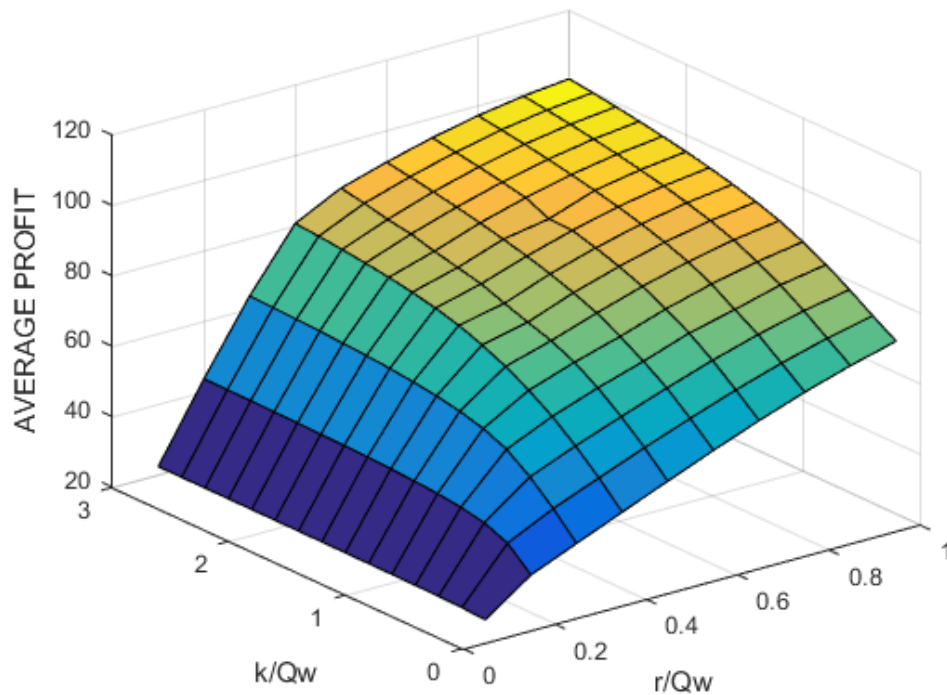




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ & ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ



ΕΚΠΟΝΗΣΗ: Ι. ΝΤΟΥΞΗ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α. ΕΥΣΤΡΑΤΙΑΔΗΣ, ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π.
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

Αθήνα, 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ &
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α. ΕΥΣΤΡΑΤΙΑΔΗΣ ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π.
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

ΙΩΑΝΝΑ ΝΤΟΥΣΗ

Διπλωματούχος Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2016 – All rights reserved

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο αυτό, θέλω να ευχαριστήσω τον κο Δημήτρη Κουτσογιάννη, ο οποίος μέσα από το μάθημα της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και την άριστη επικοινωνία μας συνέβαλε καθοριστικά στην επιλογή της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ τον κο Ανδρέα Ευστρατιάδη για τις ενδιαφέρουσες ιδέες που υλοποιήθηκαν, τις πολύτιμες υποδείξεις, την υπομονή και το ευχάριστο κλίμα συνεργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου Αλεξάνδρα & Γιάννη για όλα, από τότε ως τώρα και για τα καλύτερα που μας περιμένουν.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ABSTRACT	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	15
ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ	15
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	15
1.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ	16
1.2.1 Υδατικό Ισοζύγιο.....	16
1.2.2 Μοντέλο Λειτουργίας Ταμειυτήρα	17
1.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	18
1.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	20
1.5 ΣΥΖΕΥΞΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	22
1.6 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ.....	23
1.7 Ο ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	25
1.7.1 Στοχαστική Ανέλιξη.....	25
1.7.2 Δυναμική Hurst - Kolmogorov	26
1.7.3 Συνθετικές Χρονοσειρές Εισροών	27
1.7.4 Γέννηση τυχαίων αριθμών με μακροπρόθεσμη εμμονή	28
1.8 Η ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	28
1.8.1 Πλεονεκτήματα Υδροηλεκτρικής Ενέργειας	28
1.8.2 Βασική Λειτουργία ενός Υδροηλεκτρικού (Υ/Η) Έργου.....	29
1.8.3 Προσομοίωση στα Υ/Η έργα	31
1.8.4 Πρωτεύουσα, Δευτερεύουσα Ενέργεια & Έλλειμα Ενέργειας	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	33
ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΥΠΟΘΕΤΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	33
2.1 ΣΚΟΠΟΣ.....	33
2.2 ΤΟ ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	33
2.2.1 Γενική Διατύπωση Προβλήματος.....	33
2.2.2 Δεδομένα Εισόδου	33
2.3 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ & ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ-ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	34
2.3.1 Γέννηση Συνθετικής Χρονοσειράς Εισροών	34
2.3.2 Μοντέλο Προσομοίωσης - Εξισώσεις Υδατικού Ισοζυγίου	35

2.3.3 Βελτιστοποίηση: Συνάρτηση Στόχου, Μεταβλητές Απόφασης & Περιορισμοί.....	37
2.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ	37
2.5 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	38
2.5.1 Εμφάνιση Αστοχιών.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	41
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ-ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ MATLAB.....	41
3.1 ΣΚΟΠΟΣ.....	41
3.2 Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΕΙΣΡΟΩΝ	41
3.3 Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΣΤΟΧΟΥ	44
3.4 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	47
3.5 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΕΩΝ: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΕΤΕΥΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ	48
3.5.1 Εξέλιξη του μέσου οφέλους και του στόχου πρωτεύουσας ενέργειας	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	53
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	53
4.1 ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ	53
4.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΟΦΕΛΟΥΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ k, r	53
4.3 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΣΤΟΧΟΥ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ k, r	56
4.4 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ k, r	58
4.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ ΤΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	67
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΕΙΣΡΟΩΝ.....	67
5.1 ΣΚΟΠΟΣ.....	67
5.2 ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΡΑΧΥΤΕΡΕΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ	67
5.2.1 Επίλυση για μήκος χρονοσειράς 100 έτη.....	67
5.2.2 Επίλυση για μήκος χρονοσειράς 200 έτη.....	69
5.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΥΤΕΡΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ.....	69
5.3.1 Ο συντελεστής μεταβλητότητας	71
5.3.2 Στατιστική συμπεριφορά της χρονοσειράς μήκους 100 ετών	71
5.3.3 Στατιστική συμπεριφορά της χρονοσειράς μήκους 200 ετών	78
5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 100 ΚΑΙ 200 ΕΤΩΝ	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	89
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

Η βελτιστοποίηση των υδροσυστημάτων ως προς την υδροηλεκτρική παραγωγή παρουσιάζει αρκετές προκλήσεις λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα των εισροών, της αβεβαιότητας ως προς τις τιμές των παραμέτρων και της μη γραμμικής δυναμικής των υδροσυστημάτων. Ωστόσο η συνεχής μείωση των διαθέσιμων πόρων και η πίεση για στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, απαιτούν τη διερεύνηση και εμβάθυνση του πεδίου της υδροηλεκτρικής παραγωγής. Οι παλαιότερες προσεγγίσεις βελτιστοποίησης ήταν περιορισμένες σε απλές τοπολογίες και κανόνες εύρεσης, πλέον όμως αναπτύσσεται η προσέγγιση της βελτιστοποίησης-προσομοίωσης λειτουργίας ταμειυτήρα συνδυαστικά.

Μέσω της προσομοίωσης, αναπαρίσταται η συνδυαστική λειτουργία του συστήματος και γίνονται στοχαστικές προγνώσεις όλων των υδατικών και ενεργειακών ροών. Από την άλλη πλευρά, η βελτιστοποίηση εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της πολιτικής λειτουργίας του υδροηλεκτρικού έργου, κατά την οποία ελαχιστοποιείται η διακινδύνευση και μεγιστοποιείται η οικονομική επίδοση του συστήματος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η εύρεση του βέλτιστου μέσου οφέλους από την υδροηλεκτρική παραγωγή. Αναζητάται ο ενεργειακός στόχος ανά χρονικό βήμα, που θα αποδώσει το μέγιστο δυνατό όφελος και θα καλύπτεται όσο το δυνατόν περισσότερες φορές. Παράλληλα υπολογίζεται το αντίστοιχο μέσο ποσοστό αστοχίας για το χρόνο μελέτης.

Ειδικότερα, μεταβλητές των παραπάνω ευρημάτων είναι οι κατασκευαστικές συνιστώσες του υδροηλεκτρικού έργου. Εφαρμόζεται η μεθοδολογία με διάφορες μεταβολές της παροχτευτικότητας του αγωγού προσαγωγής και της χωρητικότητας του ταμειυτήρα. Έμφαση δίνεται στην αποτύπωση της στοχαστικής φύσης του προβλήματος με σχετικές διερευνήσεις, βάσει στοχαστικών μοντέλων εισροών που διατηρούν διαφορετικές δομές αυτοσυσχέτισης. Τέλος, πραγματοποιούνται οι απαραίτητες αναλύσεις ευαισθησίας ως προς το μήκος της χρονοσειράς εισροών.

The optimization of the hydrosystems for the hydropower production involves many challenges due to the stochastic nature of the inflows, the uncertainty of the values of the parameters and the non-linear dynamics of the hydrosystems. However the continuous reduction of the available resources and the pressure for a shift to renewable energy resources, require investigation and deepening of the scope of hydropower production. Earlier optimization approaches were limited to simple topologies and discovery rules, but now the approach of optimization-simulation of reservoir combined operation is being developed.

The combined operation of the system is represented through simulation and stochastic forecasts of all water and energy flows are conducted. On the other hand, optimization is applied to determine the operational policy of the hydroelectric project, during which the risk is minimized and the economic performance of the system is maximized.

The aim of this thesis is to find the optimum mean value of the profit made of hydropower production. The energy target per time step is being searched, which will yield the maximum potential profit and which will be valid as many times as possible. In the same time the respective average failure percentage is calculated for the year of study.

After that, investigation of the two structural parts of the system is conducted, namely the flow capacity of the flow line and the capacity of the reservoir. Emphasis is given to capture the stochastic nature of the problem by relevant investigations under stochastic inflow models that maintain different autocorrelation structures. Finally necessary sensitivity analyses are performed with respect to the length of the time-series of the inflows.

Στην παρούσα εργασία εξηγείται αρχικά το πρόβλημα συνδυασμένης διαχείρισης νερού και ενέργειας, εισάγονται οι βασικές έννοιες και εντοπίζονται οι ιδιαιτερότητες του προβλήματος, σε επίπεδο μεθοδολογιών και υπολογιστικής υλοποίησής τους. Περιγράφεται επίσης το μεθοδολογικό πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης ενός υδροηλεκτρικού συστήματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο, το οποίο βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση ενός μοντέλου εξαμηνιαίας προσομοίωσης λειτουργίας ταμειυτήρα με παραμέτρους τα κατασκευαστικά μεγέθη χωρητικότητα k και παροχτευτικότητα r . Το μοντέλο τροφοδοτείται από συνθετικές χρονοσειρές υδρολογικών εισροών για την παραγωγή των οποίων χρησιμοποιούνται κατάλληλα στοχαστικά σχήματα. Τέλος, γίνονται αναλύσεις ευαισθησίας με τροποποίηση του μήκους της χρονοσειράς εισροών.

Πιο αναλυτικά:

Στο *Κεφάλαιο 1* γίνεται μία επισκόπηση των βασικών εννοιών. Ορίζεται το σύστημα υδατικών πόρων και αναλύεται το υδατικό ισοζύγιο ενός ταμειυτήρα. Ορίζεται η έννοια της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης καθώς και η συνδυαστική τους εφαρμογή και η έννοια της αξιοπιστίας ως προς κάποιο στόχο που τίθεται για τη λειτουργία του ταμειυτήρα. Εισάγεται η έννοια της στοχαστικότητας και το πώς αυτή υπεισέρχεται σε κάθε στάδιο λειτουργίας. Τέλος επεξηγούνται βασικές έννοιες της υδροηλεκτρικής ενέργειας και γίνεται σύνδεση με την έννοια της στοχαστικότητας, τονίζοντας την αναγκαιότητα της προσομοίωσης-βελτιστοποίησης για την αποτίμηση της επίδοσης ενός υδροηλεκτρικού έργου.

Στο *Κεφάλαιο 2* αναπτύσσεται το μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης μέσα από μία γενική διατύπωση ενός υποθετικού προβλήματος. Αναπτύσσονται αναλυτικά όλες οι σχέσεις και οι περιορισμοί που διέπουν τη λειτουργία του συστήματος και ορίζονται η συνάρτηση και οι μεταβλητές της βελτιστοποίησης. Γίνεται επίλυση για πραγματικές τιμές και γίνεται επιπλέον σύγκριση της εγγυημένης ενέργειας για την ίδια αξιοπιστία πριν και μετά τη βελτιστοποίηση.

Στο *Κεφάλαιο 3* αναπτύσσεται το μοντέλο σε περιβάλλον Matlab, εξυπηρετώντας πολλαπλές και ταυτόχρονες επαναλήψεις της διαδικασίας. Στη συνέχεια αναπτύσσεται κώδικας με αλλαγή ανά βήμα των δύο κατασκευαστικών μεγεθών, της χωρητικότητας και της παροχτευτικότητας συνδυαστικά, καθώς επίσης και της εμμονής της χρονοσειράς εισροών, με πολλαπλές επιλύσεις.

Αυτό γίνεται για να την αναπαράσταση ενός χώρου βέλτιστων λύσεων όπου θα είναι οπτικά ευκολότερη η εύρεση του/των συνδυασμού/-ών όπου το όφελος είναι το μέγιστο.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Απεικονίζονται και σχολιάζονται οι χώροι βέλτιστων λύσεων για δεκαπέντε διαφορετικές χωρητικότητες ταμειυτήρα σε συνδυασμό με δέκα διαφορετικές παροχτετευτικότητες ως προς το μέσο όφελος, το στόχο ενεργειακής παραγωγής και το μέσο ποσοστό αστοχιών. Ακολουθούν χαρακτηριστικές τομές των τρισδιάστατων επιφανειών μίας συγκεκριμένης χρονοσειράς, για μια πιο εποπτική σύγκριση της πορείας των αποτελεσμάτων.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται ανάλυση ευαισθησίας ως προς το μήκος της χρονοσειράς εισροών. Επαναλαμβάνονται οι επιλύσεις για μικρότερα μήκη χρονοσειράς και εξετάζεται η στατιστική συμπεριφορά τους. Ομοίως ακολουθούν κι εδώ οι αντίστοιχες με του Κεφ. 4 χαρακτηριστικές τομές και σχολιάζονται τα αποτελέσματα. Σκόπιμος είναι ο έλεγχος χρήσης βραχύτερων χρονοσειρών (όπως πχ ιστορικών) με την ίδια εγκυρότητα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο απαιτούμενος χρόνος επίλυσης και ο υπολογιστικός φόρτος.

Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται σε ένα πιο σφαιρικό πλαίσιο τα συμπεράσματα και οι δυνητικές κατευθύνσεις για την προσέγγιση ενός προβλήματος τέτοιας φύσης, συμπληρωματικά με τα πιο ειδικά σχόλια των σχημάτων των κεφαλαίων 5 και 6

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ένα Σύστημα Υδατικών Πόρων (ΣΥΠ - Water Resource System) είναι ένα σύστημα που αποτελείται από φυσικά υδάτινα σώματα και τεχνικά έργα σε συνεργασία μεταξύ τους, που αποσκοπούν στην αξιοποίηση του νερού ως φυσικού πόρου (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1997). Η λειτουργία ενός ΣΥΠ δεν περιλαμβάνει τον έλεγχο του φαινομένου της πλημμύρας για την αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών, όπως στην περίπτωση του Υδροσυστήματος (Hydrosystem) μίας έννοιας-υπερσυνόλου του ΣΥΠ, του οποίου η λειτουργία δύναται να είναι και αντιπλημμυρική.

Η Διαχείριση Υδατικών Πόρων είναι το σύνολο μέτρων, κατασκευαστικών και μη για τον έλεγχο των υδατικών συστημάτων, φυσικών και μη, με στόχο την ωφέλεια τόσο του ανθρώπου όσο και του περιβάλλοντος (Grigg, 1996).

Η ωφέλεια αυτή μεταφράζεται:

- ✓ Στην ικανοποίηση των ανθρώπινων αναγκών για νερό επαρκούς ποσότητας και κατάλληλης ποιότητας
- ✓ Στην προστασία του πληθυσμού από ακραία φαινόμενα όπως πλημμύρες και ξηρασίες
- ✓ Στη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των υδατικών πόρων για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών
- ✓ Στη βιωσιμότητά τους που εξασφαλίζεται με τη διατήρηση μελλοντικών αποθεμάτων και την αποφυγή μη αναιρέσιμων παρεμβάσεων
- ✓ Στην προστασία των υδατικών πόρων από τη ρύπανση και την αισθητική υποβάθμιση
- ✓ Στον περιορισμό της αβεβαιότητας (υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας)

Ειδικότερα το καθεστώς υδρολογικής αβεβαιότητας που a priori επιβάλλεται από τη φύση, δημιουργεί ένα σύνολο φυσικών και λειτουργικών περιορισμών που πρέπει να λάβει υπόψη ένας μελετητής οποιασδήποτε μεθοδολογίας, εντείνοντας την πολυπλοκότητα της διαχείρισης. Άλλοι παράγοντες που υπαγορεύουν τους περιορισμούς αυτούς είναι η μη γραμμικότητα των φυσικών διεργασιών, η ανάγκη ταυτόχρονης ικανοποίησης πολλαπλών απαιτήσεων που επιβάλλονται από ομάδες με διαφορετικά συμφέροντα, η αβεβαιότητα της ζήτησης (σε μικρότερο βαθμό), η ανάγκη εξορθολογισμού του διπλού διακινδύνευση-όφελος και η αναγωγή της ολοκληρωμένης προσέγγισης σε μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα.

Έτσι, οι δύο γενικές αρχές που πρέπει να γίνουν αποδεκτές για την αντιμετώπιση προβλημάτων διαχείρισης είναι:

- Η αποδοχή της αβεβαιότητας
 - Αδυναμία μίας μακροπρόθεσμης ντετερμινιστικής πρόγνωσης
Η υψηλή πολυπλοκότητα των φυσικών διεργασιών δημιουργεί την υδρολογική αβεβαιότητα και έτσι δεν μπορούν να γίνουν ασφαλείς προγνώσεις μακροπρόθεσμα.
 - Ανάγκη ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας με στατιστικές φόρμες
Το πρώτο βήμα για αυτό είναι η θεώρηση των υδρολογικών μεγεθών ως τυχαίες μεταβλητές και η αντιμετώπισή τους ως στοχαστικές ανελίξεις.
- Η αποδοχή της διακινδύνευσης
 - Αδυναμία εξασφάλισης της απόλυτης ασφάλειας
Δεν μπορούν να μπουν όρια στη φύση.
 - Ποσοτικοποίηση του ρίσκου βάσει της θεωρίας πιθανοτήτων
 - Ανοιχτή υιοθέτηση της διακινδύνευσης σε ανεκτές ποσοστιαίες εκφράσεις (πχ 1%)

1.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

Πριν από οποιαδήποτε ανάλυση, θεωρείται δόκιμη η υπενθύμιση κάποιων βασικών εννοιών περί λειτουργίας των ταμιευτήρων των συστημάτων υδατικών πόρων.

1.2.1 Υδατικό Ισοζύγιο

Το υδατικό ισοζύγιο στηρίζεται στην εξίσωση συνέχειας και είναι η βασική σχέση που διέπει τη λειτουργία ενός ταμιευτήρα.

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

[1.1]

, όπου:

dS/dt , ο ρυθμός μεταβολής του αποθέματος S

$I(t)$, οι αθροιστικές εισροές

$O(t)$, οι αθροιστικές εκροές

Οι εισροές διαμορφώνονται πρωτίστως από τις απορροές στα ανάντη της λεκάνης (επιφανειακές και υπόγειες) και δευτερευόντως από τις κατακρημνίσεις στην επιφάνεια του ταμιευτήρα (βροχή, χιόνι).

Οι εκροές αποτελούνται από την εξάτμιση της επιφάνειας του ταμιευτήρα, τις υπόγειες διαφυγές, τις απολήψεις και τις απώλειες λόγω υπερχείλισεων.

1.2.2 Μοντέλο Λειτουργίας Ταμιευτήρα

Η λειτουργία του ταμιευτήρα αποσκοπεί στη ρύθμιση των φυσικών ακανόνιστων εισροών για να δώσει πιο κανονικές εκροές, βάσει της ζήτησης για διάφορες χρήσεις νερού (ύδρευση, άρδευση, ενέργεια), εξασφαλίζοντας προσωρινή αποθήκευση του πλεονάζοντος νερού όταν οι εισροές ξεπερνούν τις εκροές (Koytsoyiannis, 2005).

Για την περιγραφή της συνάρτησης λειτουργίας του ταμιευτήρα ορίζονται οι ακόλουθες έννοιες:

- Ωφέλιμο Απόθεμα S_t (Storage): Ο αποθηκευμένος όγκος νερού σε ένα χρόνο t , πάνω από την ελάχιστη στάθμη λειτουργίας. Ισχύει:

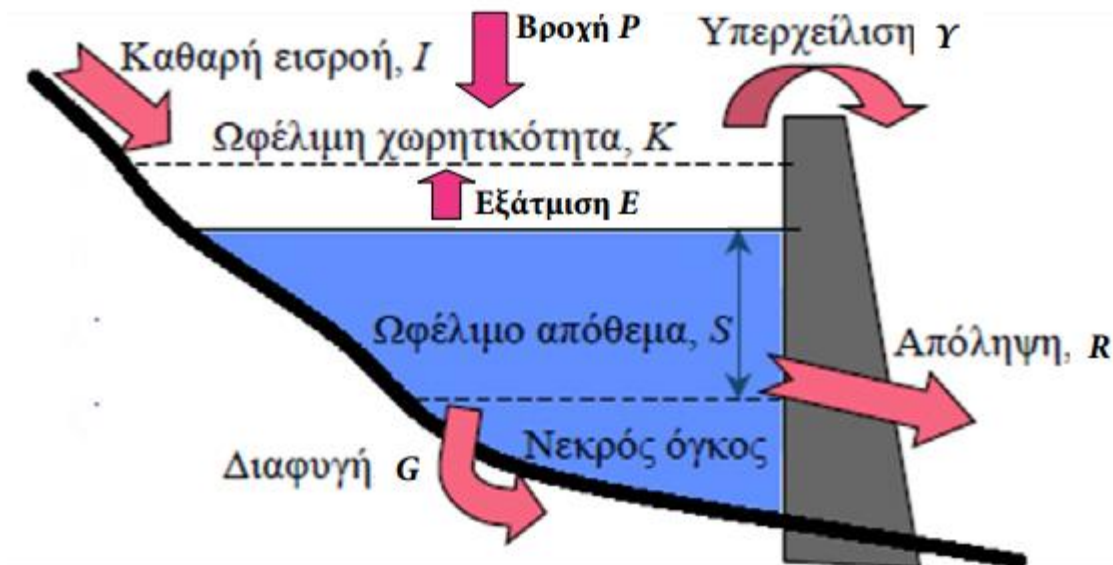
$$0 < S_t < c$$

, όπου c η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα ως τη στάθμη υπερχείλισης

- Καθαρή Εισροή X_t (Net Inflow): Είναι το αλγεβρικό άθροισμα των συσσωρευμένων εισροών στο διάστημα $(t-1, t)$ αφαιρώντας τις απώλειες στο ίδιο διάστημα. Η πλειονότητα των εισροών είναι η απορροή της λεκάνης στα ανάντη του ταμιευτήρα. Στις εισροές συμβάλλει επίσης η επιφανειακή βροχόπτωση και ενίοτε ενδολεκάνεια επικοινωνία από υπόγεια φυσική ή τεχνητή δίοδο. Οι απώλειες περιλαμβάνουν την επιφανειακή εξάτμιση, πιθανές υπόγειες διαρροές και διαρροές μέσα και κάτω από το φράγμα
- Ζήτηση Νερού d_t (Water Demand): Είναι η συνολική απαίτηση σε νερό για διάφορες χρήσεις στο διάστημα $(t-1, t)$, οι οποίες ποικίλλουν ανά περίοδο (πχ αρδευτικές περίοδοι) αλλά και ανάλογα με το διαθέσιμο απόθεμα στον ταμιευτήρα.
- Πραγματική Απόληψη R_t : Η ποσότητα νερού που λαμβάνεται για την κάλυψη της ζήτησης στο διάστημα $(t-1, t)$. Προφανώς ισχύει

$$R_t \leq d_t$$

- Υπερχείλιση W_t : Είναι το πλεονάζον νερό που δεν μπορεί να αποθηκευθεί (σε περιόδους πλημμυρών ή σε διαδοχικούς υψηλούς ωφέλιμους όγκους) στον ταμιευτήρα, πάνω από το όριο της ωφέλιμης χωρητικότητας c .



Σχήμα 1.1 Υδατικό Ισοζύγιο Ταμιευτήρα (Πηγή: Μπουζιώτας 2012)

Έτσι το υδατικό ισοζύγιο διαμορφώνεται ως εξής:

ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

$S_t = \max (0, \min \{S_{t-1} + X_t - \delta_t, c\})$	[1.2]
$R_t = \min (S_{t-1} + X_t, \delta_t)$	[1.3]
$W_t = S_{t-1} - S_t + X_t - R_t = \max \{0, S_{t-1} + X_t - \delta_t - c\}$	[1.4]

1.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για την ανάλυση ενός ΣΥΠ, απαραίτητη προϋπόθεση είναι το σύστημα να μοντελοποιηθεί, καθώς η πολυπλοκότητά του, παρούσας και της υδρολογικής αβεβαιότητας, καθιστά αδύνατη την εύρεση αναλυτικής λύσης. Έτσι γίνεται η παραδοχή μιας πιο απλοποιημένης λειτουργίας του, χωρίς τη λεπτομερειακή θεώρηση των σχέσεων ή φυσικών διεργασιών που το διέπουν (Grigg, 1996), αλλά με μαθηματικές και λογικές εκφράσεις και σε ένα μεγαλύτερο χρονικό βήμα, εντός του οποίου η λειτουργία του συστήματος θεωρείται αδιατάρακτη. Ως εκ τούτου έχουν αναπτυχθεί εξελιγμένα εργαλεία προσομοίωσης.

Προσομοίωση (simulation) είναι η τεχνική μίμησης της λειτουργίας ενός πραγματικού συστήματος, όπως αυτό εξελίσσεται στον χρόνο (Winston, 1994, σ. 23). Μοντέλο προσομοίωσης (simulation model) είναι ένα σύνολο υποθέσεων σχετικά με την δυναμική λειτουργία ενός συστήματος,

εκφρασμένων με τη μορφή μαθηματικών ή λογικών σχέσεων και κωδικοποιημένων, συνήθως, σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού (Κουτσογιάννης, 2000).

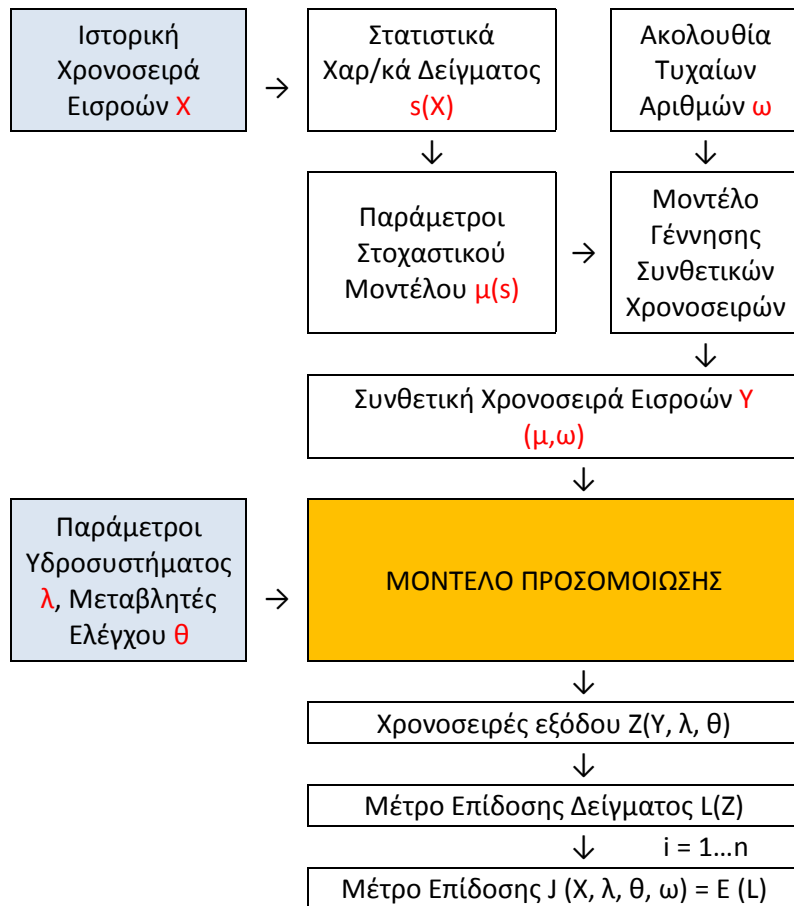
Στοχαστική προσομοίωση (stochastic simulation) ή μέθοδος Monte Carlo, περιλαμβάνει υπολογιστικές τεχνικές δειγματοληψίας τυχαίων αριθμών, για προβλήματα τα οποία είναι δύσκολο ή και αδύνατο να επιλυθούν με αναλυτικό τρόπο.

Η στοχαστική προσομοίωση εφαρμόζεται ευρέως στα υδατικά συστήματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από την υδρολογική αβεβαιότητα. Για την προσομοίωση του συστήματος εισάγονται συνθετικά δεδομένα εισόδου που έχουν προκύψει υπολογιστικά από μια αλληλουχία τυχαίων αριθμών της ίδιας στατιστικής κατανομής. Οι αποκρίσεις είναι επίσης συνθετικές και αντιπροσωπευτικές της στατιστικής συμπεριφοράς του πραγματικού συστήματος. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές για διάφορες ομάδες συνθετικών δεδομένων εισόδου.

Εφόσον η λειτουργία ενός πραγματικού φυσικού συστήματος αναπαρίσταται με ένα μαθηματικό μοντέλο, θεωρητικά για την ίδια είσοδο δεδομένων (input), η φυσική απόκριση (system output) με τη μαθηματική απόκριση (model output) ταυτίζονται και το μοντέλο είναι τέλειο. Ωστόσο στην πράξη, τα σφάλματα και οι αβεβαιότητες που υπεισέρχονται οδηγούν σε μία διαφορά των αποκρίσεων ως προς κάποιο κριτήριο προσαρμογής (πχ μέσο τετραγωνικό σφάλμα), το οποίο είναι ένδειξη της αξιοπιστίας (validity) του εκάστοτε μοντέλου προσομοίωσης και κριτήριο για την εκλογή του καταλληλότερου.

Μετά την κατασκευή και εκλογή ενός αξιόπιστου μοντέλου, αυτό μπορεί να εφαρμοστεί με σκοπό τον προσδιορισμό αποκρίσεων συστήματος, εισάγοντας δεδομένα πρόγνωσης. Το μοντέλο δηλαδή χρησιμοποιείται ως εργαλείο πρόγνωσης (forecast).

Αν τα δεδομένα εισόδου και οι παράμετροι του μοντέλου είναι γνωστές, το μοντέλο είναι ντετερμινιστικό (deterministic) και η μαθηματική του απόκριση είναι αμφιμονοσήμαντη. Αν τα δεδομένα εισόδου και οι παράμετροι είναι τυχαίες μεταβλητές, δηλ. περιγράφονται από συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας, το μοντέλο είναι στοχαστικό (stochastic) και οι αποκρίσεις του είναι κατά συνέπεια τυχαίες μεταβλητές.



Σχήμα 1.2 Στοχαστικό Μοντέλο Προσομοίωσης

Όπως φαίνεται στο σχήμα, ένα μοντέλο προσομοίωσης λαμβάνει ως εξωτερικές διεγέρσεις τις παραμέτρους εισόδου X και με τη βοήθεια των παραμέτρων λ παράγεται η απόκριση εξόδου $Z(X, \lambda)$ ή αναλυτικότερα $Z(Y, \lambda, \theta)$. Οι παράμετροι του μοντέλου μπορεί να είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν μία στατιστική κατανομή παραμέτρων μ . Ως αποτέλεσμα, οι παράμετροι εξόδου ως συναρτήσεις των, είναι τυχαίες μεταβλητές.

1.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για τη διαχείριση ενός συστήματος υδατικών πόρων, η μεθοδολογική προσέγγιση συνοψίζεται σε μια διαδοχή εναλλακτικών αποφάσεων και στην αξιολόγηση των επιπτώσεων της εκάστοτε απόφασης. Ο βέλτιστος συνδυασμός αποφάσεων, θα έχει επομένως το ελάχιστο δυνατό σύνολο επιπτώσεων, χαράσσοντας την εκάστοτε διαχειριστική πολιτική. Ως εκ τούτου έχουν αναπτυχθεί εξελιγμένα εργαλεία βελτιστοποίησης.

Βελτιστοποίηση (optimization) κατά γενικό ορισμό, είναι η διαδικασία σχεδιασμού ή λειτουργίας ενός συστήματος, η οποία κάνει το σύστημα όσο το δυνατόν καλύτερο κατά μία προκαθορισμένη έννοια. Μαθηματικά αυτό ισοδυναμεί με την εύρεση μίας ή περισσότερων λύσεων, οι οποίες είναι

οι καλύτερες δυνατές (Ναλμπάντης, 2007). Με την έννοια σύστημα νοείται το σύνολο φυσικών ή ανθρωπογενών στοιχείων που αλληλεπιδρούν ως συνιστώσες μεταξύ τους και το αποτέλεσμα είναι διαφορετικό από εκείνο που θα παρήγαγε κάθε συνιστώσα ξεχωριστά (Ναλμπάντης, 2007).

Η βελτιστοποίηση είναι μια μαθηματική μέθοδος που δίνει απαντήσεις σε προβλήματα λήψης αποφάσεων. Πραγματοποιείται σε ένα σύνολο άγνωστων πραγματικών μεταβλητών, οι οποίες ονομάζονται μεταβλητές απόφασης (decision variables).

Κάθε ένας συνδυασμός τιμών των μεταβλητών απόφασης πραγματοποιεί μία συγκεκριμένη απόφαση. Κατ'επέκταση, το σύνολο όλων των δυνατών αποφάσεων ορίζει έναν χώρο, το χώρο αποφάσεων (decision space). Ο χώρος αποφάσεων μπορεί να είναι συνεχής, αν οι μεταβλητές απόφασης είναι συνεχείς, συνήθως πραγματικοί αριθμοί, ή διακριτός αν αυτές παίρνουν διακριτές τιμές και απεικονίζονται ως σημεία στο χώρο αυτό (Ναλμπάντης, 2007)

Σε κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης οι άγνωστες μεταβλητές υπόκεινται σε περιορισμούς διάφορων ειδών, οι οποίοι οριοθετούν το πεδίο τιμών τους και εκφράζονται συναρτήσει αυτών. Εφόσον μια απόφαση ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς που έχουν τεθεί, χαρακτηρίζεται εφικτή (feasible decision) και ακολούθως εφικτή χαρακτηρίζεται η αντίστοιχη περιοχή – τμήμα του χώρου αποφάσεων (feasible region).

Σε αυτό τον χώρο εφικτών αποφάσεων, σκοπός είναι να επιλεγεί η καλύτερη εφικτή απόφαση. Γι'αυτό ορίζεται η συνάρτηση στόχου ή κριτήριο απόφασης ή κριτήριο βελτιστοποίησης. Πρόκειται για μια σχέση συναρτησιακής μορφής με ανεξάρτητες μεταβλητές X_j τις μεταβλητές απόφασης και εξαρτημένη μεταβλητή $f(X)$ το κριτήριο βελτιστοποίησης, δηλαδή το μέγεθος που είναι επιθυμητό να ελαχιστοποιηθεί ($\min f(X)$) ή να μεγιστοποιηθεί ($\max f(X)$) και να υπαγορεύσει τη λήψη της καλύτερης απόφασης.

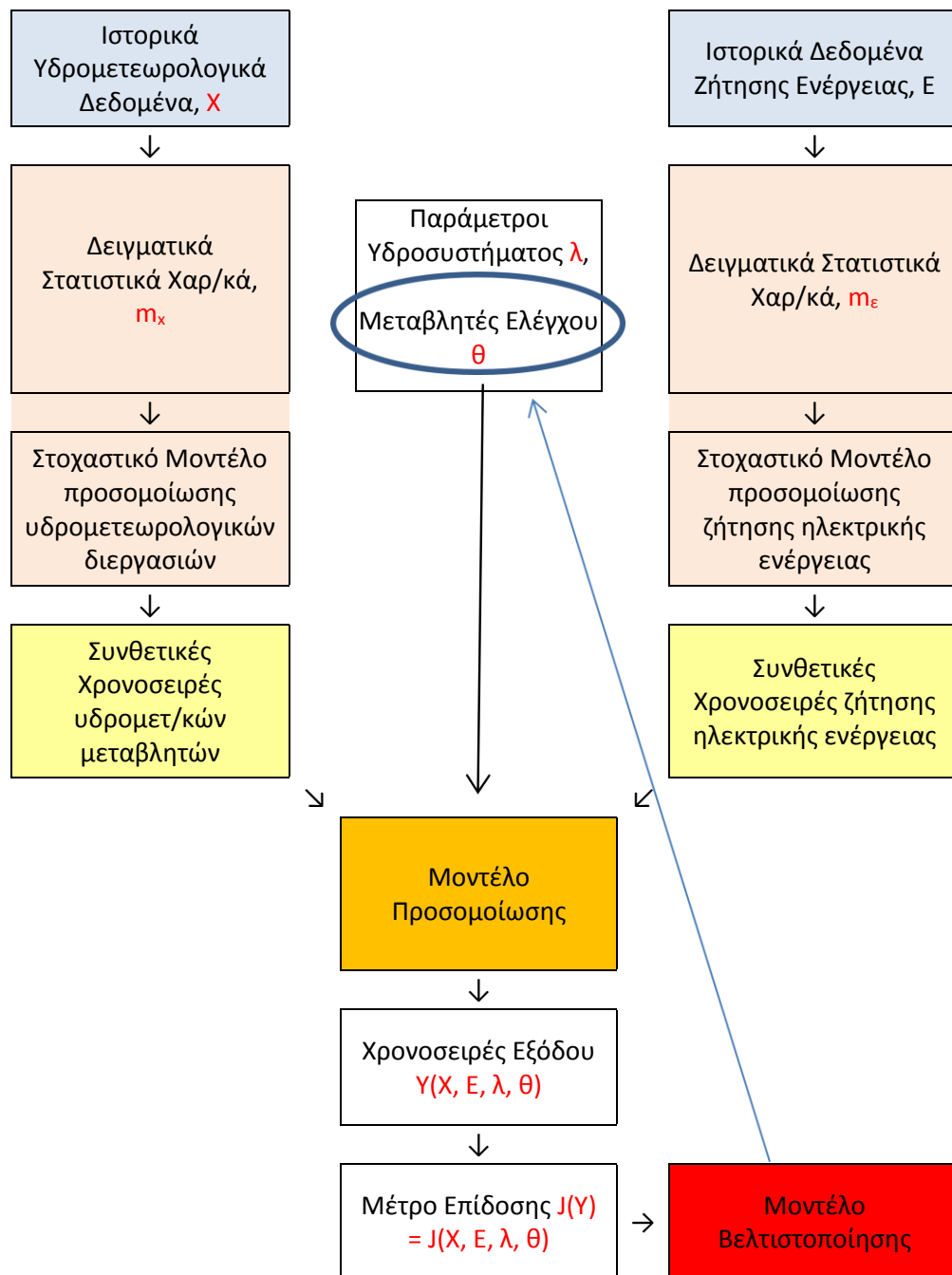
Στους ταμειευτήρες οι περιορισμοί που επιβάλλονται στη βελτιστοποίηση μπορούν να είναι:

- Φυσικοί, λόγω των χαρακτηριστικών μεγεθών των τεχνικών έργων (χωρητικότητα ταμειυτήρα, κατώτατη στάθμη υδροληψίας, παροχετευτικότητα, ισχύς τουρμπινών κτλ)
- Λειτουργικοί, για την κάλυψη των διάφορων χρήσεων αλλά και λόγω κινήτρων πολιτικής, νομικής, περιβαλλοντικής κ.α φύσης

1.5 ΣΥΖΕΥΞΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στα κλασικά εγχειρίδια ανάλυσης συστημάτων υδατικών πόρων (Biswas, 1976· Loucks et al. 1981· Mays and Tung, 1996), η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση θεωρούνται ξεχωριστές τεχνικές. Η προσομοίωση παρέχει ακρίβεια στην περιγραφή των διεργασιών, ενώ η βελτιστοποίηση εντοπίζει τις βέλτιστες διαχειριστικές πολιτικές, καταφεύγοντας ωστόσο ενίοτε σε υπεραπλουστεύσεις της δυναμικής του υδροσυστήματος (π.χ. γραμμικοποιήσεις). Η απάντηση στα ζητήματα αυτά είναι ο συνδυασμός των δύο μεθόδων, δηλ. η ένταξη της στοχαστικής προσομοίωσης στη βελτιστοποίηση, τεχνική που αποκαλείται στοχαστική βελτιστοποίηση (stochastic optimization).

Ουσιαστικά, οι παράμετροι και τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για να βρεθεί η τιμή της συνάρτησης στόχου. Το "τρέξιμο" διαδοχικών προσομοιώσεων επιτρέπει την αναδιατύπωση ορισμένων παραμέτρων εισόδου του μοντέλου θ και εξάγει το τελικό μέτρο επίδοσης εκπεφρασμένο ως μέσο όρο των αποτελεσμάτων. Έτσι όσες περισσότερες προσομοιώσεις εκτελούνται, τόσο πιο ικανοποιητικά θα είναι και τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης.



Σχήμα 1.3 Σύζευξη Στοχαστικής Προσομοίωσης - Βελτιστοποίησης σε Υδροηλεκτρικό Έργο

1.6 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ

Τα μεγάλα έργα αξιοποίησης των υδατικών πόρων διαταράσσουν το φυσικό καθεστώς υδροφορίας, ρυθμίζοντας τη δίαιτα του νερού τόσο χρονικά (αποθήκευση νερού και απόδοσή του μεταγενέστερα) όσο και χωρικά (μεταφορά νερού εντός της ίδιας λεκάνης ή μεταξύ διαφορετικών λεκανών). Τα σύνθετα υδροενεργειακά συστήματα περιλαμβάνουν πολλαπλές πηγές νερού και ενέργειας, πολλαπλές ζητήσεις και πολλαπλούς περιορισμούς. Έτσι, η εκτίμηση της αξιοπιστίας ή,

ισοδύναμα, της πιθανότητας αστοχίας, της παραγωγής νερού ή ενέργειας δεν είναι εφικτή αναλυτικά, αλλά γίνεται εμπειρικά, υπολογίζοντας την συχνότητα ικανοποίησης της ζήτησης, από ένα επαρκώς μεγάλο δείγμα εκροών νερού ή παραγωγής ενέργειας.

Ειδικότερα, αν είναι διαθέσιμη μια προσομοιωμένη χρονοσειρά της ζητούμενης μεταβλητής απόκρισης του συστήματος, η πιθανότητα αστοχίας α , εκτιμάται εμπειρικά ως η συχνότητα των αντίστοιχων ελλειμμάτων, δηλαδή:

$$\alpha = n' / n$$

[1.5]

όπου n' το πλήθος των χρονικών βημάτων κατά τα οποία δεν επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή x^* και n το σύνολο των προσομοιωμένων τιμών της τυχαίας μεταβλητής X , δηλαδή το μήκος της προσομοίωσης. Τονίζεται ότι επειδή η πιθανότητα αστοχίας εκτιμάται από πεπερασμένου μήκους δείγματα, λαμβάνει μόνο διακριτές τιμές από το σύνολο $\{0, 1/n, \dots, 1\}$.

Η αστοχία ενός συστήματος μπορεί να είναι αστοχία κατασκευαστική, όπου η καταστροφή της κατασκευής εμποδίζει την ικανότητα του συστήματος να λειτουργήσει κατά το επιθυμητό ή αστοχία λειτουργίας, όπου δεν εμπεριέχεται απαραίτητα κατασκευαστικό σφάλμα αλλά εκφράζεται περισσότερο ως η αδυναμία του συστήματος να λειτουργήσει κατά το επιθυμητό σε κάποια χρονική στιγμή της περιόδου ενδιαφέροντος με βραχυπρόθεσμες ανεπιθύμητες συνέπειες (Koutsoyiannis, 2004).

Ως αξιοπιστία (reliability) ορίζεται η πιθανότητα α επίτευξης μιας συγκεκριμένης επίδοσης για καθορισμένο χρονικό διάστημα και καθορισμένες συνθήκες (Chow et al., 1988, σ. 434) και δίνεται από τη σχέση:

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

[1.6]

Μαθηματικά η πιθανότητα αστοχίας β είναι συμπληρωματική της αξιοπιστίας και ορίζεται ως:

$$\beta = 1 - \alpha = P(X < x^*)$$

[1.7]

όπου:

X , τυχαία μεταβλητή που εκφράζει ένα ποσοτικό μέτρο επίδοσης του συστήματος (π.χ. απόληψη, παραγωγή ενέργειας)

x^* , η επιθυμητή τιμή (τιμή-στόχος) της εν λόγω επίδοσης.

Τονίζεται ότι η επίδοση του συστήματος θεωρείται τυχαία μεταβλητή, καθώς είναι συνάρτηση των υδρολογικών εισροών, που είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές (Koutsoyiannis, 2004a).

Για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας μπορεί να εξασφαλιστεί η ασφαλής απόληψη (safe yield), εκπεφρασμένη στο επιλεγμένο χρονικό βήμα, η οποία μπορεί να καλύψει τη δηλωμένη ζήτηση.

Εν προκειμένω στην παρούσα εργασία, ο λειτουργικός στόχος που εξετάζεται, είναι η παραγωγή ενέργειας και όταν υφίσταται αδυναμία εκπλήρωσης, γίνεται λόγος για αστοχία απόδοσης (performance failure). Η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από το ύψος πτώσης το οποίο για κάθε χρονικό βήμα προσδιορίζεται στα πλαίσια της προσομοίωσης λειτουργίας ταμιευτήρα. Έτσι η αξιοπιστία ορίζεται ως προς το στόχο παραγωγής ενέργειας, ο οποίος προσδιορίζεται μέσα από την εφαρμογή συνδυασμένης προσομοίωση-βελτιστοποίησης. Αν ο στόχος είναι μόνο η απόληψη νερού, χωρίς να υπεισέρχονται ενεργειακές συνιστώσες, η διαδικασία απλοποιείται αρκετά και δεν απαιτείται βελτιστοποίηση.

Η αξιόπιστη επίδοση του συστήματος, η οποία αναφέρεται σε ορισμένο χρονικό διάστημα, μπορεί να εκφραστεί με ένα επίπεδο αξιοπιστίας α^* . Ένα υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας της τάξης του 95-99 % είναι το ιδεατό στη διαχείριση υδατικών πόρων και βασικός στόχος είναι η εύρεση του x^* που αντιστοιχεί σε τέτοια ποσοστιαία πεδία.

1.7 Ο ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

1.7.1 Στοχαστική Ανέλιξη

Η συνύπαρξη της αιτιότητας και της τυχειότητας στα υδρολογικά και όχι μόνο φαινόμενα και η χρονική μεταξύ τους συσχέτιση, υπαγορεύουν την αναγνώριση του στοχαστικού χαρακτήρα τους και την αντιμετώπισή τους ως στοχαστικές ανελιξεις.

Στοχαστική ανέλιξη X_t , είναι ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών σε χρονική συνήθως ακολουθία, όπου t μπορεί να είναι μήνες, έτη κτλ, πχ μήνες μελέτης μιας λεκάνης απορροής. Η υλοποίηση μιας στοχαστικής ανέλιξης είναι η γνωστή χρονοσειρά και μπορεί να είναι το σύνολο των μετρήσεων μιας απορροής σε διατεταγμένη σειρά. Χρήσιμα στατιστικά χαρακτηριστικά μιας στοχαστικής ανέλιξης είναι η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, η αυτοσυνδιασπορά και ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης.

- Μέση τιμή: $\mu(t) = E[X(t)]$ [1.8]

- Τυπική απόκλιση: $\sigma(t) = \sqrt{Var[X(t)]} = \sqrt{E[(X(t) - \mu(t))^2]}$ [1.9]

- Αυτοσυνδιασπορά ταξης τ : $\gamma(t;\tau) = Cov[X(t), X(t+\tau)] = E[(X(t)-\mu(t))(X(t+\tau)-\mu(t+\tau))]$ [1.10]

- Συντελεστής αυτοσυσχέτισης τάξης r (με τιμές $[-1,1]$): $\rho(t;\tau) = \frac{\text{Cov}[X(t),X(t+\tau)]}{\sqrt{\text{Var}[X(t)]*\text{Var}[X(t+\tau)]}}$ [1.11]

Βάσει της υπόθεσης στασιμότητας, τα υδρολογικά μεγέθη γενικά δεν μεταβάλλουν τις παραμέτρους τους με το χρόνο, επιτρέποντας την εκτίμηση φαινομένων από μια απλή σειρά παρατηρημένων τιμών.

Εκτός από τη χρονική εξάρτηση μιας ανέλιξης, μπορεί να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ υδρολογικών μεταβλητών (πχ η άμεση εξάρτηση της απορροής από τη βροχή), κάτι που εκφράζεται με τα χαρακτηριστικά της ετεροσυνδυασφοράς και του συντελεστή ετεροσυσχέτισης μεταξύ δύο διαφορετικών στοχαστικών ανελίξεων $X(t)$, $Y(t)$.

- Ετεροσυσχέτιση: $C_{XY}(\tau) = \text{Cov}[X(t), Y(t+\tau)]$ [1.12]

- Συντελεστής ετεροσυσχέτισης τάξης τ , δύο ανελίξεων: $r_{XY}(\tau) = \frac{\text{Cov}[X(t),Y(t+\tau)]}{\sqrt{\text{Var}[X(t)]*\text{Var}[Y(t+\tau)]}}$ [1.13]

Επειδή συνήθως δύο στοχαστικές ανελίξεις συγκρίνονται στο ίδιο χρονικό βήμα, εξετάζεται ο συντελεστής μηδενικής τάξης.

1.7.2 Δυναμική Hurst - Kolmogorov

Το γεγονός ότι οι πραγματικές φυσικές διεργασίες συμπεριφέρονται διαφορετικά από μία ιδεατή ρουλέτα - όπου οι οι διαφορές αναφέρονται σε μεγάλες "αποδράσεις" του τοπικού μέσου από τον καθολικό μέσο - έχει αποκληθεί δυναμική (ή συμπεριφορά ή πραγματικότητα) Hurst - Kolmogorov (Koutogiannis & Cohn, 2008).

Το 1940 ο Kolmogorov εισήγαγε την έννοια της στοχαστικής ανέλιξης. Ακολούθως το 1950 ο Hurst, μελετώντας ένα μεγάλο αριθμό φυσικών χρονοσειρών παρατήρησε ότι αν και εμφανίζεται ομαδοποίηση ομοειδών καταστάσεων και σε τυχαία γεγονότα, η τάση ομαδοποίησης είναι μεγαλύτερη στα φυσικά γεγονότα, κάτι που είναι και οι ειδοποιός διαφορά μεταξύ τυχαίων και φυσικών γεγονότων. Η συμπεριφορά που παρατήρησε ο Hurst είναι η πλέον χαρακτηριστικότερη μιας στοχαστικής ανέλιξης.

Η δυναμική Hurst - Kolmogorov αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως ομοιοθεσία (scaling) ή μακροπρόθεσμη εμμονή (persistence). Λόγω της εμμονής, οι χρονοσειρές παρουσιάζουν υψηλή χρονική αυτοσυσχέτιση για μεγάλες χρονικές τάξεις τ , με αποτέλεσμα την τάση ομαδοποίησης των υψηλών και των χαμηλών τιμών και την διαιώνιση θετικών συντελεστών αυτοσυσχέτισης.

Για την ποσοτικοποίηση και αξιολόγηση της εμμοής χρησιμοποιείται ο συντελεστής Hurst H , ο οποίος κυμαίνεται από 0 ως 1.

- Αν $H = 0.5$, οι τιμές είναι χρονικά ανεξάρτητες
- Αν $0.5 < H < 1$, υπάρχει εμμοή
- Αν $0 < H < 0.5$, υπάρχει αντι-εμμοή και πιθανόν μία μείωση των τιμών της χρονοσειράς να ακολουθείται από μια αύξησή τους.

Η έννοια της εμμοής είναι πολύ σημαντική στην Υδρολογία, καθώς μεταφράζεται σε παρατεταμένη εμφάνιση ξηρών ετών ή πλημμυρικών ετών και είναι καταλυτική τόσο για το σχεδιασμό όσο και για τη διαχείριση του ταμιευτήρα. Επομένως, κατά την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών είναι απαραίτητη η διατήρησή της - ιδίως στις απορροές. Βέβαια για τον προσδιορισμό της εμμοής απαιτούνται ιστορικές χρονοσειρές πολύ μεγάλου μήκους (100 έτη και άνω), κάτι που δεν είναι πάντοτε εφικτό. Η άγνοια ή παράβλεψη της εμμοής και μπορεί να οδηγήσει σε υποδιαστασιολογήσεις έργων άρα σε έργα με μειωμένη αξιοπιστία.

1.7.3 Συνθετικές Χρονοσειρές Εισροών

Η υδρολογική αβεβαιότητα οφείλεται στην υψηλή πολυπλοκότητα των φυσικών διεργασιών, με αποτέλεσμα να μη μπορούν να γίνουν ασφαλείς προγνώσεις μακροπρόθεσμα. Εξαιτίας της αβεβαιότητας, οι εισροές σε ένα ταμιευτήρα μπορούν να θεωρηθούν τυχαίες μεταβλητές καθώς και όλα τα υδρολογικά μεγέθη που εξαρτώνται από αυτές, όπως πχ το απόθεμα, οι εκροές κτλ. Ως εκ τούτου ανακύπτει η ανάγκη να παραχθούν συνθετικές χρονοσειρές εισροών με στοχαστικές μεθόδους.

Το πρώτο βήμα για τη δημιουργία μιας συνθετικής χρονοσειράς είναι η γέννηση τυχαίων αριθμών - η επονομαζόμενη δειγματοληψία Monte Carlo. Για μια τυχαία μεταβλητή x με συνάρτηση κατανομής F , μια ακολουθία x_i λέγεται ακολουθία τυχαίων αριθμών κατανομής $F(x)$, εφόσον αποτελεί δείγμα της x .

Για κάθε $F(x)$ μπορούν να κατασκευαστούν γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Μία γεννήτρια είναι συνήθως ένας αλγόριθμος αναδρομικού τύπου που δυνητικά παράγει απεριόριστο πλήθος τυχαίων αριθμών. Στην πραγματικότητα οι αριθμοί είναι ψευδοτυχαίοι, καθώς κάθε ακολουθία αριθμών πεπερασμένου μήκους αντιστοιχεί αμφιμονοσήμαντα σε συγκεκριμένες αρχικές συνθήκες που δίνονται στον αλγόριθμο και ως εκ τούτου επανεμφανίζεται όσες φορές και αν γίνει το "τρέξιμό" του.

1.7.4 Γέννηση τυχαίων αριθμών με μακροπρόθεσμη εμμονή

Η τάση ομαδοποίησης των ακραίων γεγονότων στην πάροδο του χρόνου και εν προκειμένω των εισροών, γνωστή ως υδρολογική εμμονή, οδήγησε μεταξύ άλλων και στην ανάπτυξη της μεθόδου του κυλιόμενου συμμετρικού μέσου (SMA), με την οποία γεννώνται τυχαίοι αριθμοί που εσωκλείουν μακροπρόθεσμη εμμονή.

Η SMA έχει εισαχθεί από τον Koutsoyiannis (2000) και μετασχηματίζει μία ακολουθία λευκού θορύβου v_i σε μια αυτοσυσχετισμένη ακολουθία x_i βάσει της αναδρομικής σχέσης:

$$x_i = \sum_{(j=-q)}^q a_{|j|} x_{i+j} = a_q v_{i-q} + \dots + a_1 v_{i-1} + a_0 v_i + a_1 v_{i+1} + \dots + a_q v_{i+q} \quad [1.14]$$

, όπου

a_j : συντελεστές βάρους

q : το θεωρητικά άπειρο πλήθος των συντελεστών βάρους

και για ανέλιξη HK είναι (Koutsoyiannis, 2002)

$$a_j \approx \frac{\sqrt{(2-2H)y_0}}{3-2H} [|j+1|^{H+0.5} + |j-1|^{H+0.5} - 2|j|^{H+0.5}] \quad [1.15]$$

, όπου

H : ο συντελεστής Hurst

1.8 Η ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.8.1 Πλεονεκτήματα Υδροηλεκτρικής Ενέργειας

Η Υδροηλεκτρική Ενέργεια (Υ/Η) ανήκει στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (βιομάζα, βιοαέριο, γεωθερμική, ηλιακή, αιολική, παλιρροϊκή, κυματική ενέργεια). Το 2015 η Υ/Η ενέργεια αποτέλεσε το 70% της ενέργειας που παρήχθη από ανανεώσιμες πηγές και το 16.6% της ενέργειας που παρήχθη παγκοσμίως, ποσοστό το οποίο αναμένεται να αυξάνει κατά 3.1% κάθε χρόνο για τα επόμενα 25 χρόνια. Το 2015 Στην Ελλάδα υπάρχουν 16 μεγάλα Υ/Η έργα.

Η Υ/Η ενέργεια αποτελεί μία από τις πλέον οικονομικά βιώσιμες μορφές και με τη μεγαλύτερη απόδοση (ως και πάνω 90%) λόγω μικρών απωλειών, καθώς αυτές οφείλονται μόνο στις υδραυλικές απώλειες στον αγωγό προσαγωγής και στις τριβές στους στροβίλους. Σε περιόδους αιχμής της ζήτησης είναι η πλέον κατάλληλη καθώς προσφέρει άμεση χρονική απόκριση παραγωγής (οι τουρμπίνες μπορούν να τεθούν σε λειτουργία αμέσως. Επίσης, όταν η Υ/Η ενέργεια

αποθηκεύεται σε μεγάλα έργα με αντιστροβίλους, είναι ανά πάσα στιγμή διαθέσιμη παρέχοντας υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας (95-99 %).

1.8.2 Βασική Λειτουργία ενός Υδροηλεκτρικού (Υ/Η) Έργου

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός Υ/Η έργου βασίζεται στην αξιοποίηση της δυναμικής ενέργειας του επιφανειακού νερού, με μετατροπή της σε κινητική μέσω του υδροστρόβιλου και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας.

Η ισχύς I σε kW είναι:

$$I = \eta \rho g Q H_{\text{net}}$$

[1.16]

όπου:

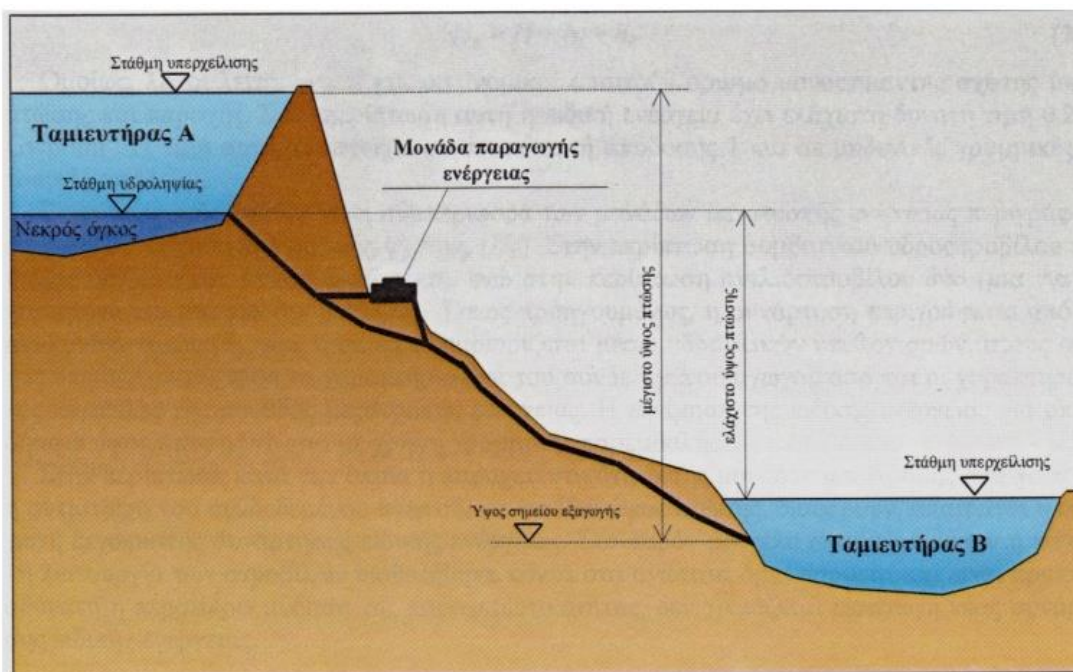
η , ο βαθμός απόδοσης

ρ , η πυκνότητα του νερού ($\approx 1 \text{ tn/m}^3$)

g , η επιτάχυνση της βαρύτητας ($\approx 9.81 \text{ m/s}^2$)

Q , η παροχή νερού που διέρχεται από τον υδροστρόβιλο (m^3/s)

H , το ακαθάριστο ύψος πτώσης με τις υδραυλικές απώλειες (m)



Σχήμα 1.4 Μονάδα παραγωγής Υδροηλεκτρικής Ενέργειας (Πηγή: Ευστρατιάδης και Ζερβός 1999)

Η παραγόμενη ενέργεια E σε kWh το χρονικό διάστημα Δt , είναι το ολοκλήρωμα της ισχύος ως προς dt :

$$E = \sum_{t=0}^{\Delta t} Idt$$

[1.17]

Η σχέση που συνδέει την παραγόμενη ενέργεια E σε GWh σε κάθε χρονικό βήμα με το ακαθάριστο ύψος πτώσης H (hm) μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή:

$$E = \psi V_{\text{net}} H$$

[1.18]

, όπου:

ψ , η ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ύψους πτώσης (ειδική ενέργεια)

V_{net} , ο όγκος νερού ο διερχόμενος από το στρόβιλο (hm^3)

Η ειδική ενέργεια για τους υδροστροβίλους μπορεί να εκφραστεί σε GWh/hm^4 , στη μορφή:

$$\psi = \eta \rho g (H_{\text{net}}/H)$$

[1.19]

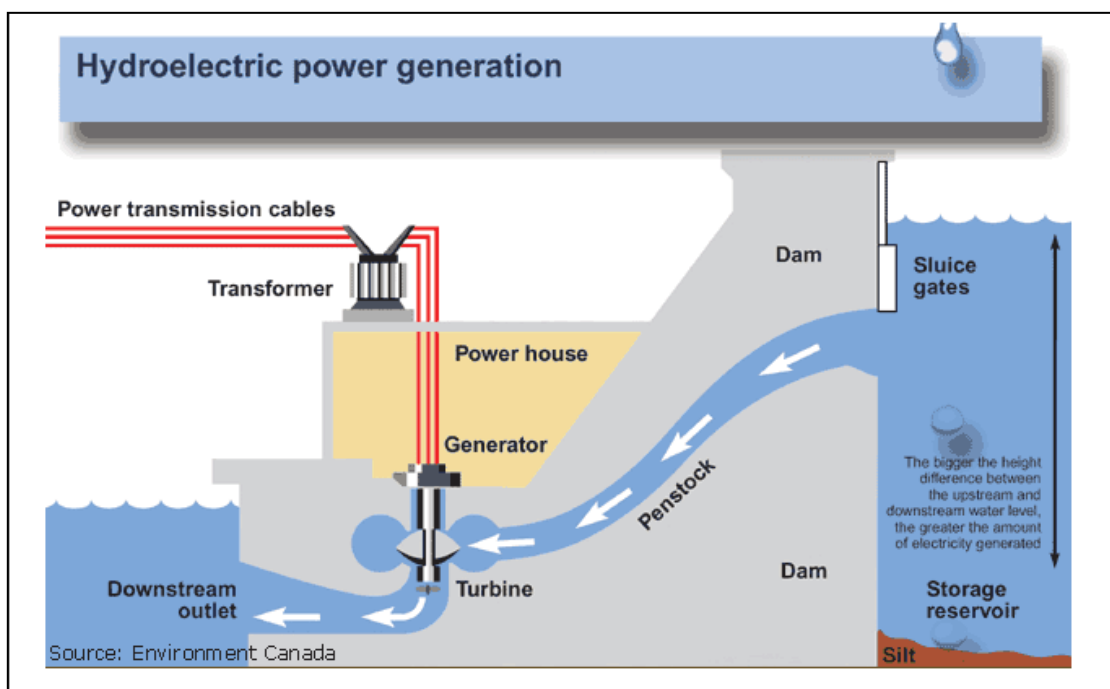
, όπου:

H_{net} , το συνολικό καθαρό ύψος πτώσης (hm) (εξαιρουμένων των γραμμικών και τοπικών απωλειών)

η , ο ολικός συντελεστής απόδοσης

ρ , η πυκνότητα του νερού

g , η επιτάχυνση της βαρύτητας



Σχήμα 1.5 Ο μηχανισμός παραγωγής Υδροηλεκτρικής Ενέργειας (Πηγή: Environment Canada)

1.8.3 Προσομοίωση στα Υ/Η έργα

Κατά κανόνα, στα μοντέλα προσομοίωσης υδροενεργειακών συστημάτων, οι χρήσεις νερού και ενέργειας και οι σχετικοί περιορισμοί (διαχειριστικοί, περιβαλλοντικοί, κτλ.) θεωρούνται γνωστές και διαχρονικά σταθερές. Στόχοι και περιορισμοί με εποχιακή μεταβλητότητα επίσης αντιμετωπίζονται θεωρώντας σταθερές τιμές ανά εποχή ή μήνα.

Στην πραγματικότητα, οι παραπάνω συνιστώσες διέπονται από σημαντικές αβεβαιότητες, που μάλιστα εξαρτώνται από τις τρέχουσες υδροκλιματικές συνθήκες (π.χ. ζήτηση υδρευτικού και αρδευτικού νερού, ζήτηση ενέργειας για θέρμανση και κλιματισμό) καθώς και από κοινωνικο-οικονομικούς παράγοντες. Υπό την προϋπόθεση της στασιμότητας, δηλαδή της αντιπροσωπευτικότητας της στατιστικής πληροφορίας του παρελθόντος, μπορούν και αυτές να θεωρηθούν τυχαίες μεταβλητές, οπότε αντί για σταθερές τιμές ζήτησης να εφαρμοστούν συνθετικές τιμές, κατ' αντιστοιχία με τις υδρομετεωρολογικές μεταβλητές εισόδου.

1.8.4 Πρωτεύουσα, Δευτερεύουσα Ενέργεια & Έλλειμα Ενέργειας

Γενικά η επίδοση ενός Υ/Η έργου αποτιμάται σε όρους πρωτεύουσας ενέργειας. Πρωτεύουσα είναι η εγγυημένη ενέργεια που καλύπτει επακριβώς το στόχο τη ζήτησης σε μια συγκεκριμένη χρονική βάση για δεδομένη αξιοπιστία. Οποιαδήποτε διαφορετική τιμή είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη του στόχου, δεν αποτελεί πρωτεύουσα ενέργεια και κοστολογείται διαφορετικά. Αν η τιμή της παραγόμενης ενέργειας είναι μεγαλύτερη από το στόχο, το πλεόνασμα ονομάζεται δευτερεύουσα ενέργεια και καθώς δεν είναι άμεσα αναγκαίο προς κατανάλωση, έχει αξία πολύ μικρότερη της πρωτεύουσας. Αν η τιμή της παραγόμενης ενέργειας είναι μικρότερη από το στόχο, παρουσιάζεται έλλειμμα ενέργειας και στην περίπτωση αυτή το συνολικό όφελος παραγωγής επιφορτίζεται με μια ποινική ρήτρα πολλαπλάσια της αξίας της μονάδας της πρωτεύουσας. Γι'αυτό σε ταμειυτήρες πολλαπλού σκοπού (ύδρευτικού, ενεργειακού κτλ) όπου υπεισέρχονται ενεργειακές συνιστώσες, η μεθοδολογία περιλαμβάνει τεχνικές προσομοίωσης λειτουργίας ταμειυτήρα σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής με το μέγιστο δυνατό οικονομικό όφελος.

2.1 ΣΚΟΠΟΣ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η τοποθέτηση του προβλήματος και η αλγοριθμική παρουσίαση επίλυσης με ξεχωριστή ανάλυση της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης. Στην πραγματικότητα η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση εκτελούνται ταυτόχρονα και πρόκειται για μια ανατροφοδοτούμενη διαδικασία.

Διερευνάται η υδροηλεκτρική παραγωγή σε ταμειυτήρες, με και χωρίς εμμονή και τηρουμένης της εποχικότητας, καθώς και η σχέση όλων των εξεταζόμενων σεναρίων με την αξιοπιστία της παραγόμενης ενέργειας.

Γίνεται μία πρώτη ενδεικτική επίλυση σε περιβάλλον Excel ώστε να υπάρξει μία αρχική εικόνα των αποτελεσμάτων, με δεδομένο ότι το Excel εμφανίζει τα εκάστοτε αποτελέσματα μίας εκτέλεσης προσομοίωσης-βελτιστοποίησης κάθε φορά. Αν είναι επιθυμητή μία συγκέντρωση αποτελεσμάτων, πρέπει μετά από κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου ο χρήστης να αποθηκεύει ξεχωριστά, να ξανατρέξει τον αλγόριθμο για, να αποθηκεύσει κ.ο.κ

Στο Excel δεν δίνεται δηλ. η δυνατότητα σύνταξης κώδικα ώστε να είναι εφικτές αλληπάλληλες προσομοιώσεις-βελτιστοποιήσεις με εμφάνιση όλων των αποτελεσμάτων συγκεντρωτικά έπειτα από ένα "τρέξιμο" επαναλήψεων, πινακοποιημένα ή/και γραφικά. Για το λόγο αυτό περαιτέρω επιλύσεις σε πιο συστηματική μορφή θα ακολουθήσουν στο Κεφάλαιο 3 σε περιβάλλον Matlab.

2.2 ΤΟ ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

2.2.1 Γενική Διατύπωση Προβλήματος

Μεγάλο Υ/Η έργο αποτελείται από φράγμα, ταμειυτήρα, υπερχειλιστή, υδροληψία, αγωγό προσαγωγής και μονάδες παραγωγής. Ζητείται η βελτιστοποίηση της παραγωγής Υ/Η ενέργειας και συγκεκριμένα ο προσδιορισμός του στόχου παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας.

2.2.2 Δεδομένα Εισόδου

- Έκταση λεκάνης απορροής α
- Μέση χειμερινή παροχή Q_w
- Τυπική απόκλιση ύψους βροχής υγρής περιόδου S_w
- Μέση θερινή παροχή Q_s
- Τυπική απόκλιση ύψους βροχής ξηρής περιόδου S_s

- Αρχικό απόθεμα S_0
- Μέγιστη Στάθμη λειτουργίας y_{max}
- Ελάχιστη Στάθμη λειτουργίας y_{min}
- Στάθμη εξόδου διώρυγας διαφυγής y_0
- Συντελεστής Μεταβλητότητας cv
- Μήκος χρονοσειράς n
- Εξίσωση καμπύλης στάθμης z - ωφέλιμου αποθέματος S : $S(z) = k(z/z_{max})^\xi$, όπου $z = y - y_{min}$ και $z_{max} = y_{max} - y_{min}$, με το z να μετράται από την ελάχιστη στάθμη απόληψης
- Ειδική ενέργεια ψ
- Υδροηλεκτρική ενέργεια e : $e = \psi r(z_0 + z)$, όπου $z_0 = y_{min} - y_0$
- Συντελεστής εμμοής Hurst H
- Τιμή μονάδας πρωτεύουσας ενέργειας Π
- Τιμή μονάδας 2ουσας ενέργειας Δ
- Ποινική ρήτρα μονάδας ελλείμματος ενέργειας EL .
- Ιστορική Χρονοσειρά Εισροών

Οι παράμετροι ως προς τις οποίες εξετάζεται το πρόβλημα είναι τα δύο κατασκευαστικά μεγέθη: Χωρητικότητα ταμιευτήρα k και παροχτευτικότητα αγωγού προσαγωγής r .

2.3 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ & ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ-ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

2.3.1 Γέννηση Συνθετικής Χρονοσειράς Εισροών

Δεδομένου του εξαμηνιαίου χρονικού βήματος, έστω ότι θέλω να δημιουργήσω συνθετική χρονοσειρά i_t εισροών μήκους n ετών, χωρίς εμμοή ($H = 0.5$).

1] Δημιουργώ μια αλληλουχία $j \in [-n, n]$

2] Δημιουργώ τους συντελεστές βαρύτητας a από τη σχέση 1.15:

$$a_j \approx \frac{\sqrt{(2-2H)y_0}}{3-2H} [|j+1|^{H+0.5} + |j-1|^{H+0.5} - 2|j|^{H+0.5}]$$

3] Με την εντολή `NORMSINV(RAND())`, παράγω τυχαίους αριθμούς κατανομής $(N,1)$

4] Στη συνέχεια δημιουργώ την αυτοσυσχετισμένη ακολουθία από τη σχέση 1.14:

$$x_i = \sum_{(j=-q)}^q a_{|j|} x_{i+j} = a_q v_{i-q} + \dots + a_1 v_{i-1} + a_0 v_i + a_1 v_{i+1} + \dots + a_q v_{i+q}$$

5 Πολλαπλασιάζοντας με την τυπική απόκλιση και προσθέτοντας τη μέση τιμή εναλλάξ για κάθε χειμερινό και θερινό μέσο ύψος βροχής, δημιουργείται μια κανονικοποιημένη συνθετική χρονοσειρά υψών βροχής, $X(\mu, \sigma)$

6 Τέλος, για τη συνθετική χρονοσειρά εισροών σε μονάδες όγκου, τίθεται η υπόθεση:

$$IF(X(\mu, \sigma) > 0, n * F16, 0)$$

[2.1]

, όπου $\alpha \text{ km}^2$ η έκταση της λεκάνης απορροής i_t

Τα παραπάνω επαναλαμβάνονται και για σενάρια με υδρολογική εμμονή ($H = 0.7, 0.8 \dots$).

2.3.2 Μοντέλο Προσομοίωσης - Εξισώσεις Υδατικού Ισοζυγίου

Έχοντας παραγάγει μία συνθετική χρονοσειρά εισροών i_t σε επιλεγμένο βήμα t (συνήθως ετήσιο ή εποχικό), μήκους n ετών:

Θεωρώ ένα αρχικό απόθεμα ταμιευτήρα $S_0 \neq 0$

Θεωρώ επίσης έναν αρχικό ενεργειακό στόχο - εκκίνησης e^*

1 Για $n = 1$, πριν από οποιαδήποτε απόληψη, το ωφέλιμο απόθεμα του ταμιευτήρα είναι:

$$S_1 = S_0 + i_1$$

[2.2]

, οπότε για κάθε επόμενο βήμα θα ισχύει

$$S_t = S_{t-1} + i_t$$

[2.3]

2 Από την εξίσωση καμπύλης στάθμης z - ωφέλιμου αποθέματος, η στάθμη είναι:

$$z(S)_t = z_{\max} (S_t/k)^{1/\zeta}$$

[2.4]

3 Ο αρχικός ενεργειακός στόχος e^* που έχω θέσει, απαιτεί μία απόληψη - στόχο παροχής r^* , η οποία είναι συνάρτηση και της ενεργής στάθμης z . Άρα:

$$r_t^* = e^*/(\psi (z_t + z_0))$$

[2.5]

4 Η εκροή από τους στροβίλους πρέπει να ισούται με το στόχο και δεν μπορεί να ξεπεράσει την παροχетеυτικότητα του αγωγού, ούτε το υπάρχον ωφέλιμο απόθεμα του ίδιου εξαμήνου. Οπότε η απόληψη για πρωτεύουσα ενέργεια είναι:

$$r_t^\Pi = \min (S_t, r_t^*, r_{\max})$$

[2.6]

5 Μετά τη δέσμευση της απώλησης για 1ουσα ενέργεια, το εναπομένον απόθεμα στον ταμιευτήρα είναι:

$$S_t' = S_t - r_t^\Pi$$

[2.7]

6 Στην περίπτωση που η απώληση για πρωτεύουσα δεν αξιοποιηθεί εξολοκλήρου, διατίθεται μία εναπομένουσα απώληση έως εξάντλησης της παροχетеυτικότητας του αγωγού, ώστε να μη μείνει αναξιοποίητη ενέργεια - έστω και δευτερεύουσα:

$$r_t^{\text{εναπομένον}} = r_{\max} - r_t^\Pi$$

[2.8]

7 Έχοντας αξιοποιήσει πλήρως τη χωρητικότητα των στροβίλων, εξετάζεται η ύπαρξη υπερχείλισης:

$$Y_t = \text{if } (S_t' > k, S_t' - k, 0)$$

[2.9]

Αν το εναπομένον ωφέλιμο απόθεμα είναι μεγαλύτερο της χωρητικότητας του ταμιευτήρα, έχω υπερχείλιση.

8 Αν υπάρχει πλεονάζον νερό, αυτό διοχετεύεται κατά προτεραιότητα από τους στροβίλους αντί από τον υπερχειλιστήπαράγοντας 2ουσα ενέργεια και εφόσον έχω $r_t^{\text{εναπομένον}} \neq 0$ εξετάζω το ενδεχόμενο:

$$r_t^\Delta = \text{if } (Y_t < r_t^{\text{εναπομένον}}, Y_t, r_t^{\text{εναπομένον}})$$

[2.10]

9 Μετά τη δέσμευση για 2ουσα ενέργεια, το εναπομένον τελικό απόθεμα στον ταμιευτήρα είναι:

$$S_t'' = S_t' - r_t^\Delta$$

[2.11]

10 Ωστόσο ενδέχεται να έχω υπερχείλιση ούτως ή άλλως:

$$Y_t' = Y_t - r_t^\Delta$$

[2.12]

12 Αντίστοιχα, από τη σχέση $e(r,z) = \psi r(z_0 + z)$ είναι:

$$e_t^{\text{total, μέσο}} = \psi(z_0 + z_t)(r_t^\Pi + r_t^\Delta)$$

[2.13]

13 Τέλος, υπολογίζονται οι τιμές των ενεργειών και τα οφέλη:

$$e_t^\Pi = \min (e_t^*, e_t^{\text{total, μέσο}}) \quad [2.14]$$

$$e_t^\Delta = \max (0, e_t^{\text{total, μέσο}} - e_t^*) \quad [2.15]$$

$$e_t^{\text{έλλειμμα}} = \max (0, e_t^* - e_t^{\text{total, μέσο}}) \quad [2.16]$$

$$\text{PROFIT}_t = \Pi^* e_t^\Pi + \Delta^* e_t^\Delta - \text{ΕΛ.}^* e_t^{\text{έλλειμμα}} \quad [2.17]$$

$$\text{AVERAGE PROFIT} = \frac{\sum_1^n \text{PROFIT}}{n} \quad [2.18]$$

2.3.3 Βελτιστοποίηση: Συνάρτηση Στόχου, Μεταβλητές Απόφασης & Περιορισμοί

Η προσομοίωση γίνεται θεωρώντας αυθαίρετα μία αρχική τιμή στόχου πρωτεύουσας ενέργειας. Η τιμή αυτή δεν είναι η βέλτιστη ως προς το μέσο οικονομικό όφελος.

Αποσκοπείται επομένως: η μεγιστοποίηση της τιμής του μέσου ωφέλους, με αλλαγή: του στόχου και υπό τους περιορισμούς: ο στόχος να είναι μικρότερος από την εν δυνάμει μέγιστη παραγόμενη ενέργεια e (r_{\max}) και ταυτόχρονα να είναι μη αρνητικός.

- Συνάρτηση Στόχου: $Z = [\max]f(e^*) = \max [\text{AVERAGE PROFIT}]$
- Μεταβλητή απόφασης: e^*
- Περιορισμοί: $0 \leq e^* \leq e_{\max}$

Οι παραπάνω σχέσεις διατυπώνονται με πολύ απλή έκφραση στο Excel και εκτελείται η επίλυση του συστήματος.

2.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Βάσει των παραπάνω, ακολουθεί μία αριθμητική εφαρμογή για ένα μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο, με τα παρακάτω δεδομένα:

Έκταση λεκάνης απορροής	α	1000	km ²
Μέση χειμερινή παροχή	Q_w	1000	hm ³
Χειμερινή τυπική απόκλιση ύψους βροχής	S_w	0.30	
Μέση θερινή παροχή Q_s	Q_s	100	hm ³
Θερινή τυπική απόκλιση ύψους βροχής	S_s	0.03	
Αρχικό απόθεμα	S_0	350	hm ³
Μέγιστη Στάθμη λειτουργίας	y_{max}	160	m
Ελάχιστη Στάθμη λειτουργίας	y_{min}	100	m
Στάθμη εξόδου διώρυγας διαφυγής	y_0	70	m
	ζ	3	
$Z_{max} = y_{max} - y_{min}$	Z_{max}	60	m
$Z_0 = y_{min} - y_0$	Z_0	30	m
Μεταβλητότητα και για τις 2 περιόδους	cv	0.30	
Μήκος χρονοσειράς	n	1000	years
Ειδική ενέργεια	ψ	0.25	GWh/hm ⁴
Συντελεστής εμμονής Hurst	H	0.5	
Τιμή μονάδας πρωτεύουσας ενέργειας	Π	1	
Τιμή μονάδας δευτερεύουσας ενέργειας	Δ	0.5	
Ποινική ρήτρα μονάδας ελλείμματος ενέργειας	$ΕΛ.$	-10	
Χωρητικότητα ταμιευτήρα	k	700	hm ³
Παροχετευτικότητα νερού από σταθμό παραγωγής εντός εξαμήνου	r	700	hm ³ /6mo

Έπειτα από επίλυση στο Excel προκύπτει το μέγιστο κέρδος 86.273 μονάδες, ενεργειακός στόχος 74.685 GWh/6μηνο και μέσο ποσοστό αστοχιών 0.5 % σε βάθος 1000ετίας.

2.5 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.5.1 Εμφάνιση Αστοχιών

Στην παραπάνω επίλυση, σκοπός ήταν η βελτιστοποίηση του οφέλους. Όταν σε ένα χρονικό βήμα υπάρχει έλλειμμα ενέργειας, αφενός επιβάλλεται ποινή, αφετέρου υποεξυπηρετούνται οι ενεργειακές ανάγκες. Έλλειμμα ενέργειας συνιστά αστοχία. Καθώς η ύπαρξη ελλείματος επηρεάζει πολύ δραστικά το όφελος, η μεγιστοποίηση του οφέλους σχετίζεται ως ένα βαθμό με την ελαχιστοποίηση του ελλείμματος ως ποσοστό επί του συνόλου των χρονικών βημάτων.

Αντίστοιχες επιλύσεις με συνάρτηση στόχου $Z = [\min]f(e^*) = \min [\text{Αστοχίες}]$ και την απαίτηση αλλαγής του ενεργειακού στόχου, είχε το ίδιο περίπου αποτέλεσμα AVERAGE PROFIT και e^* .

2.5.2 Αποτίμηση της Ενεργειακής Επίδοσης

Η αποτίμηση στηρίζεται στην προσομοιωμένη (συνθετική) χρονοσειρά παραγόμενης ενέργειας e_t , όπου εκτιμώνται:

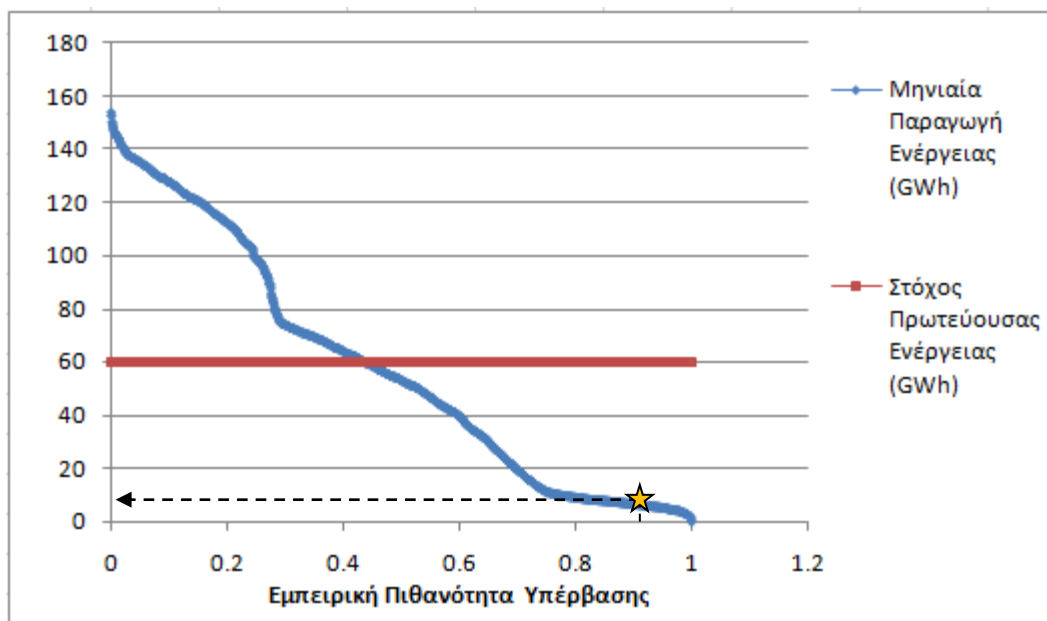
- Η αξιοπιστία κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης (ποσοστό όπου $e_t \geq e^*$ επί του συνόλου των χρονικών βημάτων)
- Η παραγωγή ενέργειας πάνω από το στόχο (δευτερεύουσα ενέργεια)
- Η παραγωγή ενέργειας πάνω από το στόχο (έλλειμμα)

Κατατάσσοντας τη χρονοσειρά σε φθίνουσα σειρά και αντιστοιχίζοντας μία πιθανότητα υπέρβασης σε κάθε τιμή, προκύπτει η καμπύλη διάρκειας-παραγωγής ενέργειας.

Αν n είναι το μέγεθος της προσομοιωμένης χρονοσειράς, η εμπειρική πιθανότητα υπέρβασης της ταξινομημένης τιμής στη θέση i , είναι: $p_i = i/(n+1)$

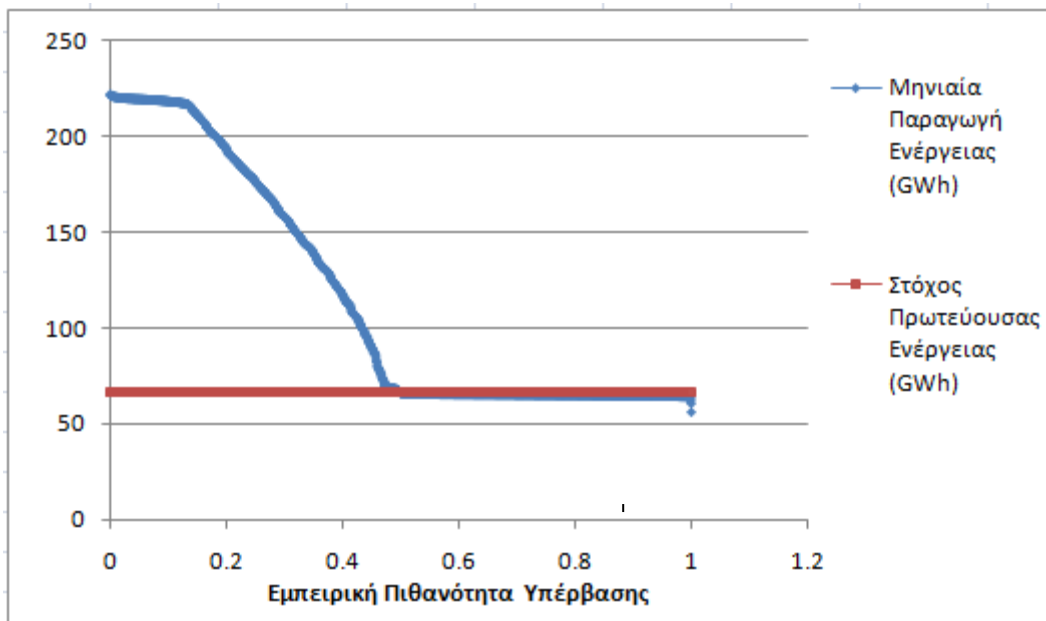
Με τη βοήθεια της καμπύλης μπορεί να εκτιμηθεί η πρωτεύουσα ενέργεια που εξασφαλίζεται για υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας (95 - 99 %).

Προσομοίωση χωρίς βελτιστοποίηση θέτοντας έναν εμπειρικό στόχο 60 GWh το εξάμηνο, επιβάλλει μικρή παραγωγή ενέργειας (15 GWh) υψηλής αξιοπιστίας η οποία προορίζεται αποκλειστικά για πρωτεύουσα.



Σχήμα 2.1 Αξιοπιστία Ενεργειακής Παραγωγής πριν τη Βελτιστοποίηση

Προσομοίωση και βελτιστοποίηση, οδηγεί σε μία αύξηση του στόχου και παράλληλα αυξάνει την αξιοπιστία της ενεργειακής παραγωγής.



Σχήμα 2.2 Αξιοπιστία Ενεργειακής Παραγωγής μετά τη Βελτιστοποίηση

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ-ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ MATLAB

3.1 ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η αναλυτική παρουσίαση του μοντέλου προσομοίωσης-βελτιστοποίησης σε μορφή κώδικα στο Matlab. Στο Excel, δίνεται η δυνατότητα μίας επίλυσης κάθε φορά, αποθήκευσης του αποτελέσματος, επανεπίλυσης και ούτω καθεξής. Το λογισμικό Matlab δίνει τη δυνατότητα πολλαπλών προσομοιώσεων ή/και βελτιστοποιήσεων για διάφορα κριτήρια με τη δημιουργία δομών επανάληψης και την αποθήκευση των αποτελεσμάτων συγκεντρωτικά σε πίνακες και σε γραφήματα. Έτσι, αφενός υπάρχει οικονομία στο χρόνο και στον υπολογιστικό φόρτο, αφετέρου δίνεται η δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων των επιλύσεων και εξαγωγής συμπερασμάτων. Παρακάτω παρατίθενται οι κώδικες σε αποσπάσματα τα οποία επεξηγούνται βήμα βήμα.

3.2 Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΕΙΣΡΟΩΝ

Όπως και προηγουμένως, το πρώτο βήμα για την προσομοίωση του ταμιευτήρα είναι η παραγωγή της συνθετικής χρονοσειράς.

```
H=0.7; %hurst
g0=1; %gama miden
E=1000; %emvado lekanis

voithitiko1=sqrt((2-2*H)*g0)/(3-2*H);

meso_h_vroxis_therino=0.1;
meso_h_vroxis_xeimerino=1;
typiki_apoklisi_therino=0.03;
typiki_apoklisi_xeimerino=0.3;
```

- Εισάγονται τα δεδομένα: Συντελεστής Hurst, γ_0 , Εμβαδόν Λεκάνης, μια βοηθητική πράξη που προορίζεται για τον τύπο του συντελεστή βαρύτητας α , το μέσο ύψος βροχής τη χειμερινή και την εαρινή περίοδο και οι αντίστοιχες τυπικές τους αποκλίσεις.

```
%edo vgainei apo -1000 eos 1000 (2000 times)
arithmos_eisroon=2000;
q=-(arithmos_eisroon/2):1:(arithmos_eisroon/2);
```

- Ορίζεται ο αριθμός εισροών: έχω 2000 εξάμηνα, άρα 2000 τιμές εισροών. Πρέπει να δοθεί επομένως η αλληλουχία [-1000, 1000], η πρώτη δηλ. στήλη των πράξεων. Το βήμα της αλληλουχίας είναι 1.

```
%edo vgainoun oi tyxaioi arithmoi
V=randn(2*arithmos_eisroon,1);
```

- Παραγωγή τυχαίων αριθμών με τυπική απόκλιση 1 και μέση τιμή 0.

```
%edo vgainei to a
for i=1:arithmos_eisroon
    a(i)=voithitiko1*((abs(q(i)+1))^(H+0.5) + (abs(q(i)-1))^(H+0.5) -
2*(abs(q(i)))^(H+0.5));
end
```

- Βρόχος επανάληψης: Για κάθε τιμή εισροής υπολογίζεται ο συντελεστής βαρύτητας που της αντιστοιχεί.

```
%edo vgainei i stili Z apo ta a kai V
for i=1:arithmos_eisroon
sum=0;
for j=1:arithmos_eisroon
    sum=sum+a(j)*V(i+j-1);
end
Z(i)=sum;
end
```

- Βρόχος επανάληψης: Εξαγωγή της στήλης αυτοσυσχετισμένης ακολουθίας Z(i)

```
%edo vgainei i stili x(mi,sigma)
for i=1:2:arithmos_eisroon
    Z_mi_sigma(i)=Z(i)*typiki_apoklisi_xeimerino + meso_h_vroxis_xeimerino;
    if Z_mi_sigma(i)>0
        Q(i)=E*Z_mi_sigma(i);
    else
        Q(i)=0;
    end
end
end
```

- Βρόχος επανάληψης για τη χειμερινή περίοδο: Εξαγωγή της ακολουθίας με τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών εισροών, $x(\mu, \sigma)$. Είναι λογικό ότι για την παραγωγή της συνθετικής εισροής, κάθε τιμή της αποκανονικοποιείται εναλλάξ για χειμερινή και θερινή περίοδο. Τίθεται η απαίτηση μη αρνητικών εισροών.

```

%teliko zitoumeno: eisroes Q me dedomeno Hurst
for i=2:2:arithmos_eisroon
Z_mi_sigma(i)=Z(i)*typiki_apoklisi_therino + meso_h_vroxis_therino;
if Z_mi_sigma(i)>0
    Q(i)=E*Z_mi_sigma(i);
else
    Q(i)=0;
end
end

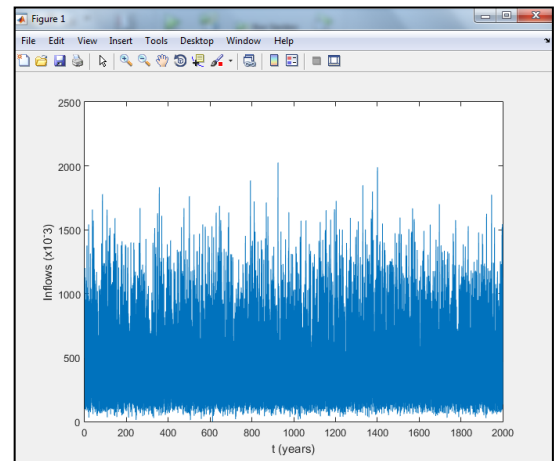
Q = Q*(10^-3);
plot(Q)

Q_me_H_0_7=Q'

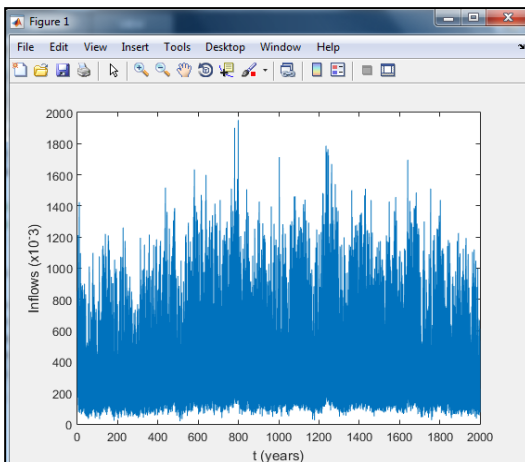
```

- Βρόχος επανάληψης: Ομοίως και για τη θερινή περίοδο. Στο τέλος ζητώνται τα αποτελέσματα σε γράφημα.

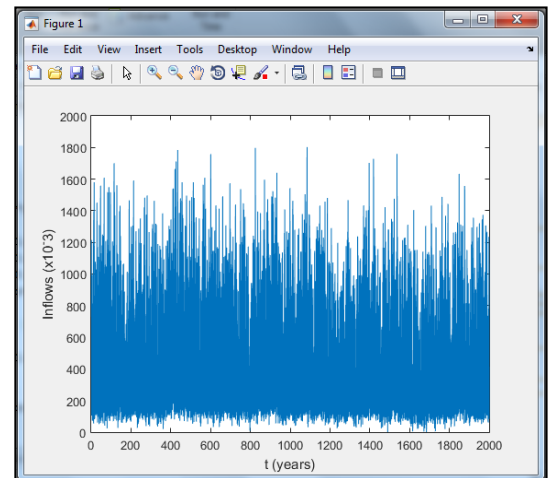
Τα παραπάνω έγιναν 3 φορές;
Για χρονοσειρά χωρίς εμμονή
($H = 0.5$)
και για χρονοσειρές με εμμονή
($H = 0.7$ & 0.9)



α) $H = 0.5$



β) $H = 0.9$



γ) $H = 0.7$

Σχήμα 3.1 Οι συνθετικές εισροές με **α)** $H = 0.5$, **β)** $H = 0.9$ και **γ)** $H = 0.7$,

για μήκος χρονοσειράς $n = 1000$ έτη (2000 εξάμηνα)

Όσο εντονότερη η είναι η εμμονή, τόσο συχνότερη είναι η εμφάνιση ακραίων διακυμάνσεων και αντίστοιχα εντονότερες οι οπτικές διακυμάνσεις στα διαγράμματα.

3.3 Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΣΤΟΧΟΥ

Για να εκτελεστεί η βελτιστοποίηση, απαιτείται ο προσδιορισμός της συνάρτησης στόχου, των περιορισμών και των μεταβλητών απόφασης. Η συνάρτηση είναι το μέσο όφελος, εσωκλείει τη δυναμική του ταμειυτήρα, τους φυσικούς και τεχνητούς περιορισμούς που υπεισέρχονται και εκφράζεται συναρτήσει του στόχου, της χωρητικότητας του ταμειυτήρα, της παροχετευτικότητας, των εισροών και του μήκους χρονοσειράς και είναι μία στοχαστική συνάρτηση. Στο Matlab

κατασκευάστηκε με τη μορφή δομής επανάληψης, η προσομοίωση λειτουργίας του ταμειυτήρα και στο τέλος ορίστηκε το AVERAGE PROFIT που επίκειται να μεγιστοποιηθεί με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

```
function [ f ] = Fun1( var,k,p,Flow,n )
%FUN1 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

x=var(1);

% reading a .txt file and creating
% an array of 1 dimension with the numbers of the file
%
% fileID=fopen('eisroes.txt','r');
% formatSpec='%f';
% Flow=fscanf(fileID,formatSpec);

st2prin=350; % st distono prin ARXIKO APOTHEMA

sum=0; % voithitiki metavlititi gia na vro athroisma stixion pinaka profit[indexi]
%n=length(Flow);
```

- Δηλώνεται η συνάρτηση και τις μεταβλητές από τις οποίες είναι εξαρτημένη. Ως $x = \text{var}(1)$ ορίζεται ο ενεργειακός στόχος, ο οποίος δεν είναι γνωστός και θα βρεθεί στο πέρας της επίλυσης. Δηλώνεται και ένα αρχικό απόθεμα στον ταμειυτήρα - με δοκιμές διαπιστώθηκε ότι το αρχικό απόθεμα της ίδιας τάξης (200, 300 ... hm^3) δεν επηρεάζει καθόλου το αποτέλεσμα. Αυτό είναι επόμενο σε μία χρονοσειρά 1000 ετών. Ορίζεται επίσης μία βοηθητική μεταβλητή ή οποία στο πέρας θα αθροίσει όλα τα οφέλη κάθε 6μήνου για να εξαχθεί στη συνέχεια το μέσο όφελος (AVERAGE PROFIT).

```
for indexi=1:n
    st=st2prin+Flow(indexi);
    zt=60*(st2prin/k)^(1/3);
    rt=x*100/(0.25*(zt+30));
```

```

rt1=minimum(st,rt,p);

st1=st-rt1; % st tonos

Drt=p-rt1; %delta rt

if st1>k

    yt1(indexi)=st1-k;

else

    yt1(indexi)=0;

end

if yt1(indexi)<Drt

    rt2=yt1(indexi);

else

    rt2=Drt;

end

orisma2=st1-rt2; % voithitiki metavliti gia na mpi os orisma sinartisis

st2meta=minimum(k,orisma2,k);

yt2(indexi)=yt1(indexi)-rt2;

st2prin=st2meta;

etot=0.25*0.01*(30+zt)*(rt1+rt2);

et1=minimum(x,etot,x);

if etot>x

    et1=x;

    et2=etot-x;

    etplin=0;

elseif etot==x

    et1=x;

    et2=0;

    etplin=0;

```

```

else

    et1=etot;

    et2=0;

    etplin=x-etot;

end

profit(indexi)=et1+0.5*et2-10*etplin;

sum=sum+profit(indexi);

end

averageProfit=sum/n;
f=-averageProfit;
end

```

- Βρόχος επανάληψης: Για όλο το μήκος χρονοσειράς, γράφονται οι γνωστές εξισώσεις δυναμικής των ταμιευτήρων. Στο τέλος διατυπώνεται το μέσο όφελος συναρτήσει πρωτεύουσας, δευτερεύουσας ενέργειας και ελλείματος ενέργειας. Καθώς το Matlab ελαχιστοποιεί συναρτήσεις, ισοδύναμα η $-f$ διατυπώνεται ως ο αντίθετος του AVERAGE PROFIT.

3.4 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το Matlab διαθέτει πολλούς έτοιμους αλγόριθμους στην εργαλειοθήκη (Global Optimization Toolbox), με τον κατάλληλο για το πρόβλημα τον αλγόριθμο GA (Genetic Algorithm). Ο Γενετικός Αλγόριθμος είναι μια μέθοδος επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης με και χωρίς περιορισμούς, η οποία βασίζεται σε μια φυσική διαδικασία επιλογής τιμών που μιμείται τη βιολογική εξέλιξη.

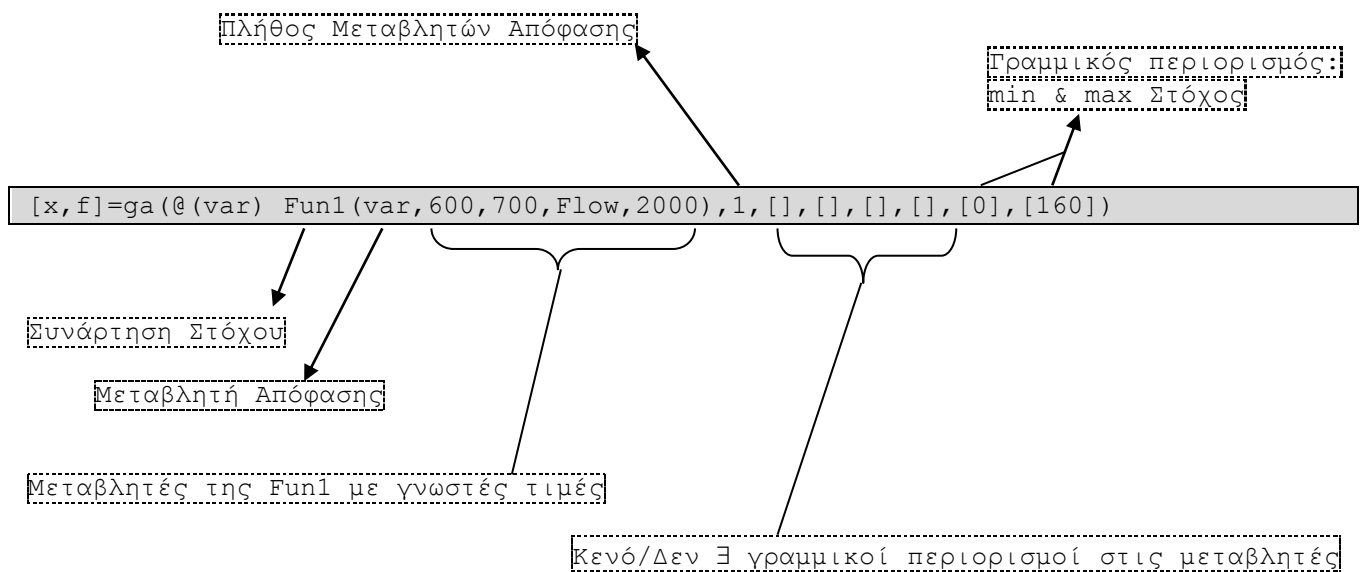
Ο αλγόριθμος τροποποιεί έναν πληθυσμό μεμονωμένων λύσεων. Σε κάθε βήμα, ο γενετικός αλγόριθμος διαλέγει τυχαία μονάδες από τον κύριο πληθυσμό και τις χρησιμοποιεί ως παραγωγούς της νέας γενιάς (εξού και γενετικός). Μετά από αλληπάλληλες επιτυχείς γεννήσεις, ο πληθυσμός εξελίσσεται προς τη βέλτιστη λύση. Ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί στην επίλυση προβλημάτων που δεν επιλύονται με τους κλασσικούς αλγόριθμους, συμπεριλαμβανομένων προβλημάτων όπου η συνάρτηση στόχου είναι ασυνεχής, εντόνως μη γραμμική, μη διαφορίσιμη ή στοχαστική, όπως στην παρούσα περίπτωση.

Ενας κλασσικός αλγόριθμος:

- ✓ Δημιουργεί ένα μοναδικό σημείο σε κάθε επανάληψη. Η σύμπτωση των σημείων οδηγεί στη βέλτιστη λύση
- ✓ Επιλέγει το επόμενο σημείο της επανάληψης με ντετερμινιστικό τρόπο.

Στον αντίποδα ένας γενετικός αλγόριθμος:

- ✓ Δημιουργεί ένα πληθυσμό σημείων σε κάθε επανάληψη. Το καλύτερο σημείο του πληθυσμού πλησιάζει τη βέλτιστη λύση
- ✓ Επιλέγει τον επόμενο πληθυσμό υπολογιστικά χρησιμοποιώντας τυχαίες γεννήτριες αριθμών



3.5 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΕΩΝ: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΕΤΕΥΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Η μεταβολή κάποιας κρίσιμης συνιστώσας του συστήματος, μπορεί να επηρεάσει την ενεργειακή παραγωγή, καθώς υπεισέρχεται στους περιορισμούς του υδατικού ισοζυγίου. Στο στάδιο αυτό εξετάζεται η εξέλιξη του στόχου πρωτεύουσας ενέργειας X , του μέσου οφέλους F και του ποσοστού των αστοχιών A , βάσει διάφορων προοδευτικών τιμών παροχетеυτικότητας r και χωρητικότητας ταμιευτήρα k . Υπενθυμίζεται ότι για κάθε χρονικό εξαμηνιαίο βήμα αστοχία θεωρείται η μη κάλυψη του ενεργειακού στόχου, δηλ. παρουσία ενεργειακού ελλείμματος.

3.5.1 Εξέλιξη του μέσου οφέλους και του στόχου πρωτεύουσας ενέργειας

Αρχικά εξετάζεται η μεταβολή της παροχетеυτικότητας r_{\max} για την ίδια χωρητικότητα ταμιευτήρα 700 hm^3 , με εμμονή $H = 0.7$. Για την απαγκίστρωση από μονάδες μέτρησης ορίζεται το αδιάστατο

μέγεθος r_{\max}/Q_w , με το Q_w σταθερό (1000 hm^3), οπότε γίνεται κάθε φορά επίλυση για διάφορες τιμές του r_{\max}/Q_w που ισοδυναμούν με την αντίστοιχη αλλαγή του r_{\max} .

Στη συνέχεια, εξετάζεται η μεταβολή της χωρητικότητας του ταμιευτήρα k με σταθερή παροχетеυτικότητα $300 \text{ GWh}/\delta\mu\eta\mu\omicron$, με εμμονή $H = 0.7$. Για την απαγκίστρωση από μονάδες μέτρησης ορίζεται το αδιάστατο μέγεθος k/Q_w , με το Q_w σταθερό (1000 hm^3), οπότε γίνεται κάθε φορά επίλυση για διάφορες τιμές του k/Q_w που ισοδυναμούν με την αντίστοιχη αλλαγή του k .

Κρίνεται δόκιμο το βήμα για το λόγο r/Q_w να είναι 0.1 στο διάστημα $[0.1, 1.0]$ (άρα 10 τιμές του r) και αντίστοιχα για το λόγο k/Q_w , βήμα 0.2 στο διάστημα $[0.2, 3.0]$ (άρα 15 τιμές του k).

Επομένως ζητούμενο είναι ένας πίνακας διαστάσεων 10×15 όπου κάθε τιμή του θα αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος $(r/Q_w, k/Q_w)$.

Πίνακας 3.1 Η αναμενόμενη μορφή των αποτελεσμάτων

F, X ή A k/Qw	r/Qw									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
1.8
2
2.2
2.4
2.6
2.8
3

Καθώς είναι ένας πίνακας 3 διαστάσεων μπορούν να εξαχθούν τρισδιάστατες επιφάνειες που αποδίδουν πιο παραστατικά την εξέλιξη των δοκιμών. Ακολουθεί η επεξήγηση του κώδικα στο Matlab:

```

diary dokimes.txt;

Qw=1000; %orizo xeimerini mesi eisroi (statheri)

kPROSQw(1)=0.2; %orizo tin proti timi tou k/Qw. vima 0.2
k(1)=Qw*kPROSQw(1); %orizo tin proti timi tou k
rPROSQw(1)=0.1; %orizo tin proti timi tou r/Qw. vima 0.1
r(1)=Qw*rPROSQw(1);%orizo tin proti timi tou r

```

- Αρχικά δηλώνεται η χειμερινή μέση εισροή, η αρχική τιμή των k/Q_w και r/Q_w και η αντίστοιχη αρχική τιμή των k και r για να εξαχθούν μετά το τρέξιμο και τα δύο αυτά μεγέθη ώστε να είναι ευκολότερη η φυσική αντίληψη της συσχέτισης των κατασκευαστικών μεγεθών με τα F, X, A .

```

for i=2:15 %domi epanalipsis: skopos einai na vro ola ta k/Qw gia dosmeno vima,
esto 8 deigmata

    kPROSQw(i)=kPROSQw(i-1)+0.2 %xekino apo to i=2 exontas pro-orisei to Qw(gt gia
i=0 den orizetai i proti timi)

    k(i)=Qw*kPROSQw(i)

    for j=2:10 %entos tis epanalipsis thelo k mia ypoantistoixisi me r/Qw

        rPROSQw(j)=rPROSQw(j-1)+0.1

        r(j)=Qw*rPROSQw(j)

    end

end

%thelo tin emfanisi

k
kPROSQw
r
rPROSQw

```

- Βρόχος επανάληψης: Σκοπός είναι η εξαγωγή των $k/Q_w, r/Q_w$ με δοσμένο βήμα και των αντίστοιχων k και r . Στο τέλος ζητείται η εμφάνισή τους.

```

%veltistopoiisi me ta proigoumena dedomena
for i = 1:15
    %epilisi
    for j=1:10

        [x(i,j),f(i,j)]=ga(@(var)
Fun1(var,k(i),r(j),Q_me_H_0_7,2000),1,[],[],[],[],[0],[160]); %veltistopoiisi:exo
valei k(i). ara toses veltistopoiises osa kai ta r(i)

        X=x;%orizo pinaka x olous tous stoxous ton veltistopoiiseon

        F=f;%omoios gia ta ofeli

    end
end

X

F

```

- Βρόχος επανάληψης με χρήση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης: Για κάθε τιμή i της στήλης k (ισοδύναμα k/Q_w) και για κάθε τιμή j της στήλης r (ισοδύναμα r/Q_w), ζητείται το ζεύγος $[x(i, j), f(i, j)]$. Επομένως αναμένεται ένας πίνακας 15×10 με 150 στοιχεία. Οπότε για τη χρονοσειρά εισροών με $H = 0.7$ ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης τρέχει 150 φορές και επαναλαμβάνεται η διαδικασία για $H = 0.5$ και για $H = 0.9$.

```

%diagramma 3D

[A,B]=meshgrid(rPROSQw,kPROSQw)

surf(A,B,-F)

surf(A,B,X)

diary off;

```

- Εμφάνιση διαγράμματος: Ζητείται η εμφάνιση του τρισδιάστατου διαγράμματος όπου στον άξονα x' είναι οι τιμές του r/Q_w , στον άξονα y' οι τιμές του k/Q_w και στον άξονα z' τα οι ενεργειακοί στόχοι ή τα μέσα οφέλη που υπολογίστηκαν.

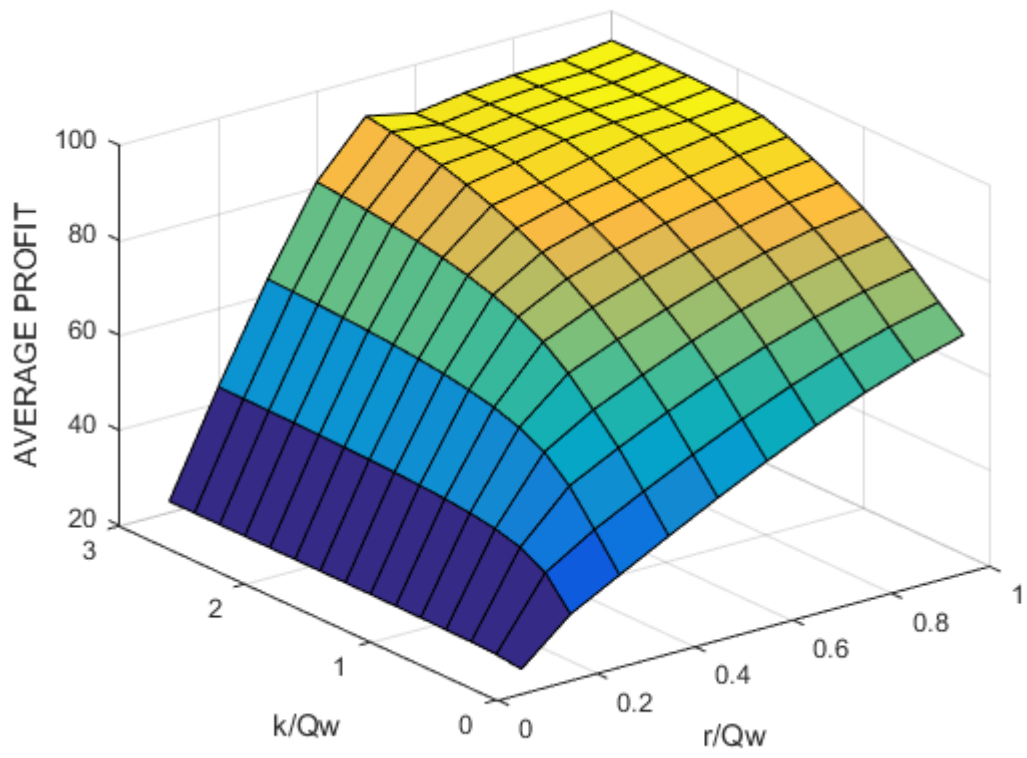
4.1 ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται τα τρισδιάστατα διαγράμματα- χώροι των βέλτιστων λύσεων. Για μια σχετικά μεγάλου μήκους χρονοσειρά όπως των 1000 ετών που χρησιμοποιήθηκε, εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια εμμόνης ($H = 0.5, 0.7$ και 0.9). Δεδομένου ότι το πρόβλημα είναι στοχαστικό, η δευτερεύουσα ενέργεια που υπεισέρχεται στο πρόβλημα μπορεί να ανακόψει την αύξουσα τάση των μεγεθών μελέτης, καθώς η παρουσία υπερχειλίσεων μπορεί να υπερκαλύψει την ανάγκη σε πρωτεύουσα ενέργεια με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ανάγκη περαιτέρω ζήτησης ενέργειας. Έτσι, όταν υπάρχει περίσσεια νερού αυτή προσφέρεται από το σύστημα και προκειμένου να μη μείνει αναξιοποίητη ως υπερχειλίση, χρησιμοποιείται για δευτερεύουσα ενέργεια, με το μικρότερο (το μισό) όφελος. Μάλιστα αυτό το ισοζύγιο μπορεί πιθανοτικά να εμφανιστεί περισσότερες φορές ανά εξάμηνο, καθώς αυξάνει το μήκος της χρονοσειράς εισροών.

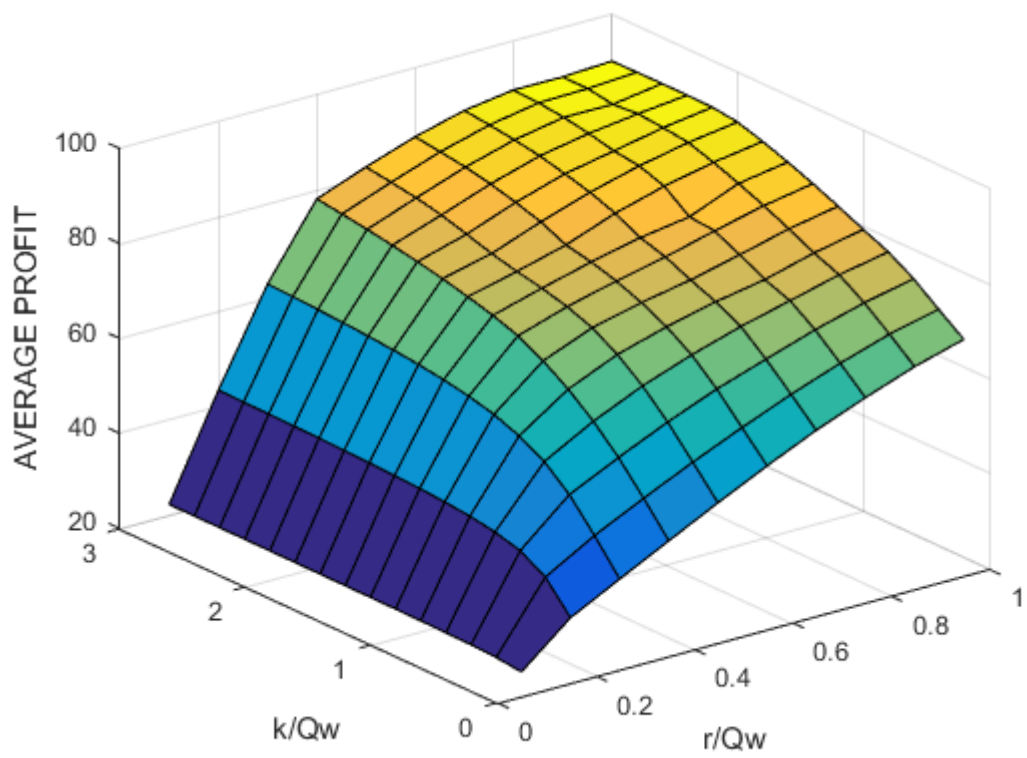
Το επιλεγμένο βήμα (για λόγους $k/Q_w = 0.2$ και $r/Q_w = 0.1$) είναι ενδεικτικό και επαφίεται στη διακριτική ευχέρεια του μελετητή, λαμβάνοντας υπόψη την τήρηση ενός δόκιμου χρόνου επίλυσης. Έχοντας τρέξει τον αλγόριθμο για μικρότερο βήμα (0.05 για k/Q_w και r/Q_w), στην πράξη πρόκειται για 1200 επιλύσεις για ένα και μόνο διάγραμμα, διαδικασία που απαιτεί 20 περίπου ώρες. Κρίθηκε επομένως ότι με τα βήματα που εν τέλει επιλέχθηκαν, 150 επιλύσεις για ένα διάγραμμα μπορούν να αποδώσουν άριστα την εξέλιξη των μεγεθών ενδιαφέροντος, με απαιτούμενο χρόνο λιγότερο από 2 ώρες. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η επιλογή του Matlab για τη βελτιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής υπερισχύει της επιλογής του Excel, όπου οι επιλύσεις γίνονται μία προς μία.

4.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΟΦΕΛΟΥΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ k, r

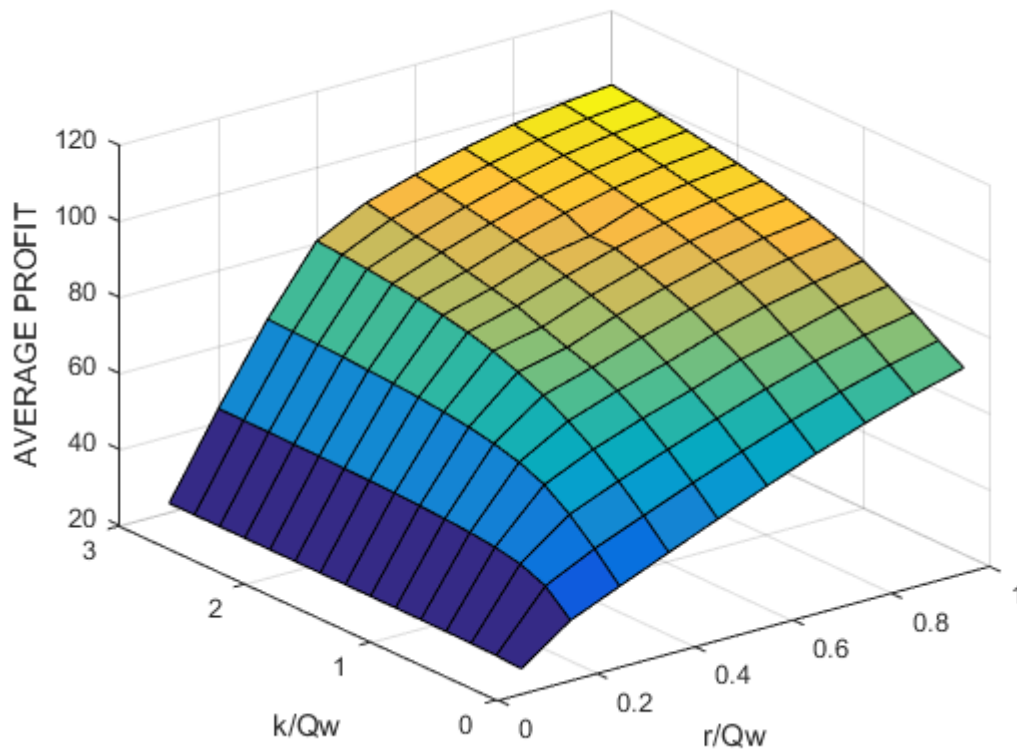
Η αλλαγή των κατασκευαστικών μεγεθών της χωρητικότητας και της παροχетеυτικότητας μεθοδευμένα και ανά βήμα για διαφορετικούς συντελεστές εμμόνης, στη συνέχεια η προσομοίωση-βελτιστοποίηση για κάθε ένα ζεύγος τιμών (k, r) και η δημιουργία των αντίστοιχων διαγραμμάτων του χώρου βέλτιστων λύσεων, οδηγεί στην εξαγωγή κάποιων χρήσιμων συμπερασμάτων. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη του μέσου οφέλους (Average Profit) συναρτήσει των τιμών αυτών, για τα τρία διαφορετικά σενάρια εμμόνης που έχουν προαναφερθεί.



α) $H = 0.5$



β) $H = 0.7$



γ) H = 0.9

Σχήμα 4.1 Ο χώρος βέλτιστων λύσεων του μέσου οφέλους με αλλαγή των κατασκευαστικών μεγεθών για συντελεστή Hurst **α) 0.5, β) 0.7, γ) 0.9**

Μελετώντας τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται τα εξής:

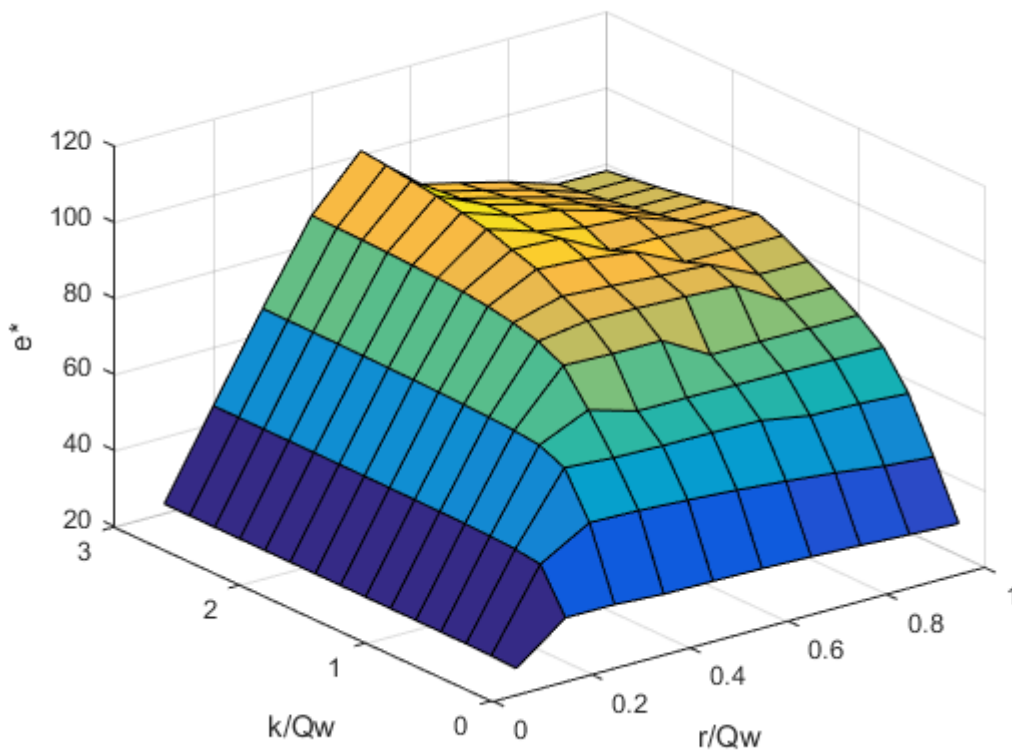
- Για την ίδια χωρητικότητα ταμιευτήρα, αύξηση της παροχетеυτικότητας οδηγεί σε αύξηση του μέσου οφέλους
- Για την ίδια παροχетеυτικότητα αγωγού, αύξηση της χωρητικότητας οδηγεί σε αύξηση του μέσου οφέλους, αλλά με μικρότερο ρυθμό μεταβολής
- Όσο μεγαλύτερα τα κατασκευαστικά μεγέθη, τόσο μεγαλύτερο το όφελος. Αυξάνει όμως το κατασκευαστικό κόστος
- Η απουσία εμμονής σημαίνει απουσία ακραίων φαινομένων, άρα ομαλότερη εξέλιξη του μέσου οφέλους
- Η απουσία εμμονής ($H = 0.5$) δημιουργεί στο διάγραμμα ένα επίπεδο με περίπου ίσα οφέλη, το οποίο ορίζεται από τα διανύσματα $(0.5, 1.0)$ (άξονας r/Q_w) και $(1.5, 3.0)$ (άξονας k/Q_w) και με AVERAGE PROFIT περίπου 95 τιμές μονάδας. Το εγγεγραμμένο αυτό επίπεδο δίνει μία ευχέρεια επιλογής συνδυασμών (k, r) που δίνουν το ίδιο κέρδος. Επομένως λαμβάνοντας υπόψη και το

κατασκευαστικό κόστος μπορεί να βρεθεί η τομή της βέλτιστης λύσης κατασκευαστικά και διαχειριστικά

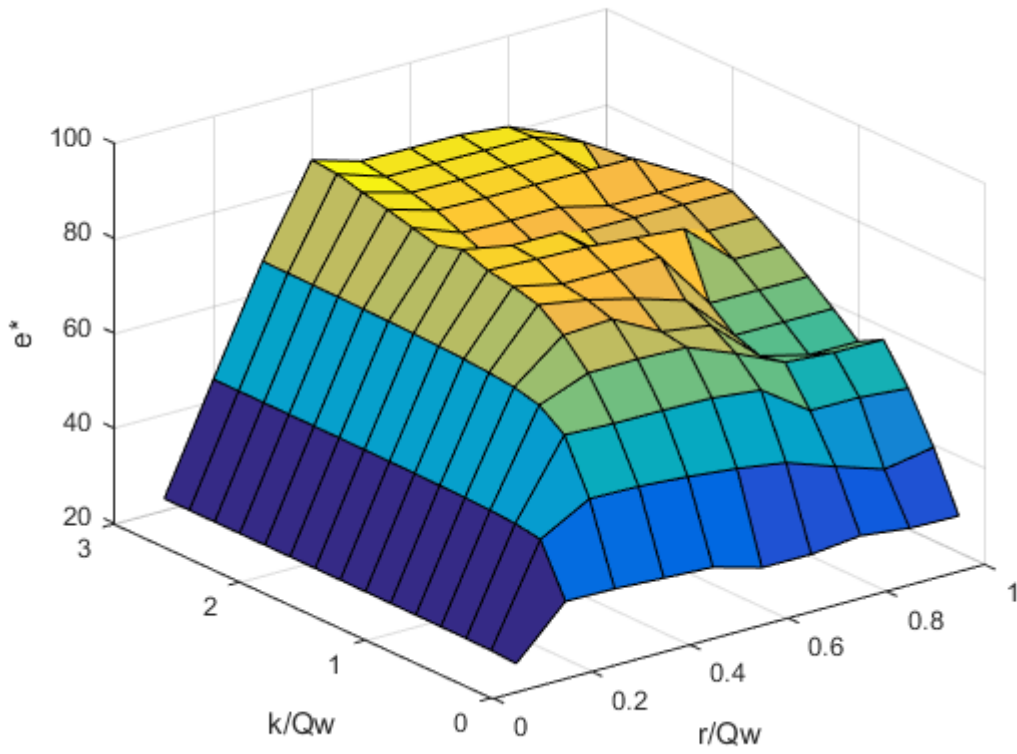
- Όταν $H = 0.7$ τα ακραία φαινόμενα είναι συχνότερα κατά μήκος της χρονοσειράς. Έτσι το εγγεγραμμένο επίπεδο ίσων οφελών συρρικνώνεται. Η παρουσία της εμμόνης επηρεάζει τις εισροές και κατ'επέκταση την παραγωγή ενέργειας και τελικά το μέσο όφελος
- Όταν $H = 0.9$ δεν υπάρχει πλέον εγγεγραμμένο επίπεδο. Η εμμόνη είναι τόσο έντονη που επηρεάζει εμφανώς τα κατασκευαστικά μεγέθη.

4.3 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΣΤΟΧΟΥ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ k, r

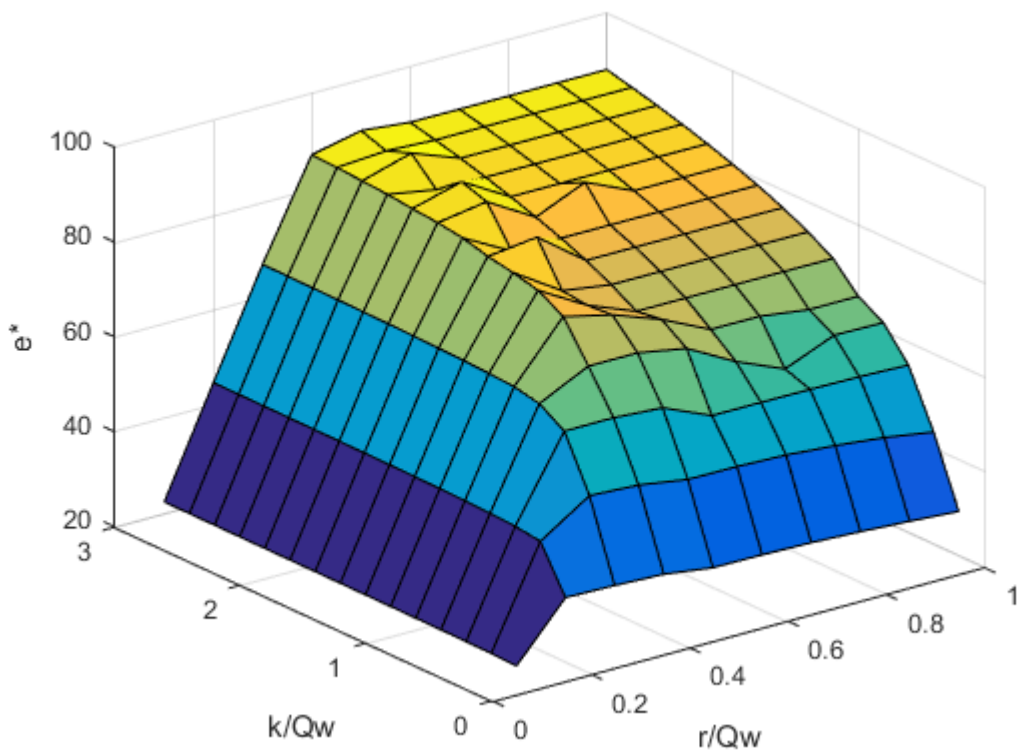
Κατά αντιστοιχία με τα παραπάνω, στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η εξέλιξη του στόχου πρωτεύουσας ενέργειας (e^*) σε GWh/6μηνο, συναρτήσει των k, r (ισοδύναμα $k/Q_w, r/Q_w$ προς αποφυγή των μονάδων) για τα τρία διαφορετικά σενάρια εμμόνης που έχουν προαναφερθεί.



α) $H = 0.5$



β) H = 0.7



γ) H = 0.9

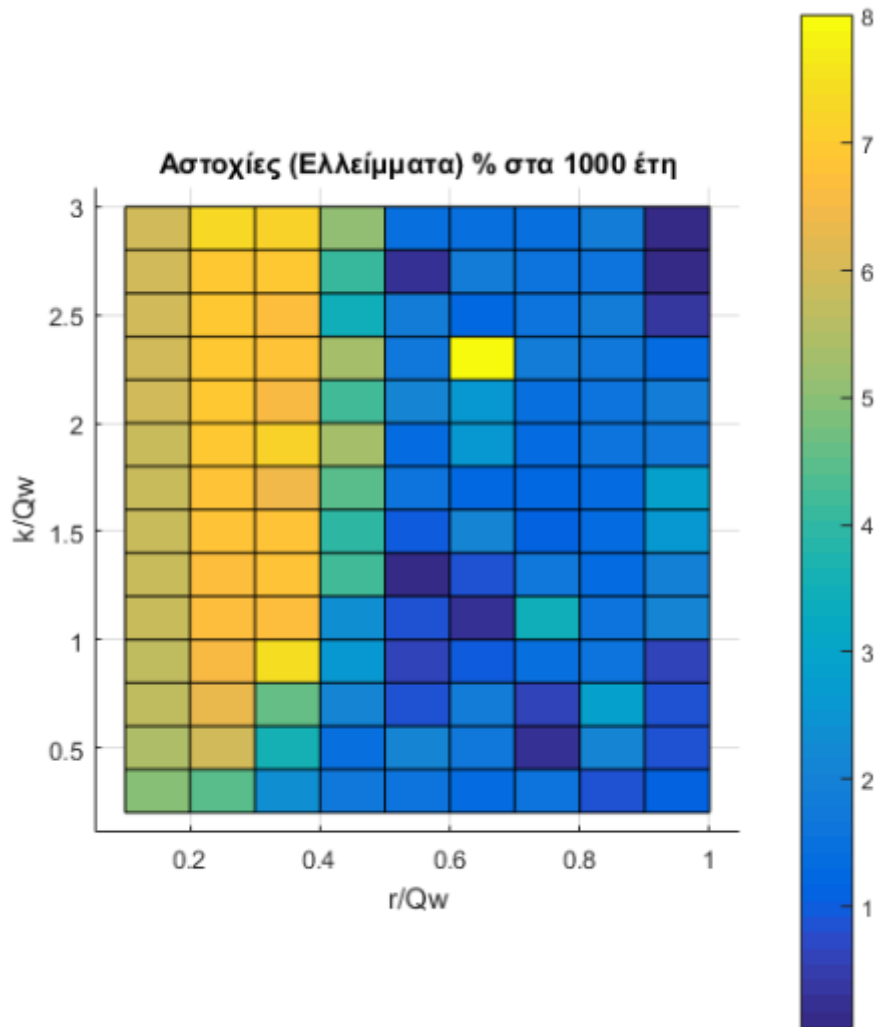
Σχήμα 4.2 Ο χώρος βέλτιστων λύσεων του στόχου με αλλαγή των κατασκευαστικών μεγεθών για συντελεστή Hurst **α) 0.5, β) 0.7, γ) 0.9**

Μελετώντας τα παραπάνω διαγράμματα και επιπρόσθετα στις παρατηρήσεις του υποκεφαλαίου 4.2, παρατηρούνται τα παρακάτω:

- Με ή χωρίς εμμονή, η δευτερεύουσα ενέργεια επηρεάζει το στόχο πρωτεύουσας και άρα το μέσο όφελος. Η συνάρτηση στόχου, δηλαδή το μέσο όφελος είναι από τον τύπο 2.18, $PROFIT_t = \Pi^* e_t^\Pi + \Delta^* e_t^\Delta - EL^* e_t^{\text{έλλειμμα}}$. Ο στόχος που τίθεται είναι στόχος πρωτεύουσας ενέργειας. Όταν εμφανίζονται οι υπερχειλίσεις, η δευτερεύουσα ενέργεια υπεισέρχεται στην εξίσωση και πρέπει να αξιοποιηθεί. Δεδομένου ότι η πρωτεύουσα έχει καλυφθεί, δεν απομένει παρά να μην αυξηθεί περεταίρω ο στόχος και να αυξηθεί το μέσο όφελος
- Η ομαλή αύξηση του μέσου οφέλους, με την αύξηση των κατασκευαστικών μεγεθών παρουσία εμμονής, ανακόπτεται κατά τόπους στα σημεία $(k/Q_w, r/Q_w) = (1.6, 0.8)$ για $H = 0.7$ και $(k, r) = (2.0, 0.7)$ για $H = 0.9$. Στα σημεία αυτά ο στόχος που έχει τεθεί είναι πιο υψηλός από τις γύρω περιοχές και υπάρχει έλλειμμα, άρα μειώνεται το μέσο όφελος
- Για εμμονή $H = 0.9$, στο ζεύγος $(k/Q_w, r/Q_w) = (3.0, 0.4)$, υπάρχει υψηλός στόχος και υψηλό μέσο όφελος, απαιτείται όμως μία πολύ μεγάλη χωρητικότητα ταμιευτήρα
- Στα σημεία όπου κατά τόπους μειώνεται απότομα ο στόχος, το αντίστοιχο μέσο όφελος δεν επηρεάζεται. Άρα τα σημεία αυτά είναι συμφέροντα, διότι αξιοποιούνται οι υπερχειλίσεις κατά το βέλτιστο τρόπο.

4.4 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ k, r

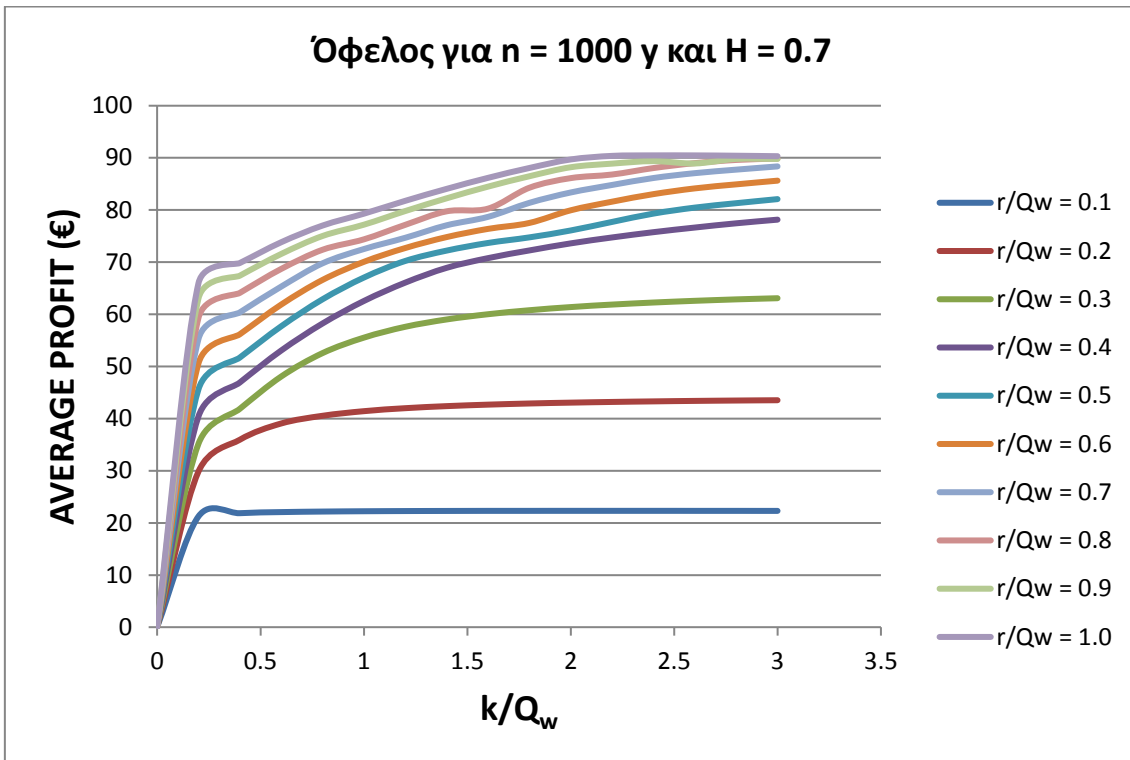
Ακολούθως, στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η εξέλιξη των αστοχιών σε ποσοστιαία έκφραση, συναρτήσει των k, r για ένα σενάριο εμμονής. Αστοχία συνιστά η παρουσία ελλείμματος ενέργειας, οπότε το μέγεθος υπολογίζεται με καταμέτρηση των εξαμήνων που παρουσιάζουν έλλειμμα ως προς το σύνολο των εξαμήνων.



Σχήμα 4.3 Ο χώρος των αστοχιών (ελλείμματα ενέργειας), με αλλαγή των κατασκευαστικών μεγεθών για συντελεστή Hurst 0.7

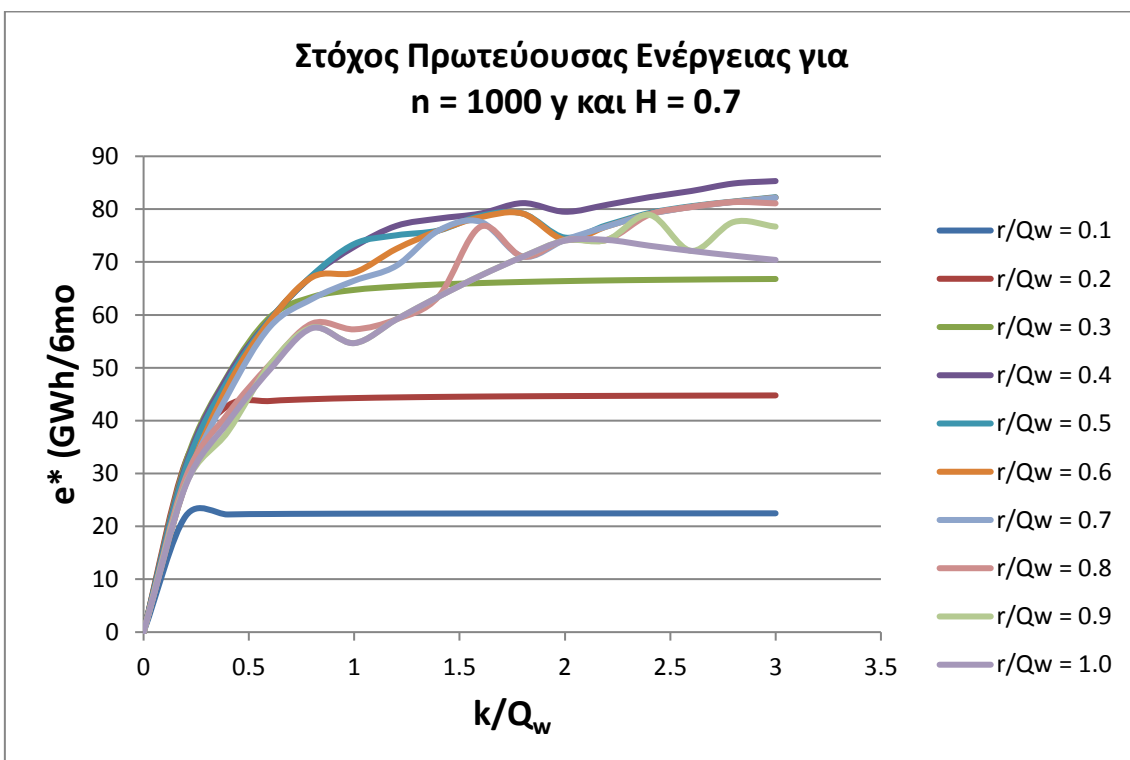
4.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ ΤΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Στο σημείο αυτό παρατίθενται τα διαγράμματα των αδιάστατων μεγεθών r/Q_w , k/Q_w και του μέσου οφέλους, του στόχου και των αστοχιών, καθώς επίσης και του στόχου-μέσου οφέλους. Πρόκειται για τομές των τρισδιάστατων επιφανειών που αποδίδουν την εξέλιξη των χαρακτηριστικών μεγεθών πιο λεπτομερώς και παραστατικά. Επιλέχθηκε το σενάριο με εμμονή $H = 0.7$.



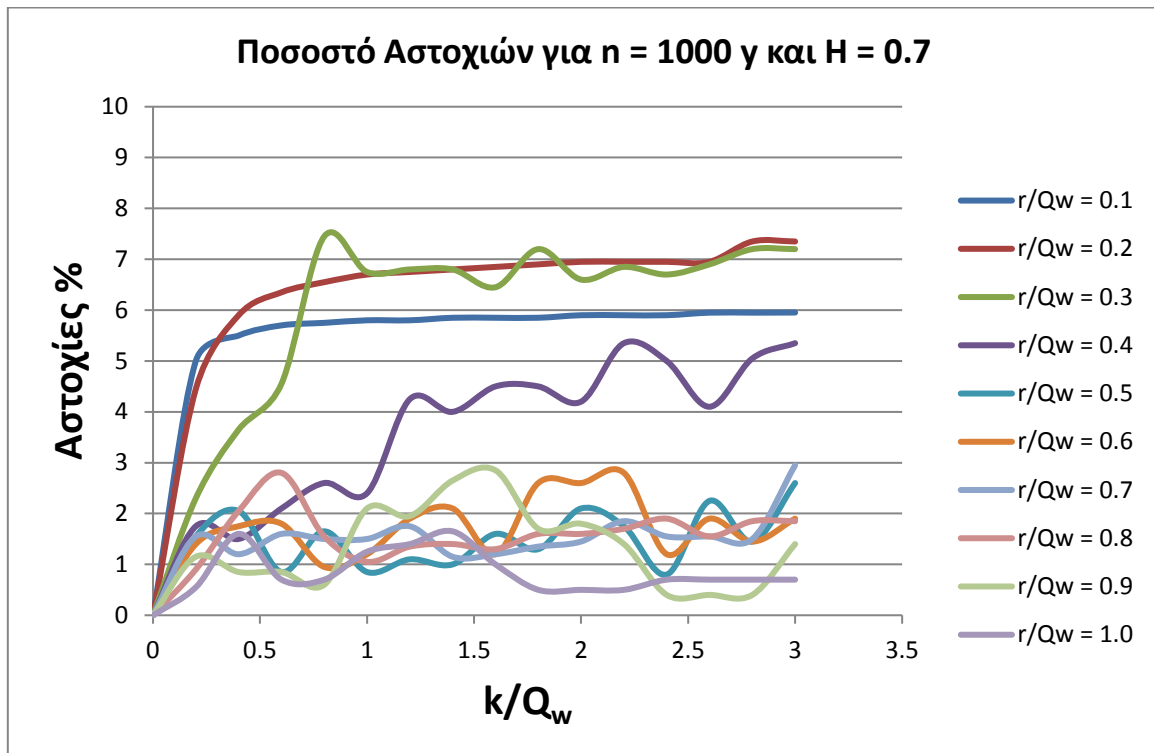
Σχήμα 4.4 Καμπύλη Μέσου Οφέλους - Αδιάστατου Δείκτη Χωρητικότητας

Στο Σχήμα 4.4, όσο αυξάνει η χωρητικότητα, μεγαλώνει το μέσο όφελος. Μεγαλύτερη χωρητικότητα σημαίνει μεγαλύτερο ύψος πτώσης για τον ίδιο ταμιευτήρα, οπότε παράγεται περισσότερη πρωτεύουσα ενέργεια.



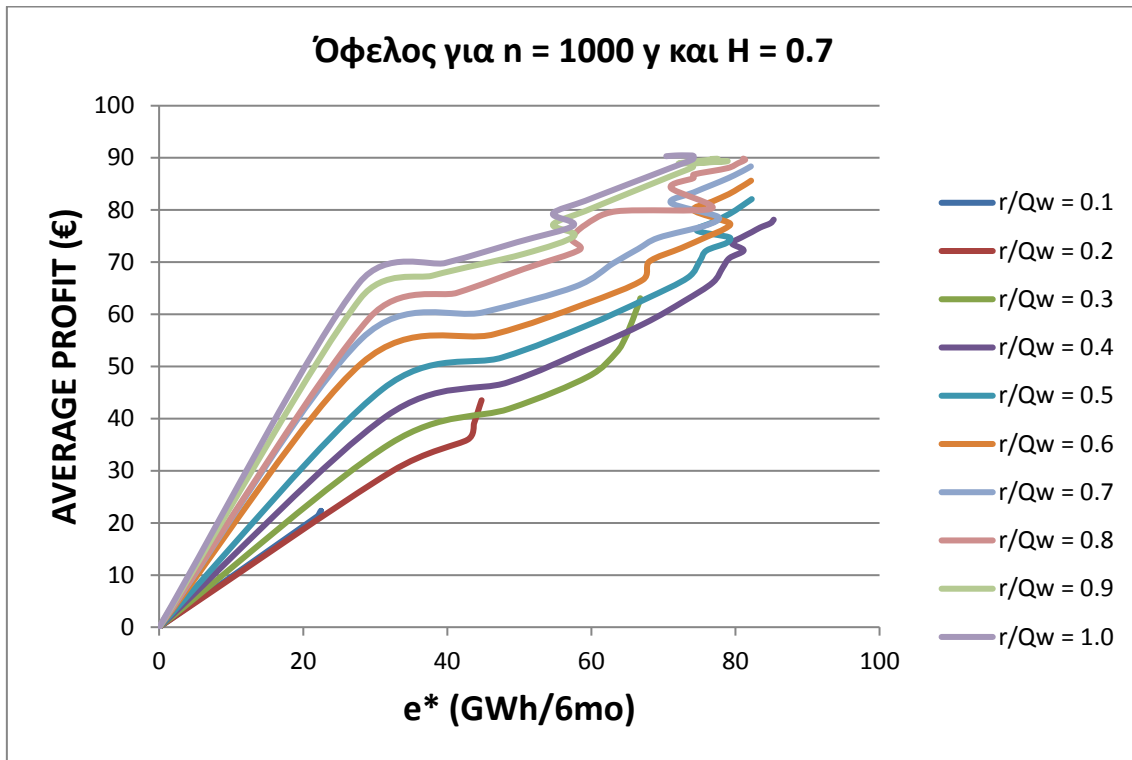
Σχήμα 4.5 Καμπύλη Στόχου - Αδιάστατου Δείκτη Χωρητικότητας

Στο Σχήμα 4.5, η τιμή του στόχου είναι γενικά αύξουσα καθώς αυξάνει η χωρητικότητα του ταμιευτήρα, για τις καμπύλες παροχетеυτικότητας 300 ως και 1000 hm³/6μηνο. Κάποιες απότομες βυθίσεις στις καμπύλες οφείλονται στη συμβολή της δευτερεύουσας ενέργειας, η οποία μπορεί να περιορίσει ή να μειώσει το στόχο παραγωγής πρωτεύουσας, καθώς υπάρχουν πλεονάσματα από τις υπερχειλίσεις. Στις καμπύλες παροχетеυτικότητας 100 και 200 hm³/6μηνο η εξέλιξη είναι σταθερή, διότι εξαντλούνται τα όρια της παροχетеυτικότητας και δεν μπορεί να παραχθεί περισσότερη ενέργεια όσο μεγάλος κι αν είναι ο ταμιευτήρας.



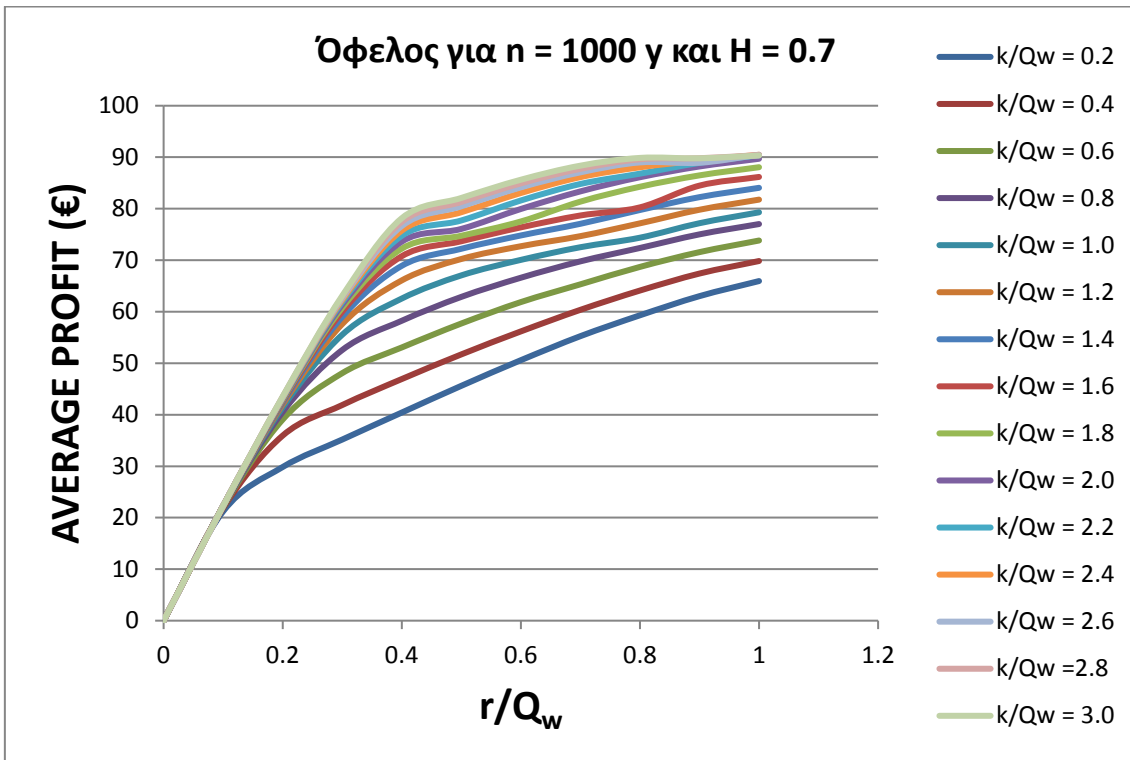
Σχήμα 4.6 Καμπύλη Αστοχιών - Αδιάστατου Δείκτη Χωρητικότητας

Στο Σχήμα 4.6, αύξηση της χωρητικότητας οδηγεί σε αύξηση των αστοχιών. Καθώς αυξάνει το k, αυξάνει ο στόχος πρωτεύουσας ενέργειας που μπορεί να τεθεί. Έτσι γίνεται μεγαλύτερη παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας, όμως η απαίτηση κάλυψης του όλο και αυξανόμενου στόχου στο ακέραιο είναι δυσκολότερη και ναι μεν τα ελλείμματα ελαττώνονται ως τιμές ανά εξάμηνο, λογίζονται δε ως αστοχίες λόγω της υπόθεσης 1 η 0 (ύπαρξη ελλείμματος ή όχι). Για την ίδια χωρητικότητα, όσο πιο μικρή είναι η παροχетеυτικότητα, τόσο περισσότερες οι αστοχίες.



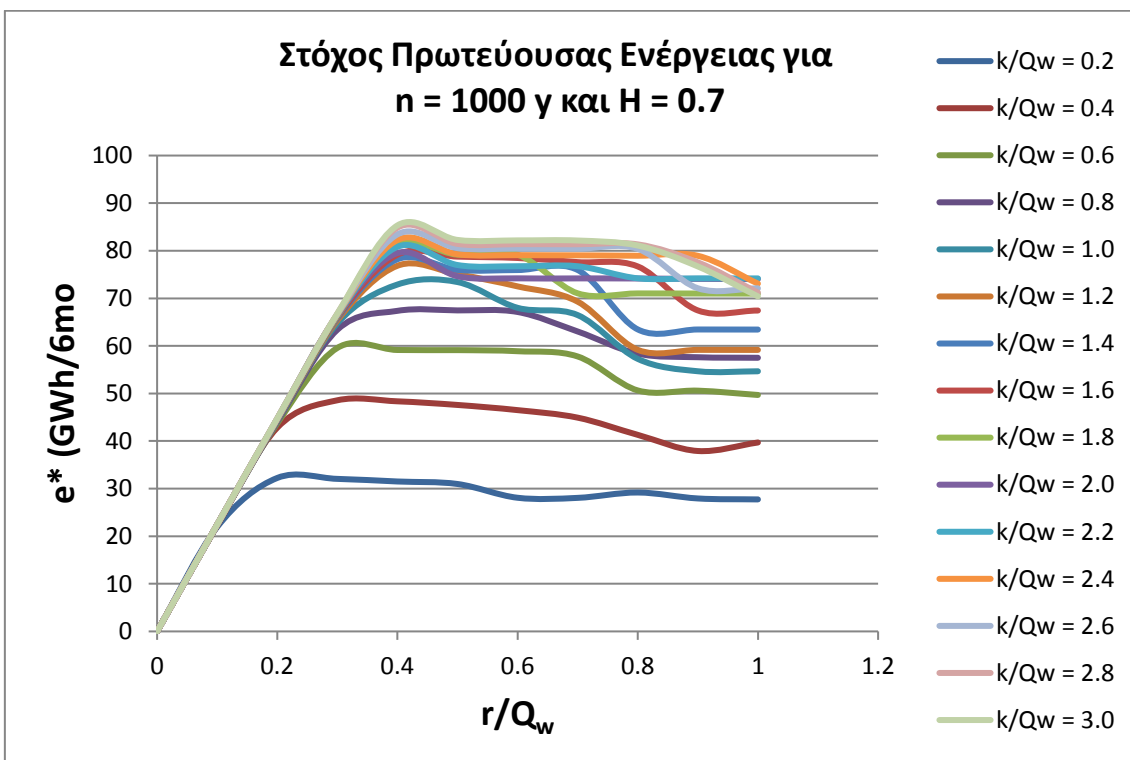
Σχήμα 4.7 Καμπύλη Μέσου Οφέλους - Στόχου

Στο Σχήμα 4.7, με αύξηση του στόχου αυξάνεται το μέσο όφελος. Μικρές αναστροφές στις καμπύλες δείχνουν ότι μπορεί με μικρότερο στόχο να υπάρξει το ίδιο ή μεγαλύτερο μέσο όφελος και αυτό λόγω της εμφάνισης της δευτερεύουσας ενέργειας που αξιοποιεί τις υπερχειλίσεις κρατώντας χαμηλά το στόχο. Επιπλέον, καθώς κατά μήκος μιας καμπύλης αυξάνει η χωρητικότητα του ταμιευτήρα, προσφέρεται περισσότερο νερό για υδροηλεκτρική παραγωγή για την ίδια παροχτετευτικότητα.



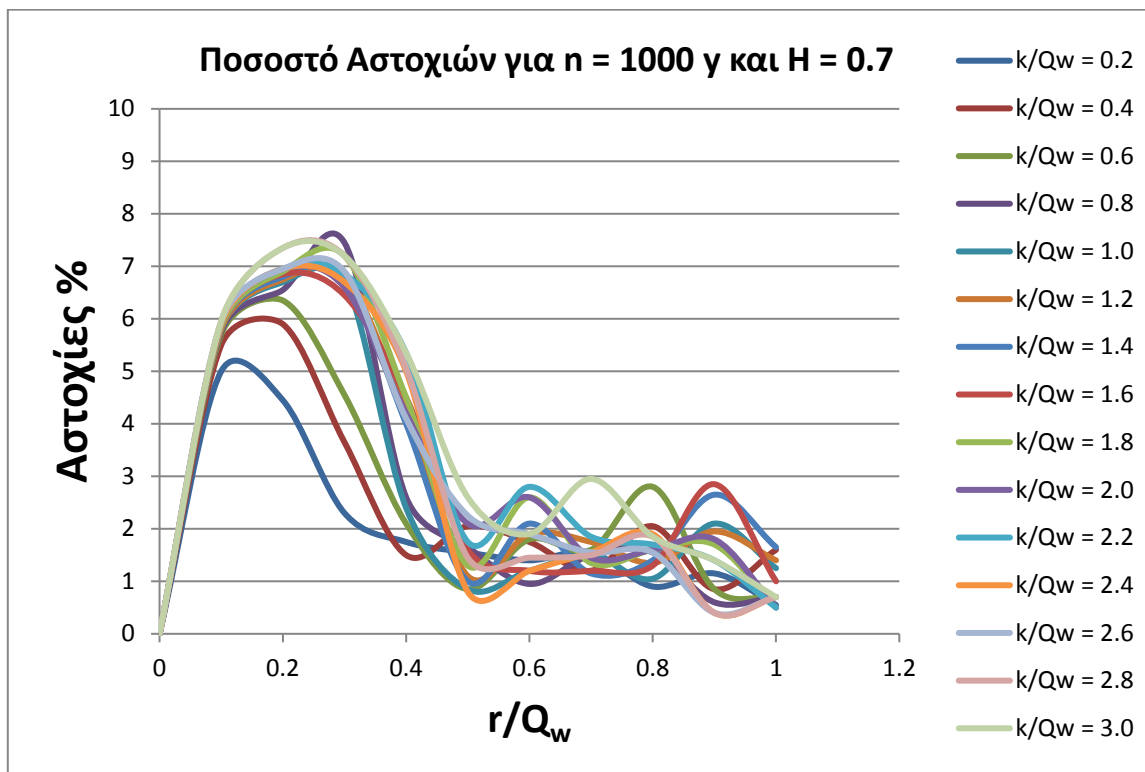
Σχήμα 4.8 Καμπύλη Μέσου Οφέλους - Αδιάστατου Δείκτη Παροχетеυτικότητας

Στο Σχήμα 4.8, όσο αυξάνει η παροχетеυτικότητα, μεγαλώνει το μέσο όφελος, διότι παράγεται περισσότερη πρωτεύουσα ενέργεια.



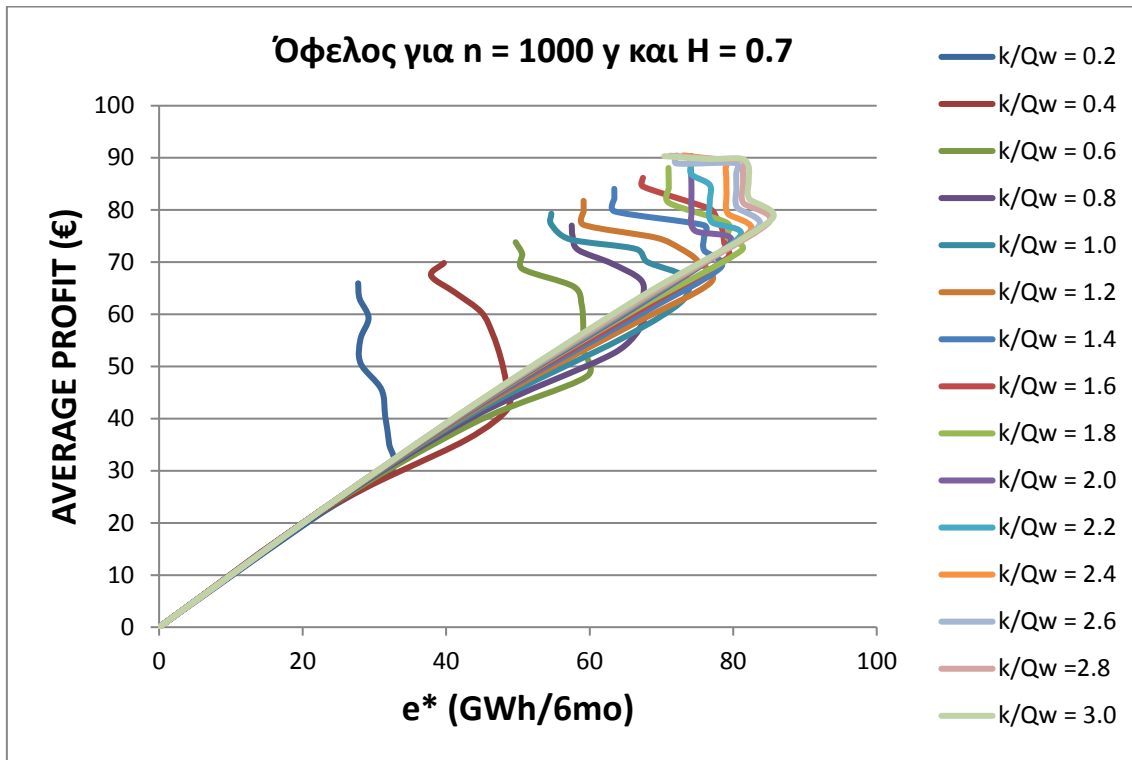
Σχήμα 4.9 Καμπύλη Στόχου - Αδιάστατου Δείκτη Παροχетеυτικότητας

Στο Σχήμα 4.9, με αύξηση της παροχευτικότητας ως περίπου 400 hm^3 το εξάμηνο, υπάρχει αύξηση του στόχου. Περαιτέρω όμως αύξηση της παροχευτικότητας οδηγεί σε ελαφρά μείωση και σταθεροποίηση του στόχου, επομένως παροχευτικότητα ως $r/Q_w = 0.4$, είναι συμφέρουσα και από πλευράς κατασκευαστικού κόστους.



Σχήμα 4.10 Καμπύλη Αστοχιών - Αδιάστατου Δείκτη Παροχευτικότητας

Στο Σχήμα 4.10, αύξηση της παροχευτικότητας πάνω από 250 hm^3 το εξάμηνο περίπου, οδηγεί σε μείωση των αστοχιών για καθεμία από τις χωρητικότητες. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η παροχευτικότητα για τον ίδιο ταμιευτήρα, τόσο μικρότερες οι αστοχίες. Επίσης για την ίδια παροχευτικότητα, όσο πιο μικρή η χωρητικότητα, τόσο πιο λίγες οι αστοχίες.



Σχήμα 4.11 Καμπύλη Μέσου Οφέλους - Στόχου

Στο Σχήμα 4.11, με αύξηση του στόχου αυξάνεται το μέσο όφελος. Μεγάλες αναστροφές στις καμπύλες δείχνουν ότι μπορεί με μικρότερο στόχο να υπάρξει το ίδιο ή μεγαλύτερο μέσο όφελος και αυτό λόγω της εμφάνισης της δευτερεύουσας ενέργειας που αξιοποιεί τις υπερχειλίσεις κρατώντας χαμηλά το στόχο. Οι αναστροφές στις καμπύλες είναι μεγαλύτερες από ότι στο Σχήμα 4.7 διότι για την ίδια χωρητικότητα η παροχετευτικότητα όταν εξαντληθεί δεν μπορεί να αποφέρει περαιτέρω κέρδος. Επομένως ένας μέγιστος στόχος παραγωγής θα αντιστοιχεί στο ίδιο περίπου κέρδος από ένα σημείο και μετά.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΕΙΣΡΩΝ

5.1 ΣΚΟΠΟΣ

Στο στάδιο αυτό εξετάζεται η επίλυση για μικρότερα μήκη χρονοσειράς εισρωών. Υπενθυμίζεται ότι το αρχικό μήκος ήταν 1000 έτη ενώ θα μπορούσε να είναι και μεγαλύτερο (5000, 10000 έτη). Ο συντελεστής εμμονής επιλέγεται ενδεικτικά $H = 0.7$. Για μεμονωμένες επιλύσεις, τα 1000 χρόνια δεν επηρεάζουν το χρόνο επίλυσης και τον υπολογιστικό φόρτο. Στις περιπτώσεις όμως που πρέπει να γίνουν δεκάδες χιλιάδες επαναλήψεις και δοκιμές ή να εξεταστούν και να επιλεχθούν σενάρια και κανόνες λειτουργίας, ένα πολύ μεγάλο μήκος χρονοσειράς μπορεί να απαιτήσει υψηλή χωρητικότητα δεδομένων επίλυσης, μεγάλο φόρτο μαθηματικών πράξεων και δυσθεώρητο απαιτούμενο χρόνο επίλυσης.

5.2 ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΡΑΧΥΤΕΡΕΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ

Το μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής εφαρμόζεται ξανά για μικρότερα μήκη χρονοσειρών εισρωών. Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται η χρονοσειρά των 100 ετών και στη δεύτερη των 200 ετών.

5.2.1 Επίλυση για μήκος χρονοσειράς 100 έτη

Το πρώτο βήμα είναι η κατάτμηση της χρονοσειράς των 1000 ετών σε 10 διαδοχικές των 100 ετών. Για διάφορες τιμές των αδιάστατων μεγεθών r/Q_w και k/Q_w επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος πολλαπλών βελτιστοποιήσεων. Σημειώνονται οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων, για τη συνάρτηση στόχου AVERAGE PROFIT και τη μεταβλητή απόφασης στόχο x^* (Βλ. Παράρτημα) και υπολογίζονται οι τυπικές αποκλίσεις των επιμέρους ομάδων από τους μέσους όρους.

```
diary dokimes.txt;

Qw=1000; %orizo xeimerini mesi eisroi (statheri)

kPROSQw(1)=0.2; %orizo tin proti timi tou k/Qw. apofasisa vima 0.2
k(1)=Qw*kPROSQw(1); %orizo tin proti timi tou k
rPROSQw(1)=0.1; %orizo tin proti timi tou r/Qw. apofasisa vima 0.1
r(1)=Qw*rPROSQw(1); %orizo tin proti timi tou r

for i=2:15 %domi epanalipsis: skopos einai na vro ola ta k/Qw gia dosmeno vima,
esto 8 deigmata
```

```

kPROSQw(i)=kPROSQw(i-1)+0.2 %xekino apo to i=2 exontas pro-orisei to Qw(gt gia
i=0 den orizetai i proti timi)

k(i)=Qw*kPROSQw(i)

for j=2:10 %entos tis epanalipsis thelo k mia ypoantistoixisi me r/Qw
rPROSQw(j)=rPROSQw(j-1)+0.1
r(j)=Qw*rPROSQw(j)

end

end

%grafo ti thelo na bgalei
k
kPROSQw
r
rPROSQw

%veltistopoiisi me ta proigoumena dedomena
for i = 1:15
    %epilisi
    for j=1:10
        [x(i,j),f(i,j)]=ga(@(var)
Fun1(var,k(i),r(j),Q me H 0 7,200),1,[],[],[],[],[0],[160]); %veltistopoiisi:exo
valei k(i). ara toses veltistopoiises osa kai ta r(i)

        X=x;%orizo pinaka x olous tous stoxous ton veltistopoiiseon

        F=f;%omoios gia ta ofeli
    end
end

X
F

%diagramma 3D
[A,B]=meshgrid(rPROSQw,kPROSQw)
surf(A,B,-F)
surf(A,B,X)
diary off;

```

- Αυτό που διαφοροποιείται στον αλγόριθμο πολλαπλών βελτιστοποιήσεων είναι το όνομα της νέας χρονοσειράς και η δήλωση του μήκους της.

5.2.2 Επίλυση για μήκος χρονοσειράς 200 έτη

Ακολούθως η χρονοσειρά των 1000 ετών κατατμίζεται σε 5 χρονοσειρές των 200 ετών.

```
[...]
%veltistopoiisi me ta proigoumena dedomena
for i = 1:15
    %epilisi
    for j=1:10
        [x(i,j),f(i,j)]=ga(@(var)
Fun1(var,k(i),r(j),Q me H 0.7,400),1,[],[],[],[],[0],[160]); %veltistopoiisi:exo
valei k(i). ara toses veltistopoiises osa kai ta r(i)
        X=x;%orizo pinaka x olous tous stoxous ton veltistopoiiseon
        F=f;%omoios gia ta ofeli
    end
end
end
[...]
```

5.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΥΤΕΡΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ

Έχοντας κατασκευάσει τους πίνακες αποτελεσμάτων από τις επιλύσεις του 5.2 με $H = 0.7$ για 1000, 100 και 200 έτη, μπορεί να μελετηθεί η σκοπιμότητα χρήσης των χρονοσειρών μικρότερου μήκους. Σημειώνεται ότι ο χρόνος επίλυσης για τα 100 και 200 έτη προέκυψε πολύ μικρότερος. Ενδεικτικά για μία βελτιστοποίηση στα 1000 έτη απαιτούνται κατά προσέγγιση 40 sec, στα 200 έτη 15 sec ενώ στα 100 έτη κάτω από 10 sec.

Για το συγκεκριμένο κομμάτι επειδή είναι αριθμητικό, ο υπολογισμός γίνεται στο Excel. Εξάγονται οι μέσοι όροι ενεργειακών στόχων και μέσων οφελών από τις 5 ομάδες των 200 ετών και τις 10 ομάδες των 100 ετών. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι τυπικές αποκλίσεις των δειγμάτων.

Ενδεικτικά παρατίθεται ο υπολογισμός μέσου οφέλους και οι αντίστοιχοι στόχοι της χρονοσειράς εισροών των 1000 ετών.

Πίνακας 5.1 Το μέσο όφελος με αλλαγή των k, r για χρονοσειρά 1000 ετών και $H = 0.7$

F	r/Q_w									
k/Q_w	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.2	21.234	29.839	35.169	40.415	45.607	50.581	55.250	59.301	63.023	65.951
0.4	21.861	35.942	41.873	46.923	51.707	56.175	60.365	64.108	67.409	69.837
0.6	22.068	39.063	48.067	53.056	57.704	61.865	65.316	68.701	71.572	73.823
0.8	22.171	40.541	52.559	58.239	62.878	66.596	69.775	72.381	75.022	77.018
1	22.232	41.425	55.530	62.555	67.051	70.064	72.521	74.375	77.187	79.299
1.2	22.268	41.996	57.604	66.076	70.231	72.713	74.675	77.160	79.801	81.765
1.4	22.289	42.389	59.010	68.912	72.217	74.809	77.070	79.750	82.245	84.056
1.6	22.302	42.676	60.016	70.776	73.681	76.379	78.687	80.264	84.484	86.170
1.8	22.307	42.897	60.783	72.246	74.753	77.523	81.376	84.267	86.477	88.060
2	22.310	43.062	61.388	73.605	76.079	79.946	83.365	86.114	88.203	89.696
2.2	22.312	43.194	61.868	74.736	77.718	81.597	84.805	86.806	88.897	90.386
2.4	22.311	43.302	62.259	75.751	79.314	83.048	86.138	88.046	89.376	90.478
2.6	22.307	43.393	62.586	76.639	80.464	84.146	87.067	88.992	88.924	90.475
2.8	22.303	43.465	62.862	77.451	81.309	84.919	87.741	89.598	89.804	90.415
3	22.299	43.523	63.083	78.152	82.090	85.631	88.362	89.867	89.791	90.321

Πίνακας 5.2 Ο στόχος πρωτεύουσας ενέργειας με αλλαγή των k, r για χρονοσειρά 1000 ετών και $H = 0.7$

e*	r/Q_w									
k/Q_w	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.2	21,947	32,250	32,055	31,507	30,975	28,085	28,063	29,188	27,937	27,736
0.4	22,260	42,819	48,568	48,351	47,590	46,501	44,919	41,305	37,912	39,699
0.6	22,345	43,714	59,572	59,140	59,107	58,881	57,772	50,639	50,594	49,685
0.8	22,385	44,065	63,391	67,367	67,458	67,125	63,024	58,371	57,615	57,502
1	22,408	44,269	64,730	72,897	73,415	67,998	66,471	57,270	54,671	54,663
1.2	22,424	44,398	65,352	76,841	75,060	72,503	69,291	59,169	59,163	59,153
1.4	22,435	44,489	65,760	78,217	75,969	75,939	75,950	63,457	63,446	63,432
1.6	22,443	44,558	66,023	79,170	78,758	78,470	77,604	76,694	67,449	67,430
1.8	22,449	44,610	66,233	81,142	79,171	79,158	71,046	71,028	71,005	70,986
2	22,454	44,649	66,394	79,508	74,627	74,196	74,186	74,164	74,080	74,045
2.2	22,459	44,682	66,522	80,828	76,990	76,738	76,738	74,200	74,189	74,178
2.4	22,462	44,709	66,613	82,257	79,256	79,073	79,035	78,943	78,931	73,088
2.6	22,465	44,732	66,685	83,433	80,552	80,444	80,419	80,391	72,110	72,100
2.8	22,467	44,751	66,748	84,851	81,437	81,385	81,360	81,330	77,554	71,208
3	22,470	44,768	66,796	85,315	82,267	82,171	82,142	81,092	76,696	70,397

5.3.1 Ο συντελεστής μεταβλητότητας

Αν ένα δείγμα εξεταζόμενο ως προς μια ποσοτική μεταβλητή του, παρουσιάζει μέση τιμή \bar{X} και τυπική απόκλιση s , τότε συντελεστής μεταβολής ή συντελεστής μεταβλητότητας (CV) ονομάζεται το πηλίκο της τυπικής απόκλισης προς την μέση τιμή * 100% (Ανδρουλάκης, 2013).

Ο συντελεστής μεταβλητότητας αποτελεί σχετική μέτρηση της διασποράς ενός δείγματος. Εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό (%) και η μαθηματική του έκφραση ορίζεται ως ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς τον αριθμητικό μέσο:

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \quad [5.1]$$

Ωστόσο αν $\bar{x} < 0$, τότε

$$CV = \frac{s}{|\bar{X}|} \quad [5.2]$$

Ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι ανεξάρτητος από τις μονάδες μετρήσεων των δεδομένων, διευκολύνοντας τη σύγκριση ομάδων δεδομένων με διαφορετικές μονάδες μέτρησης και δειγμάτων με μεγάλες αποκλίσεις στις μέσες τιμές τους. Ένα μειονέκτημά του είναι ότι παύει να ορίζεται όταν η μέση τιμή x του δείγματος είναι κοντά στο μηδέν.

Ο CV μετράει την ομοιογένεια ενός πληθυσμού.

- Αν είναι $CV < 10\%$, ο πληθυσμός θεωρείται ομοιογενής
- Αν είναι $CV > 10\%$ ή $CV = 10\%$, ο πληθυσμός θεωρείται ανομοιογενής.

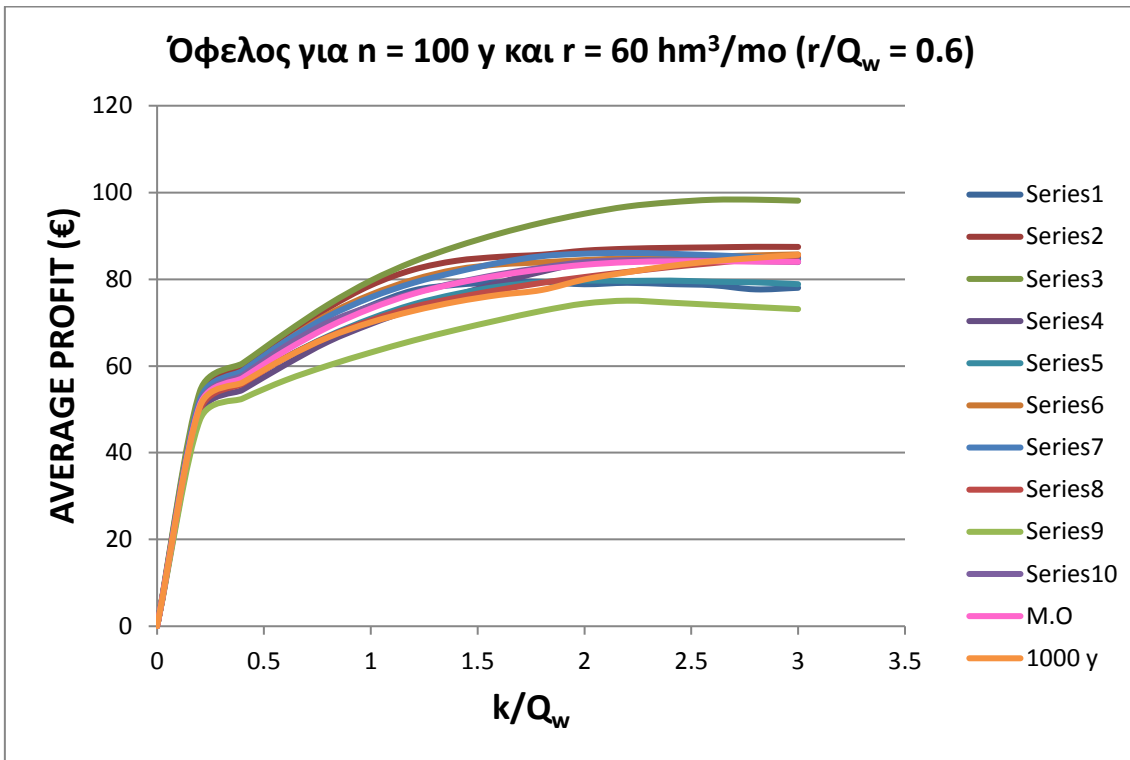
5.3.2 Στατιστική συμπεριφορά της χρονοσειράς μήκους 100 ετών

Για κάθε μία εκ των δέκα ομάδων χρονοσειρών εισροών μήκους 100 ετών εξάγονται τα αποτελέσματα του αλγόριθμου προσομοίωσης-βελτιστοποίησης με αλλαγή των κατασκευαστικών μεγεθών. Στη συνέχεια, στον Πίνακα 5.2 παρατίθεται ο μέσος όρος για το μέσο όφελος από τις δέκα ομάδες.

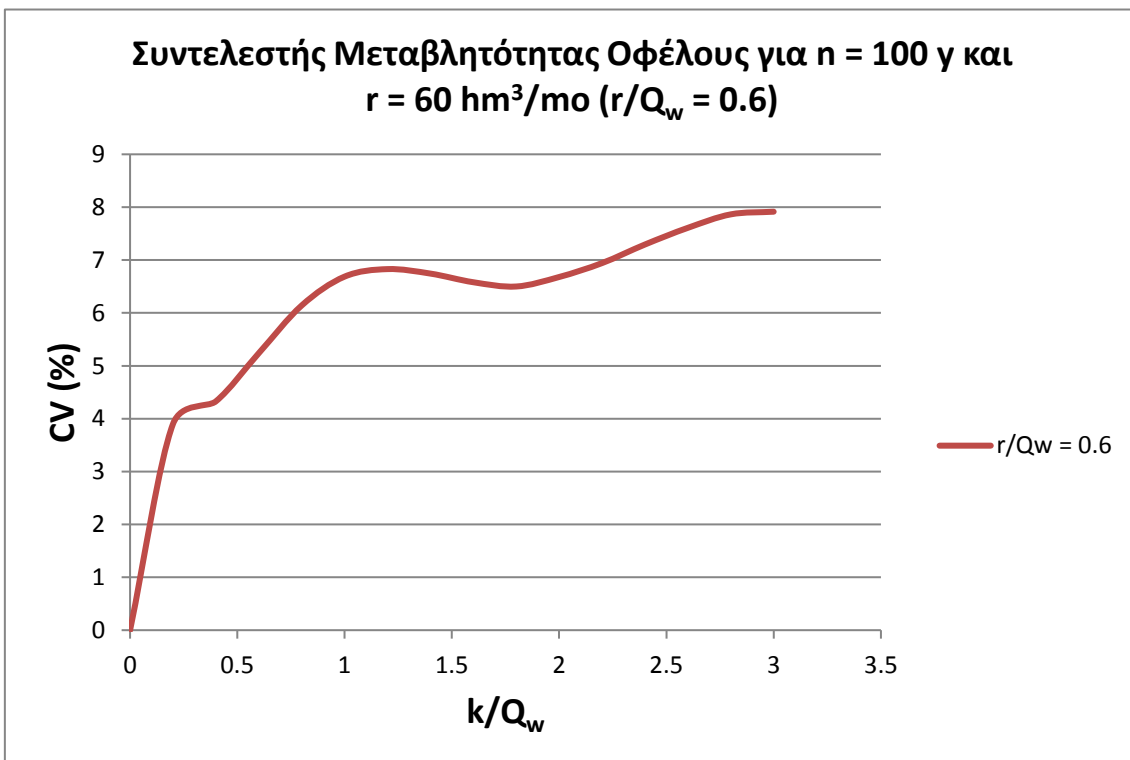
Πίνακας 5.3 Το μέσο όφελος με αλλαγή των k, r από τις 10 χρονοσειρές των 100 ετών και $H = 0.7$

Μ.Ο F	r/Q_w									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.2	21.254	30.025	35.432	40.764	45.970	50.930	55.548	59.685	63.263	66.171
0.4	21.865	36.123	42.504	47.649	52.585	57.212	61.396	65.066	68.106	70.519
0.6	22.019	39.021	49.106	54.510	59.212	63.505	67.320	70.558	73.140	75.082
0.8	22.078	40.378	53.220	60.331	64.883	68.948	72.469	75.336	77.567	79.191
1	22.097	41.151	55.728	64.675	69.363	73.243	76.528	79.132	81.155	82.596
1.2	22.084	41.609	57.318	67.737	72.987	76.649	79.726	82.135	83.878	85.199
1.4	22.056	41.877	58.322	69.895	75.591	79.056	82.028	84.308	85.892	87.122
1.6	22.012	41.999	58.979	71.451	77.554	80.886	83.711	85.893	87.421	88.510
1.8	21.950	42.043	59.436	72.595	79.159	82.284	84.981	87.042	88.520	89.551
2	21.877	42.051	59.718	73.387	80.374	83.323	85.811	87.762	89.252	90.252
2.2	21.813	42.028	59.863	73.854	81.098	83.933	86.302	88.222	89.659	90.654
2.4	21.745	41.974	59.900	74.008	81.471	84.114	86.414	88.327	89.783	90.798
2.6	21.675	41.891	59.860	74.002	81.552	84.155	86.345	88.256	89.740	90.770
2.8	21.607	41.777	59.783	73.883	81.497	84.070	86.230	88.124	89.619	90.669
3	21.534	41.656	59.660	73.698	81.377	84.018	86.068	87.733	89.438	90.512

Στο Σχήμα 5.1 εμφανίζονται συγκεντρωτικά για τις 10 ομάδες τα γραφήματα της εξέλιξης του average profit και ένα ενδέκατο γράφημα που είναι ο μέσος όρος αυτών, συναρτήσει της χωρητικότητας του ταμιευτήρα, το αντίστοιχο γράφημα των 1000 ετών καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής μεταβλητότητας σε ποσοστιαίες εκφράσεις (Σχήμα 5.2). Η παροχетеυτικότητα διατηρείται σταθερή και ίση με $60 \text{ hm}^3/\delta\mu\eta\text{no}$.



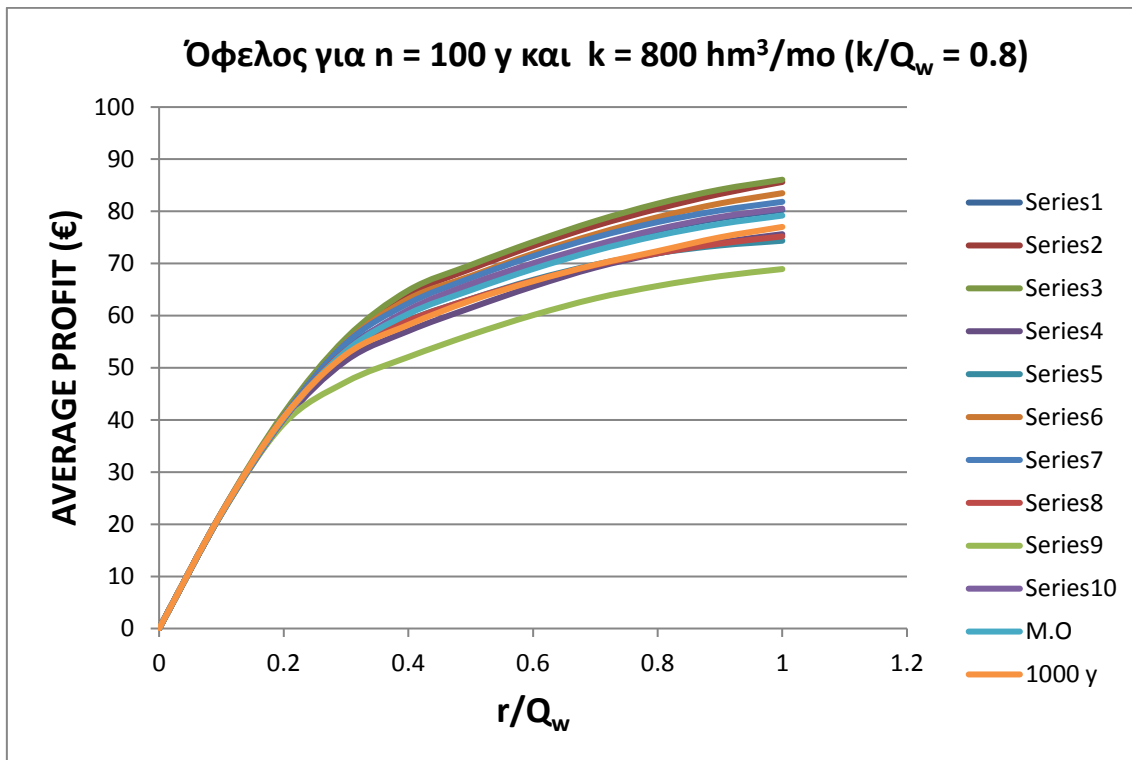
Σχήμα 5.1 Εξέλιξη του οφέλους συναρτήσει της χωρητικότητας του ταμιευτήρα για 10 χρονοσειρές εισροών μήκους 100 ετών και μέσος όρος αυτών



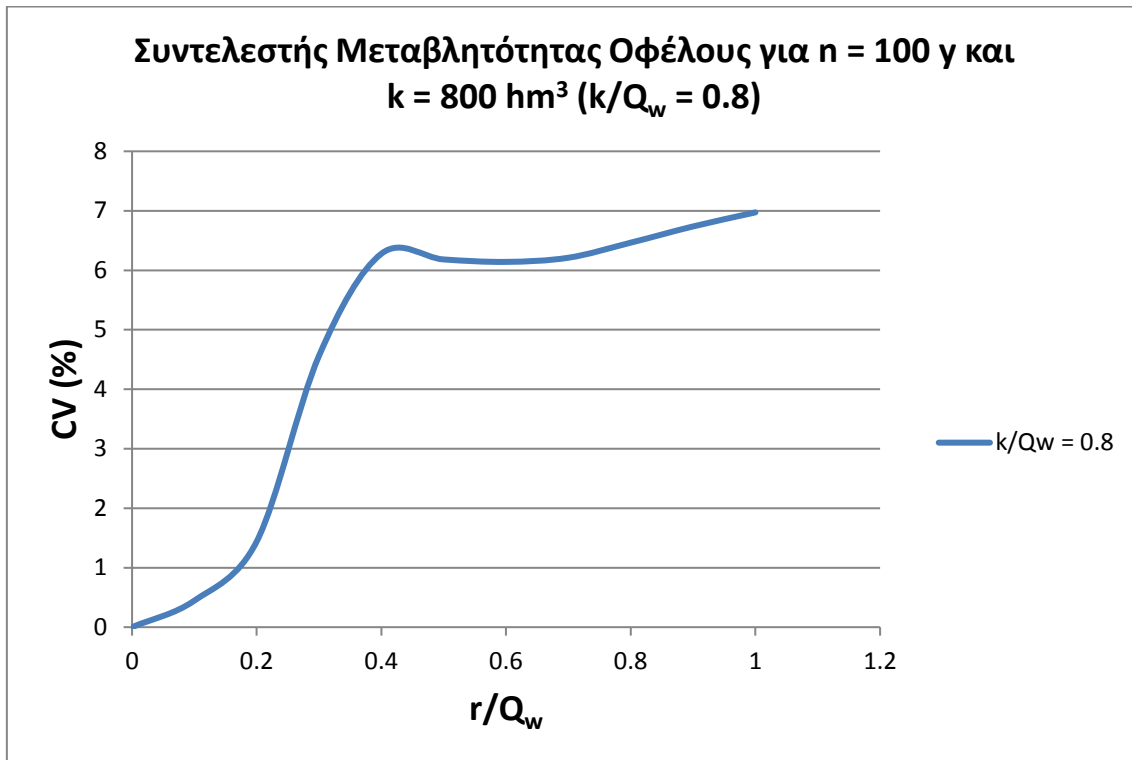
Σχήμα 5.2 Συντελεστής μεταβλητότητας μέσου οφέλους συναρτήσει της χωρητικότητας του ταμιευτήρα για 10 χρονοσειρές εισροών μήκους 100 ετών

Στο Σχήμα 5.1 οι σειρές 3 και 9 απέχουν το μέγιστο από το μέσο όρο. Επίσης, παρατηρώντας το Σχήμα 5.2, ο CV δεν ξεπερνά το 10%. Πρακτικά το δείγμα είναι ομοιογενές, επομένως η χρήση μίας χρονοσειράς 100 ετών για χωρητικότητα ταμιευτήρα άνω των 1000 hm³, είναι επαρκής.

Στο Σχήμα 5.3 εμφανίζονται συγκεντρωτικά για τις 10 ομάδες τα γραφήματα της εξέλιξης του average profit και ένα ενδέκατο γράφημα που είναι ο μέσος όρος αυτών, το αντίστοιχο γράφημα των 1000 ετών συναρτήσει της παροχетеυτικότητας του αγωγού, καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής μεταβλητότητας σε ποσοστιαίες εκφράσεις (Σχήμα 5.4). Η χωρητικότητα διατηρείται σταθερή και ίση με 800 hm³.



Σχήμα 5.3 Εξέλιξη του μέσου οφέλους συναρτήσει της παροχетеυτικότητας του αγωγού για 10 χρονοσειρές εισροών μήκους 100 ετών και μέσος όρος αυτών



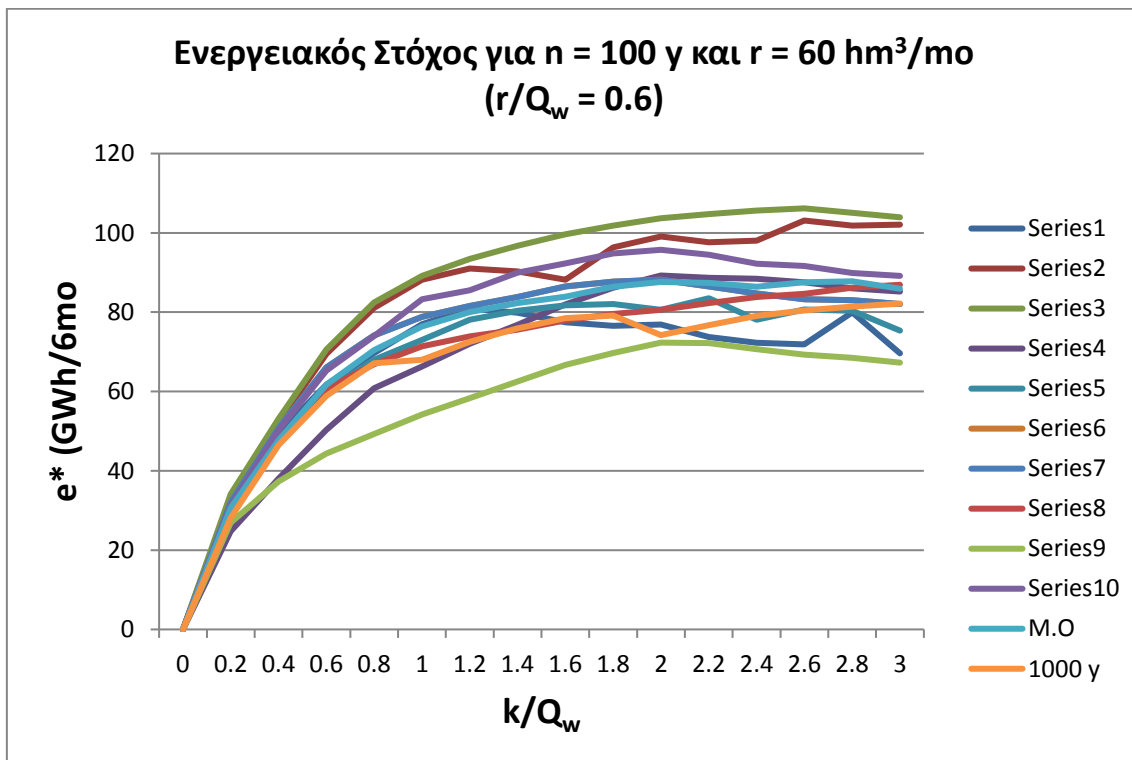
Σχήμα 5.4 Συντελεστής μεταβλητότητας οφέλους συναρτήσει της παροχетеυτικότητας του αγωγού για 10 χρονοσειρές εισροών μήκους 100 ετών

Στο Σχήμα 5.3 οι σειρές 3 και 9 απέχουν το μέγιστο από το μέσο όρο. Επίσης, παρατηρώντας το Σχήμα 5.4, ο CV δεν ξεπερνά το 10%. Πρακτικά όλα τα δείγματα είναι ομοιογενή, επομένως η χρήση μίας χρονοσειράς 100 ετών για χωρητικότητα ταμιευτήρα 800 hm^3 και διάφορες τιμές παροχетеυτικότητας, είναι επαρκής ως προς το μέσο όφελος.

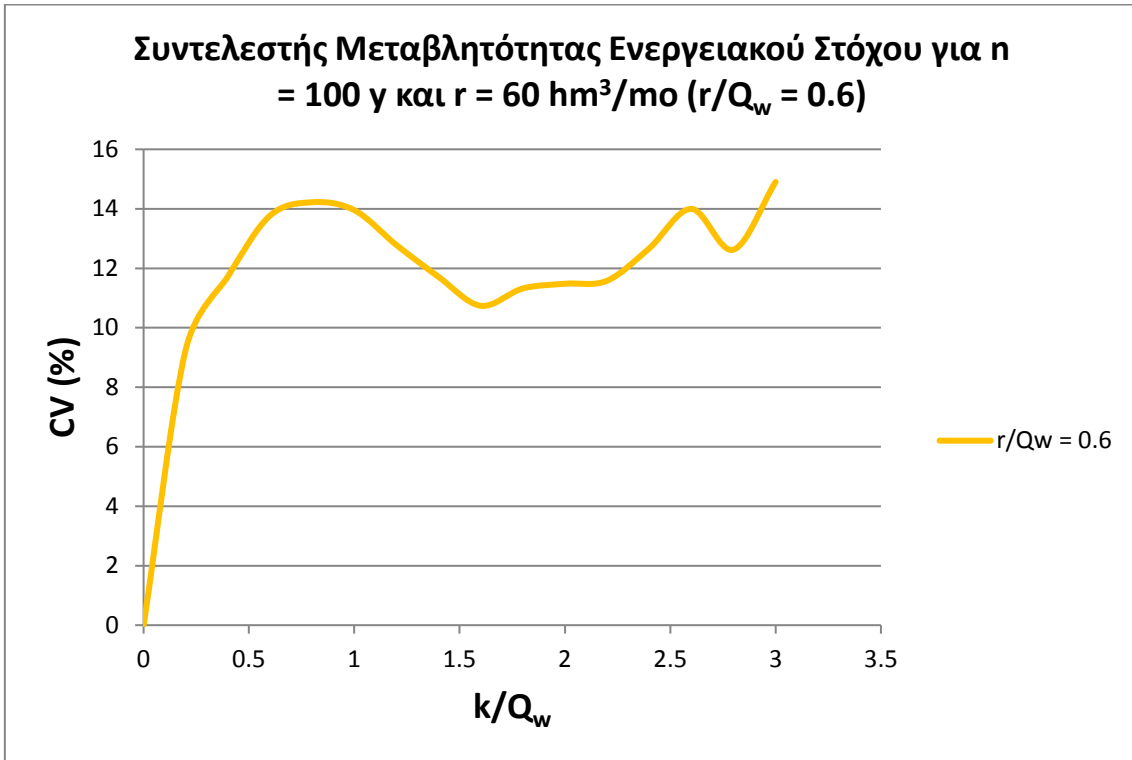
Στη συνέχεια, ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για το στόχο πρωτεύουσας ενέργειας.

Πίνακας 5.4 Ο στόχος πρωτεύουσας ενέργειας με αλλαγή των k , r από τις 10 χρονοσειρές των 100 ετών και $H = 0.7$

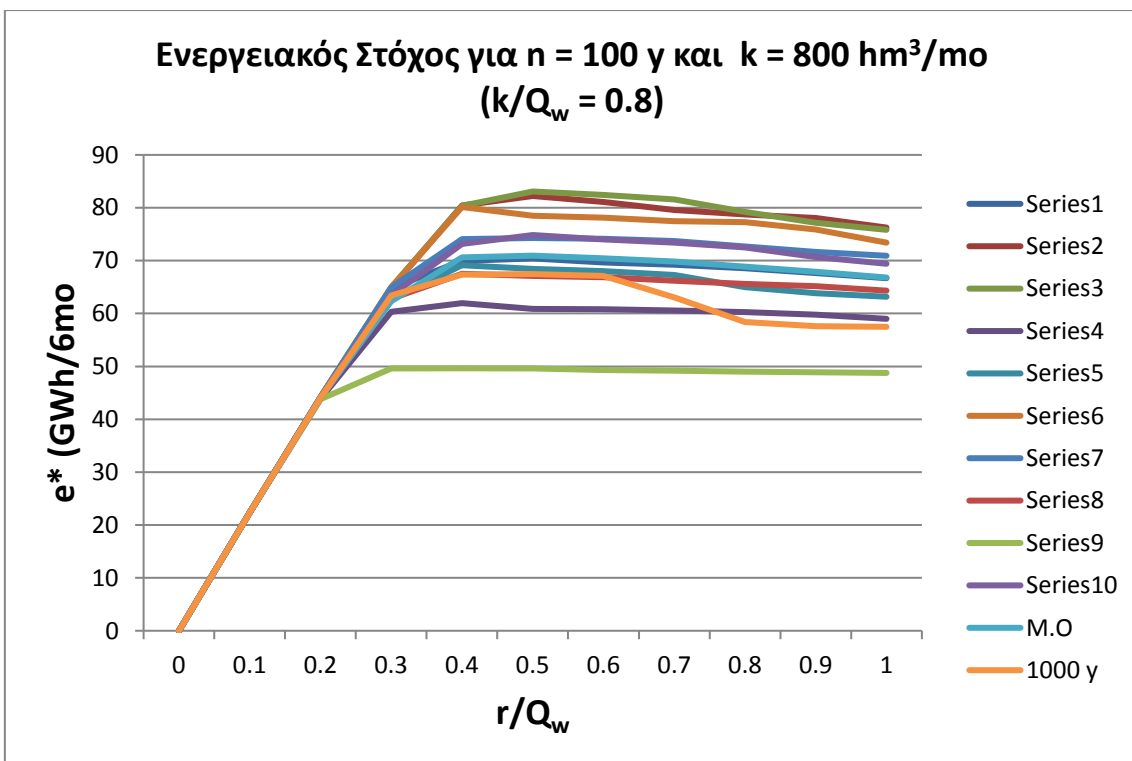
M.O e^*	r/Q_w									
k/Q_w	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.2	22,032	33,080	32,660	32,242	31,728	31,216	30,659	29,663	29,188	28,513
0.4	22,267	42,956	52,265	51,668	50,976	50,281	48,422	47,536	46,345	44,594
0.6	22,359	43,738	61,428	67,925	67,222	65,244	64,483	63,134	60,914	59,077
0.8	22,383	44,108	63,391	73,190	74,846	73,999	73,436	72,498	70,659	69,406
1	22,407	44,291	65,044	81,443	83,019	83,241	81,484	72,095	71,760	71,544
1.2	22,422	44,412	65,555	83,061	87,025	85,517	85,457	84,561	69,658	69,507
1.4	22,433	44,501	65,739	84,870	90,581	89,980	89,981	86,371	86,026	67,802
1.6	22,442	44,554	66,048	85,588	93,559	92,296	91,530	88,600	86,575	66,217
1.8	22,447	44,610	66,211	86,129	95,150	94,799	92,067	87,320	85,955	82,226
2	22,452	44,650	66,341	86,553	96,445	95,727	91,506	86,080	83,818	80,787
2.2	22,456	44,682	66,517	86,848	97,977	94,468	90,527	84,161	82,234	78,970
2.4	22,460	44,709	66,555	87,111	97,917	92,262	88,456	82,939	80,573	78,212
2.6	22,463	44,732	66,548	86,848	96,353	91,659	86,658	80,461	80,183	76,615
2.8	22,466	44,751	66,616	86,158	95,418	89,869	84,957	80,859	78,466	73,260
3	22,468	44,757	66,730	84,881	93,835	89,161	84,837	79,262	78,759	72,940



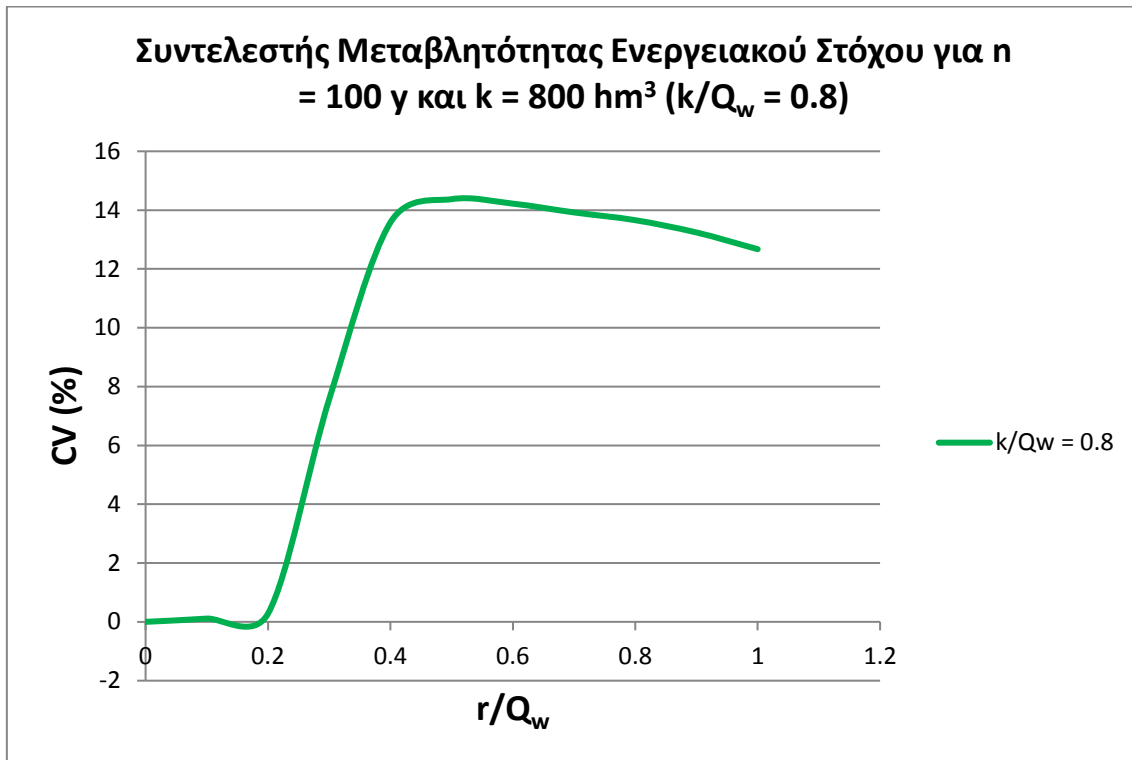
Σχήμα 5.5 Εξέλιξη του στόχου πρωτεύουσας ενέργειας συναρτήσει της χωρητικότητας του ταμιευτήρα για 10 χρονοσειρές εισρών μήκους 100 ετών και μέσος όρος αυτών



Σχήμα 5.6 Συντελεστής μεταβλητότητας στόχου πρωτεύουσας ενέργειας συναρτήσει της χωρητικότητας του ταμιευτήρα για 10 χρονοσειρές εισροών μήκους 100 ετών



Σχήμα 5.7 Εξέλιξη του στόχου πρωτεύουσας ενέργειας συναρτήσει της παροχτευτικότητας του αγωγού για 10 χρονοσειρές εισροών μήκους 100 ετών και μέσος όρος αυτών



Σχήμα 5.8 Συντελεστής μεταβλητότητας στόχου πρωτεύουσας ενέργειας συναρτήσει της παροχευτικότητας του αγωγού για 10 χρονοσειρές εισροών μήκους 100 ετών

Και στις δύο αναλύσεις παρατηρούνται ιδιαίτερα υψηλές μεταβλητότητες ως προς το στόχο πρωτεύουσας ενέργειας. Καθώς ο στόχος προσδιορίζεται μέσα από μία περίπλοκη διαδικασία προσομοίωσης-βελτιστοποίησης κι λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία της δευτερεύουσας ενέργειας, είναι επόμενο να υπάρχουν αποκλίσεις από το μέσο όρο.

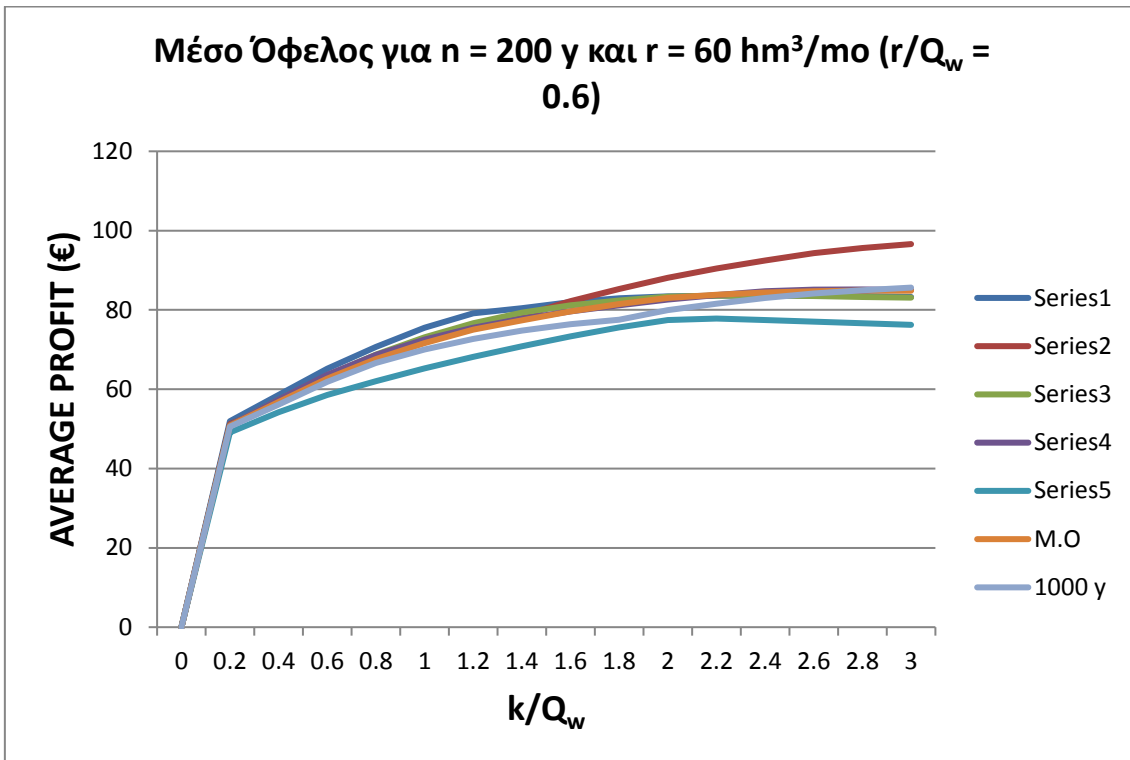
5.3.3 Στατιστική συμπεριφορά της χρονοσειράς μήκους 200 ετών

Για κάθε μία εκ των πέντε ομάδων χρονοσειρών εισροών μήκους 200 ετών εξάγονται τα αποτελέσματα του αλγόριθμου προσομοίωσης-βελτιστοποίησης με αλλαγή των κατασκευαστικών μεγεθών. Στη συνέχεια, στον Πίνακα 5.4 παρατίθεται ο μέσος όρος για το μέσο όφελος από τις πέντε ομάδες.

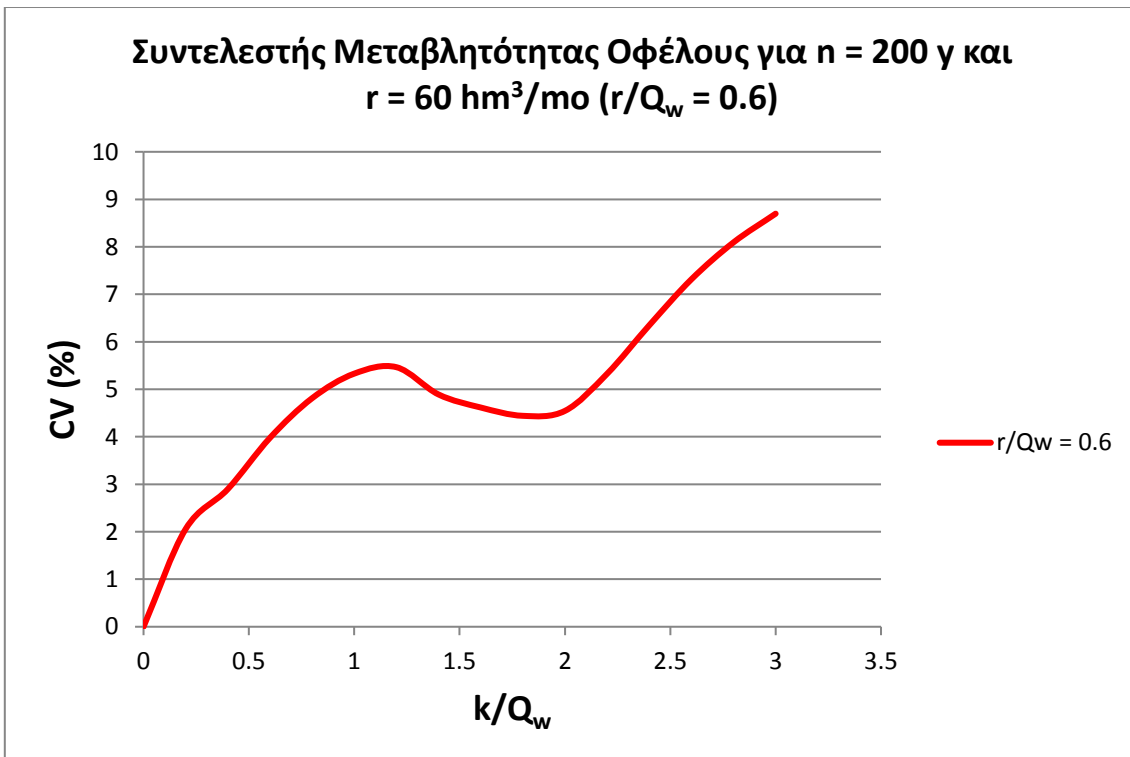
Πίνακας 5.5 Το μέσο όφελος με αλλαγή των k , r από τις 5 χρονοσειρές των 200 ετών και $H = 0.7$

M.O F k/Qw	r/Qw									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.2	21,241	29,892	35,217	40,638	45,842	50,809	55,418	59,551	63,108	21,241
0.4	21,862	35,888	42,151	47,312	52,198	56,752	60,975	64,730	67,759	21,862
0.6	22,045	39,042	48,364	53,435	58,325	62,643	66,395	69,954	72,661	22,045
0.8	22,134	40,479	52,695	58,712	63,235	67,577	71,318	74,389	76,828	22,134
1	22,176	41,315	55,488	63,059	67,570	71,646	74,579	78,019	80,255	22,176
1.2	22,196	41,850	57,454	66,562	71,152	75,014	78,325	81,010	83,121	22,196
1.4	22,201	42,202	58,752	69,235	73,729	77,359	80,661	83,271	85,308	22,201
1.6	22,196	42,438	59,649	71,209	76,202	79,669	82,476	85,019	86,968	22,196
1.8	22,174	42,589	60,293	72,911	78,297	81,469	83,937	86,410	88,297	22,174
2	22,148	42,692	60,774	74,177	80,076	82,996	85,169	87,510	89,331	22,148
2.2	22,123	42,760	61,111	74,883	81,212	83,847	85,923	88,197	90,005	22,123
2.4	22,096	42,804	61,346	75,274	81,908	84,385	86,381	88,599	90,388	22,096
2.6	22,064	42,823	61,496	75,524	82,316	84,718	86,682	88,298	90,621	22,064
2.8	22,034	42,811	61,578	75,679	82,519	84,844	86,780	88,908	90,709	22,034
3	22,001	42,792	61,599	75,740	82,528	84,845	86,717	88,833	90,665	22,001

Στο Σχήμα 5.9 εμφανίζονται συγκεντρωτικά για τις 5 ομάδες τα γραφήματα της εξέλιξης του average profit και ένα ενδέκατο γράφημα που είναι ο μέσος όρος αυτών, συναρτήσεως της χωρητικότητας του ταμειυτήρα, καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής μεταβλητότητας σε ποσοστιαίες εκφράσεις (Σχήμα 5.10). Η παροχτευτικότητα διατηρείται σταθερή και ίση με $60 \text{ hm}^3/6\text{μηνο}$.



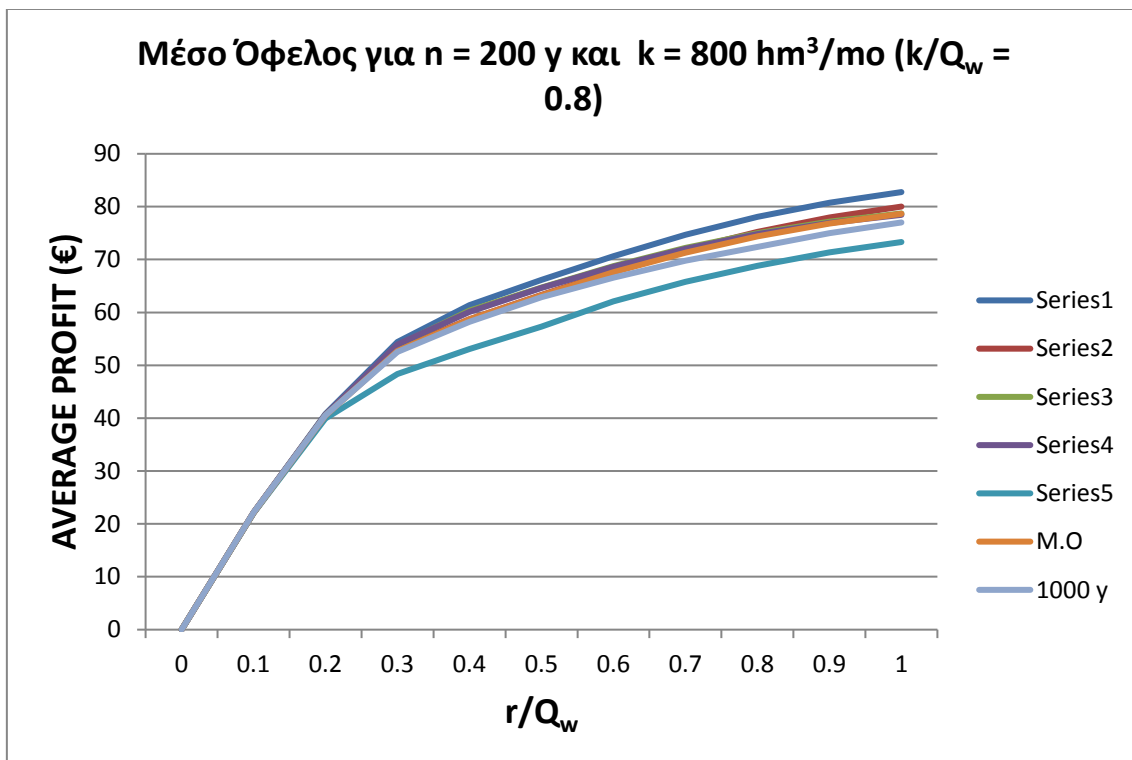
Σχήμα 5.9 Εξέλιξη του μέσου οφέλους συναρτήσει της χωρητικότητας του ταμιευτήρα για 5 χρονοσειρές εισροών μήκους 200 ετών και μέσος όρος αυτών



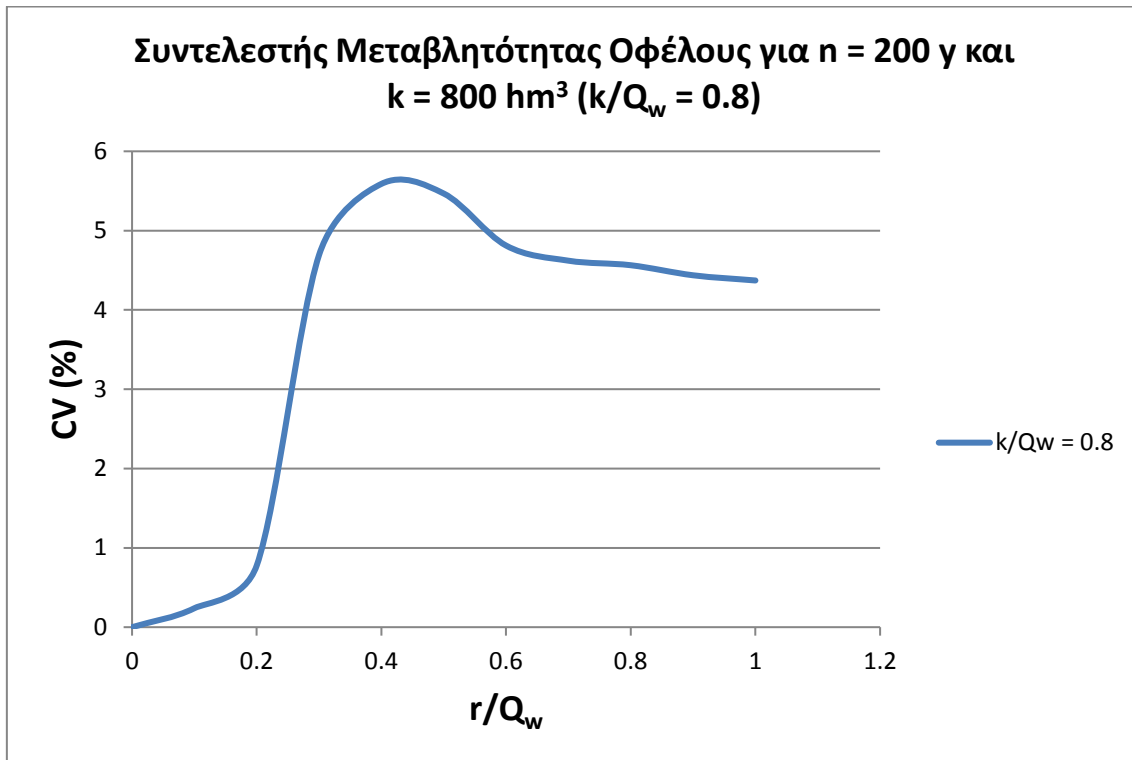
Σχήμα 5.10 Συντελεστής μεταβλητότητας μέσου οφέλους συναρτήσει της χωρητικότητας του ταμιευτήρα για 5 χρονοσειρές εισροών μήκους 200 ετών

Στο Σχήμα 5.9 οι σειρές 2 και 5 απέχουν το μέγιστο από το μέσο όρο. Παρατηρώντας το Σχήμα 5.10, ο CV τους δεν ξεπερνά το 10%. Πρακτικά το δείγμα είναι ομοιογενές, επομένως η χρήση μίας χρονοσειράς 200 ετών για χωρητικότητα ταμιευτήρα κάτω των 3000 hm³, είναι επαρκής ως προς το μέσο όφελος.

Στο Σχήμα 5.11 εμφανίζονται συγκεντρωτικά για τις 5 ομάδες τα γραφήματα της εξέλιξης του average profit και ένα ενδέκατο γράφημα που είναι ο μέσος όρος αυτών, συναρτήσει της παροχетеυτικότητας του αγωγού, καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής μεταβλητότητας σε ποσοστιαίες εκφράσεις (Σχήμα 5.12). Η χωρητικότητα διατηρείται σταθερή και ίση με 800 hm³.



Σχήμα 5.11 Εξέλιξη του μέσου οφέλους συναρτήσει της παροχетеυτικότητας του αγωγού για 5 χρονοσειρές εισροών μήκους 200 ετών και μέσος όρος αυτών



Σχήμα 5.12 Συντελεστής μεταβλητότητας οφέλους συναρτήσει της παροχευτικότητας του αγωγού για 5 χρονοσειρές εισροών μήκους 200 ετών

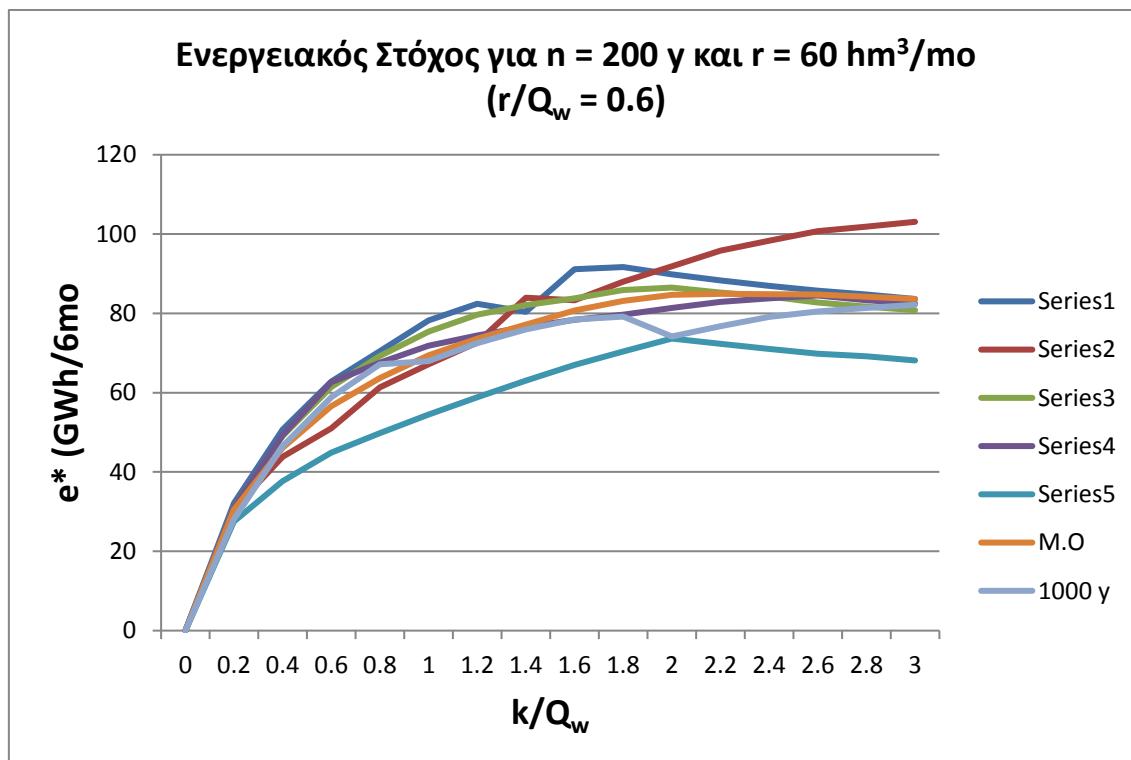
Στο Σχήμα 5.11 οι σειρές 4 και 5 απέχουν το μέγιστο από το μέσο όρο. Παρατηρώντας το Σχήμα 5.10, ο CV τους δεν ξεπερνά το 6% . Πρακτικά το δείγμα είναι ομοιογενές, επομένως η χρήση μίας χρονοσειράς 200 ετών είναι επαρκής ως προς το μέσο όφελος.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 5.5 παρατίθεται ο μέσος όρος για το στόχο πρωτεύουσας ενέργειας, από τις πέντε ομάδες.

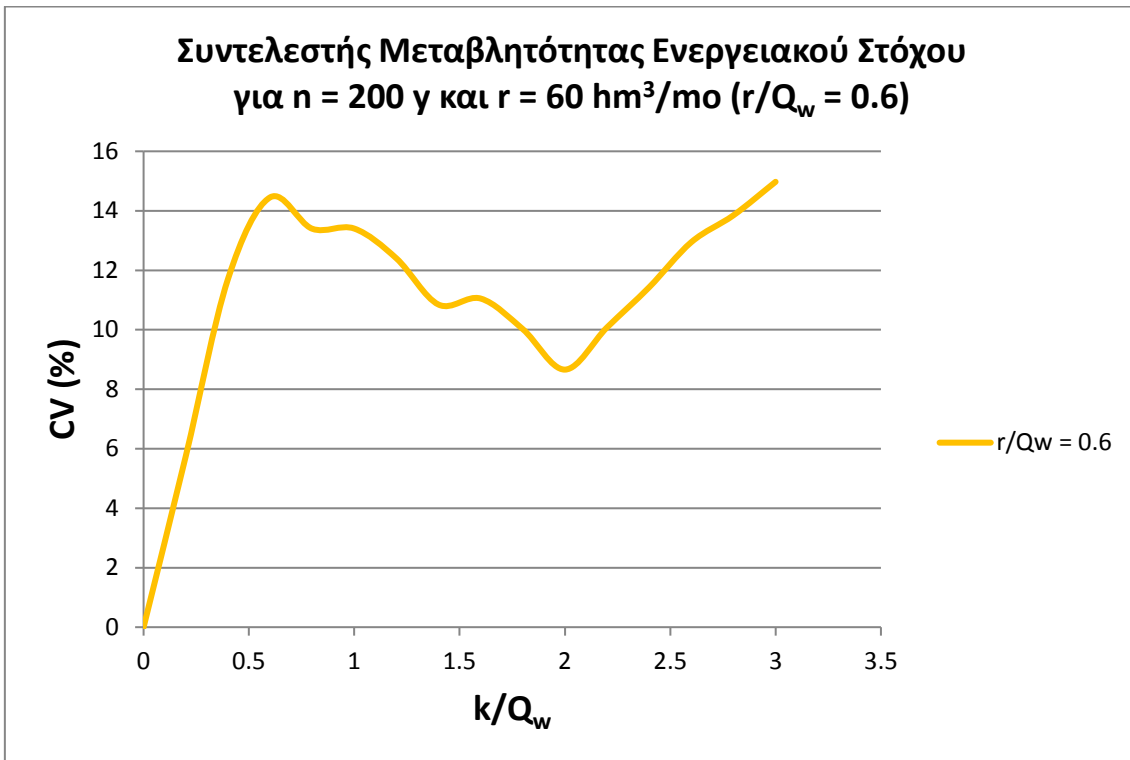
Πίνακας 5.6 Ο στόχος πρωτεύουσας ενέργειας με αλλαγή των k , r από τις 5 χρονοσειρές των 200 ετών και $H = 0.7$

M.O e^*	r/Q_w									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.2	21,956	31,939	32,025	31,346	30,968	30,534	30,014	29,479	28,859	28,235
0.4	22,256	41,679	48,949	48,005	47,334	46,096	45,216	43,490	42,842	41,570
0.6	22,339	43,691	57,900	60,435	58,674	56,554	57,247	55,546	54,854	53,892
0.8	22,382	44,062	62,331	64,217	65,874	63,689	63,510	63,233	62,829	62,425
1	22,407	44,265	64,178	73,627	71,144	69,430	69,745	68,814	68,499	68,161
1.2	22,422	44,394	65,144	76,530	74,060	73,614	73,301	73,130	72,898	72,618
1.4	22,432	44,482	65,681	80,397	76,574	77,207	75,777	75,573	75,388	75,250
1.6	22,440	44,548	65,915	79,709	81,494	80,728	77,332	77,233	77,099	76,932
1.8	22,446	44,599	66,131	81,726	84,681	83,118	79,190	78,491	78,370	78,281
2	22,452	44,639	66,290	82,583	87,338	84,649	81,954	79,731	79,461	79,364
2.2	22,456	44,671	66,388	82,531	88,202	84,929	82,391	79,777	79,652	79,573
2.4	22,460	44,701	66,462	82,568	88,633	84,876	82,167	80,008	79,811	79,698
2.6	22,463	44,722	66,474	82,670	88,402	84,719	83,189	81,521	79,627	79,473
2.8	22,465	44,742	66,437	82,575	87,922	84,153	82,889	79,341	79,207	79,083
3	22,466	44,758	66,454	82,513	87,564	83,629	81,939	78,604	78,474	78,374

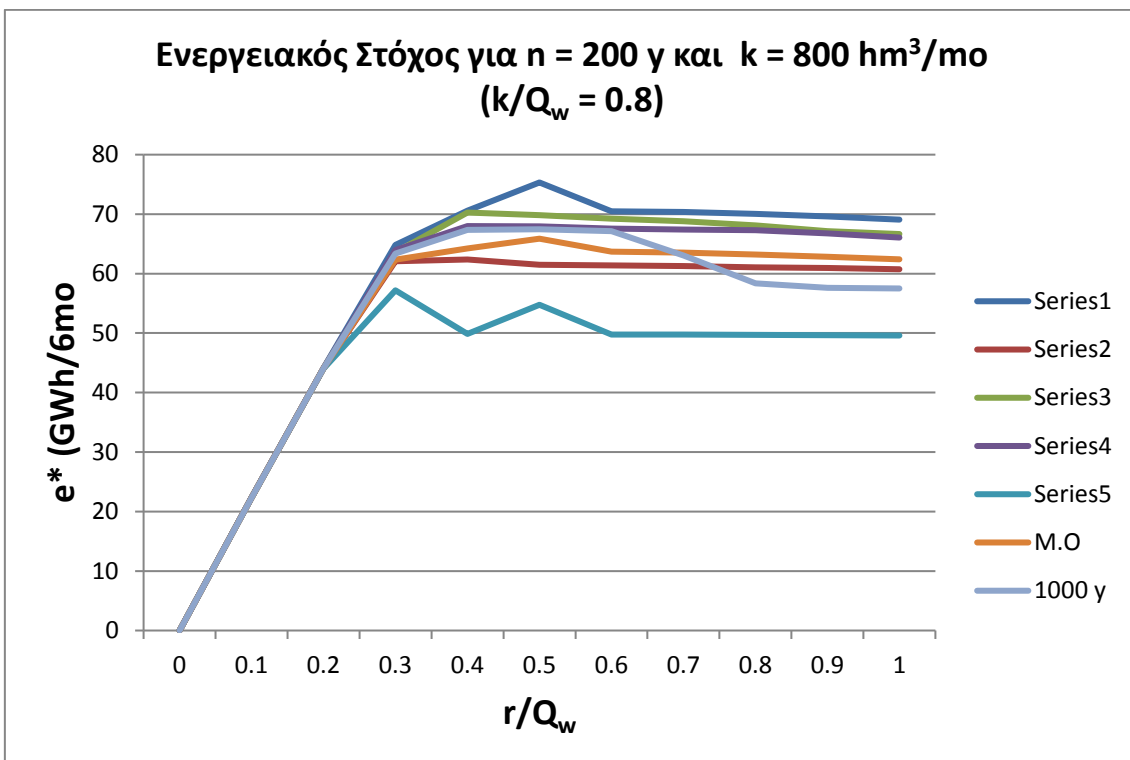
Στη συνέχεια, ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για το στόχο πρωτεύουσας ενέργειας.



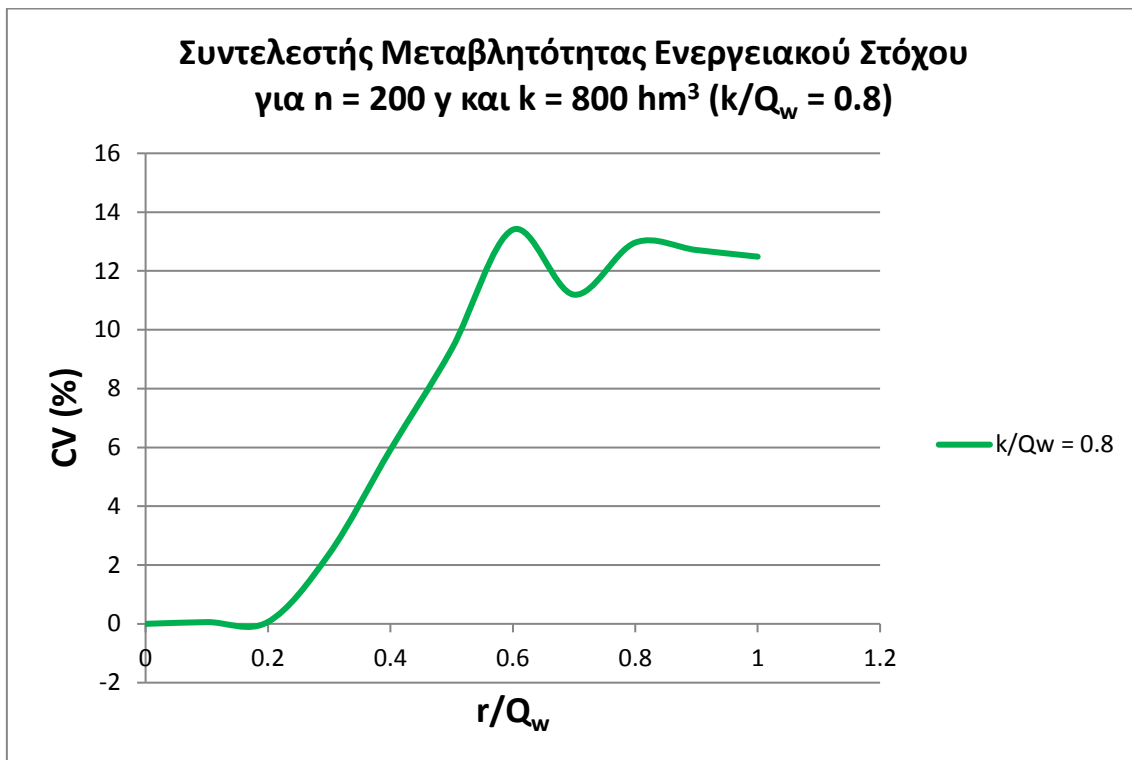
Σχήμα 5.13 Εξέλιξη του στόχου πρωτεύουσας ενέργειας συναρτήσει της χωρητικότητας του ταμιευτήρα για 5 χρονοσειρές εισροών μήκους 200 ετών και μέσος όρος αυτών



Σχήμα 5.14 Συντελεστής μεταβλητότητας στόχου πρωτεύουσας ενέργειας συναρτήσει της χωρητικότητας του ταμιευτήρα για 5 χρονοσειρές εισροών μήκους 200 ετών



Σχήμα 5.15 Εξέλιξη του στόχου πρωτεύουσας ενέργειας συναρτήσει της παροχευτικότητας του αγωγού για 5 χρονοσειρές εισροών μήκους 200 ετών και μέσος όρος αυτών



Σχήμα 5.16 Συντελεστής μεταβλητότητας στόχου πρωτεύουσας ενέργειας συναρτήσει της παροχτετευτικότητας του αγωγού για 5 χρονοσειρές εισροών μήκους 200 ετών

Και στις δύο αναλύσεις παρατηρούνται ιδιαίτερα υψηλές μεταβλητότητες ως προς το στόχο πρωτεύουσας ενέργειας. Καθώς ο στόχος προσδιορίζεται μέσα από μία περίπλοκη διαδικασία προσομοίωσης-βελτιστοποίησης κι λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία της δευτερεύουσας ενέργειας, είναι επόμενο να υπάρχουν αποκλίσεις από το μέσο όρο.

5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ 100 ΚΑΙ 200 ΕΤΩΝ

Προηγουμένως απεδείχθη ότι τόσο η χρονοσειρά των 100 ετών, όσο και των 200 ετών δεν είναι στατιστικά ομοιογενείς για να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση λειτουργίας ταμιευτήρα και βελτιστοποίηση της υδροηλεκτρικής του παραγωγής. Μάλιστα τα 100 έτη παρουσίασαν πιο ακραίες τιμές μεταβλητότητας, κυρίως ως προς το στόχο πρωτεύουσας ενέργειας.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες διαφορές των συντελεστών μεταβλητότητας ως προς το μέσο όφελος (Average Profit) και το στόχο (e^*): $CV_{10 \times 100} - CV_{5 \times 200}$, με το πρόσημό τους. Καθώς ως επί το πλείστον η χρονοσειρά των 100 ετών έχει μεγαλύτερες τιμές CV, οι περισσότερες διαφορές είναι θετικές. Μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά, τόσο περισσότερο καταδεικνύεται η σχετική ακαταλληλότητα των 100 ετών, τηρουμένης της ακαταλληλότητας των 200 ετών.

Εν τέλει αποδεικνύεται ότι ο στοχαστικός χαρακτήρας των εισροών, ο οποίος μεταβιβάζεται μέσω της προσομοίωσης-βελτιστοποίησης και σε κάθε αποτέλεσμα της, εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το μήκος της συνθετικής χρονοσειράς και όσο μεγαλύτερο είναι αυτό, τόσο ενισχύεται η εγκυρότητα των εξαγόμενων μεγεθών.

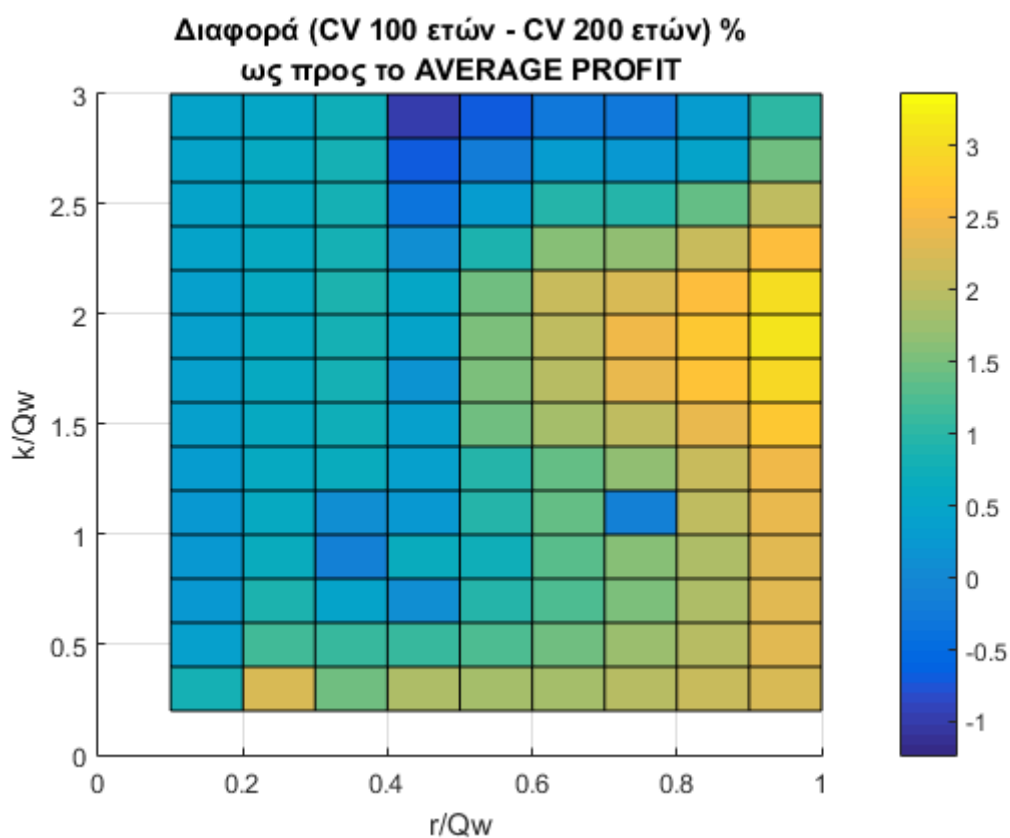
Πίνακας 5.7 Οι ποσοστιαίες διαφορές των συντελεστών μεταβλητότητας των 100 και 200 ετών ως προς το μέσο όφελος

DCV AVERAGE PROFIT %	r/Q _w									
	k/Q _w	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.2	0.79	2.24	1.45	1.87	1.80	1.84	1.96	2.09	2.27	2.60
0.4	0.37	1.16	1.12	1.12	1.28	1.43	1.74	1.95	2.33	2.67
0.6	0.24	0.90	0.42	0.07	0.99	1.26	1.51	1.90	2.30	2.63
0.8	0.21	0.66	-0.13	0.69	0.71	1.33	1.59	1.90	2.30	2.60
1	0.27	0.59	0.07	0.27	0.93	1.36	-0.09	2.00	2.36	2.64
1.2	0.34	0.61	0.66	0.41	0.96	1.36	1.67	2.08	2.43	2.70
1.4	0.39	0.62	0.77	0.37	1.49	1.85	2.04	2.41	2.72	2.93
1.6	0.38	0.62	0.84	0.16	1.56	1.96	2.40	2.69	2.96	3.19
1.8	0.36	0.61	0.83	0.44	1.52	2.06	2.47	2.75	3.08	3.36
2	0.39	0.62	0.85	0.55	1.44	2.13	2.26	2.60	3.01	3.34
2.2	0.42	0.61	0.84	0.09	0.91	1.62	1.69	2.09	2.59	2.99
2.4	0.42	0.60	0.81	-0.34	0.33	0.95	0.95	1.41	2.00	2.48
2.6	0.42	0.58	0.78	-0.66	-0.19	0.29	0.25	0.48	1.47	2.01
2.8	0.42	0.56	0.73	-0.97	-0.66	-0.23	-0.27	0.31	1.02	1.60
3	0.41	0.55	0.66	-1.23	-1.05	-0.78	-0.53	-0.04	0.73	1.32

Πίνακας 5.8 Οι ποσοστιαίες διαφορές των συντελεστών μεταβλητότητας των 100 και 200 ετών ως προς το στόχο πρωτεύουσας ενέργειας

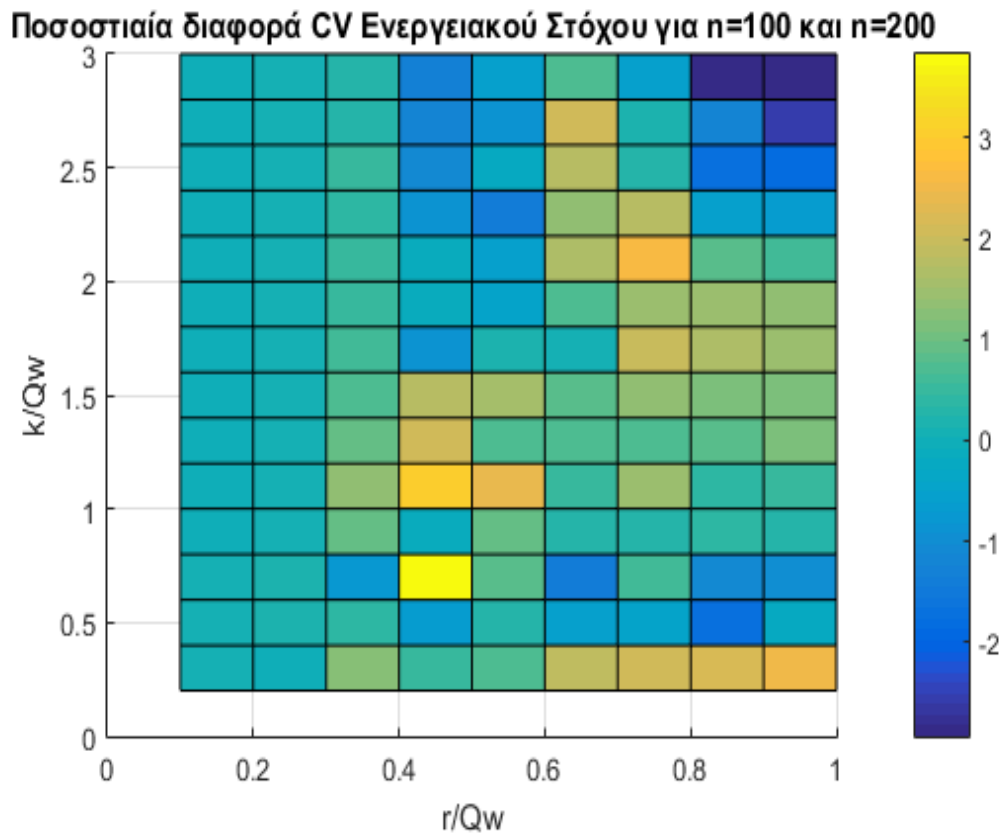
DCV e* %	r/Q _w										
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	
k/Q _w											
0.2	0.25	0.45	2.75	0.73	1.26	3.53	3.64	3.88	4.03	4.56	
0.4	0.09	0.60	1.46	-1.60	0.34	0.03	0.23	-1.20	0.57	0.30	
0.6	0.07	0.39	-1.74	7.40	0.94	-0.68	0.63	-0.67	-0.72	-0.36	
0.8	0.04	0.19	2.69	0.09	2.34	0.82	0.63	0.56	0.46	0.18	
1	0.03	0.14	3.12	6.17	4.82	0.55	2.50	0.35	0.48	0.24	
1.2	0.03	0.09	2.14	4.38	0.24	0.38	0.56	0.54	0.83	0.93	
1.4	0.02	0.10	1.62	4.24	1.98	0.87	1.49	1.32	1.38	2.58	
1.6	0.02	0.10	1.00	-1.12	-0.58	-0.31	2.84	2.31	2.20	3.96	
1.8	0.02	0.09	0.85	0.07	-0.82	1.30	2.67	2.44	2.52	2.45	
2	0.02	0.07	1.16	0.12	-1.14	2.82	3.23	1.62	1.68	1.65	
2.2	0.02	0.06	0.76	-1.54	-2.18	1.50	1.64	-0.11	-0.06	-0.03	
2.4	0.02	0.10	0.96	-1.88	-0.85	1.24	0.17	-1.59	-1.73	-1.80	
2.6	0.02	0.10	0.64	-2.20	-2.58	1.05	-1.39	-2.26	-3.49	-3.18	
2.8	0.02	0.10	0.76	-2.35	-2.52	-1.22	-2.43	-4.41	-4.40	-4.00	
3	0.01	0.09	0.70	-2.81	-2.41	-0.07	-2.75	-4.49	-4.95	-4.61	

Οι παραπάνω διαφορές απεικονίζονται σε κάτοψη τρισδιάστατης επιφάνειας.



Σχήμα 5.17 Οι ποσοστιαίες διαφορές των συντελεστών μεταβλητότητας των 100 και 200 ετών ως προς το μέσο όφελος σε τρισδιάστατη απεικόνιση

Στο Σχήμα 5.17, με την αύξηση των κατασκευαστικών μεγεθών μεγαλώνει η διαφορά του συντελεστή μεταβλητότητας. Επομένως με την αύξηση των κατασκευαστικών μεγεθών μεγαλώνει η αβεβαιότητα, μειώνεται η καταλληλότητα μιας χρονοσειράς μικρού μήκους και απαιτείται μεγαλύτερο μήκος χρονοσειράς.



Σχήμα 5.18 Οι ποσοστιαίες διαφορές των συντελεστών μεταβλητότητας των 100 και 200 ετών ως προς το στόχο πρωτεύουσας ενέργειας σε τρισδιάστατη απεικόνιση

Στο Σχήμα 5.18, για μικρά κατασκευαστικά μεγέθη οι διαφορές είναι κοντά στο μηδέν, ενώ στη συνέχεια οι διαφορές ποικίλλουν σε γενικές γραμμές όμως είναι εμφανές ότι μία χρονοσειρά 200 ετών είναι πιο αξιόπιστη για τη διαδικασία.

Συνοψίζοντας, εφαρμόστηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης - βελτιστοποίησης σε υποθετικό ταμιευτήρα, με κριτήριο το μέγιστο οικονομικό όφελος και μεταβλητή απόφασης το στόχο παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας, σε εξαμηνιαίο βήμα, ώστε να ληφθεί υπόψη, έστω και αδρομερώς, η επίδραση της εποχικότητας. Εξετάστηκαν τα σενάρια για μία σειρά τιμών αδιαστατοποιημένης χωρητικότητας ταμιευτήρα σε συνδυασμό με μία σειρά τιμών αδιαστατοποιημένης παροχτευτικότητας αγωγού προσαγωγής, για χρονοσειρά εισροών με και χωρίς εμμονή, με έμφαση στην τιμή $H = 0.7$ όπου και παρουσιάστηκαν οι χαρακτηριστικές τομές των επιφανειών.

Στη συνέχεια έγινε ανάλυση ευαισθησίας ως προς το μήκος της συνθετικής χρονοσειράς για μία τυπική τιμή εμμονής 0.7. Επαναλήφθηκε η εφαρμογή για δέκα χρονοσειρές εκατό ετών και πέντε χρονοσειρές διακοσίων ετών, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα και ελέγχθηκε η στατιστική επάρκεια του δείγματος ώστε να διαπιστωθεί αν μπορεί να ληφθεί μία αποδοτική διαχειριστική απόφαση με το μικρότερο υπολογιστικό φόρτο.

Συμπεραίνοντας, παρατηρούνται πιο μακροσκοπικά τα παρακάτω:

1. Δεδομένου ότι σε ένα υδροηλεκτρικό έργο εξασφαλίζεται μία ορισμένη ασφαλής επίδοση ως προς την ενεργειακή παραγωγή για ένα δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας, όσο μικρότερη είναι η τιμή του στόχου ενέργειας, τόσο μεγαλύτερο είναι το επίπεδο αξιοπιστίας
2. Σύνθετα προβλήματα υδατικών συστημάτων εσωκλείουν μη γραμμικές διεργασίες, αβεβαιότητες, ποικίλους τύπους περιορισμών απαιτώντας ιδιαίτερο φόρτο υπολογισμών. Επομένως ενδείκνυται αυτής της φύσης τα προβλήματα να επιλύονται με γλώσσα προγραμματισμού ή εξειδικευμένο λογισμικό παρά σε υπολογιστικά φύλλα. Έτσι, είναι εφικτές πολλές επαναλήψεις ταυτόχρονα και εξοικονομείται χρόνος και υπολογιστικός φόρτος
3. Η στατιστική μεταβλητότητα των δεδομένων εισόδου (συνθετική χρονοσειρά εισροών), έχοντας θεωρήσει σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου, αντανακλάται και στα δεδομένα εξόδου (ενέργεια, όφελος, αστοχία).
4. Ειδικότερα η ύπαρξη εμμονής επηρεάζει και το διαχειριστικό στόχο και το οικονομικό αποτέλεσμα
5. Το ιδανικό είναι να παράγεται μόνο πρωτεύουσα ενέργεια (ακριβώς όση ο στόχος) χωρίς περίσσειες και κυρίως χωρίς ελλείμματα. Όταν όμως υπάρχουν υπερχειλίσσεις, το ύψος

πτώσης είναι μέγιστο, οπότε αξιοποιούνται ως δευτερεύουσα για να ελαχιστοποιηθούν τα ελλείμματα από εξάμηνο σε εξάμηνο. Έτσι για τον ίδιο στόχο υπάρχει μεγαλύτερο όφελος

6. Χωρίς την ύπαρξη δευτερεύουσας ενέργειας και της ρήτρας ελλείμματος, η σχέση του στόχου της υδροηλεκτρικής παραγωγής με το όφελος θα ήταν αύξουσα, όπως σε ένα κλασικό υδρευτικό ή αρδευτικό ταμιευτήρα. Η δευτερεύουσα ενέργεια εισάγει περαιτέρω αβεβαιότητα στο σύστημα με τόσο πολύπλοκο τρόπο, η οποία μόνο μέσω προσομοίωσης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί
7. Αυξάνοντας τα κατασκευαστικά μεγέθη του συστήματος, δηλαδή της χωρητικότητας ταμιευτήρα και της παροχετευτικότητας του στροβίλου, η δευτερεύουσα ενέργεια επηρεάζει το στόχο περισσότερο από τα άλλα μεγέθη εξόδου, από κάποιο όριο των δύο εν λόγω μεγεθών και άνω. Σε ό,τι αφορά το όφελος, επιβεβαιώνεται η θετική συμβολή της δευτερεύουσας ενέργειας
8. Όσο μεγαλύτερα τα κατασκευαστικά μεγέθη, τόσο μεγαλύτερο το όφελος. Αυξάνει όμως το κατασκευαστικό κόστος.
9. Ένα γενικός κανόνας βάσει αδρομερούς εκτίμησης είναι η παροχετευτικότητα του στροβίλου να είναι περίπου το $\frac{1}{4}$ της μέσης ετήσιας απορροής και αντίστοιχα η χωρητικότητα του ταμιευτήρα το $\frac{1}{2}$ αυτής, με τη θεωρητική υπόθεση συνεχούς λειτουργίας
10. Η πιθανότητα αστοχίας ελάχιστα επηρεάζεται από την εμμονή για ένα μεγάλο μήκος χρονοσειράς. Παρά τις πολλές περιοριστικές συνθήκες, τις συχνές υπερχειλίσεις και τις διάφορες δοκιμές, τα ενεργειακά ελλείμματα δεν μπορούν να αποφευχθούν
11. Το μήκος της χρονοσειράς είναι καθοριστικός παράγοντας για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Χρονοσειρές 100 και 200 ετών δεν ενδείκνυνται για ένα μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο καθώς εισάγουν αβεβαιότητα της τάξης του 15 - 20 %. Στην πράξη μία ιστορική χρονοσειρά είναι συνήθως 50 ή 100 έτη, οπότε η αβεβαιότητα θα ήταν μη αποδεκτή. Επομένως συνιστάται η κατασκευή συνθετικών χρονοσειρών μήκους 1000 ετών και άνω

Κρίνοντας σκόπιμο η παρούσα εργασία ως θεωρητικό εργαλείο να είναι ένα εν δυνάμει επιχειρησιακό εργαλείο, προτείνονται τα παρακάτω:

1. Το χρονικό βήμα της προσομοίωσης ήταν εξαμηνιαίο. Χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και από την αντίστοιχη εφαρμογή σε διαφορετικά χρονικά βήματα (μήνας, έτος κτλ)

2. Για εκτενέστερη ανάλυση η εφαρμογή μπορεί να εκτελεστεί και για άλλες χρονοσειρές εισροών
3. Για το βέλτιστο συνδυασμό θα ήταν σκόπιμη η διαθεσιμότητα καμπυλών κόστους για το φράγμα και το σταθμό παραγωγής ώστε σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες καμπύλες οφέλους να βρεθεί η τομή τους
4. Τα περισσότερα συμπεράσματα προκύπτουν από την a priori θεώρηση ότι η πρωτεύουσα ενέργεια κοστολογείται κατά μία (1) μονάδα, η δευτερεύουσα έχει τη μισή (0.5) αξία της πρωτεύουσας και το έλλειμμα έχει δέκα φορές μικρότερη (-10) αξία από την πρωτεύουσα. Μπορεί να εξεταστούν επομένως σενάρια με διαφορετικές, πραγματικές κοστολογήσεις
5. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα έχει η ανάλυση σε σύστημα ταμειυτήρων με αντλησοταμίευση, για την καλύτερη διαχείριση και καταμερισμό των πλεονασμάτων και των ελλειμμάτων ενέργειας

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Ευστρατιάδης Α., Μαμάσης Ν. και Κουτσογιάννης Δ., *Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων - Μέρος 2*, 97 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011
- Ευστρατιάδης, Α., *Διερεύνηση μεθόδων αναζήτησης ολικού βελτίστου σε προβλήματα υδατικών πόρων*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001
- Ευστρατιάδης Α. και Ζερβός Ν., *Βέλτιστη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων – Εφαρμογή στο σύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999
- Κοντίνη Α., *Λογισμικό προσομοίωσης λειτουργίας μικρού υδροηλεκτρικού έργου (Μ.Υ.Η.Ε)*, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016
- Κουτσογιάννης, Δ., *Σημειώσεις Βελτιστοποίησης Συστημάτων Υδατικών Πόρων - Μέρος Α*, Έκδοση 2, 91 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000
- Μπουζιώτας Δ., *Ανάπτυξη πλαισίου βελτιστοποίησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ – Διερεύνηση στο υδροσύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2012
- Ναλμπάντης, Ι., *Μοντελοποίηση υδροδοτικού συστήματος, Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 2*, Τεύχος 14, 133 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούνιος 1990
- Ναλμπάντης, Ι., *Προστασία και διαχείριση υδατικών πόρων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007*
- Ντούξη Ι., *Βελτιστοποίηση σχεδιασμού ακτινωτών δικτύων μεταφοράς νερού*, Διπλωματική εργασία, Τομέας Έργων Υποδομής και Περιφερειακής Ανάπτυξης – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2014

Οικονόμου, Α., *Αξιολόγηση της μεθόδου Παραμετροποίησης - Προσομοίωσης - Βελτιστοποίησης στη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000

Στεργίου, Α., *Διαχείριση διακρατικών επιφανειακών υδατικών πόρων. Ανάλυση κόστους οφέλους*, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Efstratiadis, A., Karavokiros, G., and D. Koutsoyiannis D., *Hydronomeas: A water resources planning and management software system*, European Geosciences Union General Assembly 2005, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, Vienna, 04675, European Geosciences Union, 2005.

Koutsoyiannis, D., and Economou, A., *Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems*, Water Resources Research, 39(6), 1170, 1-17, 2003.

Koutsoyiannis, D., *Reliability concepts in reservoir design*, *The Encyclopedia of Water*, edited by J. H. Lehr, New York, 2004a

Koutsoyiannis, D., *Stochastic simulation of hydrosystems*, *The Encyclopedia of Water*, edited by J. H. Lehr, New York, 2004b

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ

<http://www.mathworks.com/discovery/geneticalgorithm.html?requestedDomain=www.mathworks.com>

<http://androulakis.bma.upatras.gr/mediawiki/index.php/%CE%9C%CE%AD%CF%84%CF%81%CE%B1%CE%B1%CF%80%CF%8C%CE%BA%CE%BB%CE%B9%CF%83%CE%B7%CF%82>

http://users.itia.ntua.gr/nikos/metsovo/ene_yhs_10.pdf

<http://www.itia.ntua.gr/getfile/763/1/documents/2007WRMSyppllyDemand.pdf>

