασφαλίζεται μέσω
 1. Ντιζελογεννήτριας
 2. Διπλής παροχής από το εργοστάσιο
 3. Μανιβέλας



Εικόνα 25: Η διώρυγα του υπερχειλιστή



Εικόνα 26: Θυρόφραγμα υπερχειλιστή οgee

- Για τον εκκενωτή πυθμένα διατίθεται εφεδρικό ρεύμα.
- Το σώμα του φράγματος (**Εικόνα 27**) είναι χωμάτινο, αργιλικού πυθμένα 580 m μήκος, 87 m ύψος, 450 m πλάτος στο πόδα και η λεκάνη έχει επιφάνεια ίση με 23000 στρέμματα,

χωρητικότητας 865 hm³ (**Εικόνα 28**). Η ετήσια παραγωγή τυπικά ανέρχεται στις 500 εκατομμύρια KWh μέγεθος που έχει επιτευχθεί ωστόσο μία φορά στη διάρκεια ζωής του φράγματος, καθώς συνήθως επιτυγχάνεται περίπου το μισό. Η συνολική του ισχύς ισούται με 300 MW.



Εικόνα 27: Όψη υδροηλεκτρικού φράγματος Πουρνάρι Ι

υδροηλεκτρικός σταθμός Πουρναρίου (Αραχθός)	
συνολική ισχύς	: 300 MW (3x100 MW)
χωμάτινο φράγμα	: ύψος 87 μ. - μήκος 580 μ.
όγκος	: 9.000.000 κ. μ.
πλάτος	: στη βάση του 450 μ.
σήραγγα εκτροπής:	700 μ.
τεχνητή λίμνη	: επιφάνεια 23.000 στρέμματα χωρητικότητας 865 εκατομμυρίων κ. μ. νερού
ετήσια παραγωγή	: 500 εκατομ. KWh.

Εικόνα 28: Χαρακτηριστικά μεγέθη υδροηλεκτρικού φράγματος Πουρνάρι Ι

- Στο ταμιευτήρα του φράγματος και συγκεκριμένα στο δεξί σημείο αυτού, παρατηρείται μεγάλη συσσώρευση απορριμμάτων (ξύλα, πλαστικά κ.ά.) τα οποία έχουν μεταφερθεί

μέσω του Αράχθου από τα ανάντη. Για το καθάρισμα αυτών, έχει κατασκευαστεί γερανογέφυρα (Εικόνα 29), η οποία τοποθετεί τα απορρίμματα στην άκρη της στέγης, από όπου και απομακρύνονται με τη βοήθεια απορριμματοφόρου.



Εικόνα 29: Η γερανογέφυρα των απορριμμάτων

5.3. Σταθμός παραγωγής ενέργειας

Η επίσκεψη συνεχίστηκε στο κτίριο του σταθμού παραγωγής ενέργειας, ο οποίος βρίσκεται κατάντη της αριστερής παρειάς του φράγματος. Εκεί, καταγράφηκαν τα παρακάτω στοιχεία:

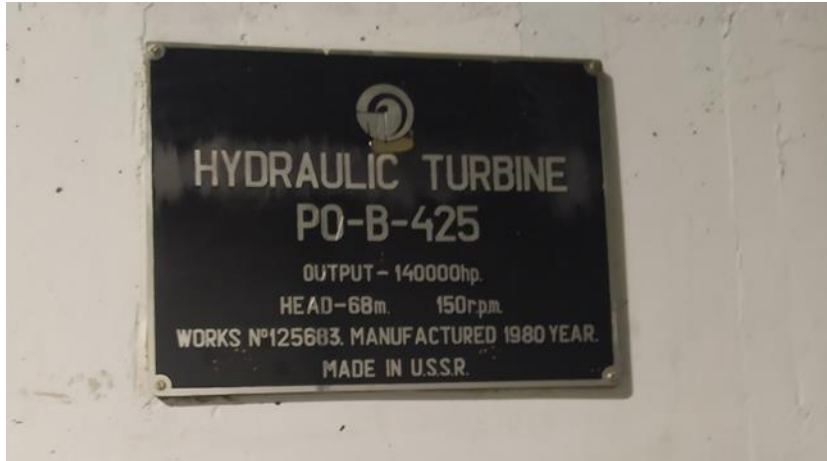
- Όσο η στάθμη του ταμιευτήρα πλησιάζει τη στάθμη κινδύνου, η τιμή της παραγόμενης ενέργειας μειώνεται και ουσιαστικά η ενέργεια που παράγεται είναι δευτερεύουσα.
- Οτιδήποτε επιπλέον των υποχρεώσεων πρέπει να είναι δικαιολογημένο και να προκύπτει από τους αλγόριθμους

- Ο σταθμός παραγωγής ενέργειας (**Εικόνα 30**) φέρει περιβαλλοντικό ISO και στο εσωτερικό του υπάρχουν κάδοι για όλες τις κατηγορίες απορριμμάτων (πχ. λάδια, πανιά, γράσα κτλ.).



Εικόνα 30: Ο σταθμός παραγωγής ενέργειας

- Οι τρεις στρόβιλοι είναι τύπου Francis (**Εικόνα 31**) και έκαστος έχει παροχευτικότητα περίπου $170 \text{ m}^3/\text{s}$. Το νερό εισέρχεται στον κάθε στρόβιλο περιφερειακά και βγαίνει αξονικά. Το κυρίως τμήμα του κάθε στροβίλου είναι επισκέψιμο από κατάλληλα διαμορφωμένες εισόδους (**Εικόνα 32**). Η περιστροφή του κάθε στροβίλου (**Εικόνα 33**) συνεπάγεται και περιστροφή της αντίστοιχης γεννήτριας (**Εικόνα 34**), γεγονός που προκαλεί ηλεκτρικό πεδίο και επαγωγικά ρεύμα. Στην έξοδο της γεννήτριας το ρεύμα αντιστοιχεί σε 15000 V και έπειτα στο μετασχηματιστή αυξάνεται η τάση του και μειώνεται η ένταση του, ώστε να μειωθούν όσο γίνεται οι απώλειες. Κατά την έξοδο του από το μετασχηματιστή, το παραγόμενο ρεύμα αντιστοιχεί πλέον σε 150000 V .



Εικόνα 31: Στοιχεία στροβίλου



Εικόνα 32: Είσοδος στροβίλου



Εικόνα 33: Όψη στροβίλου τύπου Francis



Εικόνα 34: Άνω τμήμα στροβίλου

- Το ρεύμα που υποστηρίζει όλες τις διαδικασίες είναι τριφασικό και ένα τμήμα των συνδέσεων του απεικονίζεται στην **Εικόνα 35**.



Εικόνα 35: Σύνδεση τριφασικού ρεύματος

- Στον κάθε στρόβιλο υπάρχει ένα τμήμα που εξασφαλίζει τη ψύξη του. Για κάθε μονάδα διατίθενται περίπου 15 tn λάδι, οι αγωγοί του οποίου απεικονίζονται στην **Εικόνα 36**. Η πίεση του λαδιού στις κατάλληλες δεξαμενές, χρησιμοποιείται για το άνοιγμα και για το κλείσιμο των πτερυγίων των στροβίλων. Ο αέρας πάνω από το λάδι λειτουργεί ως πηγή και αποθήκη ενέργειας και επιπλέον συμβάλλει στο κλείσιμο των πτερυγίων των στροβίλων όταν αυτό καταστεί αναγκαίο. Επιπλέον υπάρχει αέρας 40 atm για αποθήκευση ενέργειας και 35 atm για τη λειτουργία της κάθε μονάδας και συγκεκριμένα ως κινητήρας για γρήγορη εφεδρεία και διόρθωση της τάσης του δικτύου. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι υπό κανονικές συνθήκες

απαιτούνται 2 λεπτά, ενώ αν χρησιμοποιηθεί ο αέρας η πλήρης ισχύς των 100 MW επιτυγχάνεται σε δευτερόλεπτα.

Το νερό περιορίζεται στο κάθε στρόβιλο χάρη σε 600 atm αέρα και 300 tn λαδιού σε τρία έδρανα (100 tn αζονικά και 200 tn ακτινικά).



Εικόνα 36: Αγωγοί λαδιών

- Οι σωλήνες του κάθε συστήματος έχουν διαφορετικό χρώμα για εποπτικούς λόγους (άσπρο-αέρας, κόκκινο-πυρόσβεση, πράσινο-λάδι, κίτρινο-νερό). Η πυρόσβεση (κόκκινο χρώμα) ενεργοποιείται αυτόματα όταν υπάρξει κάποιο βραχυκύκλωμα (πχ. **Εικόνα 37**) ή όταν καεί κάποιο μηχάνημα, και διοχετεύεται άμεσα CO₂.



Εικόνα 37: Βλάβη σε στρόβιλο του σταθμού Πουρνάρι II

- Σε ένα δωμάτιο βρίσκονται 200 μπαταρίες (**Εικόνα 38**), 2.2 V έκαστη, συνδεδεμένες σε σειρά για τον έλεγχο της λειτουργίας όλων των μηχανημάτων καθώς επίσης και των ρελέ ασφαλείας.
- Οι αντλίες λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα και με τη συμβολή των αεροσυμπιεστών (**Εικόνα 39**).



Εικόνα 38: Ο χώρος με τις μπαταρίες



Εικόνα 39: Μηχάνημα παροχής αέρα

- Οι πηγές ενέργειας για τις λειτουργίες του φράγματος είναι :
 1. Η ΔΕΗ
 2. Η μονάδα 1
 3. Η μονάδα 2
 4. Ντιζελογεννήτρια

- Το φράγμα διαθέτει τρεις σήραγγες υδροληψίας, μία για κάθε μονάδα. Στην αρχή τους είναι κατασκευασμένες από σκυρόδεμα, έπειτα επενδεδυμένες και στη συνέχεια συνδέονται με τους στρόβιλους, όπως ενδεικτικά απεικονίζεται και στην **Εικόνα 40**.



Εικόνα 40: Ενδεικτική σύνδεση της σήραγγας υδροληψίας με τον στρόβιλο

- Οι βίδες των συνδέσεων, όπως και όλα τα μηχανήματα, απαιτούν τη χρήση εργαλείων κατάλληλου μεγέθους, όπως ενδεικτικά απεικονίζονται στην **Εικόνα 41**.



Εικόνα 41: Εργαλεία

- Δόθηκαν τα παρακάτω δεδομένα (Εικόνα 42) από το ωριαίο ισοζύγιο.

The image shows three sheets of a daily operation report titled "ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΔΕΛΤΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ". The sheets are filled with handwritten data in blue and red ink. The data is organized into columns representing different stages or components of the operation. The first sheet on the left has a header "Α.Α.Α. Τ.Α.Α. ΠΟΥΡΝΑΡΙΟΥ ΚΡΟΣΑ ΔΕΛΤΙΟΥ" and lists various parameters. The middle and right sheets continue the data across multiple columns. At the bottom of each sheet, there are summary tables with numerical values and some text.

This image shows another set of three sheets of a daily operation report, similar to the one above. It also features the title "ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΔΕΛΤΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ" and contains handwritten data in blue and red ink. The layout and structure are consistent with the first image, showing detailed operational data across multiple columns and summary tables at the bottom.

Εικόνα 42: Ημερήσιο δελτίο

- Στο δωμάτιο ελέγχου του σταθμού παραγωγής υπάρχουν οι υπολογιστές που παρέχουν λεπτομερή ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο για τη στάθμη των ταμιευτήρων τόσο του Πουρναρίου Ι όσο και του Πουρναρίου ΙΙ, καθώς επίσης και της στάθμης του ποταμού από δεδομένα του ανάντη σταθμού. Επιπλέον υπάρχουν

λυχνίες (Εικόνα 43) οι οποίες αντιστοιχούν στα επιμέρους μηχανήματα του φράγματος και ενεργοποιούνται σε περίπτωση βλάβης στο αντίστοιχο μηχάνημα.



Εικόνα 43: Λυχνίες ελέγχου

5.4. Διαχείριση πλημμυρών

Ιδιαίτερη βάση δόθηκε στους τρόπους διαχείρισης των πλημμυρών και πως αυτοί τελικά εφαρμόζονται. Αξιοσημείωτα σημεία είναι τα ακόλουθα:

Ο χειρισμός των θυροφραγμάτων σε περίπτωση πλημμυρικού επεισοδίου βασίζεται στην σχέση στάθμης - παροχής του υπερχειλιστή καθώς επίσης και στην εκτίμηση του ρυθμού ανόδου της στάθμης. Ο ρυθμός αυτός γίνεται αντιληπτός με χρήση σταθμήμετρων ανάντη του φράγματος, καθώς επίσης και εποπτικά.

Ως στάθμη ασφαλείας ορίζονται τα +118 m και όχι το +120 m που αναγράφεται στις σχετικές οδηγίες λειτουργίας των θυροφραγμάτων που παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω στην υποενότητα 6.3, καθώς επιτυγχάνεται έτσι μεγαλύτερη έκταση του χρόνου. Ωστόσο στη στάθμη των +120 m η ειδική κατανάλωση (m^3/kWh) ελαχιστοποιείται, αλλά για τη καλύτερη απορρόφηση ενός πλημμυρικού φαινομένου η στάθμη ασφαλείας πρέπει να είναι πιο κάτω. Ένας ακόμη λόγος για τον οποίο ορίζεται αυτό το όριο ασφαλείας είναι ότι στη περίπτωση που η στάθμη φτάσει να ξεπεράσει τα

+118 m το άνοιγμα των θυροφραγμάτων (**Εικόνα 26**) δυσχεραίνεται αρκετά λόγω του μεγάλου βάρους του νερού.

6. Δεδομένα και επεξεργασίες

6.1. Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρα

Ο ταμιευτήρας του υδροηλεκτρικού έργου Πουρνάρι Ι, διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά (ΕΕΜΦ, 2013):

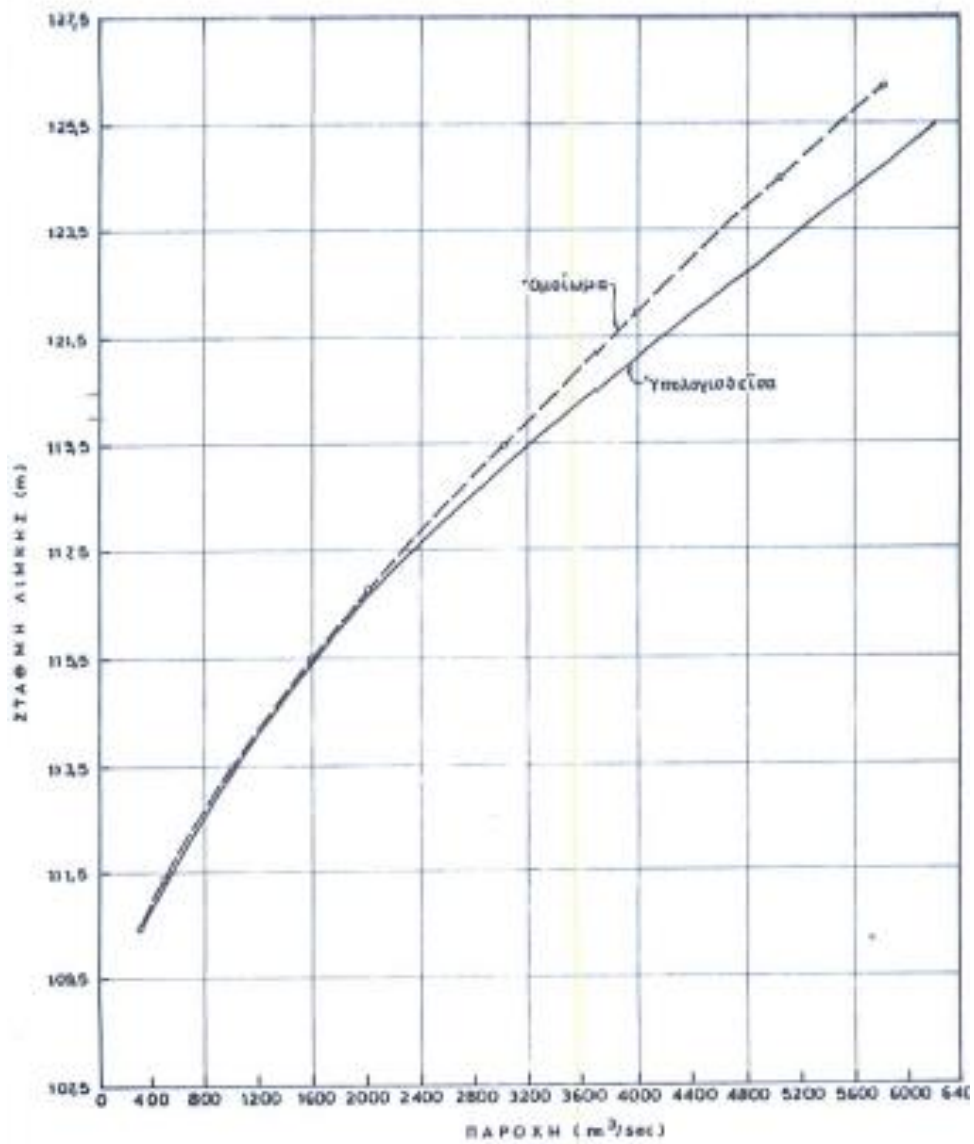
- Τεχνητή λίμνη μέγιστου όγκου αποθήκευσης 865 hm^3 με Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας (ΑΣΠ) $+126 \text{ m}$, Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ) $+118 \text{ m}$, Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΚΣΛ) $+100 \text{ m}$, ωφέλιμη χωρητικότητα 355 hm^3 και επιφάνεια που αντιστοιχεί στην ΑΣΛ ίση με 20.6 km^2
- Σήραγγα εκτροπής πεταλοειδούς διατομής με εσωτερική διάμετρο 10.5 m και μήκος 700 m , παροχής μελέτης $1720 \text{ m}^3/\text{s}$, υψόμετρο πυθμένα στην είσοδο ίσο με $+39.5 \text{ m}$ και στην έξοδο $+38.0 \text{ m}$, η οποία φράζεται οριστικά με πώμα από σκυρόδεμα.
- Χωμάτινο φράγμα αποτελούμενο από 7 στρώσεις, συνολικού όγκου 9 hm^3 με ονομαστική στέψη στα $+128 \text{ m}$ και μέγιστο ύψος από τη θεμελίωση του πυρήνα ίσο με 107 m . Το πλάτος της στέψης είναι ίσο με 10 m και το μήκος 580 m , ενώ στη βάση αυξάνεται στα 450 m .
- Συγκρότημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από:
 - ✓ τρεις στροβίλους τύπου Francis, παροχαρακτηριστική $167 \text{ m}^3/\text{s}$ έκαστος, συνολικής ισχύος 300 MW , αριθμού στροφών 150 rpm και ετήσιας παραγωγής 504 GWh . Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το μέγεθος 504 GWh έχει επιτευχθεί μία φορά στην έως τώρα ζωή του έργου, ενώ ο μέση παραγόμενη ενεργεία είναι ίση με 235 GWh . Επίσης, οι τρεις γεννήτριες είναι τύπου κατακόρυφου άξονα - σύγχρονες, ισχύος 111 MVA , με συντελεστή 0.9 , συχνότητας 50 HZ και τάσης 15750 KV
 - ✓ σήραγγες προσαγωγής κυκλικής διατομής από οπλισμένο σκυρόδεμα ανάντη του διαφράγματος στεγανοποίησης του φράγματος, με χαλύβδινη επένδυση και σκυρόδεμα κατάντη αυτού. Η εσωτερική διάμετρος της κάθε σήραγγας είναι 7 m , ενώ στο σημείο του σταθμού

- παραγωγής μειώνεται σε 6 m. Η κάθε μία σήραγγα φράζεται από φρεάτιο, ύψους 42 m και διαμέτρου 6.5 m, με κυλιόμενο μεταλλικό θυρόφραγμα διαστάσεων 4.5×7 m
- ✓ σταθμός παραγωγής στην ανατολική όχθη του ποταμού, περίπου 250 m κατάντη του άξονα του φράγματος
 - ✓ υποσταθμό ζεύξεως, στον οποίο εισέρχονται τρεις γραμμές των 150 KV και εξέρχονται τρεις γραμμές μεταφοράς αυτών που συνδέουν τον ΥΗΣ Πουρναρίου με το ΚΥΤ Αράχθου
- εκκενωτή πυθμένα, ο οποίος τοποθετείται μπροστά από το σύστημα παραγωγής, έχει συνολικό μήκος 503 m με εσωτερική διάμετρο περίπου 7.10 m και παροχευτική ικανότητα 300 m³/s
 - εκχειλιστή στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος, παροχευτικότητας ίσης με 6100 m³/s, που αποτελείται από:
 - ✓ έργο εισόδου που περιλαμβάνει τρία τοξωτά θυροφράγματα διαστάσεων 12.5×12.5 m έκαστο, με στέψη στο υψόμετρο +107.5 m
 - ✓ διάρρυγα απαγωγής μήκους περίπου 260 m, πλάτους 43.5 m και κλίση μεταβλητή από 5% έως 25%
 - ✓ λεκάνη αποτόνωσης με flip bucket

6.2. Χαρακτηριστικά μεγέθη έργων υπερχείλισης

Πολύ χρήσιμα δεδομένα αποτέλεσαν οι καμπύλες στάθμης – παροχής του εκχειλιστή (ομοίωμα και υπολογισθείσα) της ΔΕΗ, οι οποίες αποτέλεσαν μέτρο σύγκρισης για την επιτυχημένη προσέγγιση της ακριβέστερης καμπύλης, η οποία περιγράφεται εκτενώς στο υποκεφάλαιο 6.2.1.

Πιο συγκεκριμένα, όπως αποδεικνύεται παρακάτω, η αναλυτική μορφή της καμπύλης του ομοιώματος που απεικονίζεται στην **Εικόνα 44** είναι (6.3) ή διαφορετικά η (6.4) και της υπολογισθείσας καμπύλης η (6.1) ή διαφορετικά η (6.2).



ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΕΡΓΟ ΠΟΥΡΝΑΡΙΟΥ	ΣΧ.
ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΟΜΟΙΩΜΑ ΕΚΧΕΙΛΙΣΤΗ	
ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΕΚΧΕΙΛΙΣΤΗ	1

Εικόνα 44: Καμπύλη στάθμης – παροχής εκχειλιστή φράγματος Πουρνάρι Ι (πηγή: ΔΕΗ)

$$Q=60.732 \times H^{1.5664} \quad (6.1)$$

$$Q=0.366 \times L' \times (2 \times g)^{1/2} \times H^{1.5664} \quad (6.2)$$

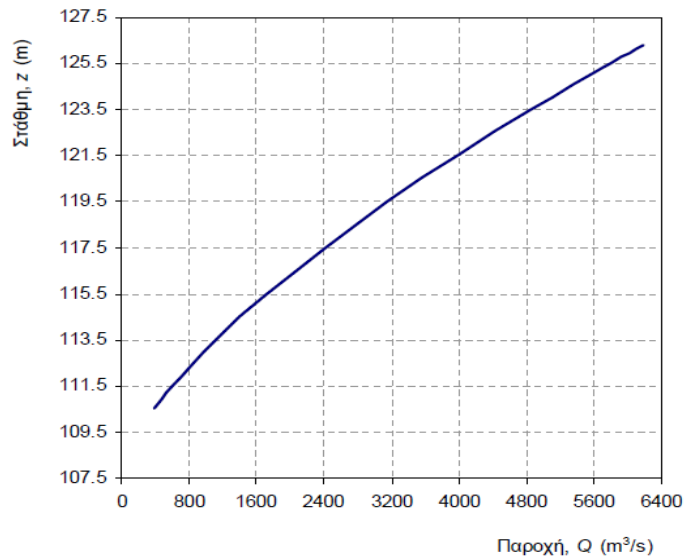
$$Q=48.678 \times H^{1.6854} \quad (6.3)$$

$$Q=0.366 \times L' \times (2 \times g)^{1/2} \times H^{1.6854} \quad (6.4)$$

6.2.1. Η σχέση στάθμης – παροχής του υπερχειλιστή Ogee του φράγματος Πουρνάρι Ι

Στόχος της εν λόγω υποενότητας είναι ο προσδιορισμός της καμπύλης στάθμης – παροχής του εκχειλιστή τύπου ogee του φράγματος μελέτης και η σύγκριση της με τις σχέσεις (υπολογισθείσα και ομοίωμα) της ΔΕΗ.

Κατά τη μελέτη πλημμυρών των Κουτσογιάννη κ.ά. (2010), η καμπύλη στάθμης – παροχής για πλήρως ανοιχτά θυροφράγματα λήφθηκε από το σχετικό γράφημα (**Εικόνα 45**).



Εικόνα 45: Καμπύλη θεωρητικής σχέσης στάθμης - παροχής εκχειλιστή (Πηγή Κουτσογιάννης κ.ά., 2010)

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε η απλοποιημένη αυτή μορφή, αλλά αντιθέτως λάβαμε υπόψιν και την επίδραση της κινητικής ενέργειας (3.7) και τις απώλειες που προκαλούν τα μεσόβαθρα, μεγέθη που προηγουμένως θεωρούνταν αμελητέα, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 3.3.

Με δεδομένα εισόδου το πλάτος του υπερχειλιστή L ίσο με 37.5 m (αποτελείται από τρία θυροφράγματα 12.5×12.5 m έκαστο), το ύψος P της κατακόρυφης παρειάς ίσο με 4.5 m, και τη παροχή σχεδιασμού Q_d ίση με $6100 \text{ m}^3/\text{s}$, δομήσαμε την παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά, για τη κατάρτιση της σχέσης στάθμης – παροχής, ως υδραυλικό φορτίο H ορίστηκε η απόσταση από τη στέψη του υπερχειλιστή μέχρι την γραμμή ενέργειας (3.6). Έπειτα, κατά το προσδιορισμό του συντελεστή παροχής c_o , λήφθηκε υπόψιν το εμπειρικό διάγραμμα (**Εικόνα 17**) από το οποίο εξαγάγαμε τις σχέσεις (3.10), (3.11) συναρτήσεως του λόγου P/H .

Ο συντελεστής αυτός διορθώθηκε λαμβάνοντας υπόψιν το σχετικό εμπειρικό διάγραμμα (**Εικόνα 18**) και την επιρροή του λόγου H/H_0 και έτσι βάσει της σχέσης (3.12) προέκυψε η τιμή του συντελεστή παροχής c για κατακόρυφο οgee, c_v .

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο εκχειλιστής στη δική μας περίπτωση είναι κεκλιμένος με κλίση προσεγγιστικά 1:1, βάσει της σχέσης (3.13) και του διαγράμματος της **Εικόνα 19**, καταλήξαμε στον τελικό συντελεστή c_i βάσει του οποίου έγιναν οι υπολογισμοί.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το ενεργό πλάτος του υπερχειλιστή, L' , το οποίο προέκυψε αφαιρώντας τις τοπικές απώλειες που προκαλούν τα μεσόβαθρα. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τους Roberson *et al.* (1998) ισχύει η σχέση (3.5). Εν προκειμένω, θεωρήσαμε πλήθος μεσοβάθρων $N=2$, συντελεστής συστολής για τις γωνίες $K_p=0.01$, συντελεστή συστολής για το σχήμα του αντερείσματος $K_a=0.1$ και H_e το υδραυλικό φορτίο σύμφωνα με τη σχέση (3.5) κυμαινόμενο για κάθε βήμα.

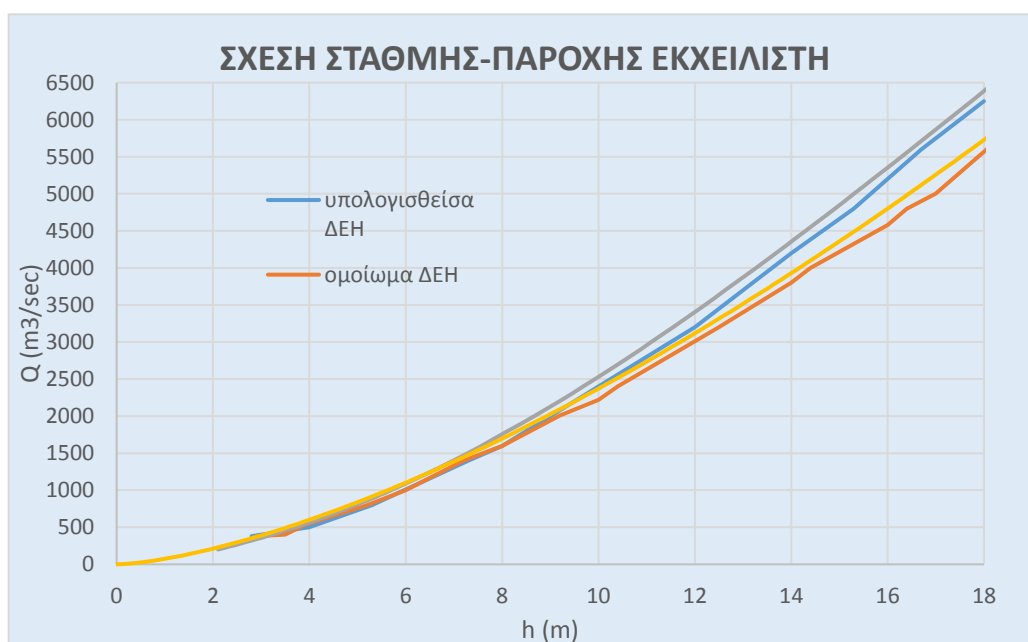
Πιο αναλυτικά, η υπολογιστική διαδικασία είχε ως εξής: Αρχικά, υπολογίσαμε το υδραυλικό φορτίο H_0 για τη παροχή σχεδιασμού Q_0 και υπολογίσαμε το ενεργό πλάτος του εκχειλιστή L' για τη παροχή Q_0 , όπως περιγράφηκε προηγουμένως, βάσει της σχέσης (3.5). Στη συνέχεια, θεωρήσαμε ένα βάθος ροής h και βάσει αυτού από τις σχέσεις (3.6) και (3.9) υπολογίσαμε το υδραυλικό φορτίο H και την ταχύτητα ροής V , αντίστοιχα. Έπειτα υπολογίσαμε την θεωρητική παροχή μέσω της σχέσης (3.8) καθώς επίσης και το τετραγωνικό σφάλμα $(Q_0 - Q_{\theta\epsilon\omega\rho})^2$. Με χρήση του solver του Excel 2013, ελαχιστοποιήσαμε το άθροισμα του τετραγωνικού σφάλματος για όλα τα βήματα και έτσι προέκυψαν οι βέλτιστες μεταβολές Δh , άρα και τα ζητούμενα βάθη νερού. Τέλος, προσαρμόσαμε μια σχέση παλινδρόμησης μορφής δύναμης στα ζεύγη (h, Q) από το οποίο προέκυψε η σχέση στάθμης - παροχής του εκχειλιστή (6.5) ή διαφορετικά (6.6).

$$Q=60.491 \times h^{1.6158} \quad (6.5)$$

$$Q=0.364 \times L' \times (2 \times 9.81)^{1/2} \times h^{1.6158} \quad (6.6)$$

Όπως προαναφέραμε, σύμφωνα με τα δεδομένα της ΔΕΗ η σχέση στάθμης – παροχής του ομοιώματος απεικονίζεται στην **Εικόνα 44** και η αναλυτική της μορφή είναι η (6.3) ή διαφορετικά η (6.4), ενώ της υπολογισθείσας καμπύλης είναι η (6.1) ή διαφορετικά η (6.2).

Παρατηρούμε ότι ο εκθέτης από 1.50 στην απλοποιημένη θεωρητική σχέση, γίνεται 1.62 όταν λαμβάνουμε υπόψιν στους υπολογισμούς την κινητική ενέργεια και τις τοπικές απώλειες των μεσοβάθρων, δεδομένου ότι η βάση εν προκειμένω είναι το βάθος νερού και η επίδραση της κινητικής ενέργειας ενσωματώνεται στον εκθέτη. Επίσης παρατηρούμε ότι η καμπύλη μας συναληθεύει σε ικανοποιητικό βαθμό με τις καμπύλες της ΔΕΗ και συγκεκριμένα με τη την υπολογισθείσα καμπύλη, ενώ η σχέση που χρησιμοποιήθηκε από τους Κουτσογιάννη κ.ά. στη μελέτη του 2010, προσομοιάζει αρκετά τη καμπύλη του ομοιώματος (**Εικόνα 46**).



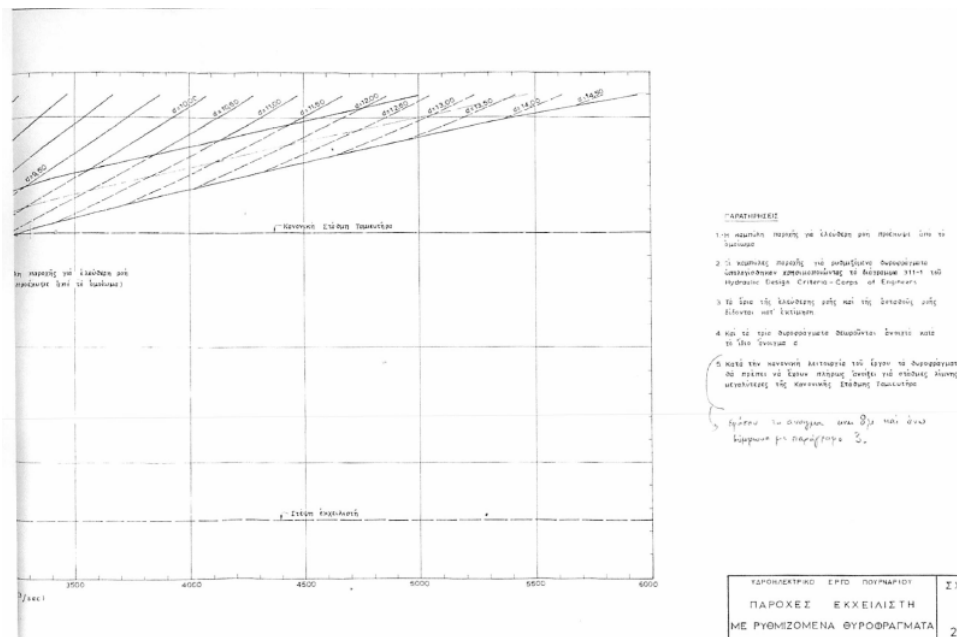
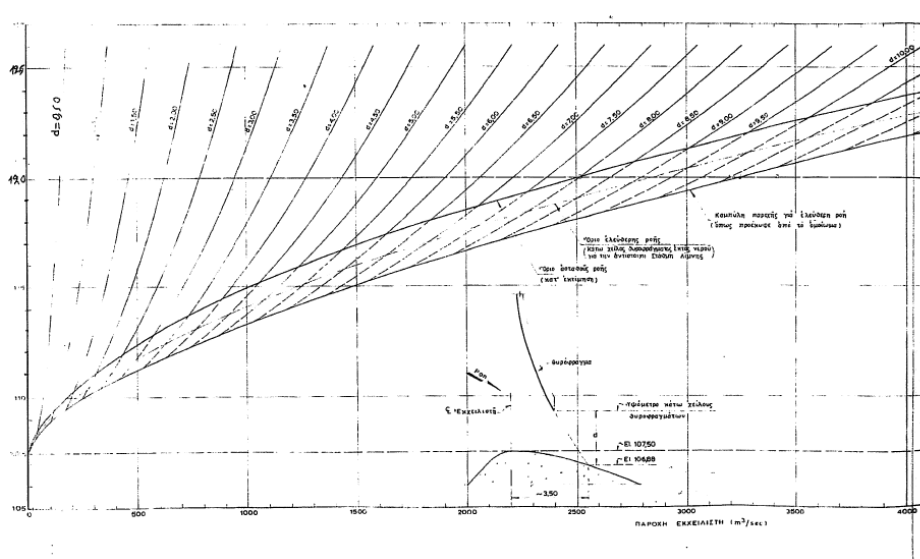
Εικόνα 46: Καμπύλες στάθμης-παροχής εκχειλιστή

6.3. Χαρακτηριστικά θυροφραγμάτων

Αξιοσημείωτη είναι η αναφορά στους κανόνες λειτουργίας, βάσει των οποίων λειτουργεί η ΔΕΗ τα θυροφράγματα στον τρέχοντα χρόνο. Αναλυτικότερα,

- Στην κανονική λειτουργία του ταμιευτήρα τα θυροφράγματα μένουν κλειστά.
- Για εισροές μικρότερες της παροχευτικότητας των στροβίλων, $500 \text{ m}^3/\text{s}$, τα θυροφράγματα παραμένουν και πάλι κλειστά και το νερό διοχετεύεται κατάντη μόνο μέσω των στροβίλων του σταθμού παραγωγής.
- Στη περίπτωση εισροών μεγαλύτερων από $500 \text{ m}^3/\text{s}$ και για τάση ανύψωσης της στάθμης πάνω από το επίπεδο των $+118 \text{ m}$ πραγματοποιείται σταδιακό βαθμιαίο άνοιγμα των θυροφραγμάτων.
- Βασική λεπτομέρεια είναι ότι τα θυροφράγματα πρέπει να είναι ανοιχτά στο ίδιο άνοιγμα, το οποίο θα είναι τέτοιο ώστε η στάθμη της λίμνης να παραμένει όσο το δυνατόν σταθερή στη τιμή $+120 \text{ m}$. Ωστόσο, από την επί τόπου μελέτη αποκομίσαμε ότι πλέον η στάθμη ασφαλείας είναι $+118 \text{ m}$. Αξίζει να αναφερθεί, ότι αν είναι εφικτό το άνοιγμα μόνο των δύο θυροφραγμάτων, προτιμώνται τα δυο ακραία. Ωστόσο για άνοιγμα d ίσο με 8 m και στάθμη ίση με 120 m , η ροή κάτω από το θυροφράγμα γίνεται ασταθής, γεγονός που αντιμετωπίζεται με πλήρες άνοιγμα των θυροφραγμάτων είτε με σταδιακό κλείσιμο αυτών, λαμβάνοντας υποψήν την άνοδο ή την πτώση της στάθμης ως προς τη στάθμη των 120 m , αντίστοιχα.
- Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η μέγιστη στάθμη για την πλημμύρα μελέτης του έργου δεν ξεπερνά τα $+126 \text{ m}$ και η παροχή του εκχειλιστή την τιμή $6100 \text{ m}^3/\text{s}$. Εξαιρέση σε αυτό αποτελεί η περίπτωση αστοχίας του ενός θυροφράγματος, όπου τότε η στάθμη θα φτάσει περίπου τα $+127 \text{ m}$ και η μέγιστη παροχή του υπερχειλιστή θα μειωθεί στα $4500 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Στο καθοδικό κλάδο της πλημμύρας, τα θυροφράγματα παραμένουν ανοιχτά μέχρι η στάθμη να φτάσει τα $+120 \text{ m}$, ενώ όσο αυτή υποχωρεί το άνοιγμα φτάνει αρχικά στα 8 m και έπειτα μειώνεται σταδιακά, μέχρι που μηδενίζεται στο τέλος της πλημμύρας.

- Σε γενικές γραμμές πρέπει να αποφεύγεται το άνοιγμα μόνο ενός εκ των τριών θυροφραγμάτων καθώς επίσης και το μακροχρόνιο άνοιγμα αυτών σε τιμές μικρότερες του 1.5 m, καθώς τότε δημιουργούνται αρνητικές πιέσεις στη στέψη και στη κατάντη παρειά του εκχειλιστή.



Εικόνα 47: Παροχές εκχειλιστή με ρυθμιζόμενα θυροφράγματα (ΔΕΗ)

Ακολουθώντας τους ανωτέρω κανόνες λειτουργίας, επιτυγχάνεται τόσο η ασφαλής ανάσχεση όλων των πλημμυρών – ακόμη και τη μέγιστης πιθανής πλημμύρας – όσο

και η επαναφορά του ταμιευτήρα στην κανονική του λειτουργία μετά το πέρας του πλημμυρικού γεγονότος, χωρίς ωστόσο να είναι απαραίτητη η πρόγνωση της προς αντιμετώπιση πλημμύρας.

Στην **Εικόνα 47** απεικονίζεται το νομογράφημα λειτουργίας των θυροφραγμάτων σύμφωνα με τη ΔΕΗ, το οποίο συσχετίζει τη στάθμη του ταμιευτήρα z (m) με την παροχή του εκχειλιστή Q (m^3/sec) και το άνοιγμα των θυροφραγμάτων d (m).

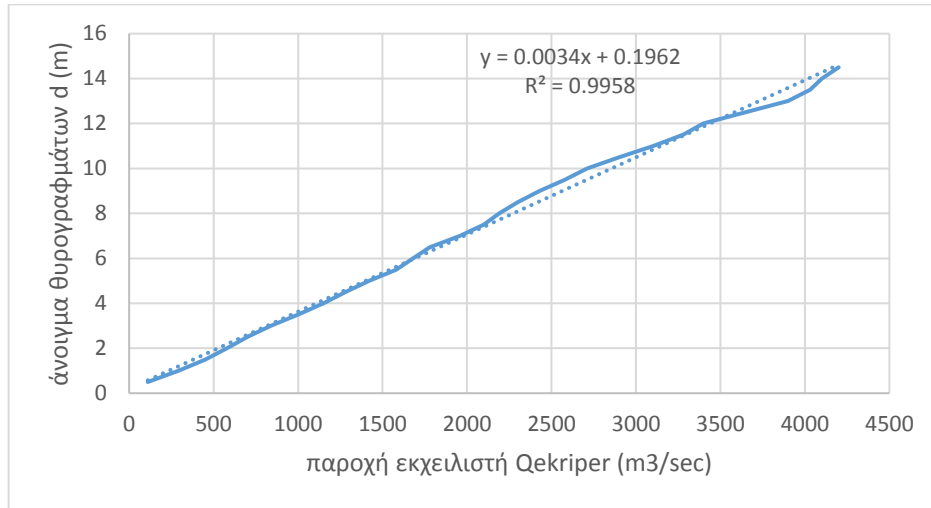
Από την επεξεργασία του παραπάνω νομογραφήματος και λαμβάνοντας υπόψιν ότι η ΔΕΗ λαμβάνει ως στάθμη ασφαλείας το +118 m, καθώς έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη έκταση του χρόνου, δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα (**Εικόνα 48**) που συσχετίζει τη παροχή του εκχειλιστή Q (m^3/sec) και το άνοιγμα των θυροφραγμάτων d (m) και αναλυτικά περιγράφεται μέσω της σχέσης (6.7). Για τυπικούς λόγους η διαδικασία επαναλήφθηκε και για στάθμη ασφαλείας +120 m, που ήταν το παλαιότερο όριο ασφαλείας της ΔΕΗ. Τα αποτελέσματα για αυτή τη στάθμη απεικονίζονται στην **Εικόνα 49** και στη σχέση (6.8).

Για στάθμη ασφαλείας +118 m, η αναλυτική σχέση που το περιγράφει είναι:

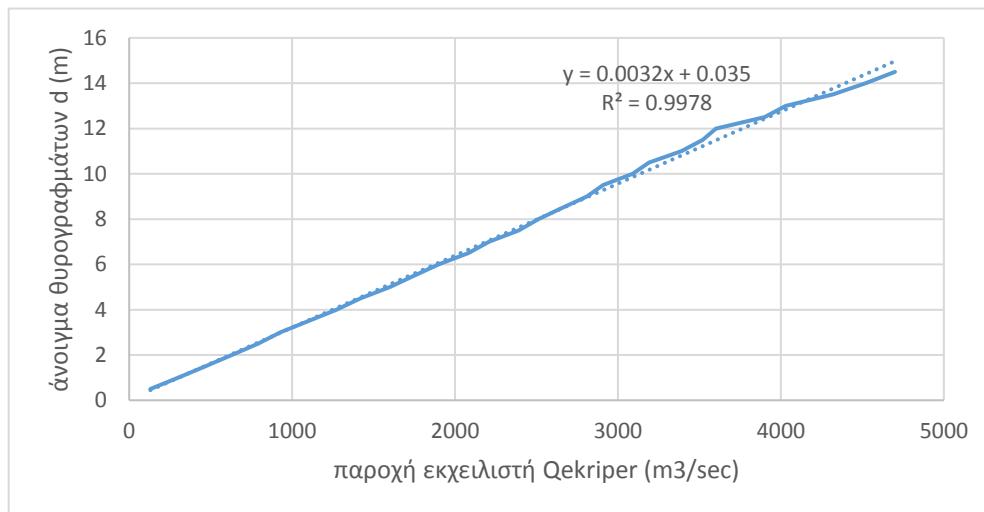
$$d = 0.0034 \times Q_{ekriper} + 0.1962 \quad (6.7)$$

Για στάθμη ασφαλείας +120 m, η αναλυτική σχέση που το περιγράφει είναι:

$$d = 0.0032 \times Q_{ekriper} + 0.035 \quad (6.8)$$



Εικόνα 48: Το άνοιγμα των θυροφραγμάτων συναρτήσει της παροχής του εκχειλιστή για στάθμη ασφαλείας +118 m (Πηγή: ΔΕΗ, ύστερα από επεξεργασία).

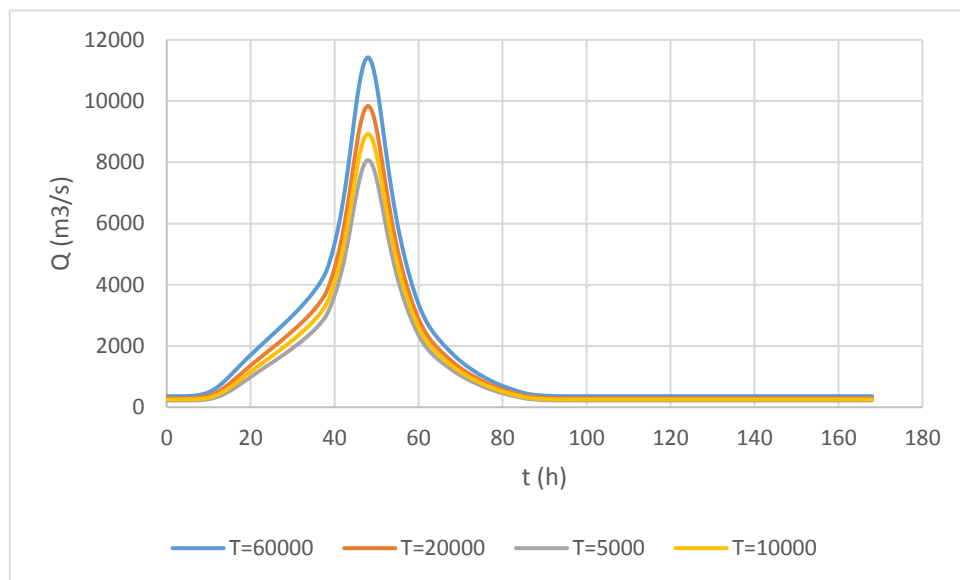


Εικόνα 49: Το άνοιγμα των θυροφραγμάτων συναρτήσει της παροχής του εκχειλιστή για στάθμη ασφαλείας +120 m (Πηγή: ΔΕΗ, ύστερα από επεξεργασία).

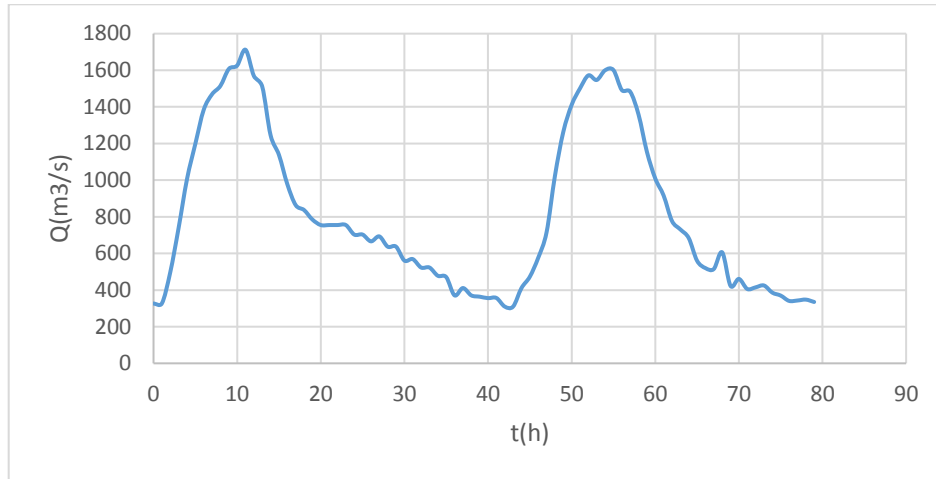
6.4. Υδρολογικά δεδομένα

Το υπολογιστικό τμήμα της εν λόγω εργασίας βασίστηκε σε ένα πλήθος υδρολογικών δεδομένων, καμπύλων λειτουργίας και νομογραφημάτων.

Ο κώδικας του ισοζυγίου του ταμιευτήρα έτρεξε για πλημμυρογραφήματα που αντιστοιχούν σε $T=5000$, $T=10000$, $T=20000$ και $T=60000$ έτη (**Εικόνα 50**) καθώς και για το πλημμυρογράφημα της πλημμύρας του 2005 (**Εικόνα 51**). Όπως θα αποδειχθεί στο **Κεφάλαιο 8**, τα βέλτιστα επίπεδα που προκύπτουν από τη παραπάνω διαδικασία διαφέρουν, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την παραγωγή συνθετικών πλημμυρογραφημάτων, η οποία και περιγράφεται παρακάτω στο **Κεφάλαιο 9**.

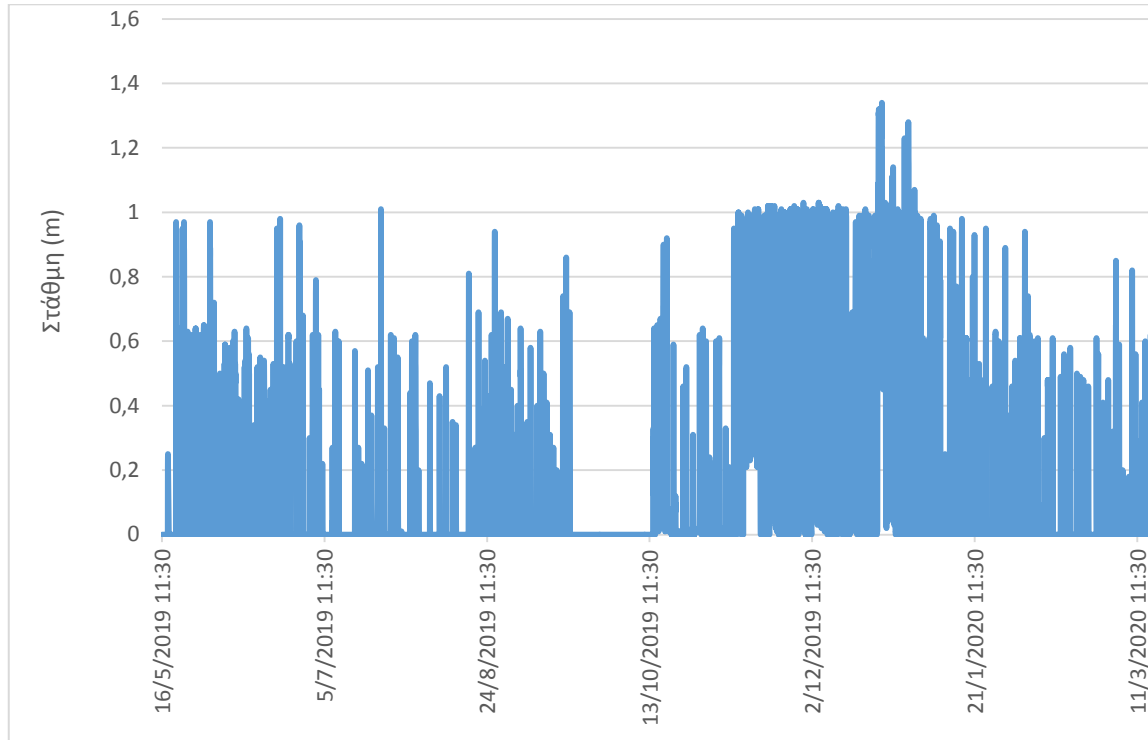


Εικόνα 50: Πλημμυρογραφήματα εισροής για $T=5000$, 10000 , 20000 , και 60000 έτη (Μαμάσης, 2020, ύστερα από επεξεργασία).



Εικόνα 51: Το πλημμυρογράφημα εισροής της πλημμύρας του 2005(Πηγή: Μαμάσης, 2020, ύστερα από επεξεργασία).

Τέλος, κατά τη διόδευση της πλημμύρας ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην διαχείριση των στροβίλων. Συγκεκριμένα θεωρήθηκε ότι λειτουργούν κανονικά με παροχή εκροής $500 \text{ m}^3/\text{s}$, έπειτα σταματούν για περίπου 8 ώρες και στη συνέχεια τίθενται και πάλι σε λειτουργία. Αυτός ο κανόνας προέκυψε λαμβάνοντας υπόψη μετρήσεις στάθμης στη νέα γέφυρα Άρτας, που ελήφθησαν από την πλατφόρμα OpenHi.net (<https://system.openhi.net/stations/1484/>), και έχουν χρονική διακριτικότητα 30 λεπτά. Μετά από επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα (**Εικόνα 52**):



Εικόνα 52: Δεδομένα στάθμης από τον τηλεμετρικό σταθμό στη νέα γέφυρα της Άρτας (Πηγή: OpenHi, 2020, ύστερα από επεξεργασία).

7. Εφαρμογή μεθοδολογικού πλαισίου στο Πουρνάρι I

Το παραπάνω μεθοδολογικό πλαίσιο βρίσκει ευρεία εφαρμογή στις περισσότερες περιπτώσεις διαχείρισης πλημμυρών σε ταμιευτήρες που φέρουν υπερχειλιστές με θυροφράγματα, καθώς όλα τα επιμέρους στοιχεία είναι παραμετροποιημένα. Κρίνεται ωστόσο σκόπιμη, στο σημείο αυτό, η εφαρμογή της εν λόγω μεθοδολογίας στη περίπτωση του φράγματος Πουρνάρι I, αρκεί να αναλογιστούμε τόσο το μεγάλο μέγεθος του ταμιευτήρα του και τις καταστρεπτικές συνέπειες που θα επέφερε η θραύση του, όσο και τη παραγωγή σημαντικής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.

Το μοντέλο διόδευσης βασίστηκε στην εξίσωση του συνολικού όγκου εισροής $Veis$ με το συνολικό όγκο εκροής $Vekr$ και καταστρώθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.

Ορίσματα εισόδου είναι το πλημμυρογράφημα, η σχέση στάθμης – παροχής του υπερχειλιστή, όπως προσδιορίστηκε στο **Κεφάλαιο 6**, η σχέση στάθμης – αποθέματος του ταμιευτήρα, καθώς και άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη αυτού, μερικά εκ των οποίων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**.

```
Qeis=xlsread('metrics4G.xlsx','hydrographs','E2:E170');
```

```
t=xlsread('metrics4G.xlsx','hydrographs','A2:A170');
```


Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρα και υπερχειλιστή

<i>Q_{maxstr}</i>	500	<i>m³/sec</i>
<i>z_c</i>	107.5	<i>m</i>
<i>z_{str}</i>	42.5	<i>m</i>
<i>stepsi</i>	128	
<i>z_{idr}</i>	100	
<i>Q_{ekripermax}</i>	6100	

όπου Q_{maxstr} η παροχευτικότητα των στροβίλων, z_c το υψόμετρο στέψης του υπερχειλιστή, z_{str} το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται οι στροβίλοι, $stepsi$ η στέψη του φράγματος, z_{idr} το υψόμετρο υδροληψίας και $Q_{ekripermax}$ η παροχευτικότητα του υπερχειλιστή.

Η σχέση στάθμης – παροχής του εκχειλιστή τύπου Ogee όπως την προσδιορίσαμε είναι: η (6.5) ή διαφορετικά η (6.6) και η σχέση στάθμης – αποθέματος του ταμιευτήρα, σύμφωνα με τον Κουτσογιάννη (2010), είναι η (7.1).

$$S = 0.042 \times (z - 40)^{2.23} \quad (7.1)$$

Στην εν λόγω εργασία, ο χειρισμός των θυροφραγμάτων μελετήθηκε βάσει ορισμένων επιπέδων της στάθμης. Πιο αναλυτικά, για παροχές μικρότερες της παροχευτικότητας των στροβίλων, ήτοι $500 \text{ m}^3/\text{s}$, το νερό θεωρήθηκε ότι διοχετεύεται κατάντη μόνο μέσω των στροβίλων και ο εκχειλιστής δεν χρησιμοποιείται, καθώς τα θυροφράγματα παραμένουν κλειστά. Για μεγαλύτερες παροχές, πραγματοποιείται σταδιακή αύξηση της στάθμης που συνεπάγεται σταδιακό άνοιγμα των θυροφραγμάτων (με κατάλληλη ρύθμιση) όταν η στάθμη

ξεπεράσει τρία χαρακτηριστικά επίπεδα, που συμβολίζονται *lev1*, *lev2* και *lev3*. Ο χειρισμός αυτός γίνεται ώστε να ελαχιστοποιείται η ενέργεια που χάνεται λόγω της υπερχειλίσης E_{xath} και να μεγιστοποιείται η απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος, η οποία συμβολίζεται ως *dist*. Αντίστοιχα, στον καθοδικό κλάδο της πλημμύρας πραγματοποιείται σταδιακό κλείσιμο των θυροφραγμάτων, όταν η στάθμη γίνει μικρότερη από τις στάθμες *lev4*, *lev5* και *lev6*.

Βασικό μέγεθος στην διαδικασία αυτή είναι η αδιάστατη παράμετρος α , που υποδηλώνει το ποσοστό της παροχτευτικότητας του εκχειλιστή που υπερχειλίζει ανά περίπτωση.

Συγκεκριμένα, κατά τον ανοδικό κλάδο της πλημμύρας, όταν η στάθμη του ταμιευτήρα ξεπεράσει το *lev1* πραγματοποιείται άνοιγμα των θυροφραγμάτων, τέτοιο ώστε να υπερχειλίζει το 1/3 της παροχτευτικότητας του εκχειλιστή. Αντίστοιχα, για περεταίρω άνοδο της στάθμης και όταν αυτή ξεπεράσει το *lev2*, το άνοιγμα των θυροφραγμάτων γίνεται τέτοιο ώστε να υπερχειλίζουν τα 2/3 της παροχτευτικότητας του υπερχειλιστή, ενώ όταν υπερβεί το *lev3*, τα θυροφράγματα ανοίγουν πλήρως.

Στον καθοδικό κλάδο, όταν η στάθμη γίνει μικρότερη του *lev4* αρχίζει το σταδιακό κλείσιμο των θυροφραγμάτων, ενώ όταν γίνει μικρότερη από το *lev5* το άνοιγμα γίνεται τέτοιο ώστε να υπερχειλίζει το 1/3 της παροχτευτικότητας του υπερχειλιστή.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για πτώση στάθμης υπό του *lev6*, ο ταμιευτήρας επανέρχεται στην κανονική του λειτουργία. Σε αυτή τη κατάσταση, τα θυροφράγματα παραμένουν κλειστά, ενώ οι στρόβιλοι παραμένουν ομοίως κλειστοί για 8 ώρες και έπειτα τίθενται ξανά σε λειτουργία.

Συνεπώς, για δεδομένο ποσοστό υπερχειλίσης α , η υπολογιστική διαδικασία υλοποιείται ως εξής:

```
if flag==true %anodikos klados  
  
    if z_opt<=lev1||z_opt<zc
```

```

a_step=parameters(20,1);
elseif lev1<=z_opt&&z_opt<lev2
    a_step=parameters(21,1)*min(1,max(0,z_opt-lev1)/0.1);
        Qekrstr=Qmaxstr;
        flag_over_lev1=true;
elseif lev2<=z_opt&&z_opt<lev3
    a_step=parameters(22,1)*min(1,max(0,z_opt-lev2)/0.1);
        Qekrstr=Qmaxstr;
        flag_over_lev1=true;
elseif z_opt>=lev3||z_opt>=upperlimit
    a_step=parameters(23,1)*min(1,max(0,z_opt-lev3)/0.1);
        Qekrstr=Qmaxstr;
        flag_over_lev1=true;
end
else %kathodikos klados
    if z_opt>=lev4||z_opt>=upperlimit
        a_step=parameters(23,1)*min(1,max(0,z_opt-lev4)/0.1);
            Qekrstr=Qmaxstr;
            flag_over_lev1=true;
    elseif lev4>z_opt&&z_opt>=lev5
        a_step=parameters(22,1)*min(1,max(0,z_opt-lev5)/0.1);
            Qekrstr=Qmaxstr;
            flag_over_lev1=true;
    elseif lev5>z_opt&&z_opt>=lev6
        a_step=parameters(21,1)*min(1,max(0,z_opt-lev6)/0.1);

```

```

        Qekrstr=Qmaxstr;
        flag_over_lev1=true;
        elseif lev6>z_opt&&z_opt>z_c
a_step=parameters(20,1);
        Qekrstr=Qmaxstr;
        flag_over_lev1=true;
elseif z_opt<=z_c
        a_step=parameters(20,1);
end
end
end

```

Για τη διαχείριση των στροβίλων :

```

Qekrstr=xlsread('metrics4G.xlsx','palmos_strovilou','B2:B170');
Qmaxstr=parameters(1,1);

```

```

if (flag_over_lev1==true) && (i<n)
        Qekrstr(i+1)=Qmaxstr;
end

```

Με άλλα λόγια, οι στρόβιλοι λειτουργούν με παροχή εκροής $Q_{ekr, str}=500 \text{ m}^3/\text{s}$ κατά τη διάρκεια της πλημμύρας ($z > lev1$) ενώ εκτός του πλημμυρικού συμβάντος έχουν μηδενική εκροή για 8 ώρες και μέγιστη εκροή για τις υπόλοιπες 16 κοκ.

Αναφορικά με το μοντέλο, σε κάθε βήμα το πρόγραμμα διαβάζει μια τιμή για την παροχή εισροής. Στην περίπτωση που οι στρόβιλοι λειτουργούν κανονικά, η παροχή εκροής των

στροβίλων ($Q_{ekr_{str}}$) λαμβάνεται ίση με 500 m³/s, ενώ μηδενίζεται αν βρισκόμαστε στην οκτάωρη παύση της λειτουργίας αυτών. Στη συνέχεια υπολογίζεται το απόθεμα S (hm³) βάσει της σχέσης (7.1) όπου η στάθμη z_{opt} του ταμιευτήρα προκύπτει από εσωτερική βελτιστοποίηση βάσει της απαίτησης ελαχιστοποίησης του τετραγωνικού σφάλματος της διαφοράς $(DS-DIQ)^2$, όπου DS η μεταβολή του αποθέματος βάσει της σχέσης στάθμης – αποθέματος (7.1) και (7.2), Q η ολική εκροή που υπολογίζεται βάσει της σχέσης (7.3) και DIQ η μεταβολή του αποθέματος βάσει της διαφοράς εισροών – εκροών, η οποία δίνεται από τη σχέση (7.4).

$$DS = S_i - S_{i-1} \quad (7.2)$$

$$Q = Q_{ekr_{str}} + Q_{ekr_{iper}} \quad (7.3)$$

$$DIQ = \left(\frac{I_i + I_{i+1}}{2} - \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \right) \times \frac{3600}{10^6} \quad (7.4)$$

```

Qekr2=Qekrstr+Qekriper_errorstep; %m3/s
Vekr=(Qekr2+Qekr1)*1800/(10^6); %hm3
Veis=(Qeis2+Qeis1)*1800/(10^6);
DS=S2-S1; %metavoli tou apothematos vasei tis sxesis stathmis-apothematos
DIQ=Veis-Vekr; %metavoli tou apothematos vasei eisrown-ekrown
error_opt=(DS-DIQ).^2;%penalty function

```

```

flag=true; %ston anodiko klado ths plimmiras

```

```

for i=2:n

Qeis1=Qeis(i-1);

Qeis2=Qeis(i);

Qekr1=Qekr(i-1);

S1=S(i-1);

Xmin=z(i-1)-0.2;

Xmax=z(i-1)+0.2;

X=z(i-1);

% z→z_opt gia apofygh sygxyshs

[z_opt,error_opt]=fminbnd(@(X)errorstep4G(X,Zbot,lev1,lev2,lev3,lev4,lev5,lev6,synt,ekth,
ekthS,zc,c,b,Qekrstr(i),S1,Qekr1,Qeis1,Qeis2,parameters,flag,Qmaxstr),Xmin,Xmax);

% z_opt mesa sto step

[a_step,S_step,Qekr2_step,Vekr_step,Veis_step,Qekriper_step,flag_over_lev1]=step4G(z_opt
,Zbot,lev1,lev2,lev3,lev4,lev5,lev6,synt,ekth,ekthS,zc,c,b,Qekrstr(i),Qekr1,Qeis1,Qeis2,para
meters,flag,Qmaxstr);

```

Στη συνέχεια υπολογίζεται η παροχή υπερχειλίσσης $Q_{ekriper}$ η οποία δίνεται από τη σχέση (7.5) όπου a το ποσοστό υπερχειλίσσης, z η στάθμη του ταμιευτήρα, z_c το υψόμετρο στέψης του υπερχειλιστή και c , b , $ekth$ συντελεστές της σχέσης στάθμης – παροχής του εκχειλιστή (Πίνακας 2).

$$Q_{ekriper(i)} = a_{(i)} \times (c \times b \times \sqrt{2 \times g} \times (z_{(i)} - z_c)^{ekth}) \quad (7.5)$$

Πίνακας 2: Συντελεστές σχέσης στάθμης-παροχής υπερχειλιστή

c	0.364	
B	37.5	m
zc	107.5	m
ekth	1.6158	m

```
S_step=synt*(z_opt-Zbot).^ekthS; %h sxesi stathmis-apothematos tou tamieytira , se hm3
```

```
Qekriper_step=a_step.*(c*b*sqrt(2*9.81)*(z_opt-zc).^ekth);
```

```
Qekr2_step=Qekrstr+Qekriper_step; %m3/s
```

```
Vekr_step=(Qekr2_step+Qekr1)*1800/(10^6); %hm3
```

```
Veis_step=(Qeis2+Qeis1)*1800/(10^6);
```

Έπειτα προσδιορίζεται ο αντίστοιχος όγκος εκροής από τον υπερχειλιστή V_{iperx} , από τη σχέση (7.6) καθώς και το ύψος πτώσης του νερού h_{pt} από τη σχέση (7.7).

$$Viperx_{(i)} = (Qekriper_{(i)} + Qekriper_{(i-1)}) \times \frac{1800}{10^6} \quad (7.6)$$

$$h_{pt(i)} = z_{(i)} - z_{str} \quad (7.7)$$

```
% Ananewnw ta dianusata sth thesh i
```

```
z(i)=z_opt;
```

```
error(i)=error_opt;
```

```
Qekr(i)=Qekr2_step;
```

```
Vekr(i)=Vekr_step;
```

```
Veis(i)=Veis_step;
```

```
S(i)=S_step;
```

```
a(i)=a_step;
```

```
Qekriper(i)=Qekriper_step;
```

```
Viperx(i)=(Qekriper(i)+Qekriper(i-1))*1800/(10^6); %iperxilisi se hm3
```

```
hpt(i)=z(i)-zstr; %ipsos ptosis
```

Για $z_{(i)} > z_c$ υπολογίζεται ο όγκος ανάσχεσης (7.8) που επί της ουσίας πρόκειται για τον όγκο του νερού που περικλείεται από τη στάθμη του ταμιευτήρα τη στιγμή i μέχρι τη στάθμη υπερχείλισης.

$$V_{anasx} = S(i) - S_c \quad (7.8)$$

```

if z(i)>zC
    Vanasx(i)=S(i)-Sc;%o ogkos anasxesis
else
    Vanasx(i)=0;
end

```

Τέλος προσδιορίζονται οι τιμές της παραγόμενης ενέργειας E_{parag} από τη σχέση (7.9) καθώς και εκείνης που χάνεται λόγω υπερχειλίσης, E_{xath} η οποία προσδιορίζεται από τη σχέση (7.10).

$$E_{parag(i)} = V_{ekrstr(i)} \times h_{pt(i)} \times \frac{0.235}{100} \quad (7.9)$$

$$E_{xath(i)} = V_{iperx(i)} \times h_{pt(i)} \times \frac{0.235}{100} \quad (7.10)$$

```

Eparag(1)=Vekrstr(1)*hpt(1)*.235/100; %i paragomeni energia
Exath(1)=Viperx(1)*hpt(1)*.235/100;%i energeia pou xanetai

```

Έπειτα από το πέρας του πλημμυρικού επεισοδίου και όταν πλέον η στάθμη του ταμιευτήρα γίνει μικρότερη από το $lev6$, ο ταμιευτήρας επανέρχεται στη κανονική του λειτουργία.

```

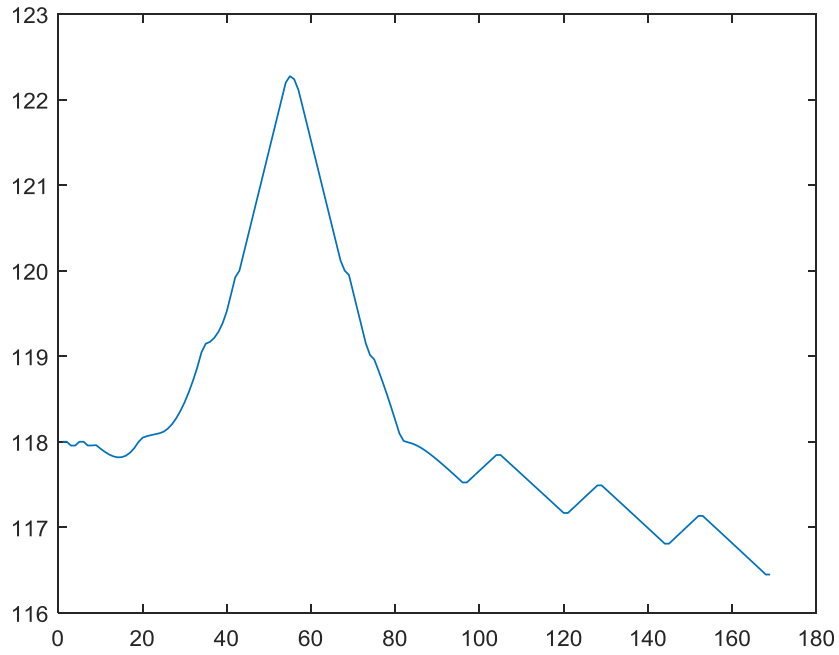
if z(i)<lev6 %pleon to sistima exei epanelthei stin kanoniki katastasi leitourgias tou
    Vekrstr(i)=0; %epomenos oi stroviloi den leitourgoun
    Viperx(i)=0; %kai den iparxei iperxeilisi

```

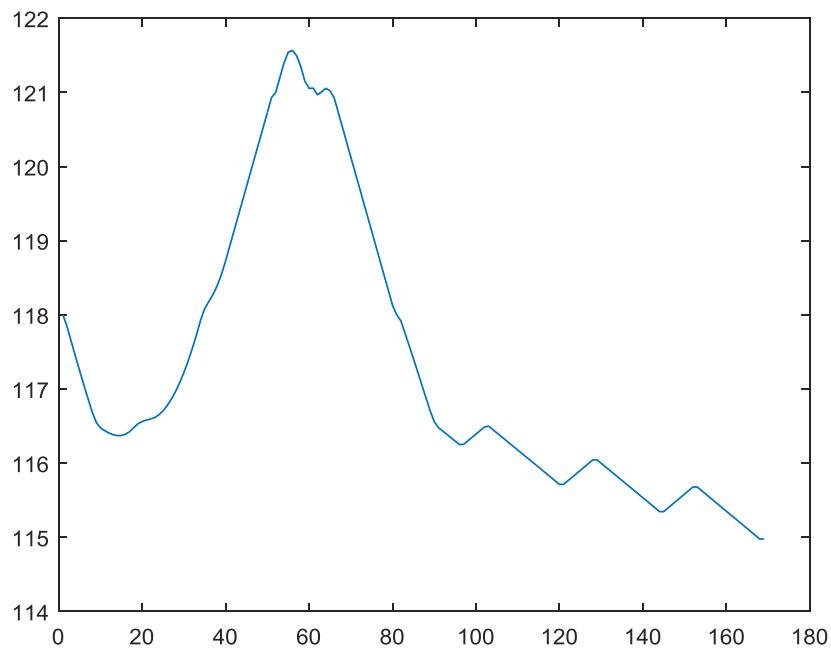
```
end
```

Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν ο συνολικός όγκος εισροής τείνει να εξισωθεί με τον συνολικό όγκο εκροής.

```
Veis_ol=sum(Veis(1:i));  
Vekr_ol=sum(Vekr(1:i));  
  
if Veis_ol>Vekr_ol  
    continue  
end  
if Veis_ol<Vekr_ol  
    continue  
end  
if abs(Veis_ol-Vekr_ol)<0.001  
    break  
end  
end
```



Εικόνα 53: Αποτελέσματα προσομοίωσης για $lev=118, lev2=119, lev3=120, lev4=119, lev5=118, lev6=117$.



Εικόνα 54: Αποτελέσματα προσομοίωσης για $lev=116.5, lev2=118, lev3=121, lev4=120, lev5=117.5, lev6=116$.

Στον **Πίνακα 3** παρατίθενται, ενδεικτικά, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το υδρογράφημα εισόδου των $T=10000$ ετών και διακοπτόμενη λειτουργία στροβίλων, για δεδομένες τιμές των χαρακτηριστικών τιμών στάθμης.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την πλημμύρα σχεδιασμού των 10000 ετών και διακοπτόμενη λειτουργία των στροβίλων, για $z_{αρχ}=118$ m.

	lev=118,lev2=119,lev3=120,lev4=119,lev5=118,lev6=117	lev=116.5,lev2=118,lev3=121,lev4=120,lev5=117.5,lev6=116
zmax (m)	122.28	121.57
Dist (m)	5.73	6.43
Exath_ol (GWh)	100.30	91.98

Από τα παραπάνω (**Εικόνες 53** και **54** και **Πίνακας 3**), παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση της ασφάλειας και της ενέργειας που χάνεται, ακόμη και με μικρές αλλαγές στα *lev1-lev6*, γεγονός που καθιστά εμφανή την ανάγκη βελτιστοποίησης της διαχείρισης των θυροφραγμάτων, η οποία και λαμβάνει χώρα στο **Κεφάλαιο 8**.

8. Βελτιστοποίηση και πολυκριτηριακή ανάλυση λειτουργίας θυροφραγμάτων

Κατά τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των θυροφραγμάτων λαμβάνονται υπόψιν κάποια μέτρα επίδοσης. Πιο συγκεκριμένα θεωρούμε ως:

- $dist$ την απόσταση από τη μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα z_{max} μέχρι τη στέψη του φράγματος
- E_{xath} η ενέργεια που χάνεται κατά την υπερχειλίση και υπολογίζεται από τη σχέση (7.13).

Ως στοχική θεωρούμε μια συνάρτηση της μορφής (8.1) όπου $w1$ και $w2$ τα βάρη των μεταβλητών $dist$ και E_{xath} αντίστοιχα. Το αρνητικό πρόσημο στη μεταβλητή $dist$ τοποθετείται καθώς η συνάρτηση `simulannealbnd` πραγματοποιεί ελαχιστοποίηση της στοχικής συνάρτησης ενώ εμείς, όπως προαναφέραμε, επιθυμούμε μεγιστοποίηση της μεταβλητής αυτής.

$$M1 = -w1 \times dist + w2 \times E_{xath} \quad (8.1)$$

Απώτερος στόχος, είναι η ελαχιστοποίηση της τιμής της συνάρτησης $M1$ με χρήση κατάλληλης συνάρτησης βελτιστοποίησης, διαδικασία από την οποία θα προκύψουν οι βέλτιστες πλέον τιμές των προαναφερθέντων επιπέδων στάθμης, $lev1 - lev6$.

`%για τα metra epidosis`

`zmax=max(z);%megisti stathmi tamieutira`

`Viperx_ol=sum(Viperx); %sinolikos ogkos nerou pou iperxilise`

`dist=stepsi-zmax; %apostasi megistis stathmis tamieftira mexri thn stepsi tou fragmatos (1o metro epidosis)`

`Exath_ol=sum(Exath);%energeia pou xathike logo iperxeilisis (2o metro epidosis)`

```
M1=(-w1)*dist+w2*Exath_ol;
```

%για τη βελτιστοποίηση από την οποία προκύπτουν τα lev έχουμε:

```
options = saoptimset('PlotFcns',{ @saplotbestx,@saplotbestf,@saplotx,@saplotf}, 'MaxIter',  
550);
```

```
[x,fval]=simulannealbnd(@(X)epidosi4G(X,parameters,Qeis),[1.5,1.2,1.3,1.1,1.0,1.2],[0,0,0,0,  
.0,0],[118-z(1),8,8,8,8,8], options);
```

```
lev1=z(1)+x(1);
```

```
lev2=lev1+x(2);
```

```
lev3=lev2+x(3);
```

```
lev4=lev3-x(4);
```

```
lev5=lev4-x(5);
```

```
lev6=lev5-x(6);
```

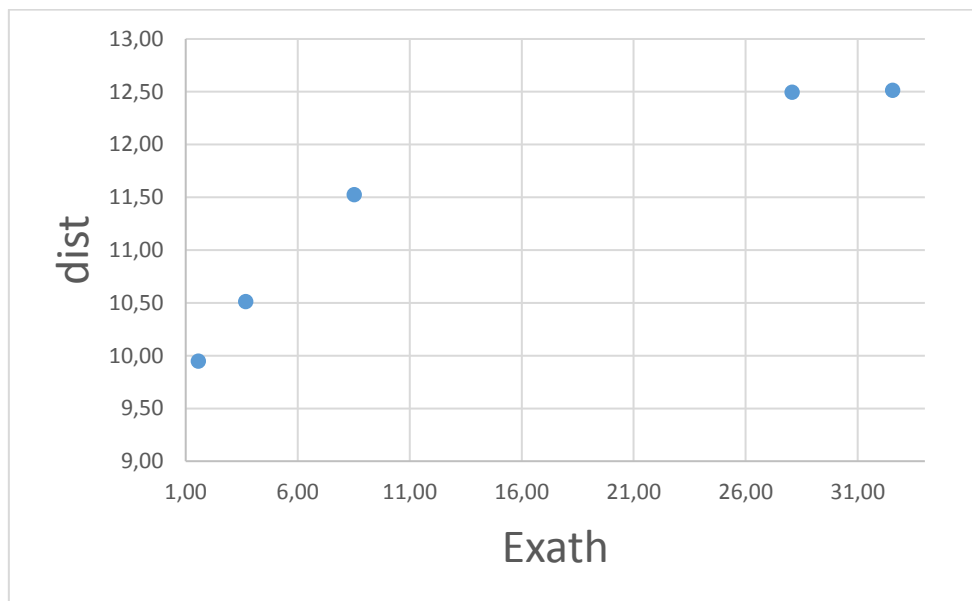
Θεωρήθηκαν τρία σενάρια πλημμυρών τα οποία διαφοροποιήθηκαν ως προς την τιμή της αρχικής στάθμης του ταμιευτήρα κατά την έναρξη του πλημμυρικού επεισοδίου και πραγματοποιήθηκαν run για διάφορους συνδυασμούς βαρών, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται παρακάτω.

Στο πρώτο σενάριο, η αρχική στάθμη του ταμιευτήρα τέθηκε ίση με 107.5 m δηλαδή ίση με τη στέψη του υπερχειλιστή, στο δεύτερο ορίσαμε $z_{αρχ}=114$ m ενώ στο τρίτο $z_{αρχ}=118$ m που δηλαδή ίσο με τη στάθμη ασφαλείας. Σε όλα τα σενάρια, ως άνω όριο της στάθμης *lev1* ορίστηκε το 118 m καθώς σύμφωνα με τη ΔΕΗ έτσι είναι πιο εύκολος ο χειρισμός των θυροφραγμάτων λόγω μικρότερων βαρυτικών δυνάμεων και επιπλέον έτσι υπάρχει περισσότερος χρόνος για την αντιμετώπιση του πλημμυρικού επεισοδίου, συγκριτικά με το παλαιότερο όριο ασφαλείας που ανερχόταν στα 120 m.

Έπειτα από την προσομοίωση για διάφορους συνδυασμούς βαρών προέκυψαν τα διαγράμματα pareto τα οποία απεικονίζονται στις : **Εικόνα 55**, **Εικόνα 56** και **Εικόνα 57** . Για την πληρέστερη παρουσίασή τους, κατά τη δημιουργία τους πραγματοποιήθηκε αδιαστατοποίηση

των μεταβλητών $dist$ και $Exath$ ώστε τα βάρη των διαφόρων δοκιμών να λαμβάνουν τιμές μεταξύ 0 και 1. Βάσει των διαγραμμάτων αυτών καθορίστηκαν οι κανόνες λειτουργίας ανά σενάριο. Γνώμονα αποτέλεσε η συναλήθευση της όσο το δυνατόν μεγαλύτερης απόστασης της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος $dist$ και της ελαχιστοποίησης της ενέργειας που χάνεται κατά την υπερχειλίση, $Exath$.

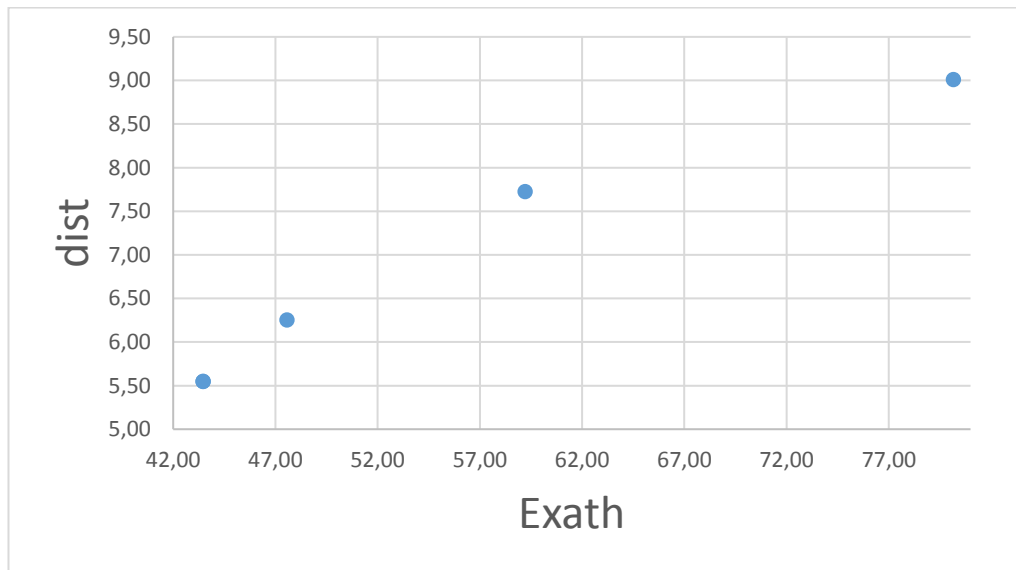
Για το πρώτο σενάριο με αρχική στάθμη 107.5 m προέκυψαν:



Εικόνα 55: Διάγραμμα Pareto σεναρίου 1.

Ο κανόνας λειτουργίας παρατίθενται στον **Πίνακας 4**.

Για το δεύτερο σενάριο με αρχική στάθμη 114 m προέκυψαν:

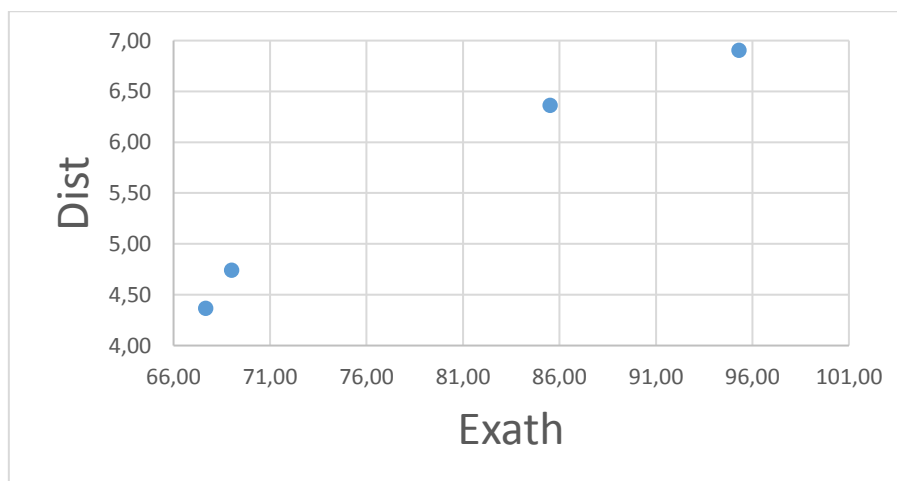


Εικόνα 56: Διάγραμμα Pareto σεναρίου 2

Ο κανόνας λειτουργίας απεικονίζεται στον **Πίνακας 4**.

Ο κανόνας αυτός ορίζεται ως ο τοπικός κανόνας λειτουργίας των θυροφραγμάτων.

Για το τρίτο σενάριο με αρχική στάθμη 118 m προέκυψαν:



Εικόνα 57: Διάγραμμα Pareto σεναρίου 3

Πίνακας 4: Κανόνας λειτουργίας 1^{ου}, 2^{ου} και 3^{ου} σεναρίου

	Lev 1	Lev 2	Lev 3	Lev 4	Lev 5	Lev 6
Σενάριο 1	116.25	116.38	118.54	117.09	110.06	107.50
Σενάριο 2	114.02	119.70	119.74	119.33	117.96	110.65
Σενάριο 3	118.00	122.98	125.97	123.61	122.06	115.33

Για τα προαναφερθέντα βέλτιστα *lev*, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του υδραυλικού μας μοντέλου για τα πλημμυρογραφήματα εισόδου που αντιστοιχούν σε T=5000 και 60000 έτη. Οι τιμές των μεταβλητών *dist* και *E_{xath}* παρατίθενται παρακάτω:

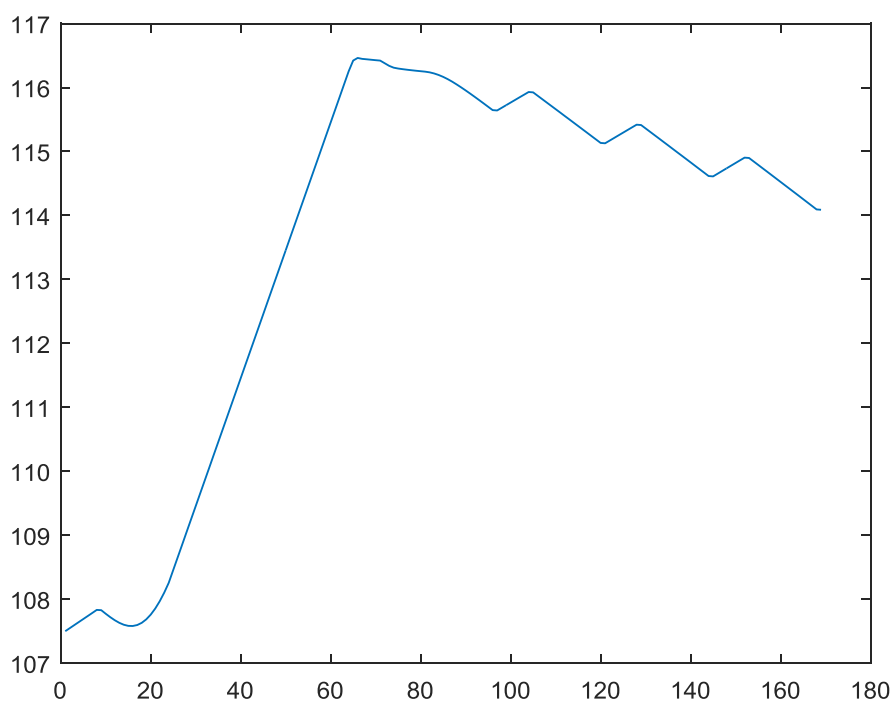
Πίνακας 5: Αποτελέσματα για πλημμυρογράφημα εισόδου T=5000 έτη

	Dist (m)	Exath (GWh)
Σενάριο 1 ^ο	11.54	5.58
Σενάριο 2 ^ο	8.12	51.59
Σενάριο 3 ^ο	4.89	60.82

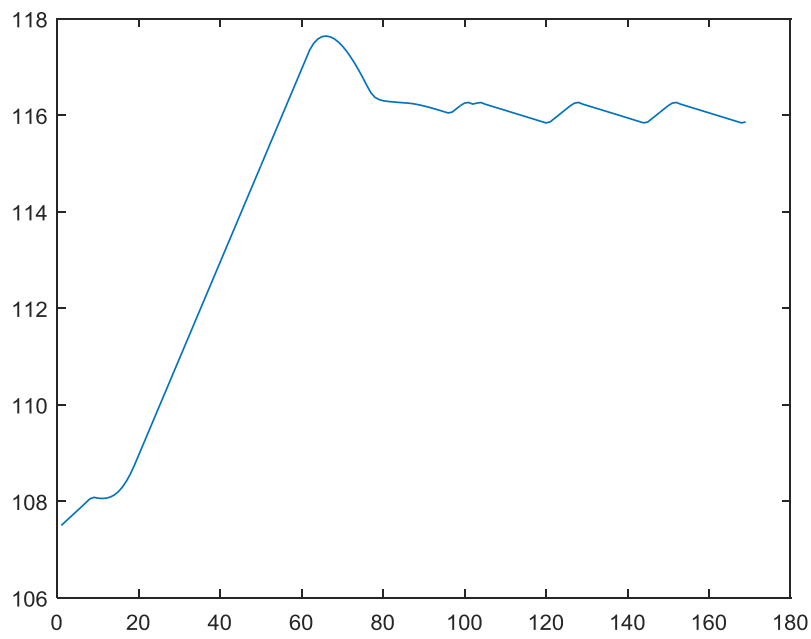
Πίνακας 6: Αποτελέσματα για πλημμυρογράφημα εισόδου T= 60000 έτη

	Dist (m)	Exath (GWh)
Σενάριο 1 ^ο	10.36	22.51
Σενάριο 2 ^ο	6.40	92.35
Σενάριο 3 ^ο	3.16	100.59

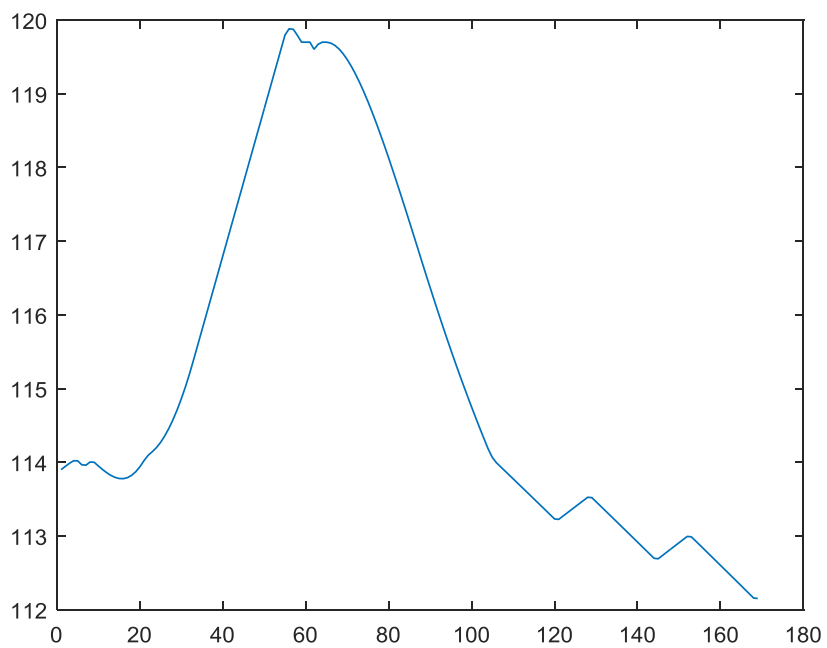
Τα διαγράμματα της στάθμης συναρτήσει του χρόνου παρατίθενται στις **Εικόνες 58, 59, 60, 61, 62 και 63**



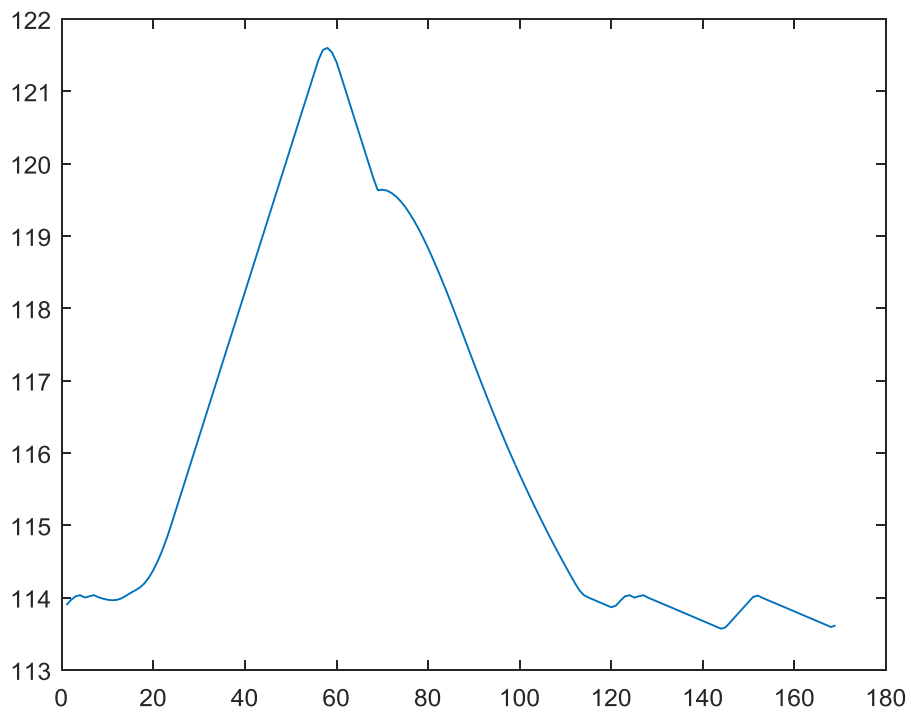
Εικόνα 58: Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 1ου σεναρίου για T=5000



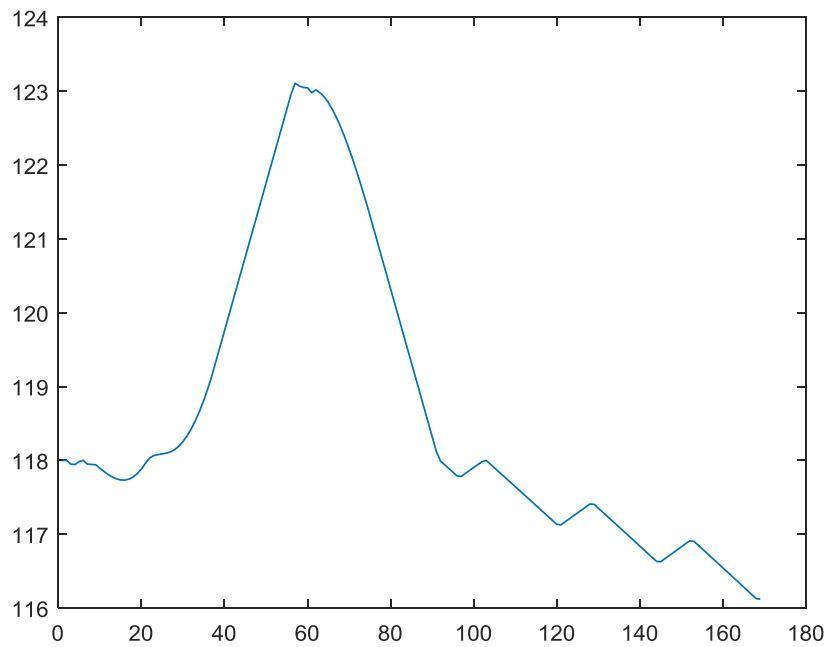
Εικόνα 59: Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 1ου σεναρίου για $T=60000$



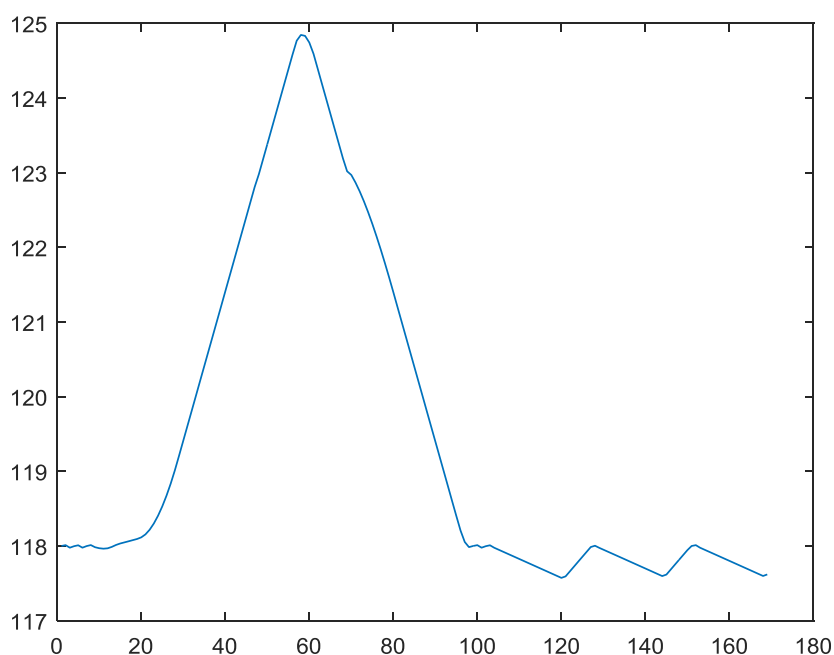
Εικόνα 60: Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 2ου σεναρίου για $T=5000$



Εικόνα 61 : Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 2ου σεναρίου για $T=60000$



Εικόνα 62: Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 3ου σεναρίου για $T=5000$



Εικόνα 63: Διάγραμμα στάθμης - χρόνου 3ου σεναρίου για $T=60000$

Παρατηρήθηκε, όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο, ότι η ασφάλεια του φράγματος μειώνεται και η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχείλισης αυξάνεται, όσο αυξάνεται η περίοδος επαναφοράς του πλημμυρογραφήματος εισόδου.

Είναι προφανές ότι στη περίπτωση συνεχόμενης λειτουργίας των στροβίλων στη μέγιστη τιμή της παροχτευτικότητάς τους $,500 \text{ m}^3/\text{s}$, τα αποτελέσματα θα ήταν ευμενέστερα τόσο ως προς την ασφάλεια του φράγματος και ως προς την ενέργεια που χάνεται. Ωστόσο μια τέτοια λειτουργία των στροβίλων δεν ανταποκρίνεται στα δεδομένα της πραγματικότητας.

Από τους παραπάνω πίνακες **Πίνακας 5** και **Πίνακας 6** γίνεται σαφής η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων ανάλογα με το πλημμυρογράφημα εισόδου. Έτσι κρίθηκε σκόπιμη η παραγωγή πλήθους συνθετικών πλημμυρογραφημάτων (**Κεφάλαιο 9**) με στόχο τη γενίκευση της ισχύος των κανόνων λειτουργίας.

9. Στοχαστικό πλαίσιο βελτιστοποίησης κανόνων λειτουργίας

9.1. Σκοπός

Όπως επαληθεύτηκε στο **Κεφάλαιο 8**, δεν υπάρχει αντιπροσωπευτικό πλημμυρογράφημα που να βρίσκει εφαρμογή σε οποιαδήποτε πλημμύρα για αυτό και κρίνεται σκόπιμη η αναζήτηση κανόνων λειτουργίας που να ανταποκρίνονται σε ένα ευρύ φάσμα πλημμυρικών επεισοδίων. Δεδομένου ότι συνήθως δεν διαθέτουμε τον κατάλληλο όγκο δεδομένων, μονόδρομο αποτελεί η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών που είναι στατιστικά συνεπείς με τη δίαιτα των πλημμυρικών φαινομένων της περιοχής μελέτης (Koutsoyiannis, 2020).

Στη προκειμένη περίπτωση, τα διαθέσιμα δεδομένα αντιστοιχούν σε ημερήσια κλίμακα, οπότε και κρίνεται αναγκαία η παραγωγή συνθετικών ωριαίων πλημμυρογραφημάτων με κατάλληλο στοχαστικό μοντέλο.

Συνοπτικά η μεθοδολογία που εφαρμόζουμε περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Ανάλυση ημερήσιας χρονοσειράς εισροών στον ταμιευτήρα.

Βήμα 2: Εφαρμογή μεθοδολογίας για τον καταβιβασμό της πληροφορίας (διασπορά παροχών) από την ημερήσια στην ωριαία κλίμακα.

Βήμα 3: Κατάστρωση και εφαρμογή στοχαστικού μοντέλου παραγωγής συνθετικών εισροών στην ωριαία κλίμακα μήκους 1000 ετών.

Βήμα 4: Εξαγωγή μέγιστων επεισοδίων κάθε έτους και διαχωρισμός του σε δύο κλάσεις (‘μικρά’ και ‘μεγάλα’ επεισόδια), με βάση την περίοδο επαναφοράς.

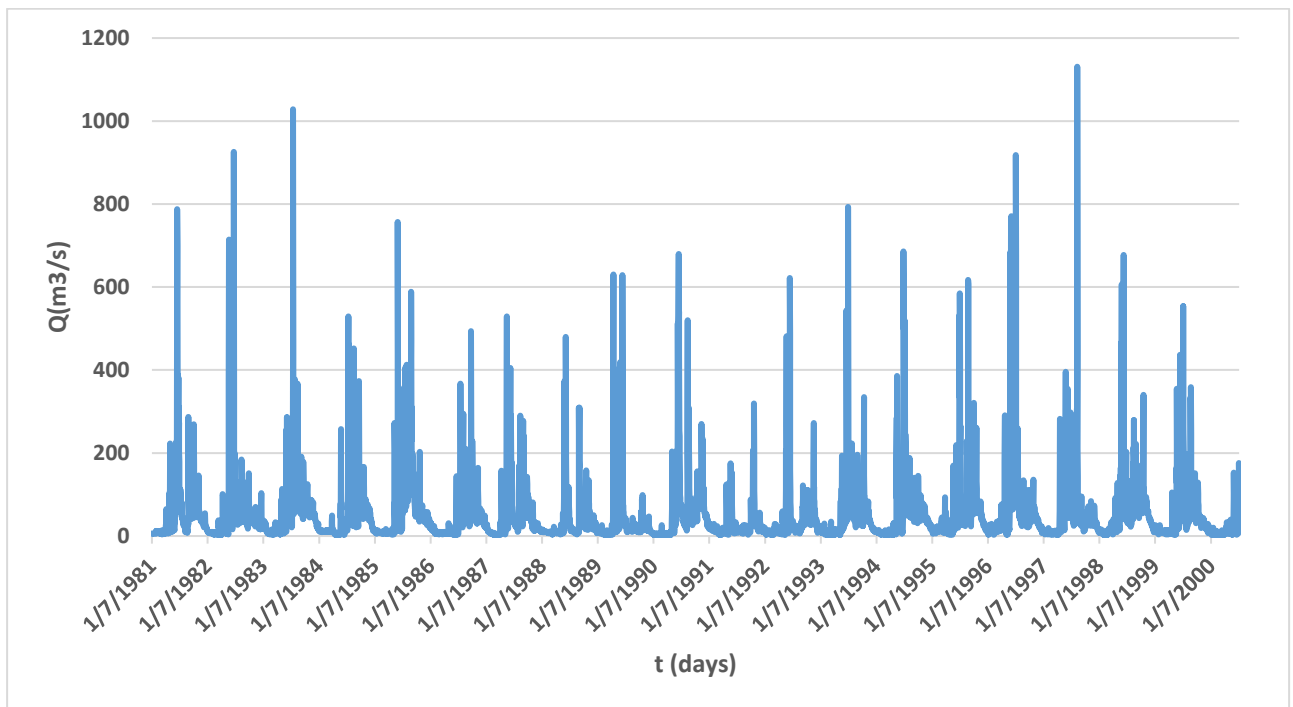
Βήμα 5: Ανάπτυξη καθολικού δείκτη επίδοσης για το σύνολο των πλημμυρογραφημάτων.

Βήμα 6: Βελτιστοποίηση κανόνων λειτουργίας μικρών και μεγάλων πλημμυρών, βάσει του καθολικού δείκτη επίδοσης.

9.2. Ανάλυση ιστορικών δεδομένων εισροών

Ως πρωτογενή δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν οι παροχές εισροής στον ταμιευτήρα, που δίνονται σε ημερήσια κλίμακα από τον Ιούλιο του 1981 μέχρι και τον Δεκέμβριο του 2000 (**Εικόνα 64**), ήτοι 20 έτη. Η χρονοσειρά ανακτήθηκε από τη μελέτη των Κουτσογιάννη κ.ά. (2010), και είχε εξαχθεί από δεδομένα ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου της ΔΕΗ. Υπολογίστηκαν η μέση τιμή

και η τυπική απόκλιση για τον κάθε μήνα των 20 ετών και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακας 7.



Εικόνα 64: Διάγραμμα ημερήσιων εισροών

Πίνακας 7: Στατιστικά χαρακτηριστικά ανά μήνα

Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μήνας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Ιανουάριος	67.84	84.17	Ιούλιος	11.25	5.94
Φεβρουάριος	80.99	99.63	Αύγουστος	8.36	4.66
Μάρτιος	60.78	50.49	Σεπτέμβριος	9.90	8.97
Απρίλιος	61.88	36.74	Οκτώβριος	20.07	41.73
Μάιος	46.05	27.32	Νοέμβριος	64.15	107.51
Ιούνιος	22.08	11.15	Δεκέμβριος	108.54	143.61

9.3. Παραγωγή συνθετικών ωριαίων πλημμυρογραφήματων

Όπως προαναφέρθηκε, τα διαθέσιμα δεδομένα παροχών (εισροής στον ταμιευτήρα) είναι στην ημερήσια κλίμακα, ενώ για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, όπως προαναφέρθηκε απαιτούνται ωριαία συνθετικά πλημμυρογραφήματα. Προκειμένου να καταστεί εφικτή η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών, στην κλίμακα ενδιαφέροντος, απαιτείται, αρχικά, η εκτίμηση των βασικών μεγεθών (συναρτήσεις πιθανότητας και δομές αυτοσυσχέτισης) που απαιτούνται για την εφαρμογή του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης.

Στα πλαίσια της εργασίας, η παραγωγή των συνθετικών ωριαίων παροχών έγινε με εφαρμογή ενός μοντέλου από την οικογένεια στοχαστικών μοντέλων Nataf (Gaussian copula), τα οποία συνδυάζουν κλασσικά γραμμικά Γκαουσιανά στοχαστικά μοντέλα με το από κοινού μοντέλου

πιθανότητας Nataf (Nataf, 1962; Tsoukalas et al., 2017, 2018; Kossieris et al., 2019). Τα εν λόγω στοχαστικά μοντέλα εξασφαλίζουν τη ρητή αναπαραγωγή της δοθείσης περιθώριας συμπεριφοράς (κατανομή πιθανότητας) και στοχαστικής δομής της διεργασίας.

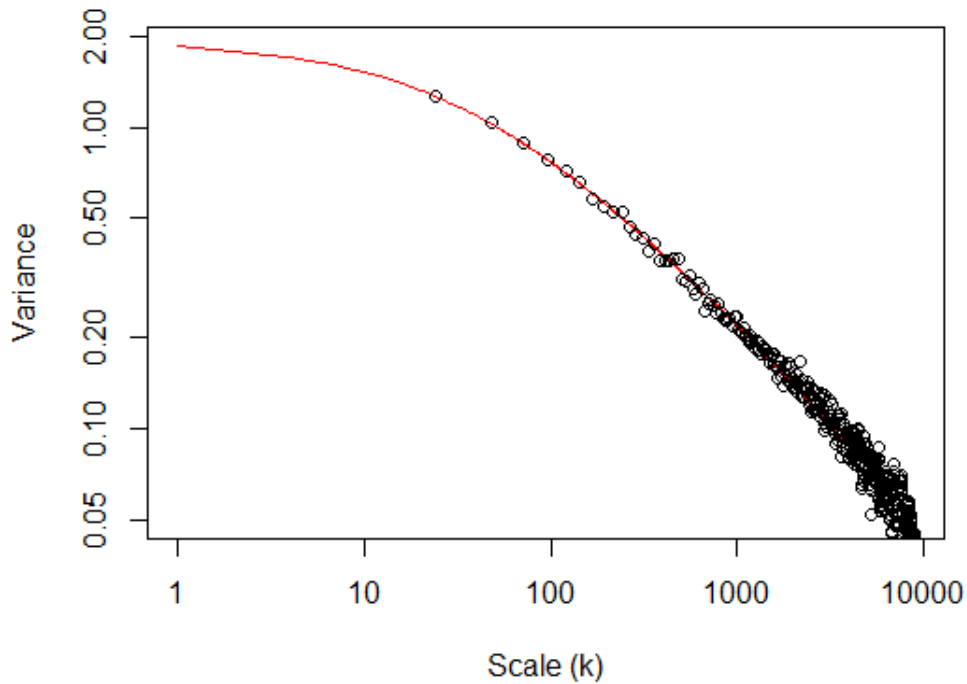
Ως κατανομή πιθανότητας για την περιγραφή της περιθώριας συμπεριφοράς της ωριαίας παροχής χρησιμοποιήθηκε η κατανομή Γάμμα δύο παραμέτρων (με μία παράμετρο κλίμακας α και μια παράμετρο σχήματος γ) η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στη μοντελοποίηση υδρο-μετεωρολογικών διεργασιών. Η προσαρμογή της κατανομής αυτής και η εκτίμηση των δύο αυτών παραμέτρων (με τη μέθοδο των ροπών), γίνεται επί της βάσης των δύο πρώτων ροπών, δηλαδή της μέσης τιμής και της διασποράς του δείγματος. Η μέση τιμή των ωριαίων παροχών προκύπτει άμεσα από τη γνωστή μέση τιμή των διαθέσιμων ημερήσιων δεδομένων, δεδομένου ότι η μέση τιμή είναι γραμμική συνάρτηση της κλίμακας συνάθροισης. Ωστόσο αυτό δεν ισχύει για τη διασπορά, η οποία και εκτιμήθηκε μέσω μιας πρωτότυπης μεθοδολογίας καταβιβασμό της πληροφορίας προς τις μικρότερες χρονικές κλίμακες, δεδομένων των διαθέσιμων εκτιμήσεων της διασποράς στις υψηλότερες κλίμακες (Kossieris, 2020).

Αρχικά, με σκοπό την ανάπτυξη ενός φειδωλού (στάσιμου) μοντέλου, επιχειρήθηκε η εξάλειψη της περιοδικότητας διενεργώντας μια ανά μήνα τυποποίηση της ημερήσιας χρονοσειράς, δηλαδή, το κάθε στοιχείο X των ημερήσιων χρονοσειρών διαιρέθηκε με τη μέση τιμή του αντίστοιχου μήνα όπως δίνεται στον **Πίνακα 7**. Εν συνεχεία, εκτιμήθηκε η διασπορά της τυποποιημένης σειράς για τις κλίμακες συνάθροισης από $k=24$ (ημερήσια κλίμακα) μέχρι $k=8928$ (ετήσια κλίμακα) συνθέτοντας με αυτό τον τρόπο το εμπειρικό κλιμακόγραμμα (Koutsoyiannis, 2010, 2017) της σειράς. Η εκτίμηση της διασποράς στην ωριαία χρονική κλίμακα ($k=1$) γίνεται προσαρμόζοντας ένα φειδωλό θεωρητικό μοντέλο αυτοσυσχέτισης τύπου Cauchy (Koutsoyiannis, 2000), ελαχιστοποιώντας το σφάλμα μεταξύ των θεωρητικών και δειγματικών διασπορών στις χρονικές κλίμακες που οι τελευταίες είναι γνωστές. Το θεωρητικό μοντέλο αυτοσυσχέτισης τύπου Cauchy (Koutsoyiannis, 2000) δίνεται ως εξής:

$$\rho_{\tau}^{CAS}(\kappa, \beta) = (1 + \kappa\beta\tau)^{\left(-\frac{1}{\beta}\right)}, \tau \geq 0$$

Όπου $\beta \geq 0$ και $\kappa > 0$ παράμετροι του μοντέλου που ελέγχουν τη μορφή της συνάρτησης και συνεπώς το βαθμό εξάρτησης.

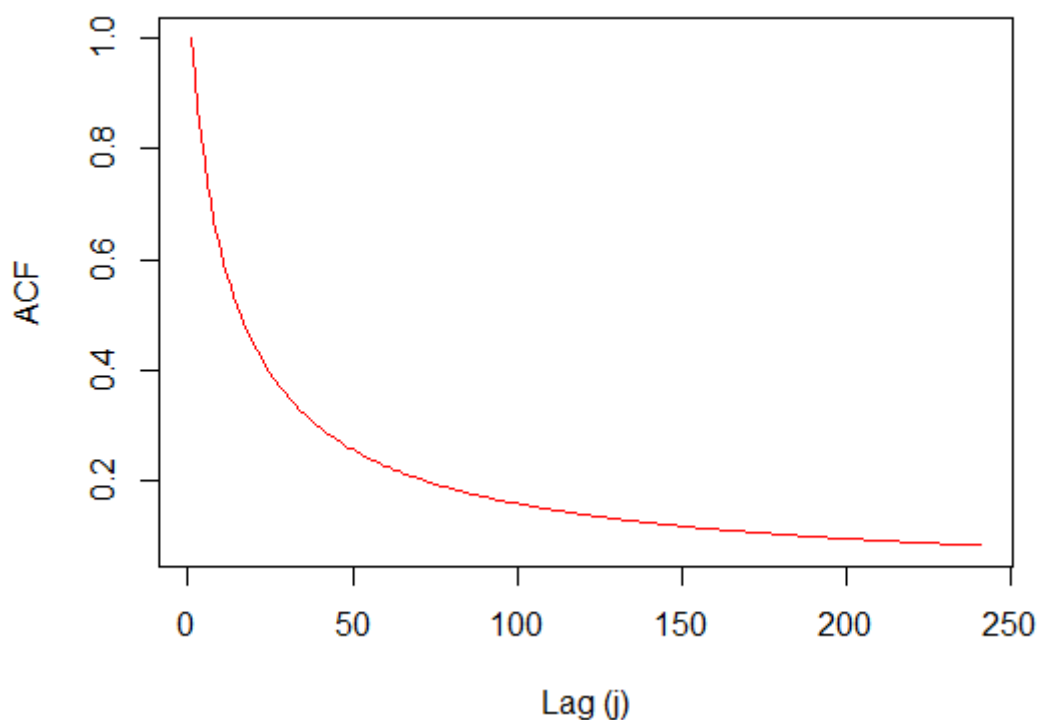
Οι βέλτιστες παράμετροι που βρέθηκαν είναι ίσες με $\beta=1.26$ και $\kappa=0.074$, ενώ η διασπορά στην ωριαία κλίμακα εκτιμήθηκε ίση με $Var^{(1)} = 1.85$. Στην **Εικόνα 65** παρουσιάζεται η προσαρμογή του θεωρητικού κλιμακογράμματος στα εμπειρικά δεδομένα.



Εικόνα 65: Θεωρητικό και δειγματικό κλιμακόγραμμα, για τις κλίμακες από $k=1$ (ωριαία κλίμακα) μέχρι $k=8928$ (ετήσια κλίμακα)

Με γνωστές τη μέση τιμή και τη διασπορά στην ωριαία κλίμακα, προκύπτουν με τη μέθοδο των ροπών οι τιμές των παραμέτρων της κατανομής Γάμμα, ίσες με $\alpha = 1.85$ και $\gamma = 0.54$.

Ταυτόχρονα, από το κλιμακόγραμμα προκύπτουν οι τιμές των συντελεστών αυτοσυσχέτισης, οι οποίες και παρουσιάζονται στην **Εικόνα 66**.

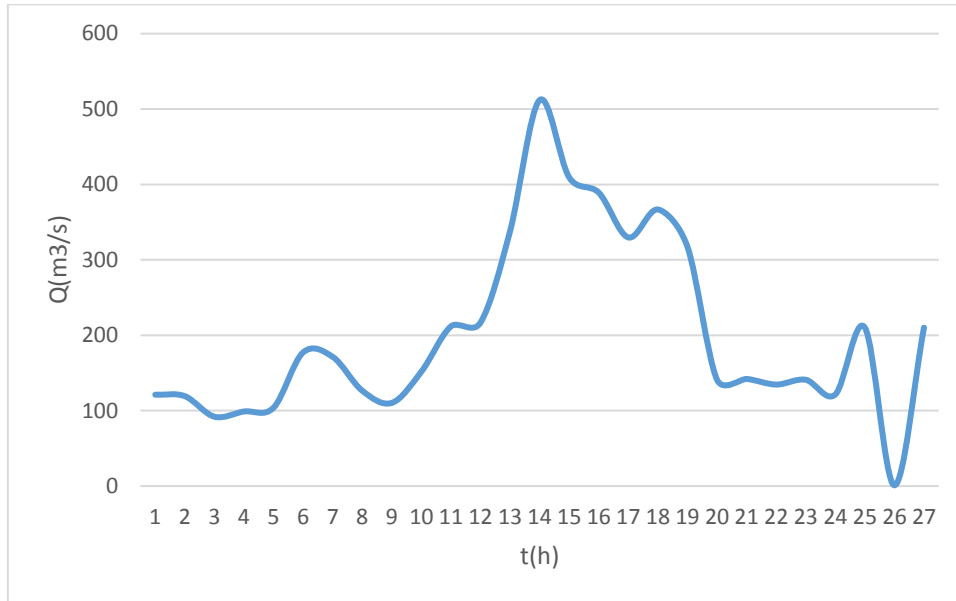


Εικόνα 66: Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης

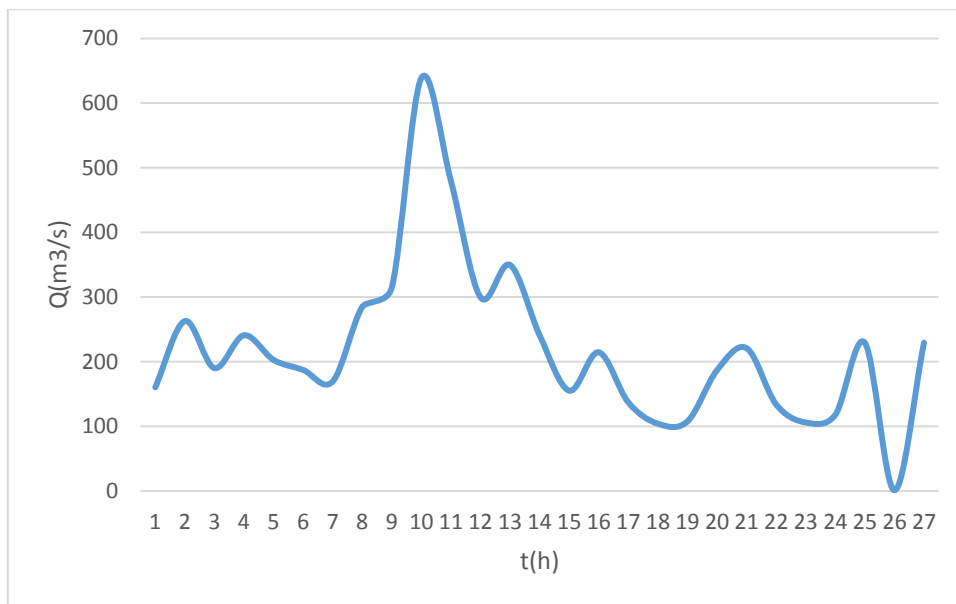
Για τη παραπάνω κατανομή Γάμμα και δομή αυτοσυσχέτισης, έγινε προσαρμογή ενός στάσιμου μοντέλου Nataf και παρήχθησαν συνθετικές ωριαίες χρονοσειρές με μήκος $24 \times 365 \times 10^3$ με τη βοήθεια του πακέτου AnySim (Tsoukalas et al., 2020), σε περιβάλλον R. Στη συνέχεια έγινε από-τυποποίηση των συνθετικών ωριαίων χρονοσειρών πολλαπλασιάζοντας κάθε τιμή με τη μέση τιμή του αντίστοιχου μήνα.

Τέλος, επιλέχθησαν 1000 ωριαίες σειρές με μήκος 24 ωρών, που αντιστοιχούν σε 1000 ημερήσια επεισόδια ωριαίου βήματος. Η επιλογή έγινε με βάση την ανάλυση ετήσιων μεγίστων της ημερήσιας κλίμακας και τα επεισόδια διακρίθηκαν σε μικρών και μεγάλων περιόδων επαναφοράς, 1-5 και 5-10000 έτη, αντίστοιχα.

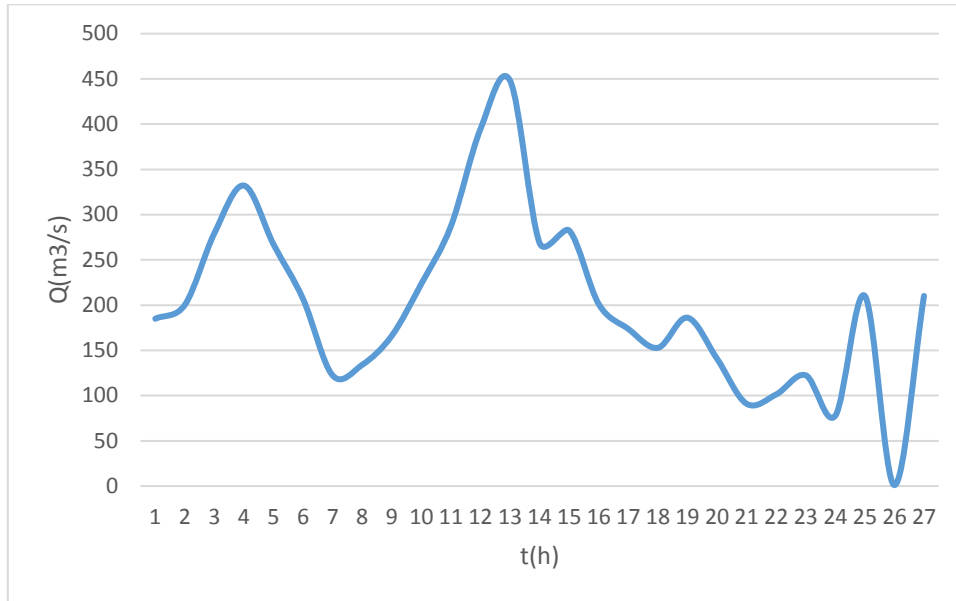
Ορισμένα χαρακτηριστικά επεισόδια για περίοδο επαναφοράς από 1 έως 5 έτη απεικονίζονται στις **Εικόνες 67, 68, 69, 70**, ενώ για περίοδο επαναφοράς από 5 έως 1000 στις **Εικόνες 71, 72, 73 και 74**.



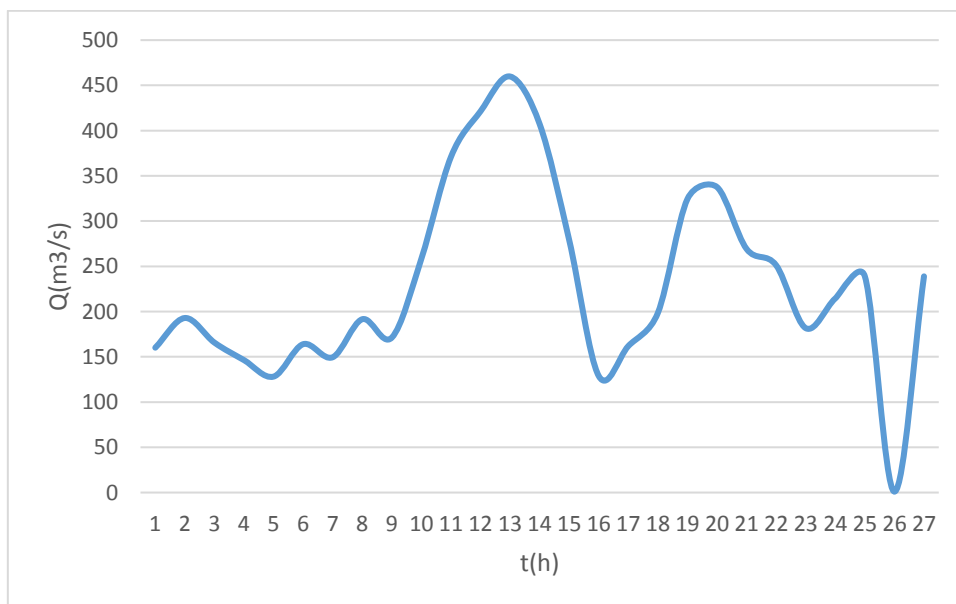
Εικόνα 67: Πλημμυρογράφημα εισόδου με αιχμή στη μέση του πλημμυρικού επεισοδίου



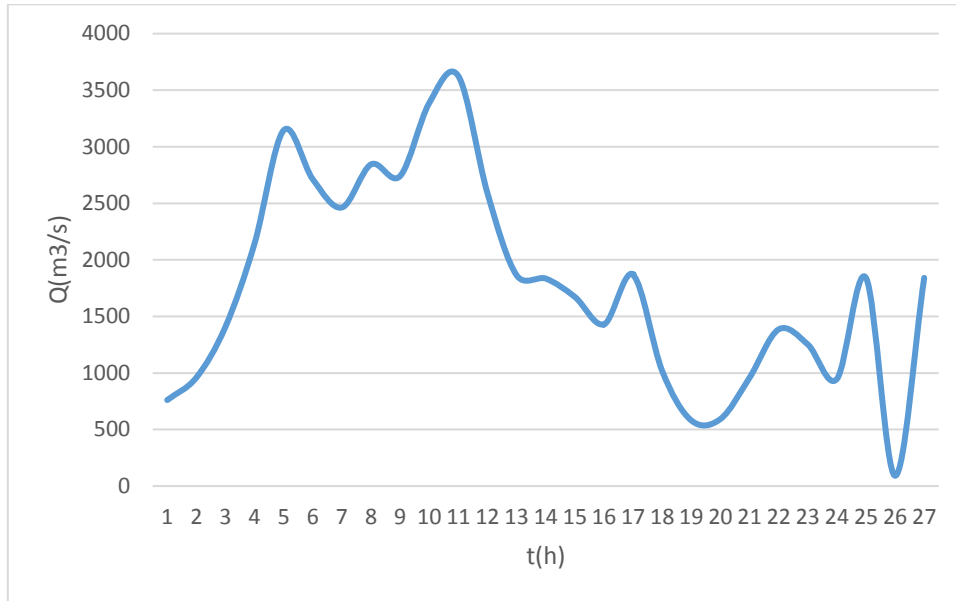
Εικόνα 68: Πλημμυρογράφημα εισόδου με αιχμή στην αρχή του πλημμυρικού επεισοδίου



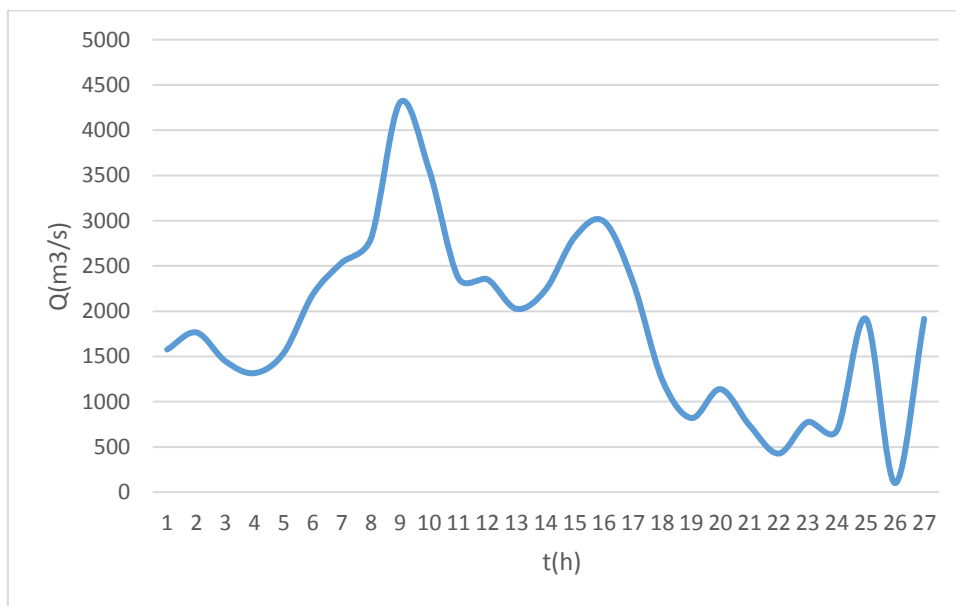
Εικόνα 69: Πλημμυρογράφημα εισόδου με διπλή αιχμή στην αρχή του επεισοδίου



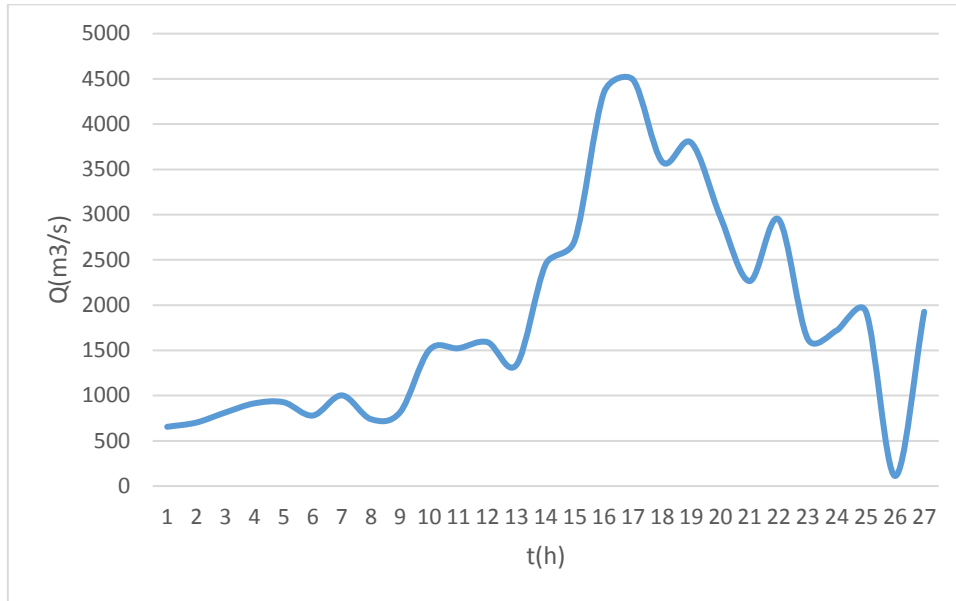
Εικόνα 70: Πλημμυρογράφημα εισόδου με διπλή αιχμή στη μέση του επεισοδίου



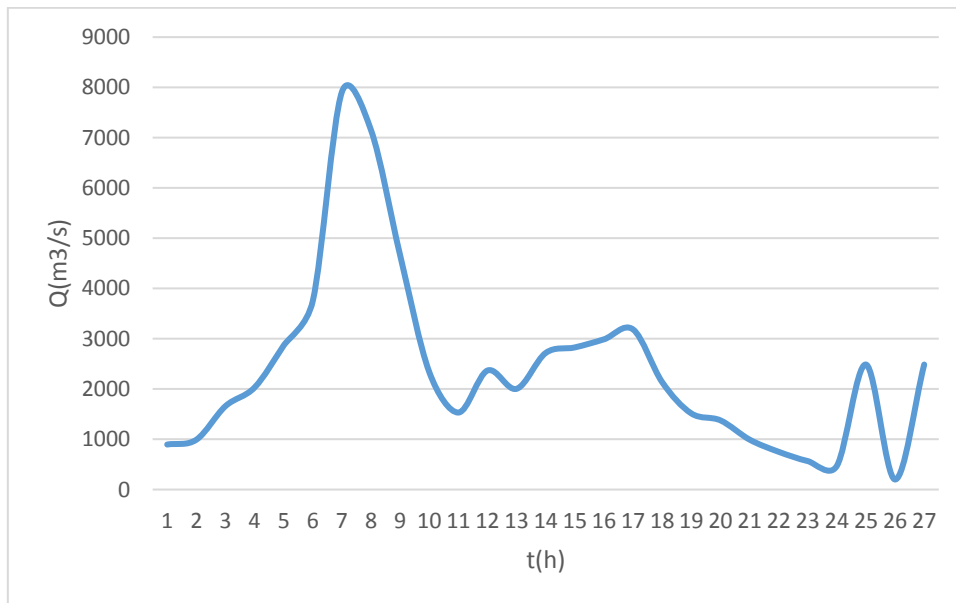
Εικόνα 71: Πλημμυρογράφημα εισόδου με διπλή αιχμή στην αρχή του επεισοδίου



Εικόνα 72: Πλημμυρογράφημα εισόδου με διπλή αιχμή στη μέση του επεισοδίου



Εικόνα 73: Πλημμυρογράφημα εισόδου με αιχμή στη μέση του επεισοδίου



Εικόνα 74: Πλημμυρογράφημα εισόδου με διπλή αιχμή στην αρχή του επεισοδίου

9.4. Βελτιστοποίηση λειτουργίας θυροφραγμάτων

Ο κώδικας που παρουσιάστηκε προηγουμένως τροποποιήθηκε ώστε να προσομοιώνονται πολλά πλημμυρογραφήματα εισόδου. Η διάρκεια της κάθε προσομοίωσης τέθηκε ίση με 48 ώρες, χρονικό διάστημα στο οποίο θεωρούμε ότι εξελίσσεται στο μεγαλύτερο μέρος του το φαινόμενο της διόδευσης και, σε κάθε περίπτωση, έχει ολοκληρωθεί ο χειρισμός των θυροφραγμάτων. Τις πρώτες 24 ώρες θεωρήθηκε ως είσοδος το αντίστοιχο συνθετικό πλημμυρογράφημα, ενώ το δεύτερο 24ωρο θεωρήσαμε σταθερή μια βασική ροή ίση με τη μικρότερη μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας τιμής του συνθετικού πλημμυρογραφήματος.

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, στο τέλος κάθε επεισοδίου υπολογίζονται τα αντίστοιχα κριτήρια επίδοσης (ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης και ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα μέχρι τη στέψη του φράγματος). Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης όλων των επεισοδίων, υπολογίζεται το ολικό μέτρο επίδοσης, ως η μέση τιμή των επιμέρους κριτηρίων που προέκυψε από το σύνολο των πλημμυρικών επεισοδίων, για κάθε μια από τις δύο κλάσεις. Το μέτρο αυτό χρησιμοποιήθηκε ως στοχική συνάρτηση στα αντίστοιχα προβλήματα βελτιστοποίησης.

Διατυπώθηκαν διάφορες εκδοχές του προβλήματος, προκειμένου να εξαχθούν γενικοί κανόνες λειτουργίας που αντιστοιχούν σε διαφορετικά βάρη κριτηρίων και διαφορετικές τιμές αρχικής στάθμης. Ειδικότερα, εξετάσαμε δύο συνδυασμούς κριτηρίων, ήτοι το συντηρητικό με βάρη 95%-5% και το κανονικό 80%-20%. Υπενθυμίζεται ότι οι συντελεστές βάρους 95% και 80% αντιστοιχούν στο κριτήριο της ασφαλείας(*dist*), ενώ οι 5% και 20% στο κριτήριο της ενέργειας που χάνεται λόγω υπερχειλίσης (E_{xath}).

Όσον αφορά στην αρχική στάθμη, θεωρήσαμε τρεις πιθανές καταστάσεις και συγκεκριμένα έναρξη πλημμύρας στα +114 m (ευνοϊκό σενάριο), +116 m (κανονικό σενάριο) και +118 m (δυσμενές σενάριο). Για τα δύο πρώτα σενάρια θεωρήσαμε ως μέγιστη στάθμη ανοίγματος των θυροφραγμάτων τα +118 m όπως προβλέπει η ΔΕΗ για λόγους ασφαλείας (**Κεφάλαιο 5**). Ωστόσο κρίθηκε σκόπιμο να εξετάσουμε και το δυσμενές σενάριο, για το οποίο θεωρήσαμε μέγιστο επιτρεπόμενο άνοιγμα των θυροφραγμάτων στη στάθμη των +120 m, που αποτελεί και την άνω παρειά των θυροφραγμάτων.

Όπως προαναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 8**, ο κανόνας λειτουργίας που προκύπτει για το συντηρητικό συνδυασμό βαρών και το ευμενές σενάριο αρχικής στάθμης ταμειυτήρα στη περίπτωση πλημμυρικού επεισοδίου περιόδου επαναφοράς $T=10000$ έτη ονομάζεται τοπικός κανόνας λειτουργίας των θυροφραγμάτων (**Πίνακας 5**).

Στο επόμενο κεφάλαιο, συνοψίζονται και σχολιάζονται τα βασικά αποτελέσματα του κάθε σεναρίου.

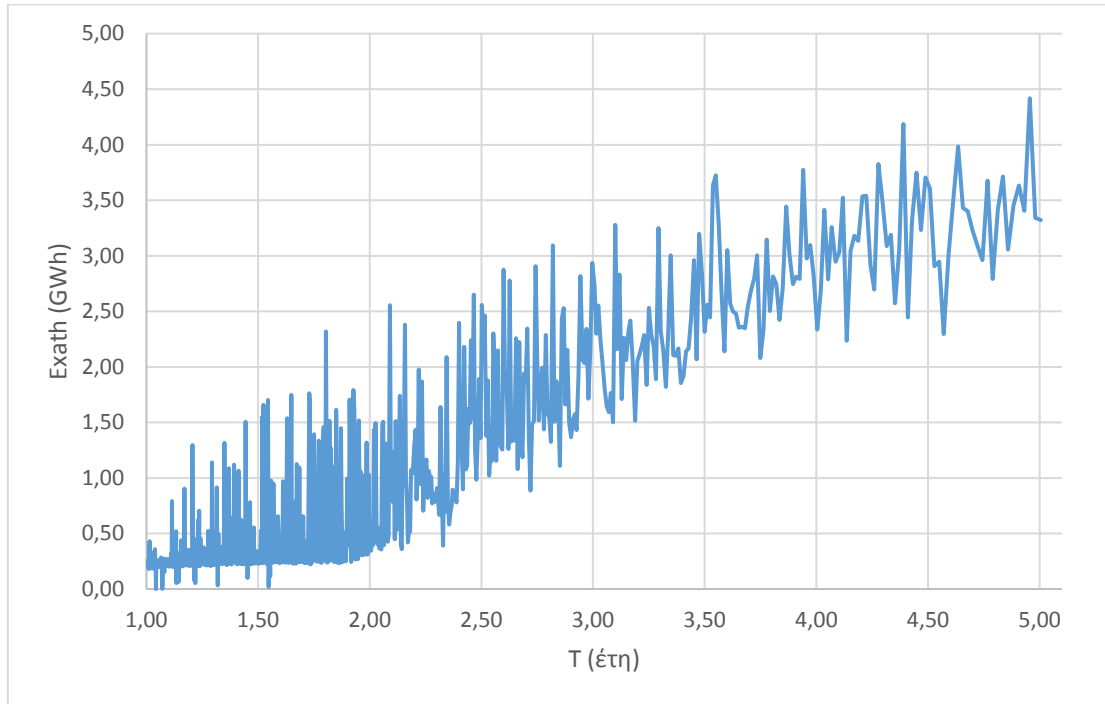
10. Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, εφαρμόζεται αρχικά ο τοπικός κανόνας που προσδιορίστηκε από τη πολυκριτηριακή ανάλυση του **Κεφάλαιο 8**, προκειμένου να ελεγχθεί η συμπεριφορά του έναντι όλων των συνθετικών πλημμυρογραφημάτων που αναφέρονται σε μικρότερου μεγέθους πλημμύρες, συγκριτικά με την πλημμύρα αναφοράς $T=10000$ έτη βάσει της οποίας έγινε η βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών τιμών της στάθμης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βελτιστοποιημένων κανόνων για τα μικρά και μεγάλα πλημμυρικά επεισόδια που παρήχθησαν μέσω της στοχαστικής προσέγγισης. Τέλος, γίνεται εφαρμογή του πλέον πρόσφορου ολικού κανόνα λειτουργίας στο πραγματικό επεισόδιο του 2005 και η επίδοσή του αντιπαραβάλλεται με τη διαχειριστική πολιτική που εφάρμοσε η ΔΕΗ εκείνη την ημέρα.

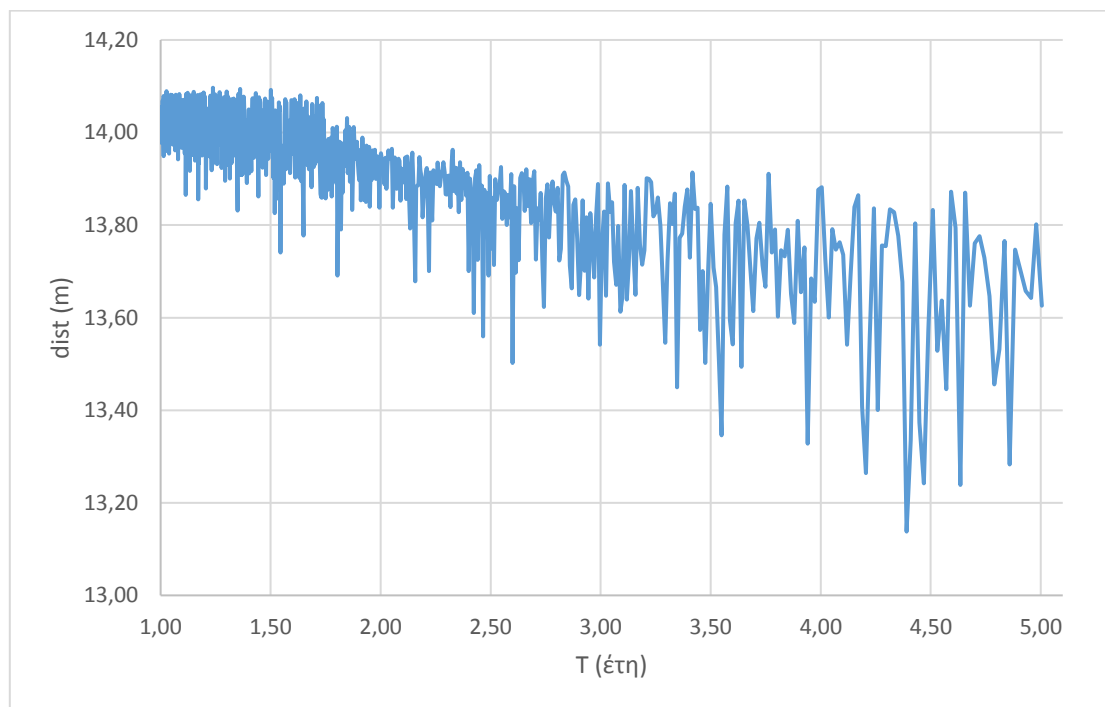
10.1. Έλεγχος τοπικού κανόνα λειτουργίας

Η προσομοίωση για κάθε ομάδα συνθετικών πλημμυρικών επεισοδίων έγινε βάσει του τοπικού κανόνα ο οποίος προέκυψε από την ανάλυση των διαγραμμάτων Pareto. Συγκεκριμένα εξετάστηκε το ευνοϊκό σενάριο αρχικής στάθμης +114 m και η βαρύτητα που δόθηκε στα κριτήρια βελτιστοποίησης ήταν σύμφωνη με το συντηρητικό συνδυασμό, ήτοι 95% ως προς την ασφάλεια και 5% ως προς την ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης.

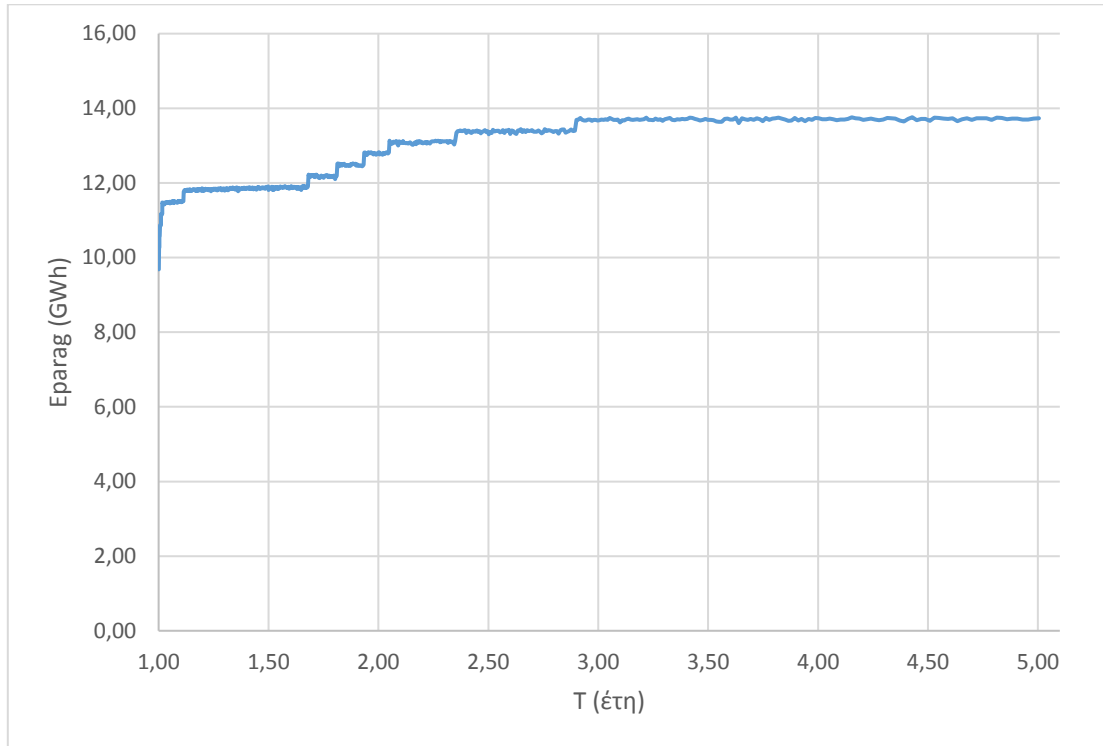
Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης, η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος και η παραγόμενη ενέργεια που αντιστοιχούν στα μικρά επεισόδια απεικονίζονται παρακάτω στις : **Εικόνα 75**, **Εικόνα 76**, και **Εικόνα 77**, ενώ των μεγάλων επεισοδίων στις : **Εικόνα 78**, **Εικόνα 79** και **Εικόνα 80**.



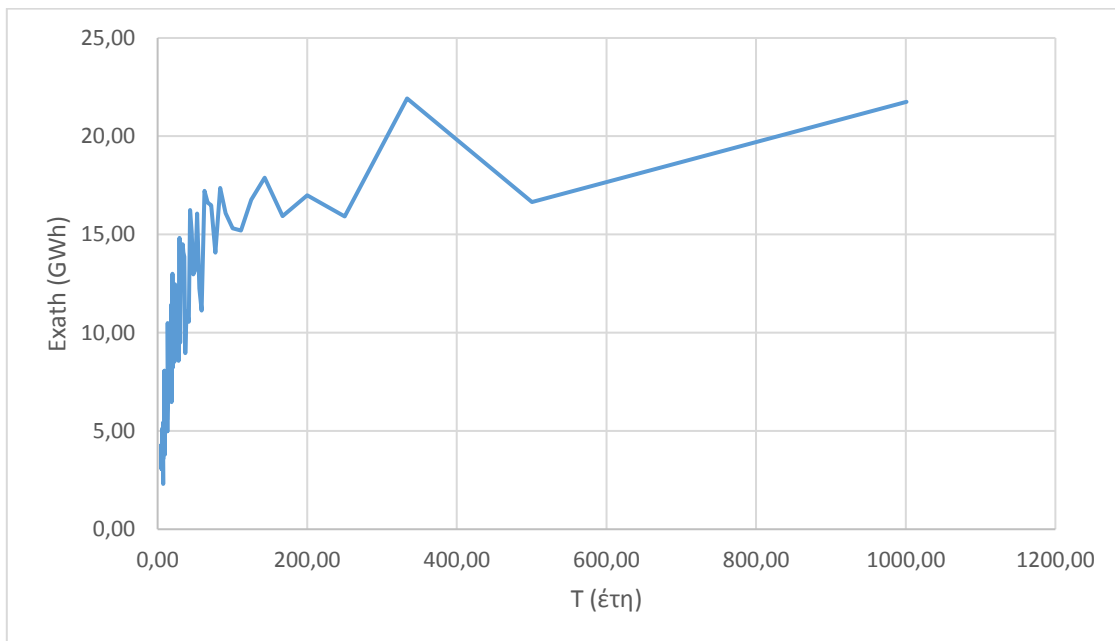
Εικόνα 75: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχείλισης για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη



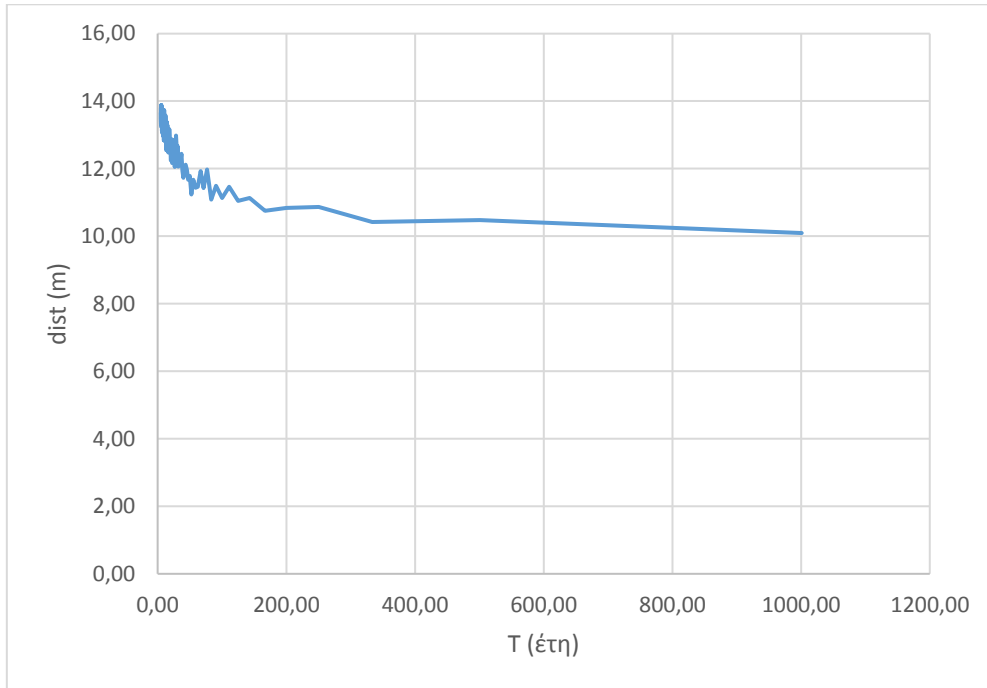
Εικόνα 76: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη



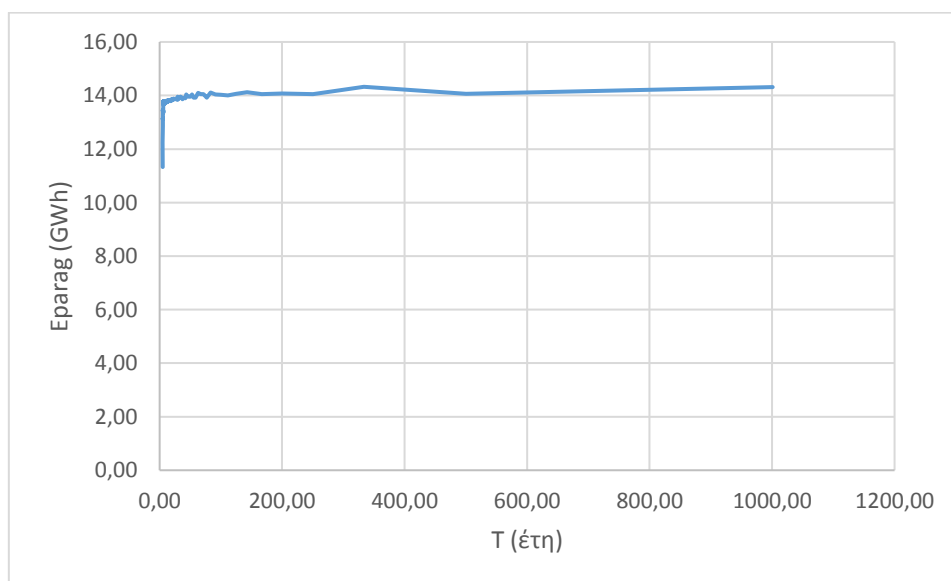
Εικόνα 77: Η ενέργεια που παράγεται για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη



Εικόνα 78: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη



Εικόνα 79: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέγη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη



Εικόνα 80: Η ενέργεια που παράγεται για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη

10.2. Βελτιστοποίηση λειτουργίας θυροφραγμάτων με χρήση συνθετικών πλημμυρογραφημάτων

10.2.1. Συντηρητικό σενάριο με αρχική στάθμη $z=114$ m

Από την βελτιστοποίηση των πλημμυρογραφημάτων με περίοδο αναφοράς από 1 έως 5 έτη προέκυψε ο ολικός κανόνας μικρών επεισοδίων (Πίνακας 8), ενώ από εκείνη των πλημμυρογραφημάτων με περίοδο επαναφοράς από 5 έως 1000 έτη προέκυψε ο ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων (Πίνακας 9).

Πίνακας 8: Ολικός κανόνας λειτουργίας μικρών επεισοδίων

Lev 1	113.90
Lev 2	114.17
Lev 3	121.24
Lev 4	113.83
Lev 5	113.08
Lev 6	109.34

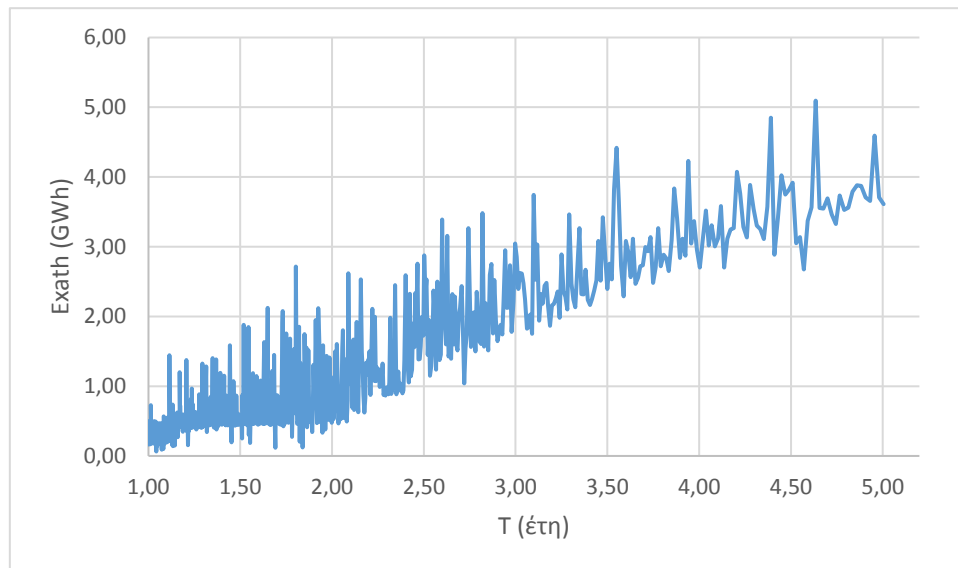
Πίνακας 9: Ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων

Lev 1	113.94
Lev 2	113.94
Lev 3	113.94
Lev 4	107.50
Lev 5	107.50
Lev 6	107.50

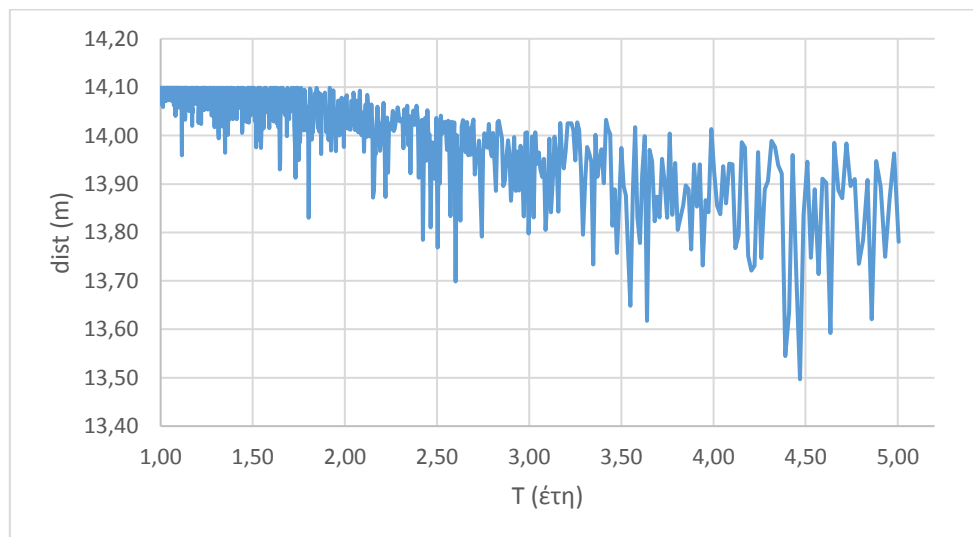
Έπειτα από τη βελτιστοποίηση προέκυψαν τα γραφήματα της ενέργειας που χάθηκε λόγω υπερχειλίσης και της ελάχιστης απόστασης της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του

φράγματος καθώς και το γράφημα της παραγόμενης ενέργειας. Τα γραφήματα που αντιστοιχούν στα μεγέθη των μικρών επεισοδίων απεικονίζονται στις : **Εικόνα 81**,

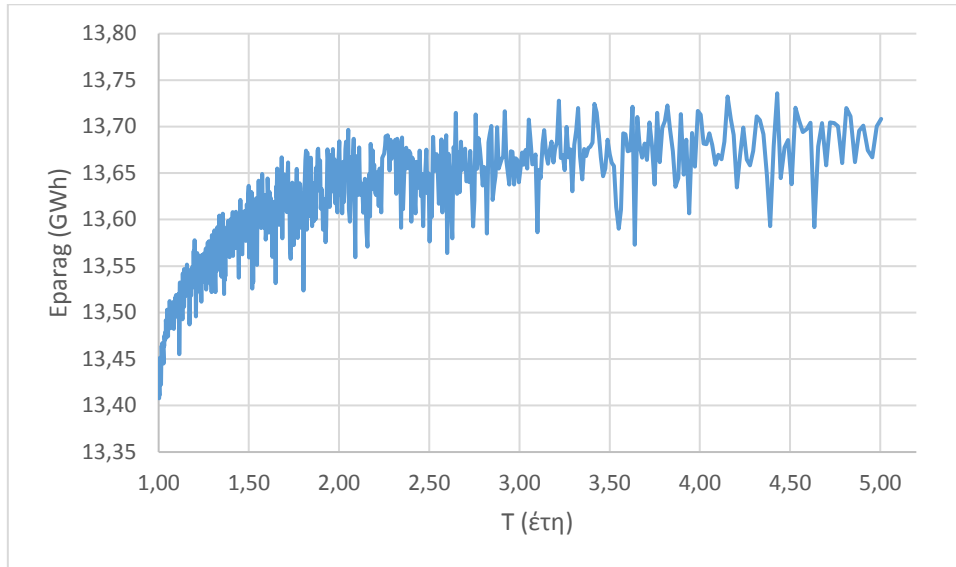
Εικόνα 82 και **Εικόνα 83** ενώ εκείνα των μεγάλων στις : **Εικόνα 84**, **Εικόνα 85** και **Εικόνα 86**.



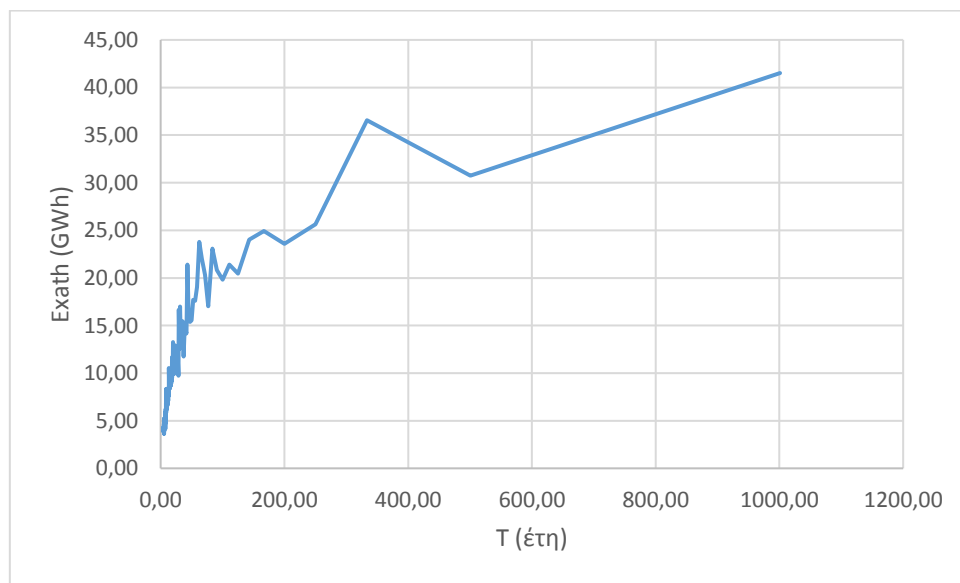
Εικόνα 81: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



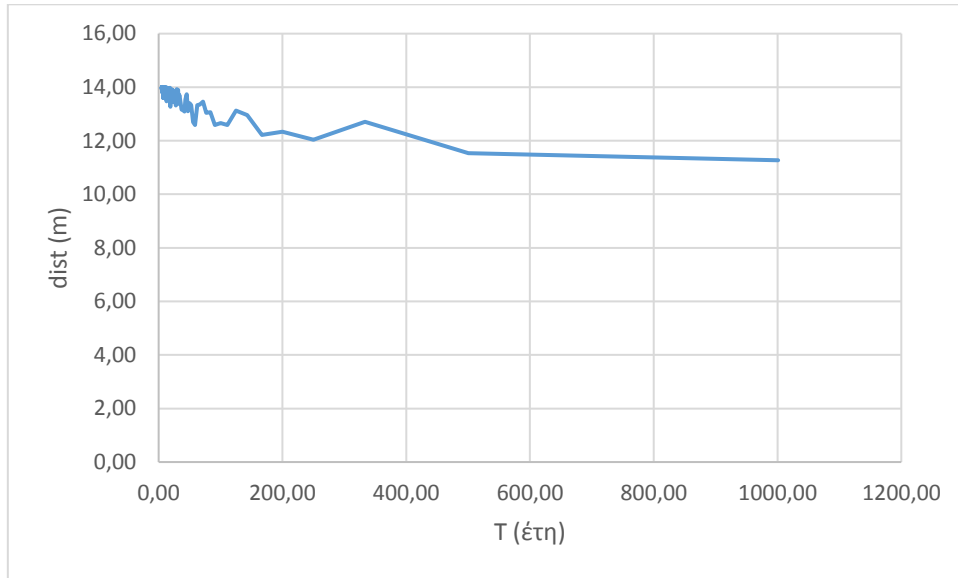
Εικόνα 82: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



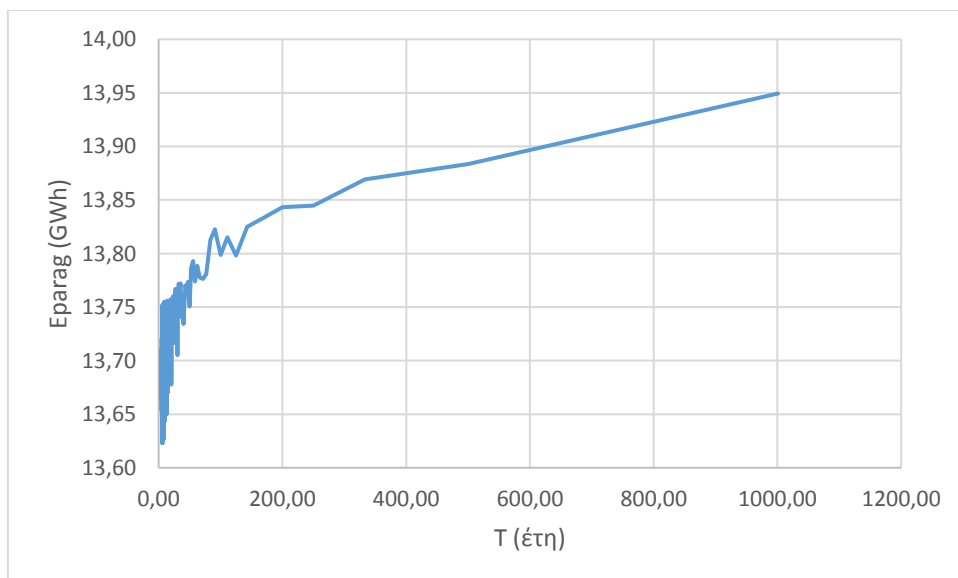
Εικόνα 83: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



Εικόνα 84: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης

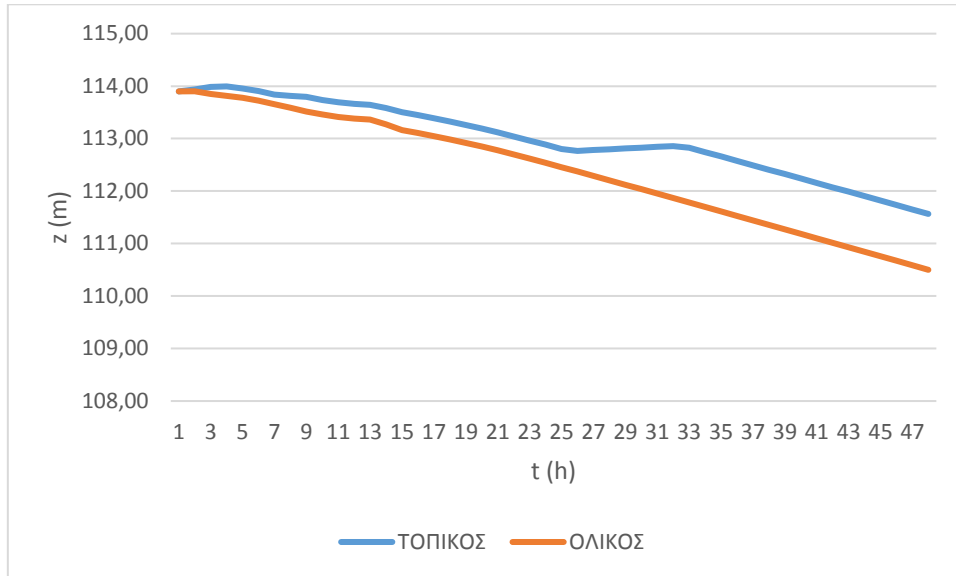


Εικόνα 85: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέγη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης

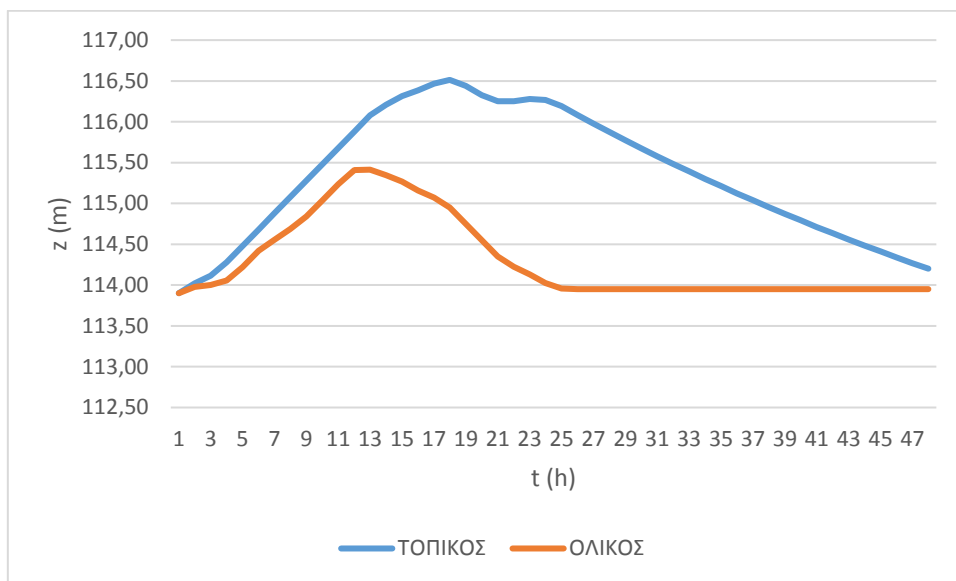


Εικόνα 86: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης

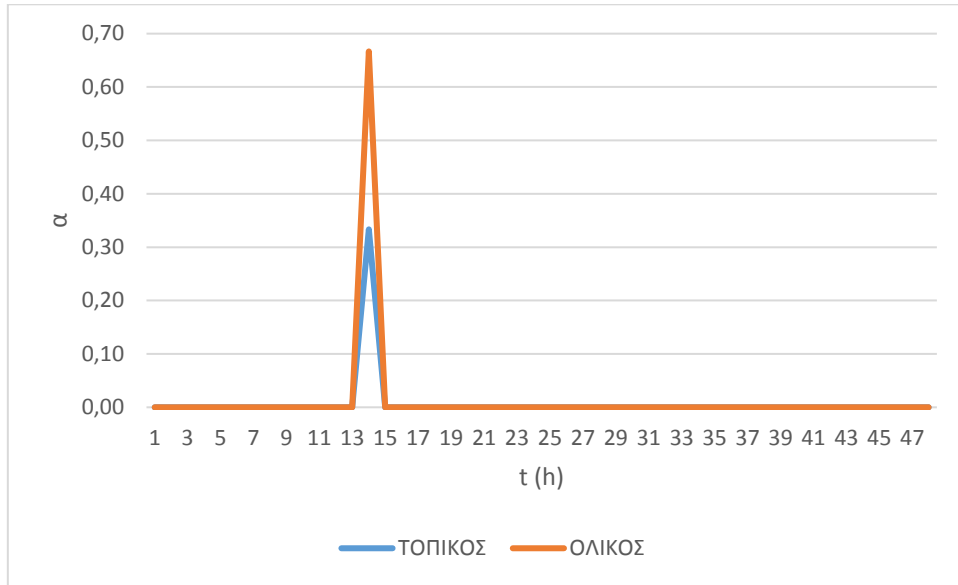
Τέλος, αξιοσημείωτη είναι σε αυτό το σημείο η παράθεση των χρονοσειρών (**Εικόνα 87**, **Εικόνα 88**, **Εικόνα 89**, **Εικόνα 90**, **Εικόνα 91** και **Εικόνα 92**), ενδεικτικών πλημμυρικών επεισοδίων, του συντελεστή υπερχείλισης α , της εκροής του υπερχειλιστή και της στάθμης τόσο βάσει του τοπικού όσο και του ολικού κανόνα λειτουργίας.



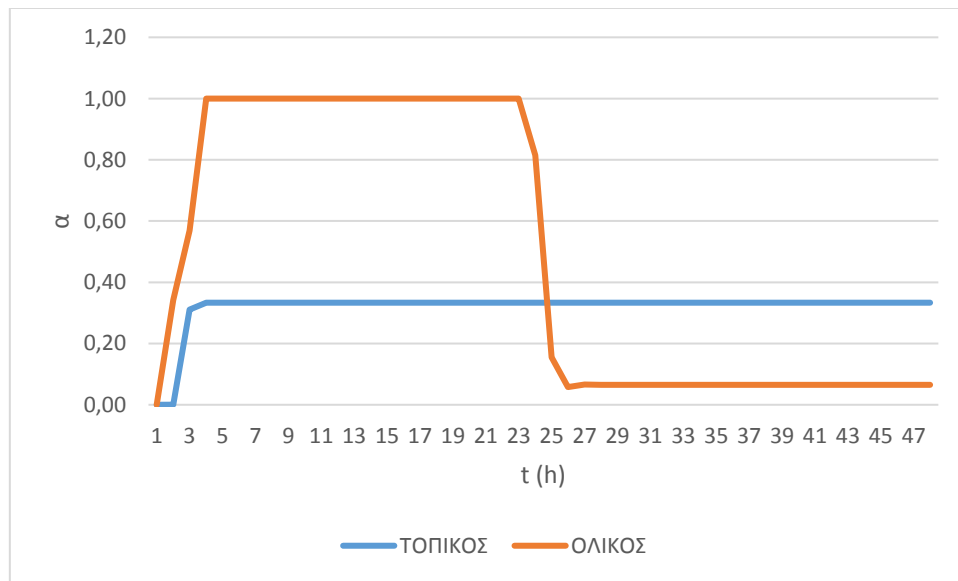
Εικόνα 87: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=1.01 έτη



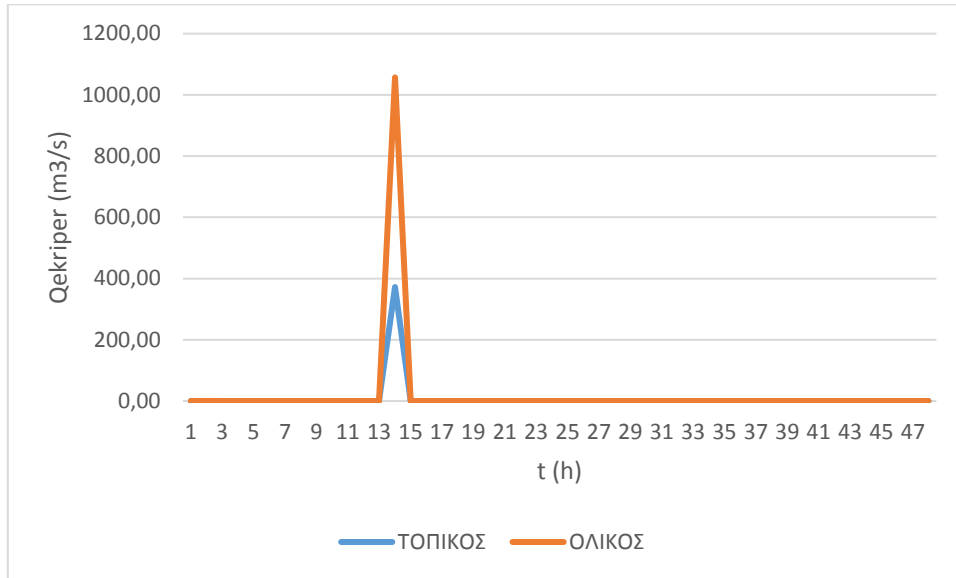
Εικόνα 88: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=90 έτη



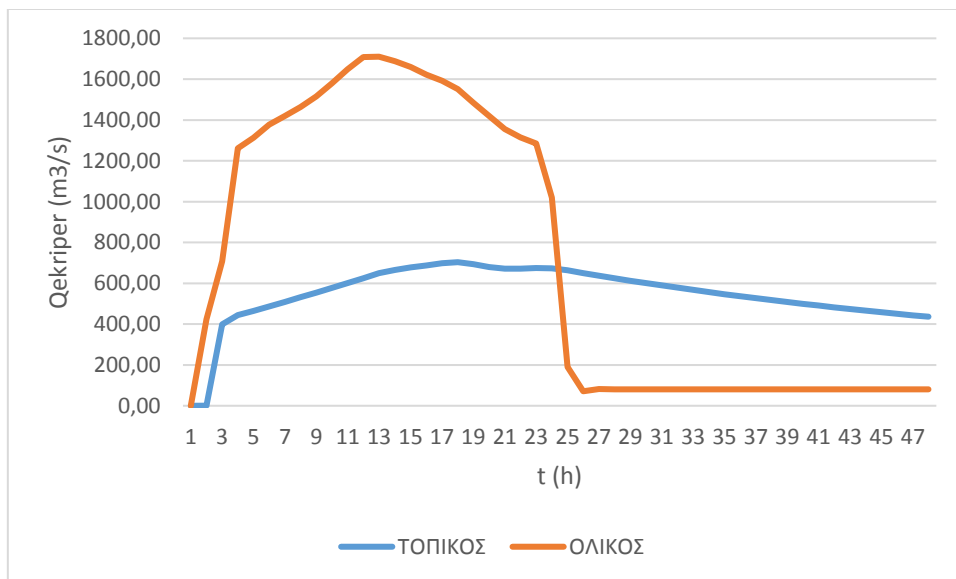
Εικόνα 89 : Χρονοσειρά συντελεστή υπερχείλισης α για την πλημμύρα $T=1.01$ έτη



Εικόνα 90: Χρονοσειρά συντελεστή υπερχείλισης α για την πλημμύρα $T=90$ έτη



Εικόνα 91: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για πλημμύρα T=1.01 έτη



Εικόνα 92: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για πλημμύρα T=90 έτη

10.2.2. Κανονικό σενάριο με αρχική στάθμη z=114 m

Στη συνέχεια εξετάστηκε η συμπεριφορά του τοπικού κανόνα λειτουργίας (Error! Reference source not found.) στη περίπτωση που δοθεί περίπου τριπλάσια βαρύτητα στην ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης, για την ίδια αρχική στάθμη των +114 m.

Από την υπερβελτιστοποίηση των πλημμυρογραφημάτων με περίοδο αναφοράς από 1 έως 5 έτη προέκυψε ο ολικός κανόνας μικρών επεισοδίων **Πίνακας 10** ενώ από εκείνη των πλημμυρογραφημάτων με περίοδο επαναφοράς από 5 έως 1000 έτη προέκυψε ο ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων **Πίνακας 11**.

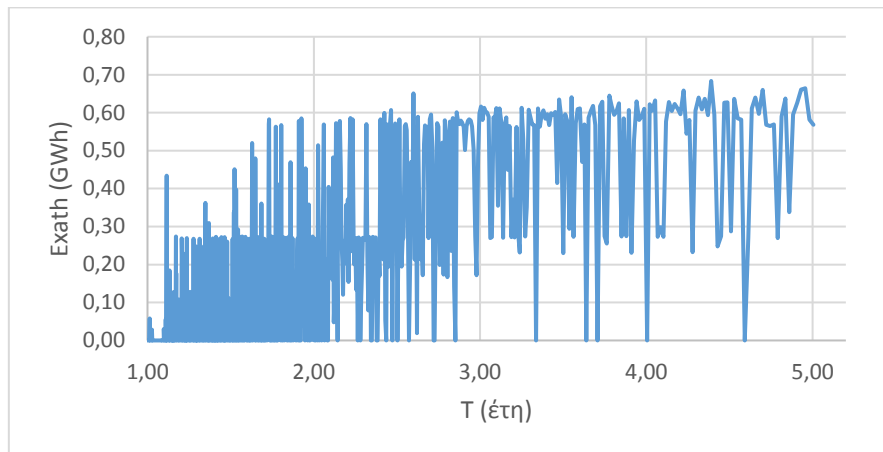
Πίνακας 10: Ολικός κανόνας λειτουργίας μικρών επεισοδίων

Lev 1	115.74
Lev 2	116.38
Lev 3	116.88
Lev 4	116.20
Lev 5	114.35
Lev 6	114.15

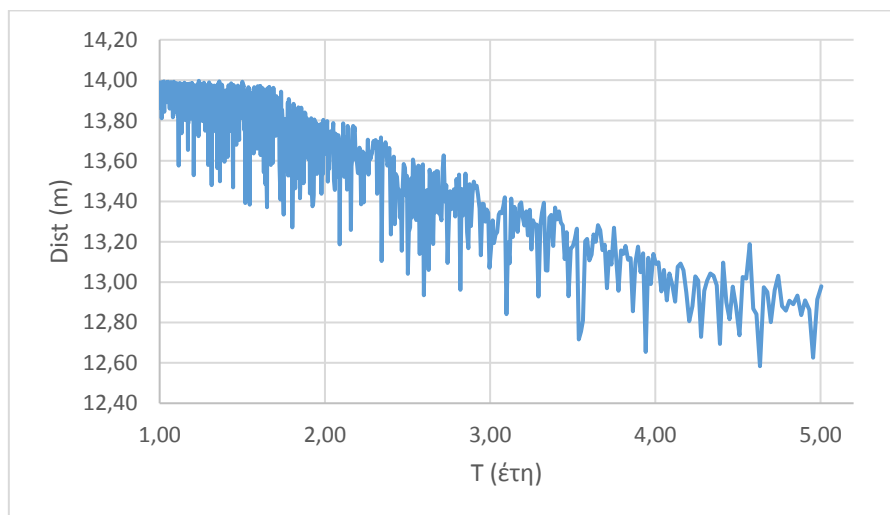
Πίνακας 11: Ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων

Lev 1	117.46
Lev 2	118.42
Lev 3	118.49
Lev 4	117.93
Lev 5	117.93
Lev 6	117.80

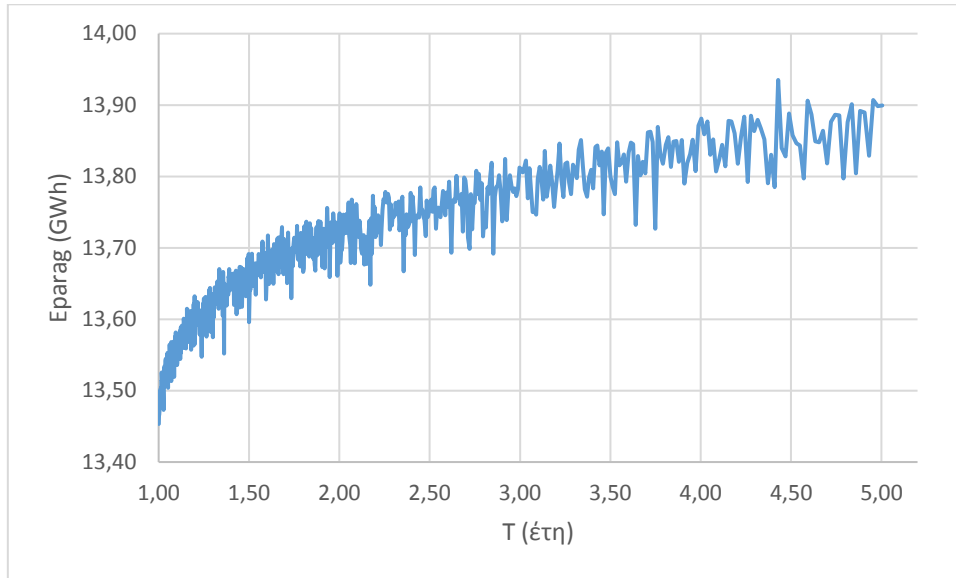
Έπειτα από τη βελτιστοποίηση προέκυψαν τα γραφήματα της ενέργειας που χάθηκε λόγω υπερχειλίσσης και της ελάχιστης απόστασης της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος καθώς και το γράφημα της παραγόμενης ενέργειας. Τα γραφήματα που αντιστοιχούν στα μεγέθη των μικρών επεισοδίων απεικονίζονται στις : **Εικόνα 93**, **Εικόνα 94** και **Εικόνα 95** ενώ εκείνα των μεγάλων στις : **Εικόνα 96**, **Εικόνα 97** και **Εικόνα 98**.



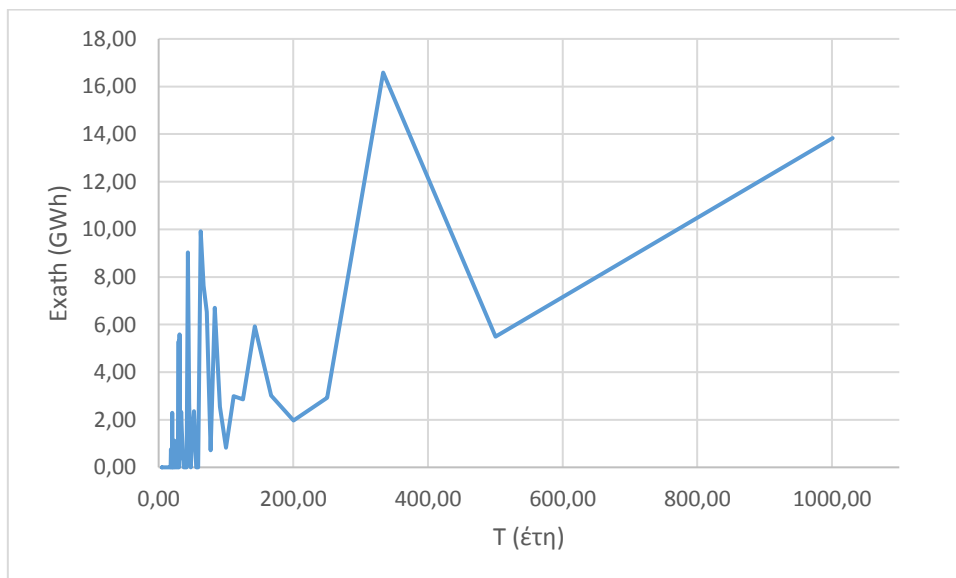
Εικόνα 93: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσσης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



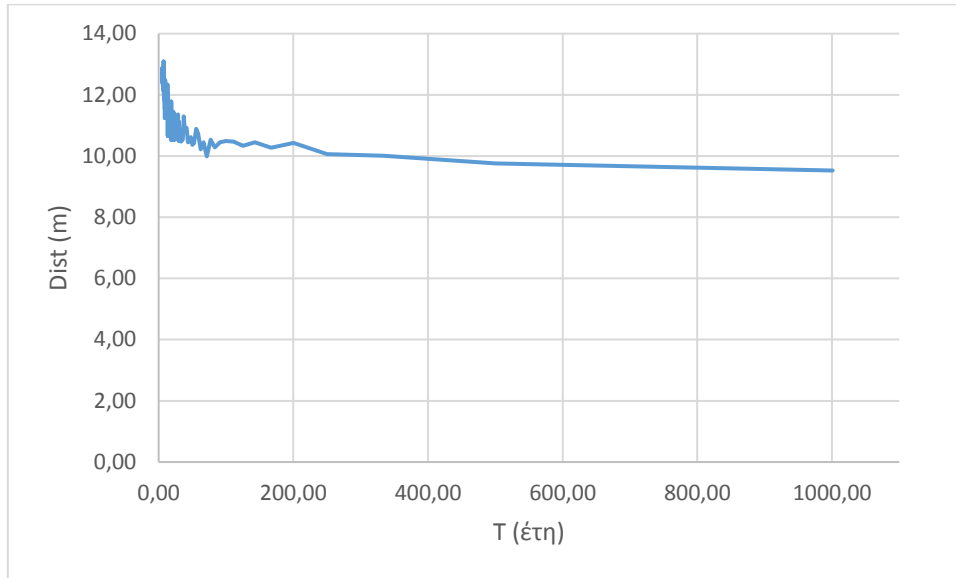
Εικόνα 94: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



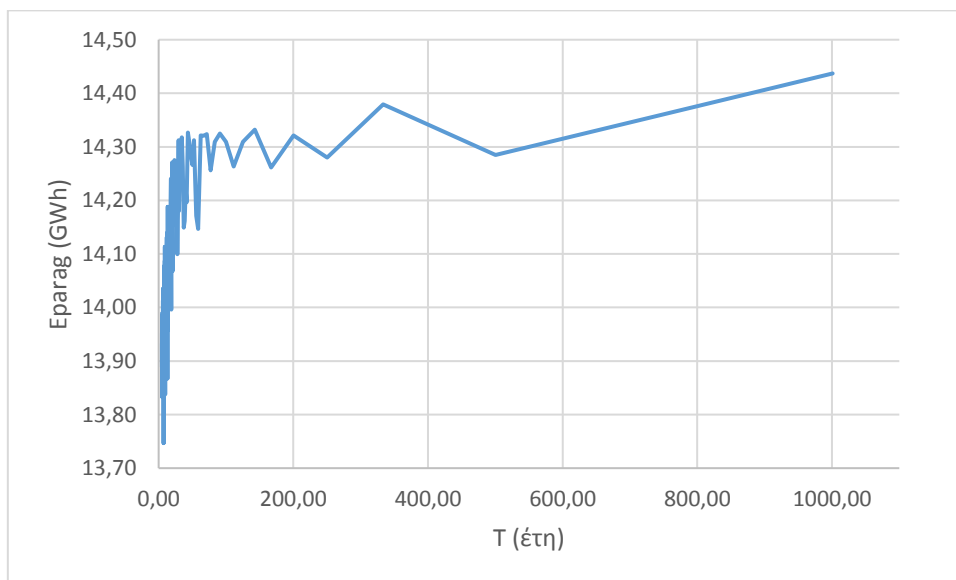
Εικόνα 95: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



Εικόνα 96: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχείλισης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης

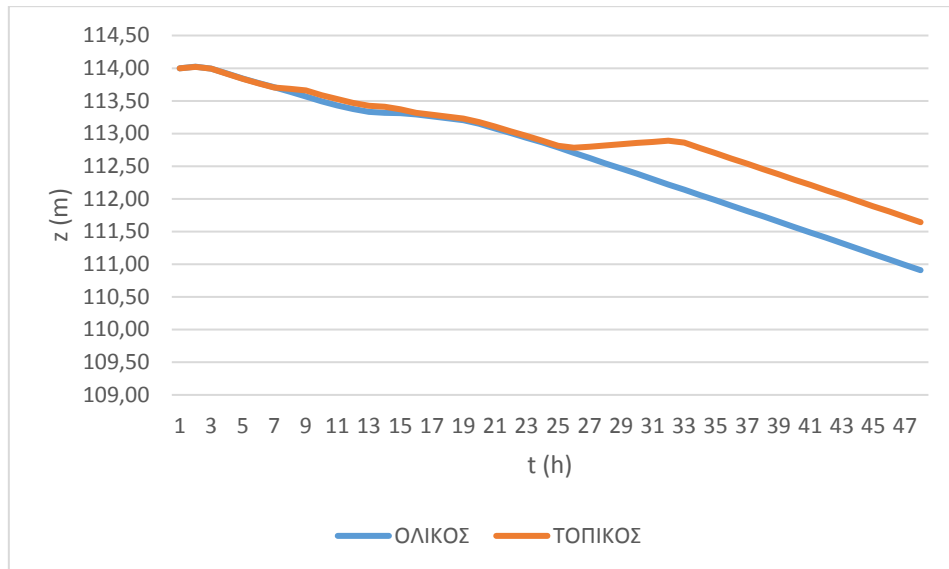


Εικόνα 97: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης

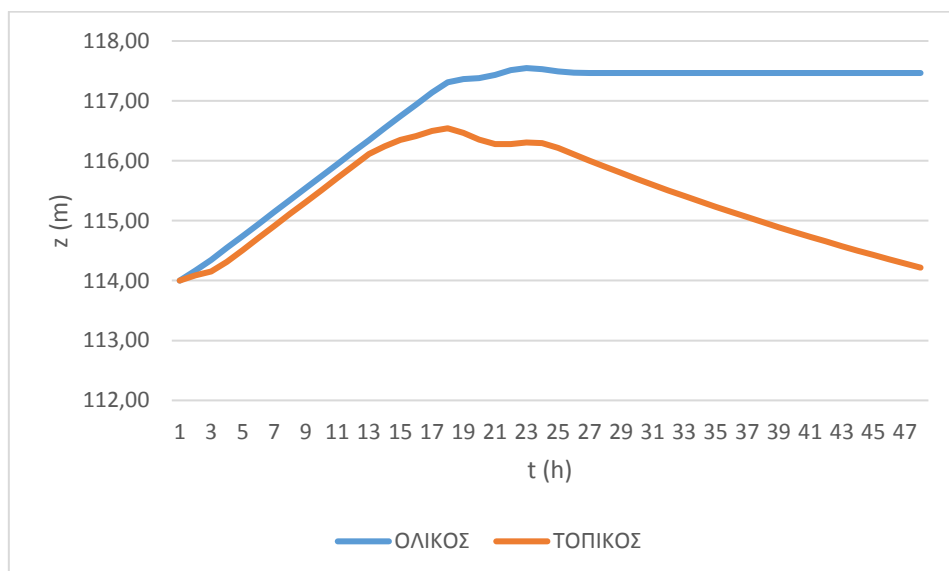


Εικόνα 98: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης

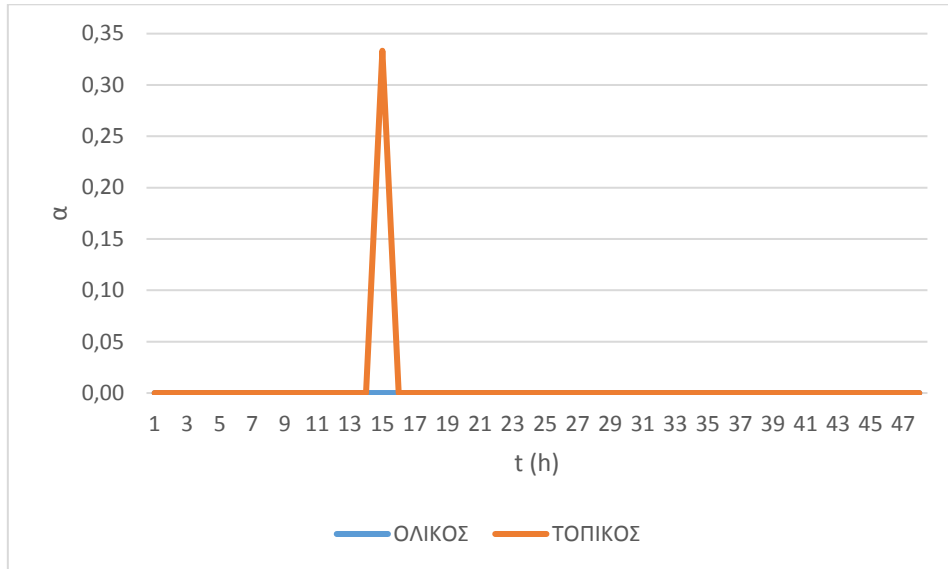
Τέλος, αξιοσημείωτη είναι σε αυτό το σημείο η παράθεση των χρονοσειρών (**Εικόνα 99**, **Εικόνα 100**, **Εικόνα 101**, **Εικόνα 102**, **Εικόνα 103** και **Εικόνα 104**), ενδεικτικών πλημμυρικών επεισοδίων, του συντελεστή υπερχείλισης α , της εκροής του υπερχειλιστή *Qekriper* και της στάθμης z τόσο βάσει του τοπικού όσο και του ολικού κανόνα λειτουργίας.



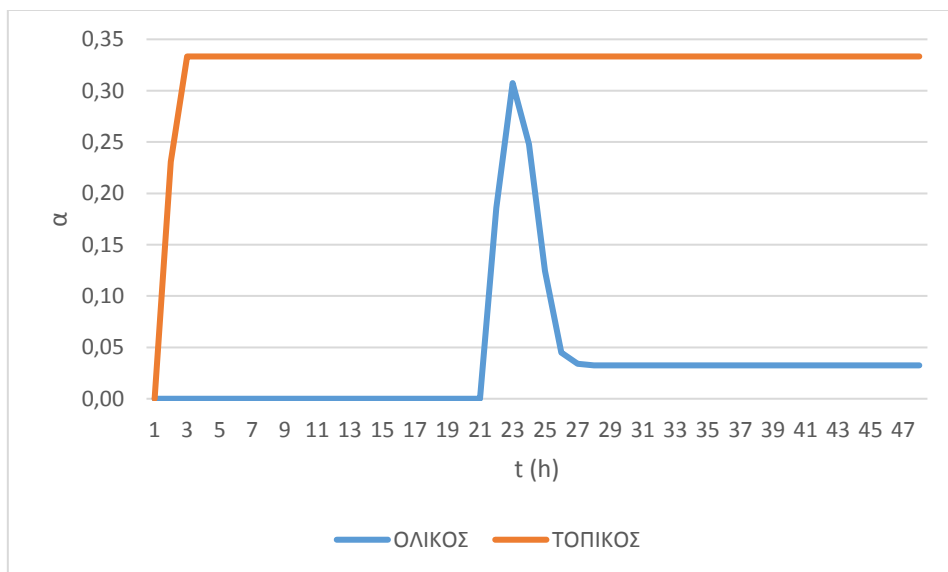
Εικόνα 99: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=1.01 έτη



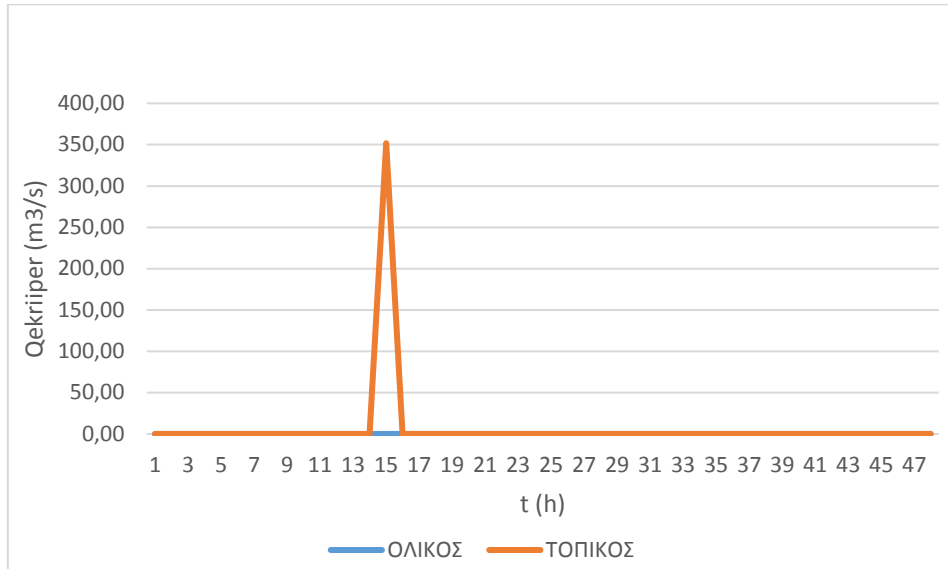
Εικόνα 100: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=90 έτη



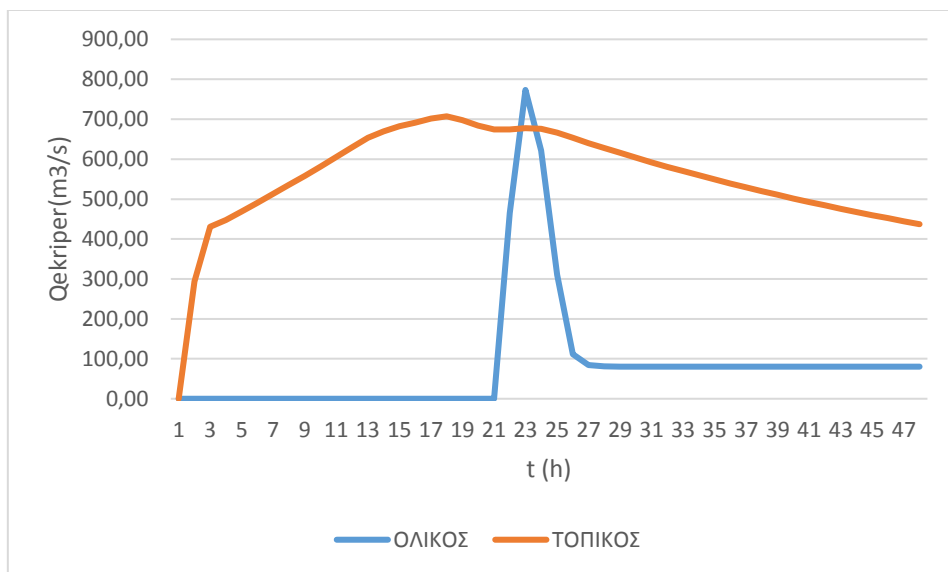
Εικόνα 101 : Χρονοσειρά συντελεστή υπερχείλισης α για την πλημμύρα $T=1.01$ έτη



Εικόνα 102: Χρονοσειρά συντελεστή υπερχείλισης α για την πλημμύρα $T=90$ έτη



Εικόνα 103: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα T=1.01 έτη



Εικόνα 104: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα T=90 έτη

10.2.3. Κανονικό σενάριο με αρχική στάθμη $z=116$ m

Η συμπεριφορά του τοπικού κανόνα λειτουργίας εξετάσθηκε επίσης και στην περίπτωση ίδιας αναλογίας μεταξύ των δύο κριτηρίων – 80% υπέρ της ασφαλείας και 20% υπέρ της ενέργειας – διαφορετικής όμως αρχικής στάθμης και συγκεκριμένα ίσης με +116 m.

Από την βελτιστοποίηση των πλημμυρογραφημάτων με περίοδο αναφοράς από 1 έως 5 έτη προέκυψε ο ολικός κανόνας μικρών επεισοδίων **Πίνακας 12** ενώ από εκείνη των πλημμυρογραφημάτων με περίοδο επαναφοράς από 5 έως 1000 έτη προέκυψε ο ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων **Πίνακας 13**.

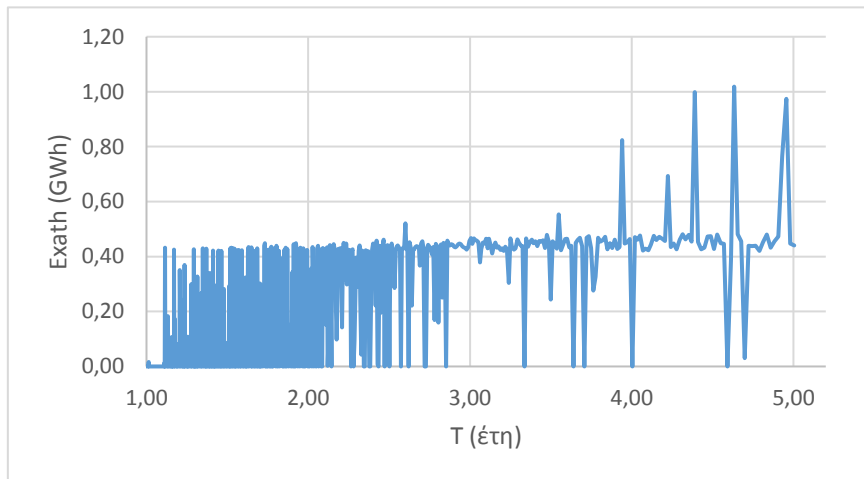
Πίνακας 12: Ολικός κανόνας λειτουργίας μικρών επεισοδίων

Lev 1	117.24
Lev 2	117.95
Lev 3	118.67
Lev 4	117.19
Lev 5	117.01
Lev 6	116.17

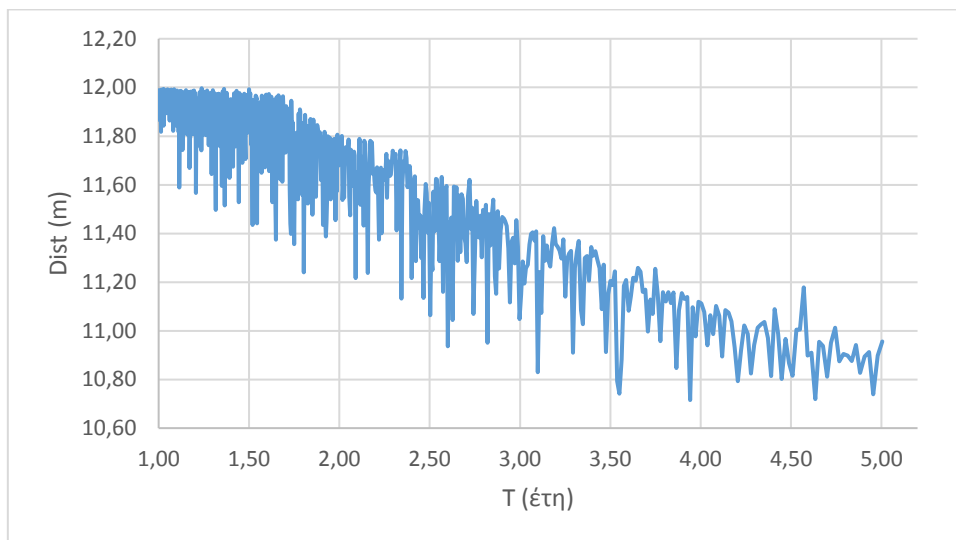
Πίνακας 13: Ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων

Lev 1	117.49
Lev 2	117.99
Lev 3	118.60
Lev 4	117.29
Lev 5	116.42
Lev 6	115.43

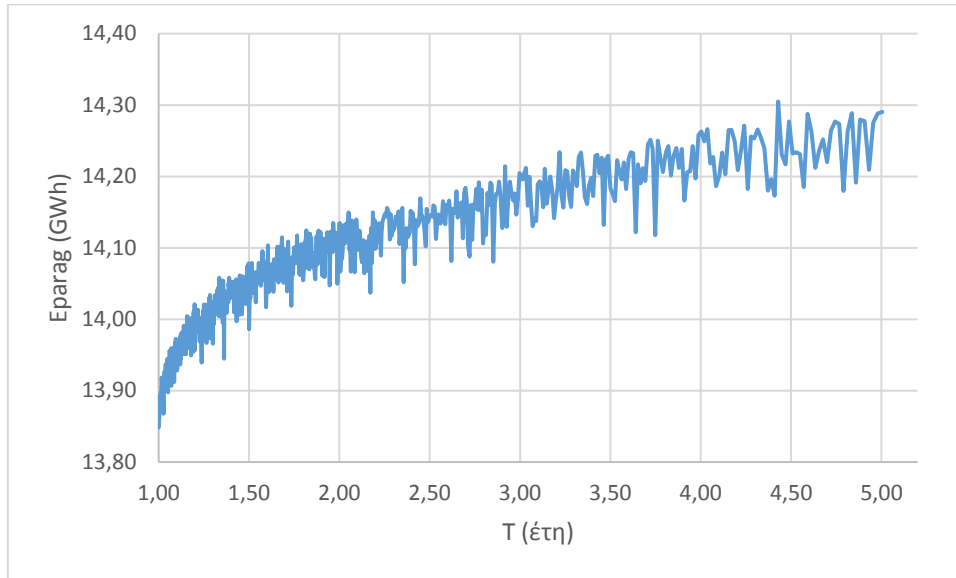
Έπειτα από τη βελτιστοποίηση προέκυψαν τα γραφήματα της ενέργειας που χάθηκε λόγω υπερχειλίσσης και της ελάχιστης απόστασης της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος καθώς και το γράφημα της παραγόμενης ενέργειας. Τα γραφήματα που αντιστοιχούν στα μεγέθη των μικρών επεισοδίων απεικονίζονται στις : **Εικόνα 105**, **Εικόνα 106** και **Εικόνα 107** ενώ εκείνα των μεγάλων στις : **Εικόνα 108**, **Εικόνα 109** και **Εικόνα 110**.



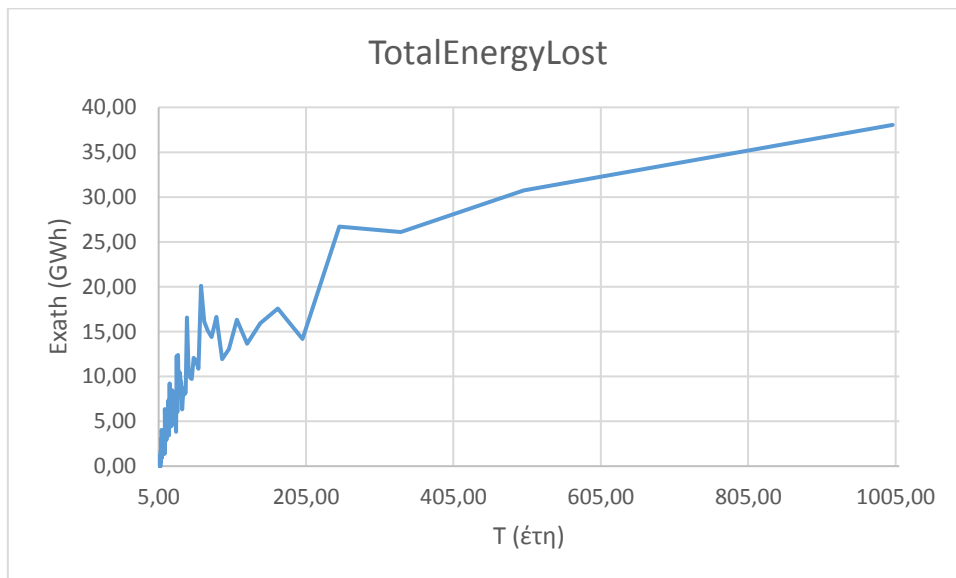
Εικόνα 105: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσσης για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



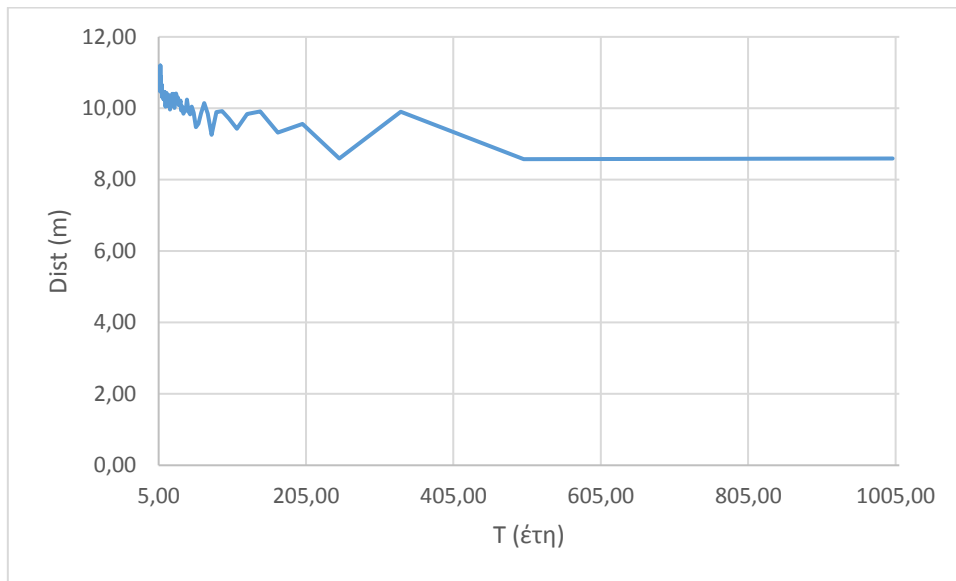
Εικόνα 106: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



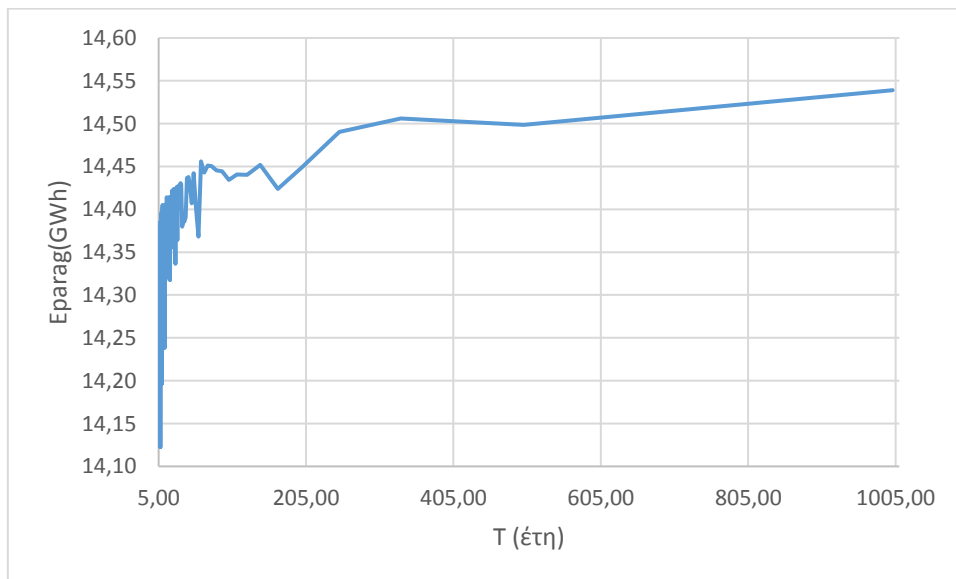
Εικόνα 107: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



Εικόνα 108: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχείλισης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης

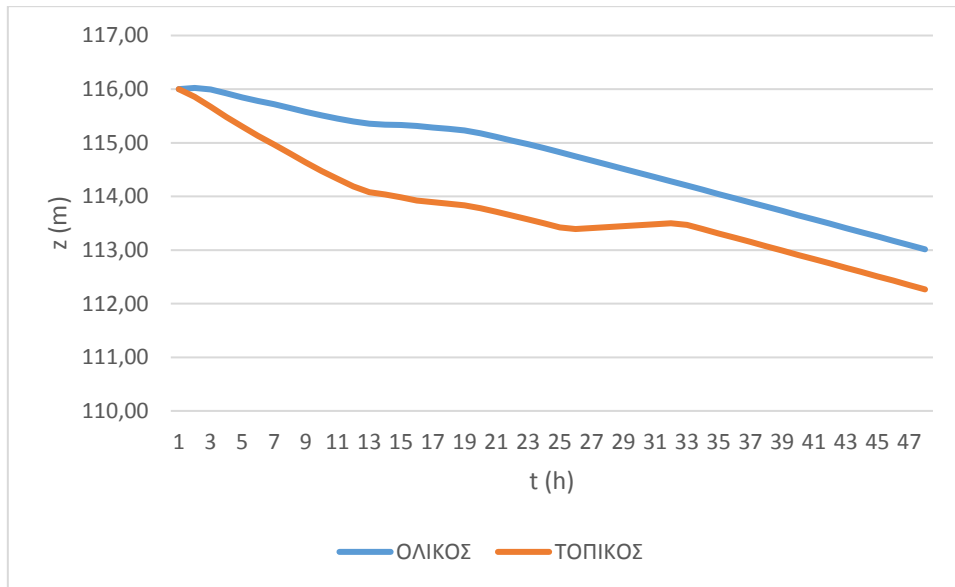


Εικόνα 109: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέγη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης

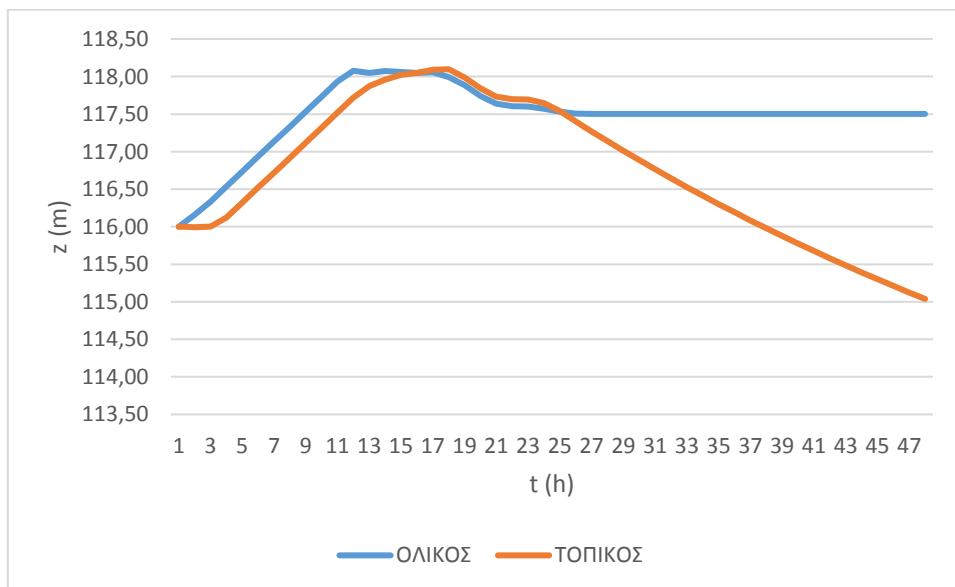


Εικόνα 110: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης

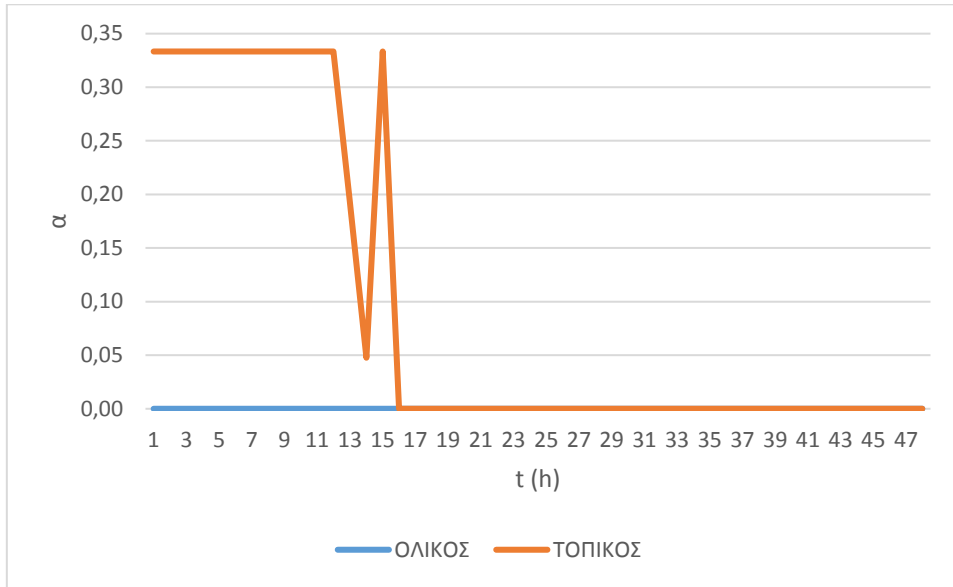
Τέλος, αξιοσημείωτη είναι σε αυτό το σημείο η παράθεση των χρονοσειρών (**Εικόνα 111**, **Εικόνα 112**, **Εικόνα 113**, **Εικόνα 114**, **Εικόνα 115** και **Εικόνα 116**), ενδεικτικών πλημμυρικών επεισοδίων, του συντελεστή υπερχείλισης α , της εκροής του υπερχειλιστή *Qekriper* και της στάθμης z τόσο βάσει του τοπικού όσο και του ολικού κανόνα λειτουργίας.



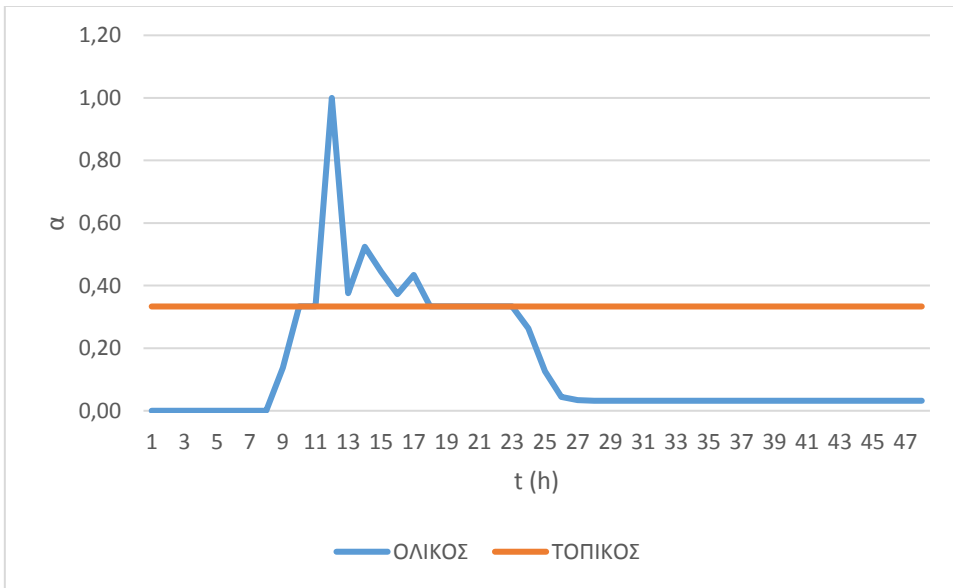
Εικόνα 111: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=1.01 έτη



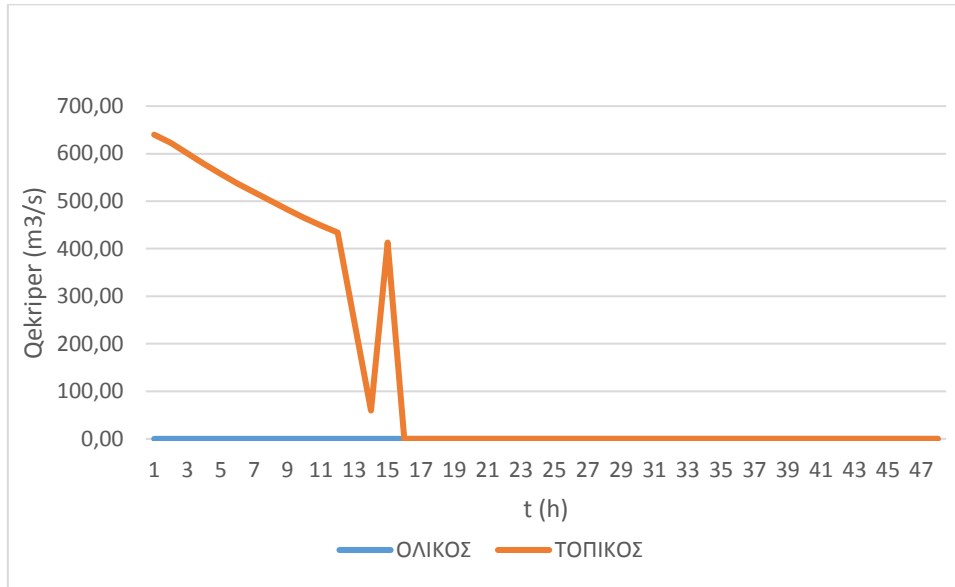
Εικόνα 112: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=90 έτη



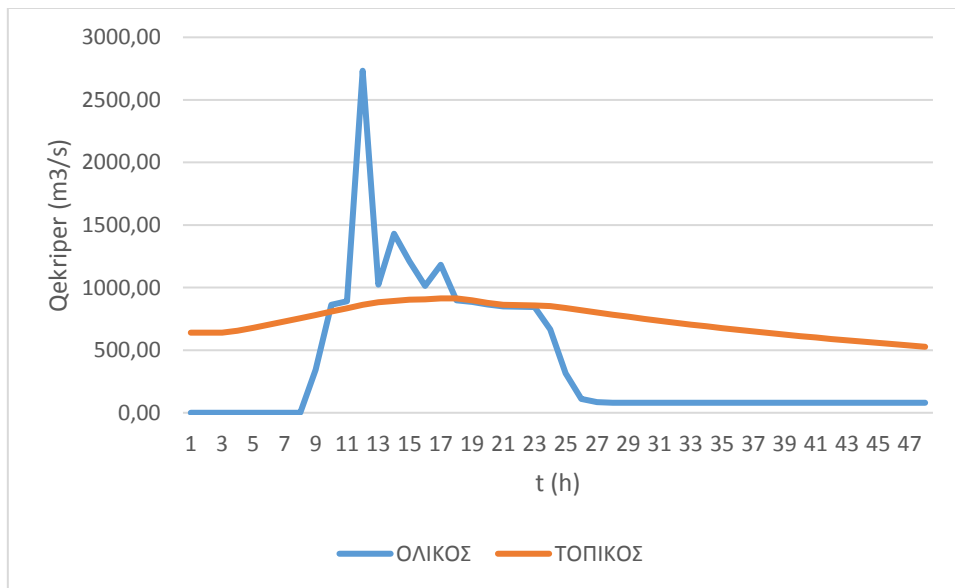
Εικόνα 113 : Χρονοσειρά συντελεστή υπερχείλισης α για την πλημμύρα $T=1.01$ έτη



Εικόνα 114: Χρονοσειρά συντελεστή υπερχείλισης α για την πλημμύρα $T=90$ έτη



Εικόνα 115: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα T=1.01 έτη



Εικόνα 116: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα T=90 έτη

10.2.4. Κανονικό σενάριο με αρχική στάθμη $z=118$ m

Τέλος η συμπεριφορά του τοπικού κανόνα λειτουργίας εξετάστηκε και στην ακραία περίπτωση κατά την οποία να μεν η αναλογία μεταξύ των δύο κριτηρίων είναι ίδια με προηγουμένως – 80% υπέρ της ασφαλείας και 20% υπέρ της ενέργειας, ωστόσο η αρχική στάθμη είναι ίση με +118m, στάθμη που αποτελεί και το όριο ασφαλείας της ΔΕΗ.

Από την υπερβελτιστοποίηση των πλημμυρογραφημάτων με περίοδο αναφοράς από 1 έως 5 έτη προέκυψε ο ολικός κανόνας μικρών επεισοδίων **Πίνακας 14** ενώ από εκείνη των πλημμυρογραφημάτων με περίοδο επαναφοράς από 5 έως 1000 έτη προέκυψε ο ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων **Πίνακας 15**.

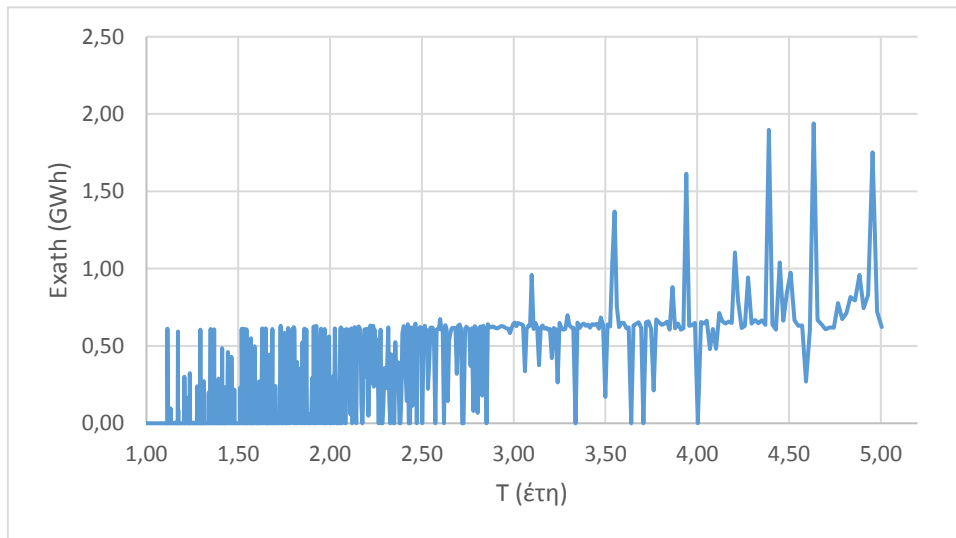
Πίνακας 14: Ολικός κανόνας λειτουργίας μικρών επεισοδίων

Lev 1	119.00
Lev 2	120
Lev 3	120.50
Lev 4	120.00
Lev 5	119.00
Lev 6	118.20

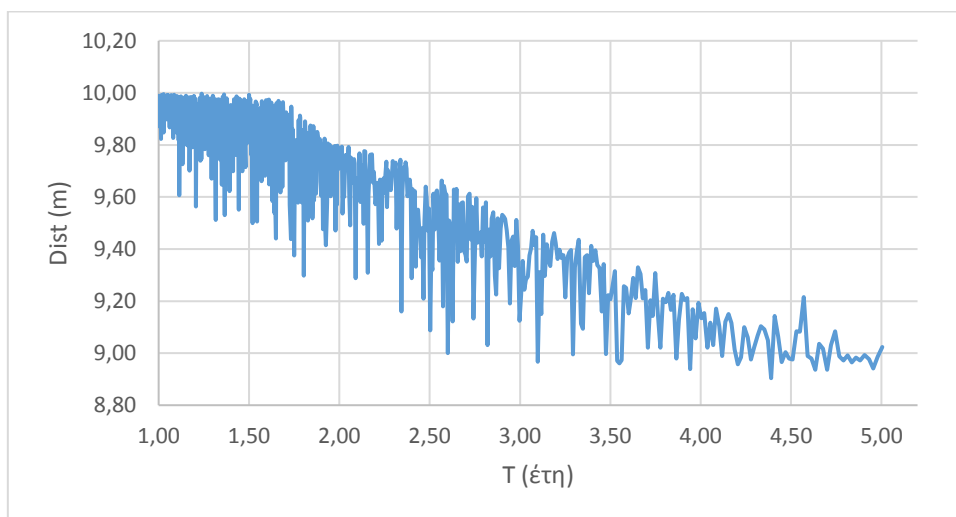
Πίνακας 15: Ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων

Lev 1	119.00
Lev 2	119.50
Lev 3	119.55
Lev 4	118.56
Lev 5	116.56
Lev 6	114.67

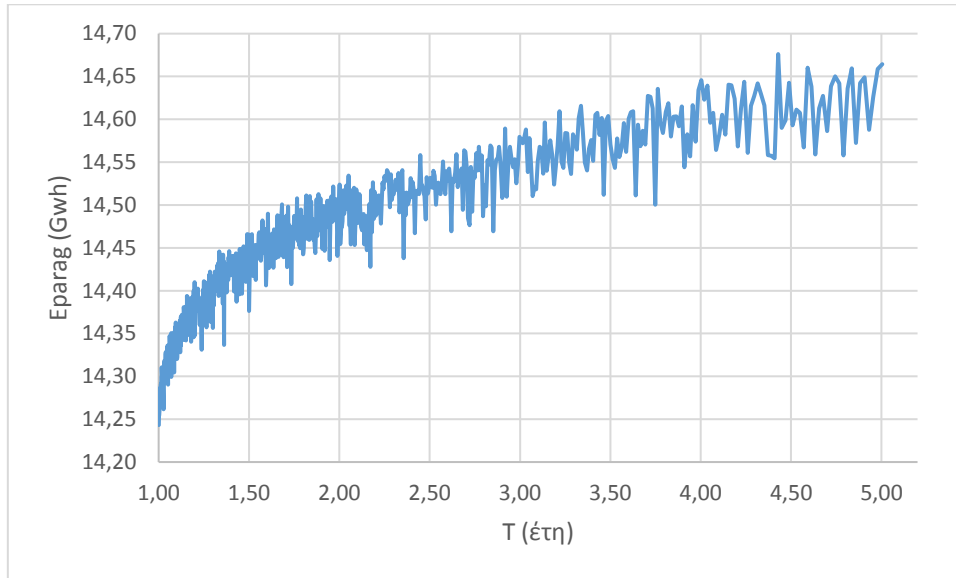
Έπειτα από τη βελτιστοποίηση προέκυψαν τα γραφήματα της ενέργειας που χάθηκε λόγω υπερχειλίσσης και της μέγιστης απόστασης της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος καθώς και το γράφημα της παραγόμενης ενέργειας. Τα γραφήματα που αντιστοιχούν στα μεγέθη των μικρών επεισοδίων απεικονίζονται στις : **Εικόνα 117, Εικόνα 118, Εικόνα 119**, ενώ εκείνα των μεγάλων στις : **Εικόνα 120, Εικόνα 121 και Εικόνα 122**.



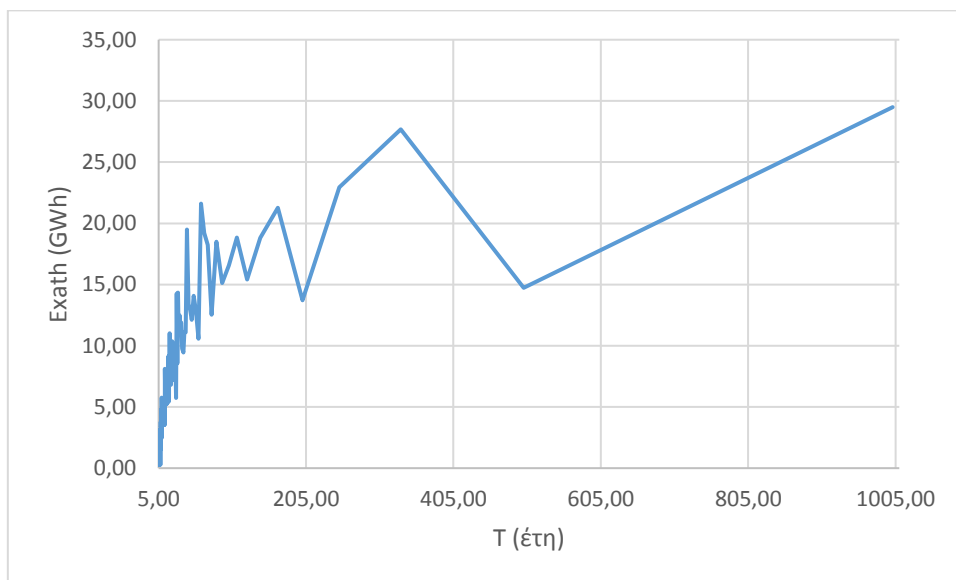
Εικόνα 117: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσσης για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



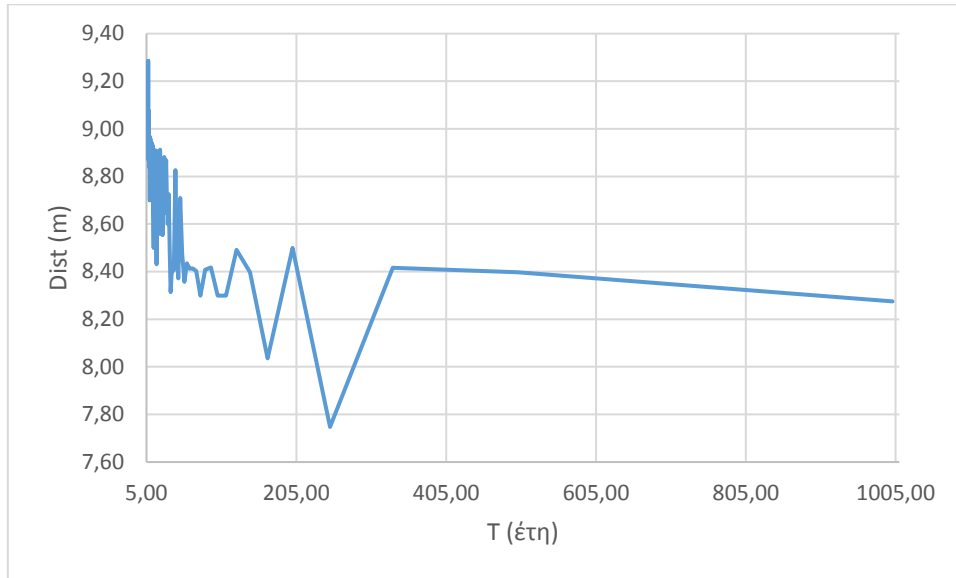
Εικόνα 118: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



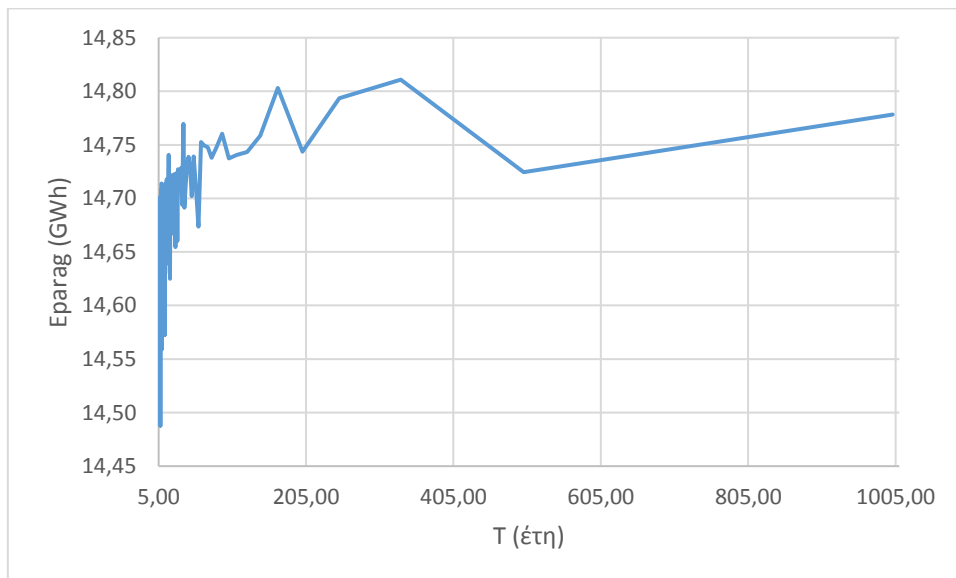
Εικόνα 119: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μικρών πλημμυρών για T από 1 έως 5 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



Εικόνα 120: Η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχείλισης για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



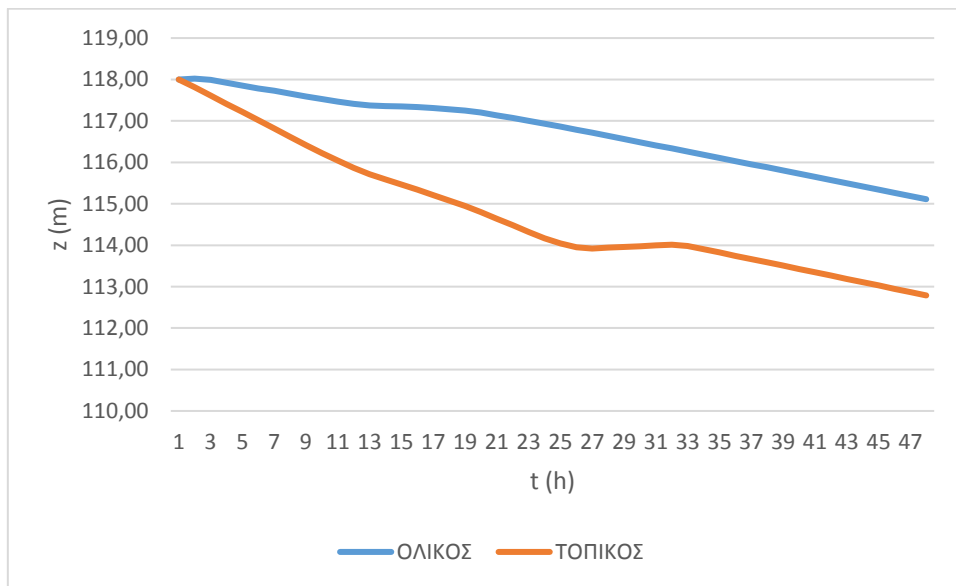
Εικόνα 121: Η ελάχιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέγη του φράγματος για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης



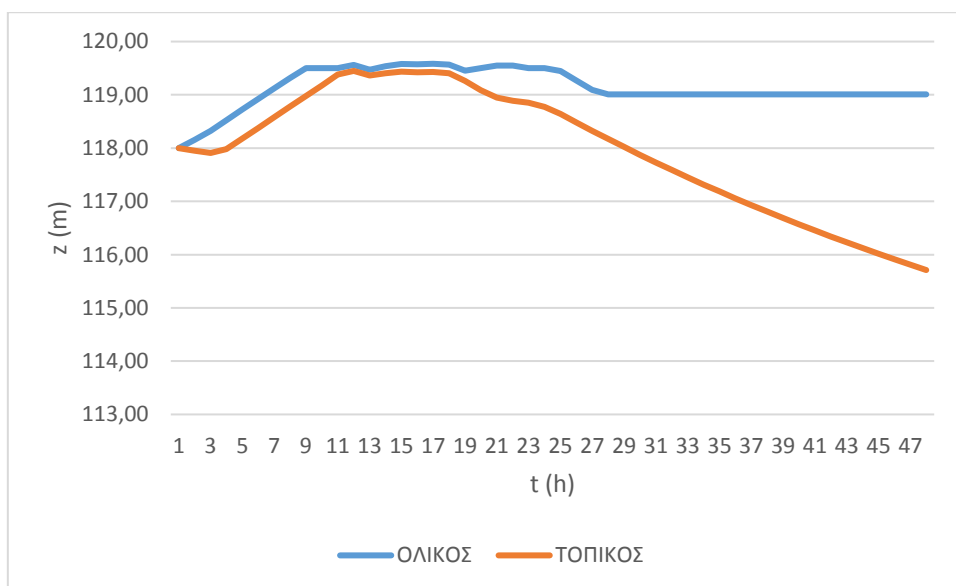
Εικόνα 122: Η παραγόμενη ενέργεια για όλα τα επεισόδια μεγάλων πλημμυρών για T από 5 έως 1000 έτη, κατόπιν βελτιστοποίησης

Τέλος, αξιοσημείωτη είναι σε αυτό το σημείο η παράθεση των χρονοσειρών (**Εικόνα 123**, **Εικόνα 124**, **Εικόνα 125**, **Εικόνα 126**, **Εικόνα 127**, **Εικόνα 128** και **Εικόνα 129**), ενδεικτικών

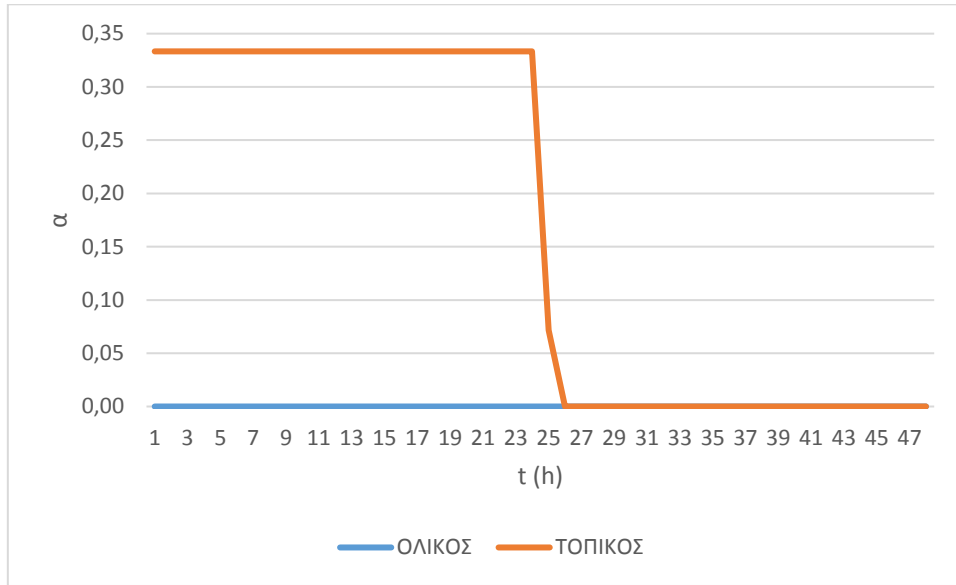
πλημμυρικών επεισοδίων, του συντελεστή υπερχειλίσης α , της εκροής του υπερχειλιστή *Qekriper* και της στάθμης z τόσο βάσει του τοπικού όσο και του ολικού κανόνα λειτουργίας.



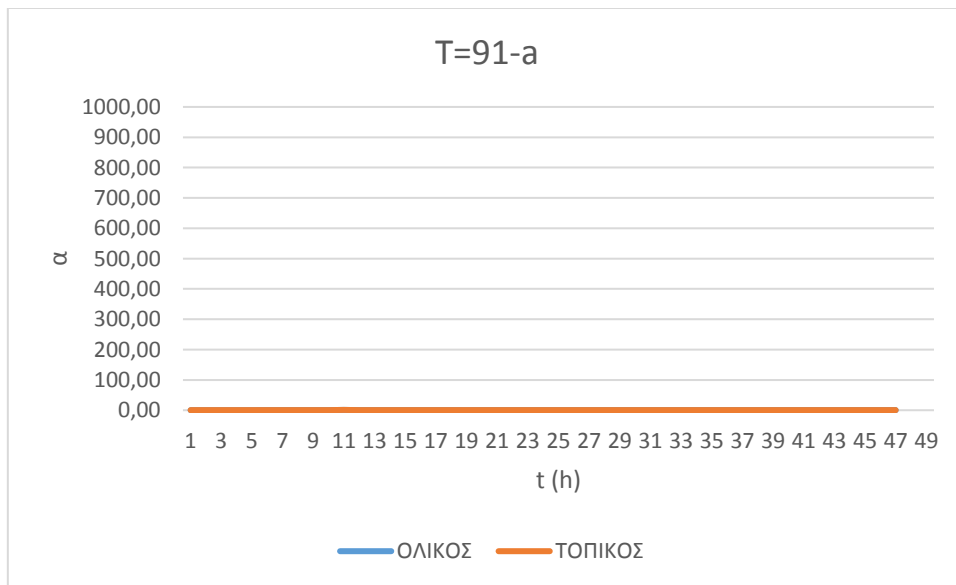
Εικόνα 123: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=1.01 έτη



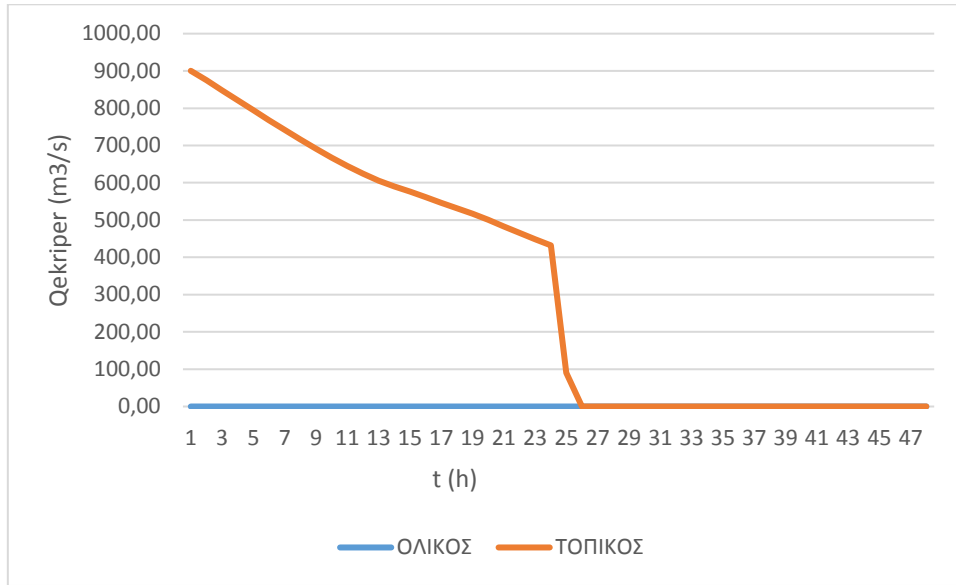
Εικόνα 124: Χρονοσειρά στάθμης για την πλημμύρα T=90 έτη



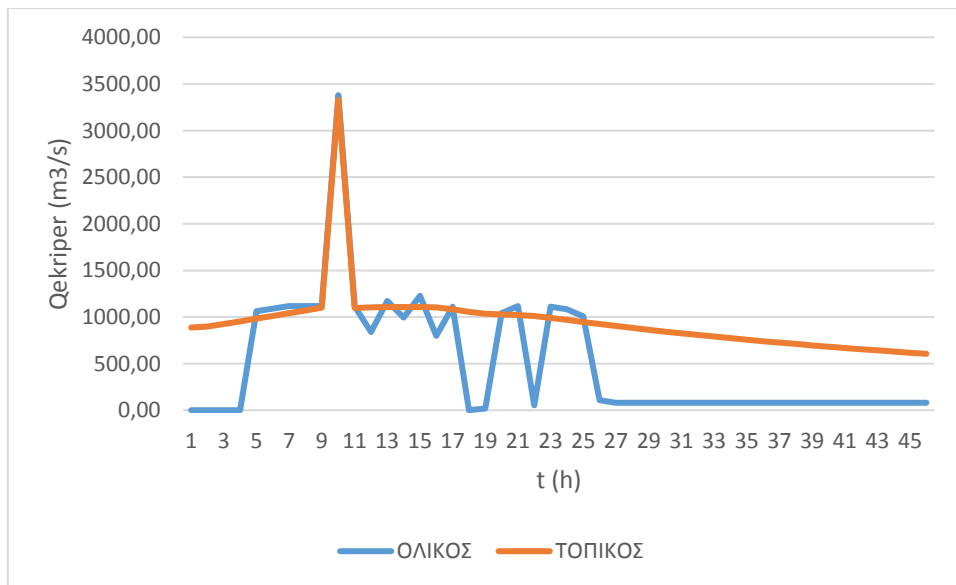
Εικόνα 125 : Χρονοσειρά συντελεστή υπερχείλισης α για την πλημμύρα $T=1.01$ έτη



Εικόνα 126: Χρονοσειρά συντελεστή υπερχείλισης α για την πλημμύρα $T=90$ έτη



Εικόνα 127: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα T=1.01 έτη



Εικόνα 128: Χρονοσειρά παροχής εκχειλιστή για την πλημμύρα T=90 έτη

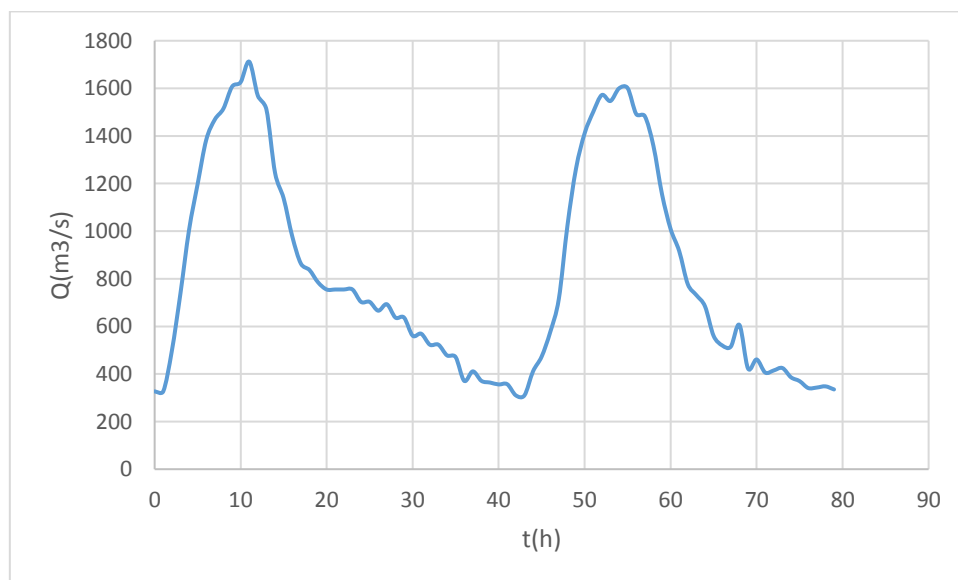
Από τα παραπάνω επαληθεύεται η κοινή λογική ότι όσο πιο μικρή είναι η αρχική στάθμη, τόσο λιγότερη ενέργεια χάνεται λόγω υπερχειλίσσης και τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση της μέγιστης στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το συμπέρασμα ότι για μικρά πλημμυρικά επεισόδια, με περίοδο επαναφοράς από 1 έως 5 έτη, και στις τρεις περιπτώσεις αρχικής στάθμης, δεν παρατηρείται υπερχειλίσση και όλος ο όγκος νερού διέρχεται από τους στροβίλους, αρκεί ο χειρισμός των θυροφραγμάτων να είναι σύμφωνος με τον εκάστοτε ολικό κανόνα λειτουργίας.

10.3. Σύγκριση κανόνα λειτουργίας - χειρισμού της ΔΕΗ

Η πλημμύρα που έλαβε χώρα στις 28-31 Δεκεμβρίου 2005 θα μπορούσε να είχε καταστροφικές συνέπειες για τη πόλη της Άρτας, ωστόσο χάρη στους κατάλληλους χειρισμούς της ΔΕΗ όλες οι κατάντη περιοχές παρέμειναν ασφαλείς.

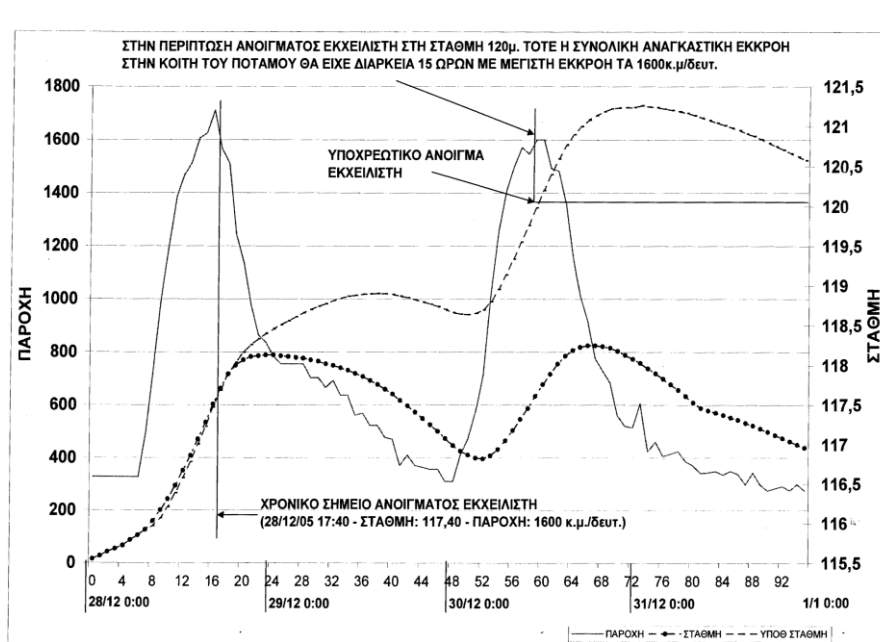
Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της εν λόγω πλημμύρας ήταν ότι το πλημμυρογράφημα εισόδου **Εικόνα 129** της παρουσίασε διπλή αιχμή, γεγονός που αιφνιδίασε αρκετά τους χειριστές.



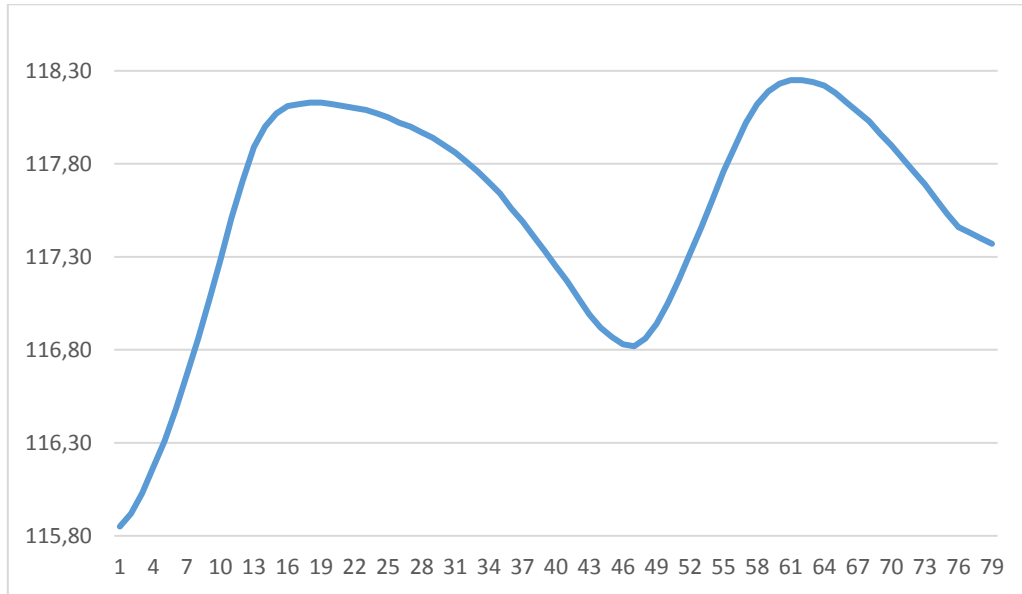
Εικόνα 129: Χρονοσειρά παροχών εισροής πλημμύρας 2005

Πραγματοποιήθηκε η διόδευση του εν λόγω πλημμυρογραφήματος βάσει του ολικού κανόνα μεγάλων επεισοδίων του πλέον πρόσφορου σεναρίου αρχικής στάθμης (+116 m). Τα παραπάνω αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα πραγματικά αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από το χειρισμό της ΔΕΗ στο συγκεκριμένο συμβάν.

Κατά την έναρξη της πλημμύρας η στάθμη του ταμιευτήρα ανερχόταν στα +115.85 m ενώ το άνοιγμα των θυροφραγμάτων πραγματοποιήθηκε όταν η στάθμη του ταμιευτήρα έγινε ίση με 117.40 m (**Εικόνα 130**). Λαμβάνοντας υπόψιν τις σχέσεις (7.6) και (7.9) υπολογίστηκε ότι η ενέργεια που χάθηκε ήταν ίση με 11.89 GWh ενώ η απόσταση της μέγιστης στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του φράγματος ανερχόταν στα 9.75 m. Η στάθμη συναρτήσκει του χρόνου παρατίθεται στην **Εικόνα 131**.

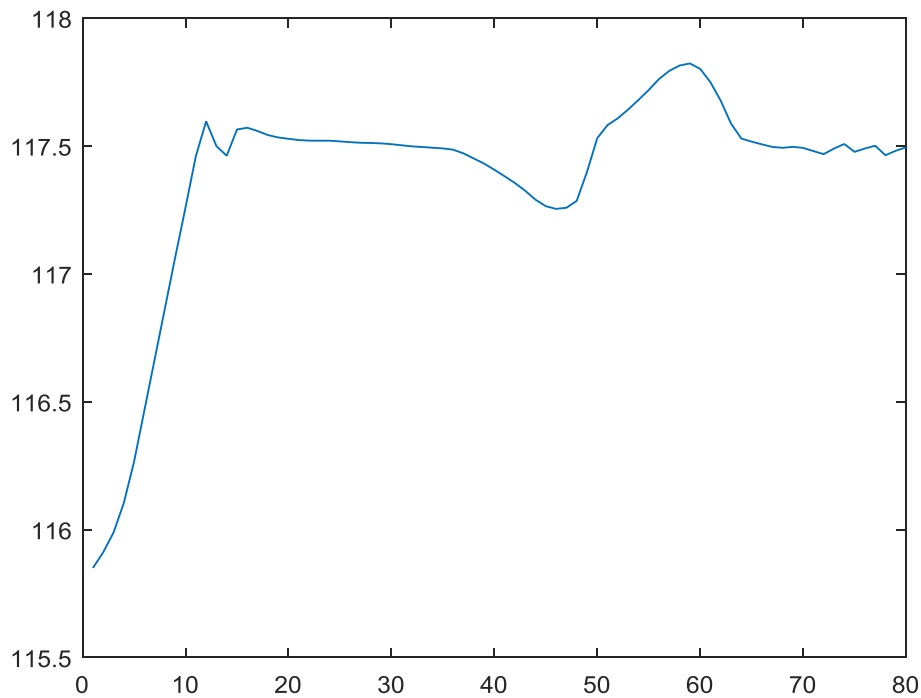


Εικόνα 130: Γράφημα εισροής και στάθμης συναρτήσκει του χρόνου



Εικόνα 131: Χρονοσειρά στάθμης ταμιευτήρα σύμφωνα με το χειρισμό του κ. Λέρη

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του πλημμυρικού συμβάντος σύμφωνα με τον ολικό κανόνα λειτουργίας μικρών επεισοδίων, αρχικής στάθμης +116 m ο οποίος παρουσιάζεται στον **Πίνακας 11**. Κατά αυτό τον τρόπο, προέκυψε ότι η ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχείλισης ανέρχεται στα 13.53 GWh ενώ η απόσταση από τη μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα μέχρι τη στέψη του φράγματος είναι ίση με 10.18 m. Η στάθμη συναρτήσεως του χρόνου παρατίθεται στην **Εικόνα 132**.



Εικόνα 132: Χρονοσειρά στάθμης σύμφωνα με τον τοπικό κανόνα λειτουργίας

Από τα παραπάνω κρίνεται σαφώς επιτυχημένος ο χειρισμός του κ. Λέρη καθώς προσομοιάζει αρκετά τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι ο χειρισμός αυτός συνοδευόταν με ταυτόχρονη παρακολούθηση του πλημμυρικού συμβάντος και την οπτική επαφή με τον ταμιευτήρα, δυνατότητα που στη δική μας προσομοίωση απουσιάζει.

11. Συμπεράσματα – Προτάσεις

11.1. Σύνοψη και συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα γενικό στοχαστικό πλαίσιο διαχείρισης θυροφραγμάτων σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες, που περιλαμβάνει συνδυασμό καινοτόμων μεθοδολογιών.

Ειδικότερα, για τη κατάρτιση της σχέσης στάθμης – παροχής του υπερχειλιστή, η οποία χρησιμοποιείται στο μοντέλο διόδευσης αναπτύχθηκε μια υδραυλικά συνεπής προσέγγιση στην οποία λαμβάνονται υπόψιν όλες οι συνιστώσες της θεωρητικής σχέσης του ελεύθερου υπερχειλιστή που εξαρτώνται από την παροχή και τη τοπική γεωμετρία (υδραυλικό φορτίο, τοπικές απώλειες, συντελεστής παροχής c). Η μεθοδολογία καταλήγει σε μια αναλυτική σχέση δύναμης που διατηρεί την απλότητα στους υπολογισμούς της διόδευσης, όντας ωστόσο πολύ πιο ακριβής από τις συνήθεις σχέσεις που εφαρμόζονται στην πράξη. Στην περίπτωση του Πουρναρίου, η σχέση αυτή επαληθεύει το αντίστοιχο νομογράφημα που χρησιμοποιεί η ΔΕΗ.

Για την αναπαράσταση της λειτουργίας του ταμιευτήρα κατά τη διέλευση πλημμύρας και των σχετικών έργων ελέγχου (εκχειλιστής, θυροφράγματα, στρόβιλοι) αναπτύχθηκε ένα πρωτότυπο αριθμητικό σχήμα διόδευσης στο οποίο επιλύεται η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου βήμα προς βήμα μέσω βελτιστοποίησης. Στο σχήμα αυτό, η λειτουργία των θυροφραγμάτων περιγράφεται με χρήση κάποιων χαρακτηριστικών τιμών στάθμης, στα οποία τα θυροφράγματα ανοίγουν κατά την άνοδο της πλημμύρας και κλείνουν κατά την ύφεσή της αξιοποιώντας κάθε φορά συγκεκριμένο ποσοστό της παροχεταιυτικότητας του υπερχειλιστή.

Για την αξιολόγηση της πολιτικής λειτουργίας των θυροφραγμάτων εισήχθησαν δύο κριτήρια επίδοσης, που συνδέονται με την ασφάλεια της όλης κατασκευής (απόσταση ανώτατης στάθμης πλημμύρας από τη στέψη του φράγματος) και την οικονομικότητα (ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχειλίσης, εξαιτίας του ανοίγματος των θυροφραγμάτων). Επειδή τα δύο αυτά κριτήρια είναι έντονα αντικρουόμενα, υλοποιήσαμε μια εκτενή πολυκριτηριακή ανάλυση, βελτιστοποιώντας τους κανόνες λειτουργίας με διαφορετικά βάρη των δύο κριτηρίων, και με είσοδο ένα εξαιρετικά δυσμενές πλημμυρογράφημα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την

πλημμύρα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε $T=10000$ έτη (τα μεγέθη της πλημμύρας ελήφθησαν από πρόσφατη υδρολογική μελέτη της ΔΕΗ και παρήχθησαν με την μεθοδολογία σχεδιασμού αντιπλημμυρικών έργων, ήτοι τη μέθοδο SCS και μοναδιαίου υδρογραφήματος και για βροχόπτωση σχεδιασμού που παράγεται από όμβριες καμπύλες). Από την ανάλυση των μετώπων Pareto καταλήξαμε σε έναν – κατά τη κρίση μας – πρόσφορο συνδυασμό συντελεστών βάρους που εξισορροπεί τα δύο κριτήρια. Θεωρούμε ότι ο κανόνας αυτός θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά σε περίπτωση ενός εξαιρετικά ακραίου πλημμυρικού επεισοδίου.

Στη συνέχεια, ο κανόνας αυτός ελέγχθηκε για τα πλημμυρικά επεισόδια περιόδου επαναφοράς $T=5000$ και 60000 έτη. Όπως είναι αναμενόμενο, ο κανόνας αυτός είναι πιο συντηρητικός για την πλημμύρα των 5000 ετών και λιγότερο ασφαλής για $T=60000$ έτη.

Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή του κανόνα σε λιγότερο ακραία επεισόδια είναι προφανές ότι λειτουργεί κατά της οικονομικότητας καθώς επιβάλλει το άνοιγμα των θυροφραγμάτων σε αρκετά χαμηλές στάθμες με συνέπεια την άσκοπη απώλεια νερού άρα και ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, η προσαρμογή του κανόνα σε ένα πλημμυρογράφημα με συγκεκριμένο χρονικό προφίλ δημιουργεί ερωτηματικά σχετικά με τη καταλληλότητά του ως προς πραγματικά πλημμυρικά επεισόδια, τα οποία έχουν ακανόνιστη χρονική κατανομή. Ένα τέτοιο επεισόδιο ήταν αυτό του 2005, που παρουσίασε διπλή αιχμή. Τα παραπάνω αποτέλεσαν το έναυσμα για την υιοθέτηση μιας τελείως διαφορετικής προσέγγισης, που βασίζεται στη χρήση πολλαπλών συνθετικών πλημμυρογραφημάτων, τα οποία παράγονται στοχαστικά. Με τον τρόπο αυτό, ως βέλτιστος κανόνας ορίζεται αυτός που είναι στατιστικά συνεπής με τη δίαιτα των πλημμυρών της περιοχής και όχι αυτός που απλά προσαρμόζεται σε κάποιο αυθαίρετο ντετερμινιστικό προφίλ πλημμύρας.

Η παραγωγή συνθετικών πλημμυρογραφημάτων προϋποθέτει τη χρήση ενός στοχαστικού μοντέλου που αναπαράγει τη στατιστική κατανομή και τις χρονικές εξαρτήσεις των παρατηρημένων δεδομένων παροχής σε μικρές χρονικές κλίμακες λχ. ώρας. Μια ακόμα πρόκληση της εργασίας μας ήταν η έλλειψη τέτοιων δεδομένων καθώς η παροχομετρική πληροφορία ήταν διαθέσιμη μόνο στην ημερήσια κλίμακα. Για το σκοπό αυτό εφαρμόσαμε μια καινοτόμο μεθοδολογία καταβιβασμού δεδομένων, όπου με χρήση κλιμακογραμμάτων

εκτιμήθηκαν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ωριαίων παροχών. Στη συνέχεια, με χρήση του μοντέλου AnySim παρήχθησαν 1000 έτη συνθετικών παροχών από τα οποία απομονώθηκε το μεγαλύτερο επεισόδιο κάθε έτους, διάρκειας 24 ωρών. Τέλος τα επεισόδια αυτά διαχωρίστηκαν σε δύο ομάδες, τα μικρά για T από 1 έως 5 έτη (800 επεισόδια) και τα μεγάλα για T από 5 έως 1000 έτη (200 επεισόδια).

Για κάθε μία από τις δύο ομάδες επεισοδίων έγινε βελτιστοποίηση του κανόνα λειτουργίας των θυροφραγμάτων για τρία σενάρια αρχικής στάθμης. Με τον τρόπο αυτό παρήχθησαν 6 κανόνες, με χρήση διαφορετικών συντελεστών βάρους σε σχέση με τον υπερσυντηρητικό κανόνα των 10000 ετών, δίνοντας περισσότερη έμφαση στο κριτήριο της ενέργειας. Η ανάλυση μας έδειξε ότι οι κανόνες αυτοί μπορούν να ανταποκριθούν επιτυχώς σε όλο το φάσμα των δυνητικών πλημμυρών της περιοχής μελέτης.

Χαρακτηριστική απόδειξη αποτελεί η σύγκριση του προτεινόμενου κανόνα με τον επιτυχή χειρισμό που έκανε το έμπειρο προσωπικό της ΔΕΗ, κατά τη διέλευση της ιδιαίτερα δυσμενούς πλημμύρας του 2005. Συγκρίνοντας τα πραγματικά με τα προσομοιωμένα μεγέθη ενδιαφέροντος (στάθμη, εκροές, παραγωγή ενέργειας), προέκυψε ότι ο κανόνας μας θα ήταν πιο ασφαλής και θα οδηγούσε σε μικρή μόνο παραπάνω απώλεια νερού λόγω υπερχειλίσης, επιτυγχάνοντας έτσι σχεδόν ισοδύναμη παραγωγή ενέργειας. Θα πρέπει βεβαίως να επισημανθεί ότι οι χειριστές της ΔΕΗ είχαν τη δυνατότητα παρακολούθησης της πλημμύρας σε πραγματικό χρόνο το οποίο προφανώς διευκόλυνε τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

11.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα εργασία αποτελεί την απαρχή της ανάπτυξης μιας συστηματικής μεθοδολογίας βελτιστοποίησης της λειτουργίας των θυροφραγμάτων και αξίζει να εμπλουτιστεί με επιπλέον στοιχεία που θα συμβάλουν στην αρτιότητά της.

Αρχικά, κρίνεται σκόπιμη η ενσωμάτωση επιπλέον εμπειρικών υδρολογικών κανόνων για την ανίχνευση του ανοδικού και του καθοδικού κλάδου του πλημμυρογραφήματος, προκειμένου να είναι εφικτή η αποτελεσματικότερη επιλογή των χαρακτηριστικών τιμών στάθμης.

Στη συνέχεια, χρειάζεται να δοθεί επιπλέον έμφαση στον ορισμό των τιμών αυτών, αποσκοπώντας στην ελαχιστοποίηση της ευαισθησίας της απόκρισης των θυροφραγμάτων, καθώς και των ταλαντώσεων στη στάθμη, που αυτή προκαλεί.

Η αποτελεσματικότητα του μεθοδολογικού πλαισίου που αναπτύχθηκε αξίζει να εμπλουτιστεί σε επιχειρησιακό πλαίσιο με τη χρήση εξωτερικής πληροφορίας, όπως μετεωρολογικές προγνώσεις και μετρήσεις παροχών σε πραγματικό χρόνο σε ανάντη σταθμούς.

Είναι σκόπιμο, επιπλέον, να διερευνηθεί και να βελτιωθεί το στοχαστικό πλαίσιο ως προς την κατηγοριοποίηση των πλημμυρικών επεισοδίων, καθώς και την αντιστοίχιση σε συγκεκριμένα επίπεδα πλημμυρικού ρίσκου. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιτευχθεί με την παραγωγή πλήθους συνθετικών πλημμυρογραφημάτων για κάθε περίοδο επαναφοράς, αποφεύγοντας την επιλογή του μέγιστου πλημμυρικού επεισοδίου εξ αυτών.

Τα πλημμυρογραφήματα που παρήχθησαν συνθετικά προτείνεται να συγκριθούν με πραγματικά δεδομένα ωριαίας κλίμακας, από όπου και θα προκύψουν τυχούσες διορθώσεις για τη μεθοδολογία καταβιβασμού.

Τέλος, η ισχύς του κανόνα λειτουργίας που προτείνεται θα επιβεβαιωθεί σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό, αρκεί αυτός να εφαρμοστεί και σε άλλα παρατηρημένα πλημμυρικά συμβάντα και να γίνει σύγκριση με τον εκάστοτε χειρισμό της ΔΕΗ.

Αναφορές

- Ghobadi, M., & Kaboli, H. S. (2020). Developing a Web-based decision support system for reservoir flood management. *Journal of Hydroinformatics*, 22(3), 641–662. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.185>
- Haktanir, T., & Kisi, Ö. (2001). Ten-Stage Discrete Flood Routing for Dams Having Gated Spillways. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(1), 86–90. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2001\)6:1\(86\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:1(86))
- Koutsoyiannis, D., 2000. A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series. *Water Resources Research*, 36, 1519–1533. <https://doi.org/10.1029/2000WR900044>.
- Koutsoyiannis, D., Karavokiros, G., Efstratiadis, A., Mamassis, N., Koukouvinos, A., & Christofides, A. (2003). A decision support system for the management of the water resource system of Athens. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(14–15), 599–609. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00106-2)
- Koutsoyiannis, D., 2010. HESS Opinions “A random walk on water.” *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 585–601. <https://doi.org/10.5194/hess-14-585-2010>.
- Koutsoyiannis, D., 2017. Encolpion of stochastics: Fundamentals of stochastic processes. Version 9. *Department of Water Resources and Environmental Engineering*, National Technical University of Athens. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10956.82564>.
- Koutsoyiannis, D. (2020). Simple stochastic simulation of time irreversible and reversible processes. *Hydrological Sciences Journal*, 65(4), 536–551. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1705302>
- Kossieris, P., Tsoukalas, I., Makropoulos, C., Savic, D., 2019. Simulating Marginal and Dependence Behaviour of Water Demand Processes at Any Fine Time Scale. *Water*, 11, 885. <https://doi.org/10.3390/w11050885>.
- Kossieris, 2020. Multi-scale stochastic analysis and modelling of residential water demand processes. *PhD thesis, Department of Water Resources and Environmental Engineering*, 304.

- Michailidi, E. M., & Bacchi, B. (2017). Dealing with uncertainty in the probability of overtopping of a flood mitigation dam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(5), 2497–2507. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2497-2017>
- Nataf, A., 1962. Statistique mathematique-determination des distributions de probabilités dont les marges sont données. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, 255, 42–43.
- Qin, H., Zhou, J., Lu, Y., Li, Y., & Zhang, Y. (2010). Multi-objective Cultured Differential Evolution for Generating Optimal Trade-offs in Reservoir Flood Control Operation. *Water Resources Management*, 24(11), 2611–2632. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9570-7>
- Tsoukalas, I., Efstratiadis, A., Makropoulos, C., 2017. Stochastic simulation of periodic processes with arbitrary marginal distributions. *15th International Conference on Environmental Science and Technology*, CEST 2017.
- Tsoukalas, I., Kossieris, P., Makropoulos, C., 2020. Simulation of Non-Gaussian Correlated Random Variables, Stochastic Processes and Random Fields: Introducing the anySim R-Package for Environmental Applications and Beyond. *Water*, 12, 1645. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w12061645>.
- Tsoukalas, I., Makropoulos, C., Koutsoyiannis, D., 2018. Simulation of Stochastic Processes Exhibiting Any-Range Dependence and Arbitrary Marginal Distributions. *Water Resources Research*, 54, 9484–9513. <https://doi.org/10.1029/2017WR022462>.
- Zargar, M., Samani, H. M. V., & Haghghi, A. (2016). Optimization of gated spillways operation for flood risk management in multi-reservoir systems. *Natural Hazards*, 82(1), 299–320. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2202-7>
- Zhang, X., Liu, P., Xu, C.-Y., Gong, Y., Cheng, L., & He, S. (2019). Real-time reservoir flood control operation for cascade reservoirs using a two-stage flood risk analysis method. *Journal of Hydrology*, 577, 123954. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123954>
- Δρόσου, Α., *Κατάρτιση πλημμυρικών χαρτών στον Ποταμό Άραχθο*, Διπλωματική εργασία, 118 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2015. Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (ΕΕΜΦ), Τα φράγματα της Ελλάδας, 2013
- Ευστρατιάδης, Α., και Π. Παπανικολάου, *Σημειώσεις μαθήματος "Υδραυλικές Κατασκευές - Φράγματα"*, 93 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018

Κουτσογιάννης, Δ., *Υδρολογικές μέθοδοι διόδευσης πλημμυρών*, 16 σ., Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1988.

Κουτσογιάννης, Δ., και Ν. Μαμάσης, *Γνωμοδοτική τεχνική έκθεση για την πλημμύρα του Δεκεμβρίου 1996 στη περιοχή κάτω Αχελώου του νομού Αιτωλοακαρνανίας*, 2005

Κουτσογιάννης, Δ., και Ν. Μαμάσης, *Γνωμοδοτική τεχνική έκθεση για την πλημμύρα του Μαρτίου 1999 στη περιοχή λίμνης Νησίου*, 2005

Κουτσογιάννης, Δ., και Ν. Μαμάσης, *Γνωμοδοτική τεχνική έκθεση για την πλημμύρα του Δεκεμβρίου 2002 στη περιοχή λίμνης Νησίου*, 2005

Κουτσογιάννης Δ., Ι. Μαρκόνης, Α. Κουκουβίνος, και Ν. Μαμάσης, *Υδρολογική μελέτη πλημμυρών Αράχθου, Οριστική Οριοθέτηση Τμήματος Κοίτης Ποταμού Αράχθου που Διέρχεται στα Όρια του Δήμου Αρταίων*, Ανάθεση: Δήμος Αρταίων, Ανάδοχοι: ΑΔΚ - Αρώνης – Δρέττας – Καρλαύτης Σύμβουλοι Μηχανικοί ΑΕ, ΥΔΡΟΤΕΚ - Υδραυλικές Μελέτες ΑΕ, Β. Μούζος, 272 σ., 2010.

Παπανικολάου, Π., *Συμπληρωματικά κεφάλαια στην υδραυλική των ανοιχτών αγωγών και ποταμών*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017.