



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών

Τομέας Έργων Υποδομής & Αγροτικής Ανάπτυξης

Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης

Υδατικών Πόρων

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΤΟΥ ΜΟΡΝΟΥ

Διπλωματική Εργασία

του

Αρβανιτάκη Νικόλαου

A.M.: 06102013

Επιβλέπων: Ναλμπάντης Ιωάννης

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2011

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει το πρόβλημα της βέλτιστης αξιοποίησης και διαχείρισης ενός ταμιευτήρα (συγκεκριμένα, αυτόν του Μόρνου), που αποτελεί ένα από τα πλέον ενδιαφέροντα και σημαντικά αντικείμενα της επιστήμης της διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η ανάλυση του προβλήματος γίνεται χρησιμοποιώντας μεθόδους πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης βασισμένες σε εξελικτικούς αλγορίθμους νέας γενιάς. Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες και τα ειδικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση ταμιευτήρα και της γύρω περιοχής, επιλέγεται για την επίλυση του προβλήματος μια ποσοτική, καθαρά υδρολογική προσέγγιση αντιμετώπισης του προβλήματος, που αφορά στην παροχή νερού για την κάλυψη της ζήτησης και στην ελαχιστοποίηση ενός ενδεχόμενου ελλείμματος. Κατά συνέπεια, τα κριτήρια εκφράζονται συναρτήσει της απόληψης από τον ταμιευτήρα. Αποτέλεσμα της εργασίας είναι η ανάδειξη βέλτιστων στρατηγικών διαχείρισης με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση ενός θεμελιώδους σημασίας υδατικού πόρου, όπως είναι ένα υδατόρευμα με έργο ταμίευσης.

Abstract

In this diploma dissertation, the problem is investigated regarding the optimal utilization and management of a reservoir (specifically, that of Mornos Reservoir), which is one of the most interesting and challenging research topics of the science of water resources management. The methodology for analysis is implemented on the basis of multi-criteria optimization using new generation evolutionary algorithms. Taking into account the special characteristics of the studied reservoir and those of the surrounding area, a quantitative, hydrology-oriented approach is attempted, that considers only reservoir releases to meet water demand and minimize a potential water deficit. As a result, the problem criteria are expressed as functions of the inflow to the reservoir. As an outcome of the study, optimal management strategies are drawn allowing for better utilization of this water resource which is a river with a storage work.

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Ναλμπάντη Ιωάννη, χωρίς την βοήθεια του οποίου δεν θα ήταν δυνατή η εκπόνηση της εργασίας αυτής. Η επιστημονική του κατάρτιση πάνω στο αντικείμενο της εργασίας, η άψογη συνεργασία μας, το ενδιαφέρον καθώς και η διαθεσιμότητά του είναι χαρακτηριστικά που μου πρόσφερε αφειδώς κατά την διάρκεια πραγματοποίησης της εργασίας.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την υλική και ηθική υποστήριξή τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Αρβανιτάκης Νικόλαος

Αθήνα, Ιούνιος 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	iii
Abstract.....	v
Ευχαριστίες	vii
Κατάλογος συμβόλων	x
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος.....	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	2
2 Η βελτιστοποίηση ως εργαλείο επίλυσης προβλημάτων μηχανικού	4
2.1 Γενικά	4
2.2 Η κλασσική βελτιστοποίηση	6
2.3 Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση	7
2.3.1 Μέθοδοι βασιζόμενες σε εξελικτικούς αλγορίθμους	11
3 Εξελικτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.....	14
3.1 Γενικά	14
3.2 Ο κλασσικός γενετικός αλγόριθμος	15
3.3 Ο αλγόριθμος Pareto Ισχύος (SPEA)	20
4 Το πρόβλημα της διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων.....	25
4.1 Τοποθέτηση του προβλήματος	25
4.2 Κριτήρια επίδοσης συστημάτων ταμιευτήρων	27
4.3 Το μονοκριτηριακό πρόβλημα – Επίλυση μέσω προσομοίωσης	30
4.4 Το πολυκριτηριακό πρόβλημα.....	33
5 Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών.....	35
5.1 Γενικά	35
5.2 Παραγωγή ετήσιων χρονοσειρών.....	38

5.3	Παραγωγή μηνιαίων χρονοσειρών.....	41
5.4	Το Πρόγραμμα «Κασταλία».....	42
6	Εφαρμογή στη διαχείριση του ταμειυτήρα του Μόρνου.....	46
6.1	Περιγραφή του ταμειυτήρα.....	46
6.1.1	Πληθυσμιακά στοιχεία	54
6.1.2	Χρήσεις γης	56
6.1.3	Υποδομές της περιοχής.....	56
6.2	Δεδομένα	57
6.3	Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών εισροής	65
6.4	Αποτελέσματα	70
7	Συμπεράσματα.....	82
	Αναφορές.....	84
	Στην ελληνική γλώσσα	84
	Ξενόγλωσσες.....	86
	Παράρτημα Α: Πίνακες	89
	Παράρτημα Β: Σχήματα	107

Κατάλογος συμβόλων

x_i	: μεταβλητές απόφασης
r	: μέτρο κυριαρχίας
S	: μέτρο διασποράς
X_t	: χρονοσειρές
Z_t	: δείκτης υπολογισμού αξιοπιστίας
W_t	: δείκτης μετάβασης από ανεπαρκή σε καλή κατάσταση
C_R	: δείκτης αξιοπιστίας
C_{RS}	: δείκτης ικανότητας ανάκαμψης
C_V	: δείκτης τρωτότητας
Q	: απορροή (= εισροή ταμιευτήρα) (10^6 m^3)
R	: βροχόπτωση (mm)
E	: εξάτμιση (mm)
SA	: προσωρινά διαθέσιμο νερό στον ταμιευτήρα (10^6 m^3)
A	: εμβαδόν επιφάνειας καθρέπτη ταμιευτήρα (km^2)
S	: απόθεμα στην αρχή κάθε μήνα (10^6 m^3)
γ	: συντελεστής μετατροπής μονάδων
λ	: συντελεστής ανισοκατανομής της ζήτησης
D	: ζήτηση νερού (10^6 m^3)
q	: οικολογική παροχή (10^6 m^3)

- RE : απόληψη από τον ταμιευτήρα (10^6 m^3)
- K : ωφέλιμη χωρητικότητα ταμιευτήρα (10^6 m^3)
- SP : υπερχείλιση (10^6 m^3)
- RT : απόληψη-στόχος (10^6 m^3)
- ST : απόθεμα-στόχος μαζί με νεκρό όγκο (10^6 m^3)
- Y_i : στάθμη ταμιευτήρα (m)
- H : μέτρο μακροπρόθεσμης εμμονής
- γ_i : αυτοσυνδιασπορά
- α_j : συντελεστής στάθμισης
- X_i : στοχαστική ανέλιξη

1 Εισαγωγή

1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η οποία εκπονείται στο εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, του ΕΜΠ έχει ως αντικείμενο τη βέλτιστη διαχείριση του ταμιευτήρα Μόρνου. Αποτελεί ουσιαστικά μια ποσοτική προσέγγιση του προβλήματος της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με κριτήρια που εκφράζονται συναρτήσει της απόληψης από τον ταμιευτήρα.

Οι ταμιευτήρες είναι έργα που εξυπηρετούν πλήθος στόχων, όπως ύδρευση, άρδευση, παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, αντιπλημμυρική προστασία κτλ. Η διαχείρισή τους καθίσταται μια εξαιρετικά περίπλοκη διαδικασία, καθώς η λειτουργία τους επηρεάζεται από μια πληθώρα εξωγενών παραγόντων, όπως περιβαλλοντικών, οικονομικών, κοινωνικών και θεσμικών. Κάθε δράση πρέπει να εξασφαλίζει αειφορική αξιοποίηση των υδατικών πόρων και, κατά συνέπεια, η αντιμετώπιση του προβλήματος της βελτιστοποίησης πρέπει να έχει μια ολοκληρωμένη φύση, προσαρμοσμένη πάντα στο ευρύτερο πλαίσιο λειτουργίας του υπό εξέταση ταμιευτήρα.

Η παρούσα εργασία μπορεί να θεωρηθεί συνέχεια της εργασίας του Καραφέρη (2009) με τίτλο «Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της διαχείρισης ταμιευτήρα με ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια – Εφαρμογή στη λίμνη Πλαστήρα», η οποία εκπονήθηκε στο ίδιο εργαστήριο το 2009. Στην εργασία του ο Καραφέρης προσεγγίζει το πρόβλημα από δυο σκοπιές: την καθαρά υδρολογική, που εκφράζεται μέσω των απολήψεων του ταμιευτήρα και την ποιοτική που εκφράζεται μέσω της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης στο νερό. Ο ταμιευτήρας Πλαστήρα, αν και σχεδιάστηκε αρχικά ως έργο ενεργειακού σκοπού, εξελίχθηκε σε πόλο έντονης τουριστικής ανάπτυξης, πράγμα που κατέστησε αναγκαία την ένταξη του κριτηρίου της ποιότητας του νερού στη διαχείριση του.

Η ουσιαστική διαφοροποίηση της παρούσας εργασίας από την προαναφερθείσα έγκειται σε δύο κύρια σημεία: Κατ' αρχάς, στη μελέτη ενός τελείως διαφορετικού ταμιευτήρα, αυτόν του Μόρνου, με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και λειτουργική συμπεριφορά και, επιπροσθέτως, στη διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Οι δυο αυτές διαφοροποιήσεις

είναι άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους, καθώς η επιλογή του συγκεκριμένου ταμιευτήρα καθόρισε και τη φύση των κριτηρίων. Η προσέγγιση του προβλήματος στην παρούσα εργασία είναι καθαρά υδρολογική. Τα κριτήρια βελτιστοποίησης συνοψίζονται στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ της ζήτησης νερού από τον ταμιευτήρα και της επιθυμητής απόληψης από αυτόν και στην ελαχιστοποίηση του ελλείμματος (επιθυμητή απόληψη μείον πραγματική απόληψη). Πρόκειται δηλαδή για κριτήρια που εκφράζονται καθαρά μέσω των απολήψεων από τον ταμιευτήρα.

Η μελέτη του προβλήματος βασίστηκε στη συλλογή και επεξεργασία υδρολογικών, γεωγραφικών και μετεωρολογικών δεδομένων και στη χρήση πληροφοριών σχετικά με τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ταμιευτήρα (κατασκευαστικά και λειτουργικά).

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η εργασία χωρίζεται σε επτά διακριτά κεφάλαια. Παρέχεται στον αναγνώστη το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στις τεχνικές βελτιστοποίησης, μονοκριτηριακής και πολυκριτηριακής, στους εξελικτικούς αλγόριθμους και ειδικά στον αλγόριθμο Pareto Ισχύος, και στην παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών. Γίνεται αναφορά στο πρόβλημα της διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων και στα κριτήρια επίδοσής τους, ενώ παρατίθενται οι απαραίτητες πληροφορίες για τον ταμιευτήρα του Μόρνου. Με βάση τα παραπάνω, εφαρμόζεται η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών και η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με υδρολογικά κριτήρια στη διαχείριση του ταμιευτήρα Μόρνου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο, που αποτελεί την εισαγωγή, γίνεται η γενική τοποθέτηση του προβλήματος και αναφέρονται τα γενικά χαρακτηριστικά και οι κατευθύνσεις της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζεται η βελτιστοποίηση ως εργαλείο επίλυσης προβλημάτων για τον μηχανικό. Παρουσιάζονται τόσο η κλασική όσο και η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, ενώ αναφέρονται και επιμέρους μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης, τόσο κλασικές όσο και βασισμένες σε εξελικτικούς αλγορίθμους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εξελικτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. Αναλύεται ο κλασικός γενετικός αλγόριθμος αλλά και οι εξελιγμένοι αλγόριθμοι πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη ανάλυση του αλγόριθμου Pareto Ισχύος (SPEA).

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του προβλήματος της διαχείρισης των συστημάτων ταμειυτήρων και εξετάζονται τα κριτήρια επίδοσης τέτοιων συστημάτων. Καθορίζονται έτσι τα κριτήρια του προβλήματος βελτιστοποίησης και αναλύεται το πολυκριτηριακό πρόβλημα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια των συνθετικών χρονοσειρών και η χρησιμότητά τους σε προβλήματα που κρίνεται απαραίτητη η προβολή στο μέλλον. Παρουσιάζεται το λογισμικό «Κασταλία» και επεξηγείται η χρήση του για την παραγωγή ετήσιων και μηνιαίων χρονοσειρών στα πλαίσια των αναγκών της εργασίας.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή των παραπάνω μεθοδολογιών στη διαχείριση του ταμειυτήρα Μόρνου. Περιγράφεται ο ταμειυτήρας και παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά του και τα δεδομένα του προβλήματος. Παράγονται οι συνθετικές χρονοσειρές εισροής με βάση τις ιστορικές χρονοσειρές του ταμειυτήρα και χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, ενώ παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της διαδικασίας.

Στο έβδομο, και τελευταίο, κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και αξιολογείται η εφαρμογή της μεθοδολογίας για τη βέλτιστη διαχείριση του ταμειυτήρα Μόρνου.

2 Η βελτιστοποίηση ως εργαλείο επίλυσης προβλημάτων μηχανικού

2.1 Γενικά

Με τον όρο βελτιστοποίηση αναφερόμαστε στην εύρεση ενός συνόλου βέλτιστων παραμέτρων ενός υπό εξέταση συστήματος (κατά κανόνα περίπλοκου), με σκοπό την επίλυση ενός προβλήματος λήψης αποφάσεων. Άρα, η αντιμετώπιση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης προϋποθέτει μια διαδοχή από εναλλακτικές επιλογές και μια διαδοχή από αξιολογήσεις των επιπτώσεων κάθε επιλογής. Στα μαθηματικά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται σαν πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης μίας ή πολλών μεταβλητών, ή αλλιώς σαν πρόβλημα εύρεσης ακρότατων μιας συνάρτησης. Στην πράξη, η βελτιστοποίηση εφαρμόζεται από τους μηχανικούς σε προβλήματα σχεδιασμού ή λειτουργίας συστημάτων.

Η έννοια της βελτιστοποίησης είναι άρρηκτα δεμένη με την έννοια του συστήματος.

Για την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων βελτιστοποίησης οι μηχανικοί κατασκευάζουν και χρησιμοποιούν απλουστεύσεις των φυσικών συστημάτων, λόγω της πολυπλοκότητάς τους, οι οποίες ονομάζονται μαθηματικά μοντέλα συστημάτων. Συγκεκριμένα, στην επιστήμη της διαχείρισης υδατικών πόρων χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα υδροσυστημάτων και η βελτιστοποίησή τους αφορά στην εύρεση του βέλτιστου τρόπου λειτουργίας και διαχείρισης τους. Σε αυτή τη συστημική προσέγγιση, η αντιμετώπιση των πολύπλοκων δομών, αλλά και φαινομένων, των υδροσυστημάτων γίνεται χωρίς λεπτομερειακή θεώρηση των σχέσεων ή των φυσικών διεργασιών που τα διέπουν. Η συγκεκριμένη προσέγγιση καθιερώθηκε τις δεκαετίες του 1960 και 1970, βασιζόμενη στη χρήση παραδοσιακών τεχνικών, όπως ο γραμμικός και ο δυναμικός προγραμματισμός.

Ένα υδροσύστημα έχει ως συνιστώσες φυσικά ή ανθρωπογενή υδάτινα σώματα (π.χ., ποτάμια, λίμνες, ταμιευτήρες) και τα συναρτώμενα με αυτά υδραυλικά έργα (π.χ., φράγματα, αγωγοί, θυροφράγματα) ([18]). Τα προβλήματα ανάλυσης υδροσυστημάτων, τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού των σχετικών έργων όσο και σε επίπεδο διαχείρισής τους, αποτελούν το κατ' εξοχή πεδίο εφαρμογής πολλαπλών κριτηρίων προς βελτιστοποίηση. Η σχετική έρευνα ξεκίνησε από

τις αρχές της δεκαετίας του 1970, με τη μεγαλύτερη έμφαση να δίνεται στα συστήματα ταμειωτήρων.

Όπως προαναφέρθηκε, η βελτιστοποίηση είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται σε προβλήματα λήψης αποφάσεων. Τα μεγέθη με τα οποία ορίζουμε τις εναλλακτικές επιλογές ονομάζονται μεταβλητές απόφασης ή μεταβλητές ελέγχου. Μια απόφαση ορίζεται όταν όλες οι μεταβλητές απόφασης πάρουν συγκεκριμένες τιμές. Όπως ήταν αναμενόμενο, σε οποιοδήποτε πρόβλημα βελτιστοποίησης υπάρχουν περιορισμοί στις μεταβλητές απόφασης οι οποίοι προκύπτουν από διαφορετικά αίτια, κυρίως οικονομικά, κοινωνικά, τεχνολογικά, περιβαλλοντικά και φυσικά. Για κάθε σύστημα υπό εξέταση οι περιορισμοί αυτοί διαφέρουν και αλλάζουν άρδην τη διαδικασία βελτιστοποίησης και συνεπώς τη βέλτιστη απόφαση.

Σε μια διαδικασία βελτιστοποίησης σκοπός είναι η αναζήτηση της καλύτερης απόφασης από το σύνολο των εφικτών αποφάσεων. Για να πραγματοποιηθεί αυτό ορίζεται η συνάρτηση στόχου ή αλλιώς κριτήριο βελτιστοποίησης. Εάν το κριτήριο βελτιστοποίησης είναι ένα, δηλαδή η συνάρτηση στόχου είναι απλή, τότε ορίζεται το πρόβλημα της κλασσικής βελτιστοποίησης ή βελτιστοποίησης ενός κριτηρίου. Αν υπάρχουν πολλαπλοί στόχοι, δηλαδή υπάρχουν πολλαπλά κριτήρια βελτιστοποίησης, τότε αναζητούμε ικανοποιητικές λύσεις με βάση όλα τα κριτήρια και πρόκειται για το δεύτερο είδος βελτιστοποίησης, την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.

Ανάλογα με τη φύση των κριτηρίων βελτιστοποίησης και των περιορισμών, τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να καταταχθούν στις ακόλουθες κατηγορίες (προσδιοριστικά/στοχαστικά, γραμμικά/μη γραμμικά, στατικά/δυναμικά, συνεχή/διακριτά [18]).

Η βιβλιογραφία που αναφέρεται σε προβλήματα βελτιστοποίησης συστημάτων ταμειωτήρων είναι εξαιρετικά εκτενής. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το πρόβλημα ανάγεται στη διατύπωση ενός μέτρου επίδοσης που αναφέρεται σε ένα διαχειριστικό κριτήριο (π.χ., κόστος, απόληψη κτλ), ενώ τα υπόλοιπα κριτήρια εισάγονται στο μοντέλο βελτιστοποίησης με τη μορφή περιορισμών. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει μια ολικά βέλτιστη στρατηγική διαχείρισης, χωρίς ωστόσο να μπορεί να ελεγχθεί η αλληλεπίδραση των κριτηρίων. Αντίθετα, η καθαρά πολυκριτηριακή αντιμετώπιση του προβλήματος, ιδιαίτερα με χρήση νέας γενιάς υπολογιστικών εργαλείων, όπως οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, σχεδόν απουσιάζει από τη βιβλιογραφία.

Τα προβλήματα ανάλυσης συστημάτων ταμειωτήρων έχουν παραδοσιακά αντιμετωπιστεί με τεχνικές όπως ο γραμμικός, δυναμικός και στοχαστικός δυναμικός προγραμματισμός, που εκ φύσεως οδηγούν σε μια μεμονωμένη βέλτιστη λύση, λαμβάνοντας μάλιστα ως μεταβλητές ελέγχου τις εκροές από κάθε συνιστώσα του συστήματος, σε κάθε χρονικό βήμα.

2.2 Η κλασική βελτιστοποίηση

Η μαθηματική διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελείται από δύο μέρη: την συνάρτηση στόχου $f(x)$ και τους περιορισμούς. Αν η συνάρτηση στόχου είναι βαθμωτή, τότε ορίζεται το πρόβλημα της κλασικής βελτιστοποίησης και το πρόβλημα ανάγεται στην εύρεση των τιμών των μεταβλητών απόφασης x που ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν την f . Έχοντας ένα πλήθος n μεταβλητών απόφασης x , ορίζουμε το διάνυσμα-στήλη των μεταβλητών απόφασης ως εξής [18]:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (2.1)$$

όπου ο εκθέτης T δηλώνει ανάστροφη μήτρα. Η μαθηματική έκφραση του προβλήματος είναι η εξής [18]

$$\begin{aligned} & \max(\min) f(x) \\ & s.t. \\ & g_i(x) \otimes b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (2.2)$$

όπου x είναι οι μεταβλητές απόφασης, $f(\cdot)$ η συνάρτηση στόχου, $g_i(\cdot)$ οι συναρτήσεις αριστερού μέλους των περιορισμών, το σύμβολο \otimes σημαίνει είτε \leq , είτε $=$, ή \geq , και b_i είναι ο συντελεστής δεξιού μέλους του περιορισμού i και m είναι το πλήθος των περιορισμών.

Όταν σε ένα πρόβλημα η συνάρτηση στόχου και οι συναρτήσεις αριστερού μέλους των περιορισμών είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης, τότε αναφερόμαστε στο κλασικό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.

Γενικά, για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης στη διαχείριση υδατικών πόρων αλλά και σε πολλά άλλα επιστημονικά πεδία, ακολουθείται μια διαδικασία τυπικών βημάτων, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω:

Βήμα 1α : Σχηματοποίηση υδροσυστήματος

- Βήμα 1β : Καθορισμός μεταβλητών απόφασης
- Βήμα 2 : Καθορισμός συνάρτησης στόχου
- Βήμα 3 : Μαθηματική έκφραση φυσικών διεργασιών – Κατάρτιση περιορισμών
- Βήμα 4 : Διάσπαση ή απλοποίηση του προβλήματος (εφόσον κρίνεται απαραίτητο)
- Βήμα 5 : Επίλυση με εφαρμογή τεχνικής βελτιστοποίησης
- Βήμα 6 : Έλεγχος αποτελεσμάτων – Ανάλυση ευαισθησίας

Για τον γραμμικό προγραμματισμό, όπως και για κάθε τεχνική μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης ο κύριος στόχος είναι ο εντοπισμός μιας μονοσήμαντης λύσης του προβλήματος. Αυτό είναι και το σημαντικότερο μειονέκτημα των κλασικών μεθόδων. Σε πολύπλοκα συστήματα, η χρήση ενός και μόνο κριτηρίου βελτιστοποίησης είναι μη ρεαλιστική και μπορεί να οδηγήσει σε απαράδεκτα μεροληπτικές λύσεις. Ακόμη και όταν πολλαπλά κριτήρια εντάσσονται σε μια ενιαία συνάρτηση στόχου, η προσέγγιση εξακολουθεί να είναι πολύ υποκειμενική. Επίσης, η μονοκριτηριακή προσέγγιση έρχεται και σε αντίφαση με την υποχρέωση του μηχανικού να προτείνει εναλλακτικές στρατηγικές δράσης. Από την άλλη πλευρά όμως, η πολυκριτηριακή προσέγγιση προβλημάτων εξασφαλίζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως τη ρεαλιστικότερη διατύπωση του προβλήματος και τη δυνατότητα προσδιορισμού εναλλακτικών στρατηγικών.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις κλασικές τεχνικές βελτιστοποίησης, ο αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στην οικεία βιβλιογραφία ([10], [12], [18] και [20]).

2.3 Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Τα περισσότερα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός στον τομέα των υδατικών πόρων, προϋποθέτουν την ταυτόχρονη ικανοποίηση πολλαπλών και, συχνά, αντικρουόμενων στόχων, όπως η ελαχιστοποίηση του κόστους, η μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας, καθώς και η ελαχιστοποίηση της απόκλισης από επιθυμητά μεγέθη, τα οποία, όπως ήδη αναφέρθηκε, καθορίζονται από ποικίλους τεχνικούς, λειτουργικούς, θεσμικούς, περιβαλλοντικούς, ακόμα και διοικητικούς παράγοντες. Ο προσδιορισμός της καταλληλότερης επιλογής κριτηρίων εμφανίζει αντικειμενικές δυσκολίες, καθώς, εξαιτίας του ανταγωνιστικού

τους χαρακτήρα, η βελτίωση της επίδοσης ορισμένων κριτηρίων συνεπάγεται επιδείνωση των υπολοίπων. Εφαρμογές πολυκριτηριακής φύσης συναντώνται σε όλες, πρακτικά, τις εφαρμογές που σχετίζονται με το νερό, από την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών μέχρι τον σχεδιασμό των υδραυλικών έργων και τη διαχείριση των υδροσυστημάτων (ταμειυτήρων στην περίπτωση που μας αφορά).

Στα πολυκριτηριακά προβλήματα έχουμε διανυσματική συνάρτηση στόχου (διάνυσμα κριτηρίων βελτιστοποίησης) με την εξής μαθηματική έκφραση [12], [18]:

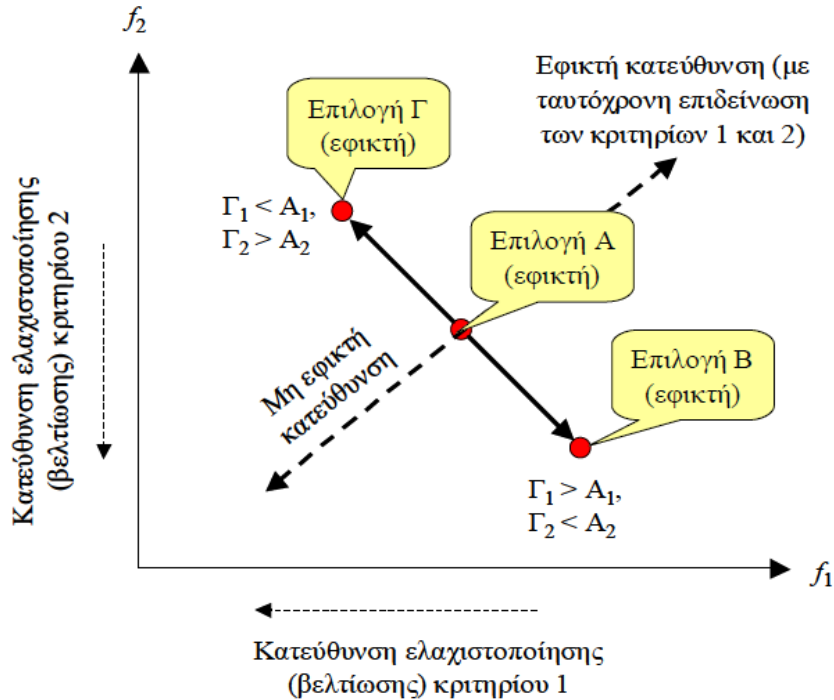
$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))^T \quad (2.3)$$

Τα διάφορα κριτήρια, χωρίζονται σε κριτήρια προς μεγιστοποίηση και σε κριτήρια προς ελαχιστοποίηση. Θα θεωρήσουμε, για λόγους απλούστευσης, στα πλαίσια της επεξήγησης ένα παράδειγμα προβλήματος όπου όλα τα κριτήρια είναι προς μεγιστοποίηση. Έστω ότι x_1 και x_2 δυο λύσεις του προβλήματος. Ορίζουμε ότι η λύση 1 κυριαρχεί της 2 αν ισχύει:

$$f_i(x_1) \geq f_i(x_2) \quad \forall i \quad (2.4)$$

Αν διαθέτουμε περισσότερες λύσεις, έστω n το πλήθος, τότε κάθε λύση επί της οποίας δεν κυριαρχεί καμία άλλη λύση, ονομάζεται μη κυριαρχούμενη λύση (non-dominated) ή μη κατώτερη ή βέλτιστη Pareto. Το σύνολο των μη κυριαρχούμενων λύσεων ονομάζεται σύνολο Pareto, ενώ η απεικόνισή του στο πεδίο των κριτηρίων λέγεται μέτωπο Pareto.

Το θεμελιώδες χαρακτηριστικό των πολυκριτηριακών προβλημάτων είναι η ύπαρξη πολλαπλών λύσεων οι οποίες θεωρούνται όλες, από μαθηματική άποψη, εξίσου αποδεκτές καθώς παρέχουν πρόσφορους συμβιβασμούς μεταξύ των διαφόρων κριτηρίων. Ο συστηματικός εντοπισμός τέτοιων λύσεων αλλά και η διατύπωση στρατηγικών περαιτέρω αξιολόγησής τους, στην κατεύθυνση μιας τελικής συμβιβαστικής επιλογής, αποτελούν ζητούμενο της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Παρακάτω, στο Σχήμα 2.1, δίνεται η γεωμετρική ερμηνεία της έννοιας των αντικρουόμενων αποφάσεων σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα.



Σχήμα 2.1: Γεωμετρική ερμηνεία της έννοιας των αντικρουόμενων αποφάσεων. Σε σχέση με μια τρέχουσα επιλογή A , είναι πάντοτε δυνατή είτε η βελτίωση ενός κριτηρίου εις βάρος ενός άλλου (π.χ. επιλογές B και Γ), είτε η ταυτόχρονη επιδείνωση και των δύο κριτηρίων. Αντίθετα, η ταυτόχρονη βελτίωση του συνόλου των κριτηρίων δεν είναι πάντα εφικτή ([10]).

Οι τρόποι προσδιορισμού της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης ενός πολυκριτηριακού προβλήματος είναι σύμφωνα με τους Cohon και Marks (1975) οι εξής ([17]):

- Επιλογή πριν την αναζήτηση (a priori articulation of preferences): η διαδικασία επιλογής προηγείται της διαδικασίας βελτιστοποίησης, καθώς ο αναλυτής δίνει προτεραιότητα σε κάποια κριτήρια για παράδειγμα με τη χρήση βαρών. Τα επιμέρους κριτήρια σταθμίζονται σε μια ενιαία αριθμητική έκφραση που αντιπροσωπεύει τις προτιμήσεις του σχεδιαστή.
- Επιλογή μετά την αναζήτηση (generating techniques-posteriori articulation of preferences): η διαδικασία επιλογής ακολουθεί την διαδικασία βελτιστοποίησης. Στις τεχνικές της συγκεκριμένης κατηγορίας συγκαταλέγονται οι παλαιότερες τεχνικές πολυστοχικής βελτιστοποίησης όπως η μεταβαλλόμενη σταθμισμένη συνάθροιση

κριτηρίων. Διατυπώνεται μια πολυστοχική συνάρτηση, συνιστώσες της οποίας είναι τα επιμέρους κριτήρια, και επιλύεται το πολυκριτηριακό πρόβλημα με σκοπό τον εντοπισμό του συνόλου των μη κατωτέρων λύσεων ή μιας ικανοποιητικής προσέγγισης αυτού. Στην συνέχεια, επιλέγεται μία από αυτές, με βάση την κρίση του αναλυτή.

- Επιλογή κατά τη διάρκεια της αναζήτησης (progressive articulation of preferences): Η βελτιστοποίηση αποτελεί διαδραστική διαδικασία ανάμεσα σε αναλυτή και σύστημα. Αξιολογώντας τα επίκαιρα αποτελέσματα, ο αναλυτής μπορεί να αναπροσαρμόσει τις προτιμήσεις του ή και να συμπεριλάβει επιπλέον κριτήρια, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση της διαδικασίας

Η κλασική προσέγγιση του πολυκριτηριακού προβλήματος βασίζεται σε μια διαδικασία μετασχηματισμού του σε μονοκριτηριακό, οδηγώντας έτσι στον εντοπισμό μίας και μόνο βέλτιστης λύσης, που θεωρείται ο βέλτιστος συμβιβασμός μεταξύ των κριτηρίων. Πρακτικά το πολυκριτηριακό πρόβλημα ανάγεται σε μονοκριτηριακό και το μοναδικό κριτήριο βελτιστοποίησης προκύπτει από τον συνδυασμό, στην απλούστερη περίπτωση γραμμικό, των επιμέρους κριτηρίων. Σε αυτή την περίπτωση, για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιούνται μέθοδοι κλασικής βελτιστοποίησης, όπως αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Η σύγχρονη προσέγγιση στοχεύει στην μετεπεξεργασία του συνόλου Pareto, που προϋποθέτει την ταυτόχρονη παραγωγή όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικών λύσεων του πολυκριτηριακού προβλήματος, με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, έχει ξεκινήσει η ανάπτυξη σχημάτων ταυτόχρονης αναζήτησης βέλτιστων λύσεων Pareto που βασίζονται σε τροποποιήσεις των εξελικτικών-γενετικών αλγορίθμων.

Οι πιο γνωστές μέθοδοι κλασικής βελτιστοποίησης είναι η μέθοδος της διαδοχικής βελτιστοποίησης, η μέθοδος των περιορισμών ϵ , η μέθοδος της προεπιλογής βαρών και οι μέθοδοι βελτιστοποίησης της απόστασης από ιδανικό στόχο ([12], [18], [20]).

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις τεχνικές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, ο αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στην οικεία βιβλιογραφία ([6], [10], [11], [13], [17] και [18]).

Οι κλασικές μέθοδοι που αναφέρθηκαν παρουσιάζουν ορισμένα σοβαρά μειονεκτήματα, τα οποία συνοψίζονται ως εξής:

- Όλες οι μέθοδοι συγκλίνουν σε μία και μόνο λύση, γεγονός που καθιστά υποχρεωτική την επανάληψη της υπολογιστικής διαδικασίας πολλές φορές, ώσπου να εντοπιστεί ικανοποιητικός αριθμός μη κατωτέρων λύσεων.
- Οι περισσότερες τεχνικές προϋποθέτουν κάποια γνώση των χαρακτηριστικών του προβλήματος, βάσει των οποίων καθορίζονται τα κριτήρια διαμόρφωσης της συνάρτησης χρησιμότητας.
- Ορισμένες μέθοδοι, όπως αυτή των βαρών, είναι ευαίσθητες στο σχήμα του μετώπου Pareto, και αδυνατούν να εντοπίσουν λύσεις που βρίσκονται στις μη κυρτές περιοχές του.
- Ορισμένες μέθοδοι, όπως αυτή των περιορισμών ϵ ανάγουν το αρχικό πρόβλημα χωρίς περιορισμούς σε πρόβλημα υπό περιορισμούς.

Για τους παραπάνω λόγους, οι κλασικές μέθοδοι εφαρμόζονται πλέον μόνο βοηθητικά, κυρίως όταν το μέτωπο Pareto αναμένεται να έχει ομαλή μορφή.

2.3.1 Μέθοδοι βασισμένες σε εξελικτικούς αλγορίθμους

Το πλαίσιο ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι πολύ διαφορετικό από αυτό της μονοκριτηριακής. Δεν γίνεται αναζήτηση ενός μοναδικού σημείου ακρότατου αλλά ενός συνόλου σημείων τα οποία είναι βέλτιστα σύμφωνα με τον ορισμό του Pareto, δηλαδή δεν μπορούν να βελτιώσουν την τιμή κάποιου κριτηρίου χωρίς να χειροτερέψουν την επίδοση ενός τουλάχιστον άλλου κριτηρίου. Η παραπάνω απαίτηση έχει καταστήσει τις εξελικτικές τεχνικές ως το μοναδικό, στην πράξη, εργαλείο αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων. Οι τεχνικές αυτές βασίζουν την διαδικασία αναζήτησης σε τυχαία επιλεγμένες λύσεις που εξελίσσονται παράλληλα και επιτυγχάνουν καλύτερη διερεύνηση του εφικτού χώρου, χωρίς να θέτουν περιορισμούς σχετικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Για τον λόγο αυτό, μπορούν να χειριστούν με την ίδια επιτυχία προβλήματα συνεχών και διακριτών μεταβλητών, κυρτών και μη κυρτών συναρτήσεων, καθώς και συναρτήσεων που χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητες ή τυχειότητα.

Οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν για την αντιμετώπιση πολυκριτηριακών προβλημάτων με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων βασίζονται στις έννοιες της κυριαρχίας και της διασποράς. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι στηρίζουν τη λειτουργία τους στη βασική θεωρία της βιολογικής εξέλιξης. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, οι λύσεις παρουσιάζονται ως άτομα γενεών και μέσα από

μια διαδικασία εξέλιξης επιβιώνουν μόνο τα καλύτερα και πιο ισχυρά άτομα. Η επιλογή των ατόμων - λύσεων που θα περάσουν στην επόμενη γενιά, καθορίζεται από ένα μέτρο κυριαρχίας r και ένα μέτρο διασποράς S . Το μέτρο κυριαρχίας καθορίζει τα άτομα που θα προκριθούν στην επόμενη γενιά, ενώ το μέτρο διασποράς ευνοεί την επιλογή ατόμων με λιγότερα γειτονικά μέλη πληθυσμού.

Οι αρχικές προσεγγίσεις που αναπτύχθηκαν με βάση τους εξελικτικούς αλγόριθμους (γνωστές ως αλγόριθμοι πρώτης γενιάς), με κυριότερο αλγόριθμο τον διανυσματικό γενετικό αλγόριθμο (VEGA), αποσκοπούν στην ταυτόχρονη παραγωγή μη κατωτέρων λύσεων, χωρίς να κάνουν άμεση χρήση της έννοιας της κυριαρχίας για την σύγκριση διανυσμάτων. Συνεπώς, κατά την διαδικασία αξιολόγησης και επιλογής των εναλλακτικών λύσεων, δεν χρησιμοποιούνται διανυσματικά αλλά βαθμωτά κριτήρια καταλληλότητας, πράγμα που περιορίζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα των συγκεκριμένων τεχνικών.

Οι επόμενες προσεγγίσεις, η λεγόμενη δεύτερη γενιά αλγόριθμων, λαμβάνουν ως κύριο κριτήριο επιλογής την σχέση κυριαρχίας μεταξύ των εξεταζόμενων λύσεων, αντιστοιχώντας σε κάθε μέλος του πληθυσμού ένα βαθμωτό μέτρο κυριαρχίας που εξαρτάται από την σχετική του θέση, στο πεδίο αποτίμησης. Η πρώτη τεχνική που αναπτύχθηκε με βάση την έννοια της κυριαρχίας, αναφέρεται ως μη-κυριαρχούμενη ταξινόμηση (NSGA), και προτάθηκε από τον Goldberg. Άλλες τεχνικές που ανήκουν στην δεύτερη αυτή γενιά πολυκριτηριακών εξελικτικών μεθόδων, είναι ο γενετικός αλγόριθμος πολλαπλών στόχων (MOGA) και ο γενετικός αλγόριθμος με θύλακες Pareto (NPGA).

Οι λεγόμενοι αλγόριθμοι τρίτης γενιάς, που ξεκίνησαν να αναπτύσσονται στα τέλη της δεκαετίας του 1990, εισάγουν την έννοια του εκλεκτικισμού (elitism). Ένα σοβαρό μειονέκτημα των σχημάτων δεύτερης γενιάς είναι η απώλεια ορισμένων εξαιρετικά σημαντικών λύσεων, εξαιτίας της στοχαστικής δομής των μηχανισμών επιλογής. Με τον εκλεκτικισμό, καθορίζεται η χρήση μεθόδων ή κανόνων προστασίας των εν λόγω λύσεων. Οι πλέον σύγχρονες μεθοδολογικές προσεγγίσεις που βασίζονται, άμεσα ή έμμεσα, στην έννοια του εκλεκτικισμού είναι: ο εξελικτικός αλγόριθμος Pareto ισχύος (SPEA), ο οποίος μάλιστα αποτελεί ορόσημο, η εξελικτική στρατηγική με αρχεία Pareto (PAES) και ο αλγόριθμος επιλογής Pareto λύσεων με βάση φακέλους (PESA). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας θα χρησιμοποιηθεί ο

εξελικτικός αλγόριθμος Pareto ισχύος, και μάλιστα η πιο καινούρια εκδοχή του (SPEA 2) η οποία θα παρουσιαστεί διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

3 Εξελικτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

3.1 Γενικά

Με τον όρο εξελικτικοί αλγόριθμοι (evolutionary algorithms) αναφέρονται οι στοχαστικές μέθοδοι αναζήτησης που χρησιμοποιούν το πρότυπο των φυσικών εξελικτικών διεργασιών για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η εξέλιξη των ζωντανών οργανισμών είναι μια φυσική διαδικασία που οδηγεί στη βελτιστοποίηση του είδους, με βάση την δυνατότητα επιβίωσης στο περιβάλλον. Κατ' αντιστοιχία, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι αφορούν στην προσομοίωση της εξέλιξης ενός πληθυσμού εφικτών σημείων, μέσω υπολογιστικών διαδικασιών που είναι εμπνευσμένες από την φυσική διαλογή.

Από τη δεκαετία του 1950 και τη δεκαετία του 1960, ήδη ερευνητές ανά τον κόσμο αναζητούσαν μέσα από την μελέτη των εξελικτικών συστημάτων, τον τρόπο με τον οποίο η διαδικασία της εξέλιξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο βελτιστοποίησης διάφορων προβλημάτων. Τις βάσεις για την ανάπτυξη των εξελικτικών τεχνικών βελτιστοποίησης έθεσαν την δεκαετία του 1970 ο Rechenberg με την ανάπτυξη μίας ομάδας τεχνικών βελτιστοποίησης με το όνομα στρατηγικές εξέλιξης, ο Fogel με την θεμελίωση του εξελικτικού προγραμματισμού και ο John Holland με τις αρχικές μελέτες που πραγματοποίησε σε εξελικτικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Το βιβλίο του τελευταίου *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (1975) σηματοδότησε την έναρξη της μελέτης των γενετικών αλγόριθμων (ΓΑ – Genetic Algorithms, GA). Για την ακρίβεια, η πρώτη αναφορά του όρου «γενετικός αλγόριθμος» και η πρώτη δημοσιευμένη εφαρμογή του έγιναν το 1967 στην πρωτοποριακή διατριβή του Bagley. Από την αρχή της δεκαετίας του 1980, η επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με τη θεωρία και την εφαρμογή των γενετικών αλγόριθμων, έχει δημιουργήσει μία πληθώρα πρακτικών εφαρμογών που εκτείνονται σε πολλούς τομείς ερευνητικής και όχι μόνο δραστηριότητας. Από το μέσο της δεκαετίας του 1990 παρατηρείται συστηματική εφαρμογή των γενετικών αλγόριθμων στη μηχανική και ειδικότερα στη διαχείριση υδατικών πόρων ([8], [9]).

Η λειτουργία των εξελικτικών αλγόριθμων στηρίζεται στις βασικές αρχές της θεωρίας της Εξέλιξης των Ειδών, η οποία αναπτύχθηκε από το Δαρβίνο και έχει σκοπό να δώσει μια εξήγηση

για το φαινόμενο της ζωής, την προέλευση και τις βασικές λειτουργίες της. Τα κυριότερα σημεία της που σχετίζονται με την εξελικτική υπολογιστική και τους γενετικούς αλγόριθμους ειδικότερα, είναι τα εξής:

- Δεν υπάρχει αντικειμενική βάση διαχωρισμού των ζωντανών οργανισμών του ίδιου είδους σε ανώτερους και κατώτερους. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες καθορίζουν ποιοι θα επιβιώσουν για να αναπαραχθούν. Σε κάθε επόμενη γενιά κληροδοτούνται περισσότερα χαρακτηριστικά από τα αναπαραγωγικά πετυχημένα άτομα.
- Τα χαρακτηριστικά και η δομή των ατόμων κωδικοποιούνται σε πολύπλοκα οργανικά μόρια, τα χρωμοσώματα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από μικρότερα μέρη, τα γονίδια. Το σύνολο της γενετικής πληροφορίας είναι κωδικοποιημένο στα γονίδια και ονομάζεται γονότυπος. Το τμήμα της γενετικής πληροφορίας που εκφράζεται αποτελεί τον φαινότυπο.
- Η αναπαραγωγή δίνει ένα νέο οργανισμό-απόγονο, του οποίου τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια κατά το ήμισυ από τον πατέρα και κατά το ήμισυ από τη μητέρα. Κάθε γονίδιο που τελικά καθορίζει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ονομάζεται επικρατών, ενώ σε αντίθετη περίπτωση υπολειπόμενο. Ένα υπολειπόμενο γονίδιο μπορεί να περάσει σε επόμενη γενιά και να εκφραστεί αργότερα. Γονίδια που είναι συνδεδεμένα με το ίδιο χαρακτηριστικό ονομάζονται αλληλόμορφα.
- Είναι δυνατόν να αλλάξει η δομή των χρωμοσωμάτων λόγω εξωγενών παραγόντων, η λειτουργία αυτή ονομάζεται μετάλλαξη και προκαλεί γενετική ποικιλομορφία.

Η έννοια του πληθυσμού είναι θεμελιώδης στους εξελικτικούς αλγορίθμους, και τους διαφοροποιεί σε σχέση με κάθε άλλη σειριακή μέθοδο που βασίζεται σε διαδοχικούς μετασχηματισμούς ενός αρχικού σημείου ή ενός αρχικού προτύπου.

3.2 Ο κλασικός γενετικός αλγόριθμος

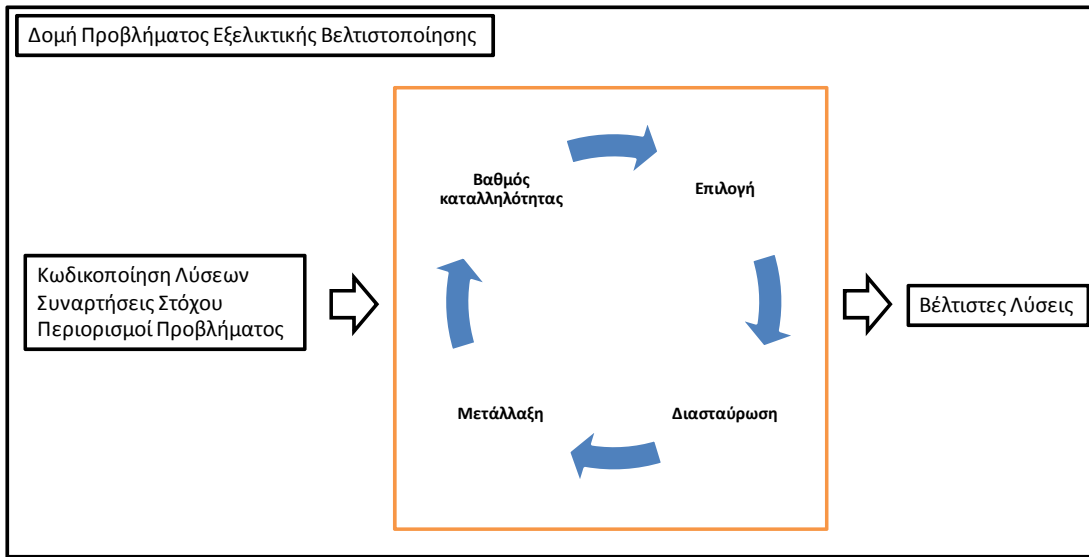
Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν τον τυπικότερο εκπρόσωπο των εξελικτικών αλγορίθμων. Η ονομασία τους οφείλεται στο γεγονός ότι τόσο το εννοιολογικό τους υπόβαθρο όσο και η ορολογία που χρησιμοποιείται προέρχεται από την επιστήμη της γενετικής. Οι ενδεχόμενες λύσεις του προβλήματος παρομοιάζονται με τα άτομα ενός πληθυσμού, ο οποίος εξελίσσεται με

τρόπο παρόμοιο με έναν πληθυσμό φυσικών ατόμων, υποκείμενος σε βιολογικές διαδικασίες όπως η φυσική επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη.

Κάθε μέλος του πληθυσμού, δηλαδή κάθε σημείο, ονομάζεται άτομο (individual). Η θέση του σημείου στον χώρο αναζήτησης συνιστά τα γενετικά χαρακτηριστικά του αντίστοιχου ατόμου, που καλούνται χρωμοσώματα (chromosomes). Τα χρωμοσώματα, που είναι το γενετικό ανάλογο των συντεταγμένων σε προβλήματα πραγματικών μεταβλητών, αποτελούνται από σύμβολα, τα οποία καλούνται γονίδια (genes), και τοποθετούμενα στην σειρά σχηματίζουν τον γονότυπο (genotype) του ατόμου. Οι πραγματικές τιμές των μεταβλητών (π.χ. οι συντεταγμένες), υποδηλώνουν τα εξωτερικά χαρακτηριστικά του ατόμου, και καλούνται φαινότυπος (phenotype), που ουσιαστικά αποτελεί το αποκωδικοποιημένο περιεχόμενο του γονότυπου. Η διαδικασία κατασκευής του γονότυπου ενός ατόμου συναρτήσσει των συντεταγμένων του αντίστοιχου σημείου καλείται κωδικοποίηση (encoding), ενώ η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή ο υπολογισμός των συντεταγμένων με βάση τον γονότυπο καλείται αποκωδικοποίηση (decoding). Η εξέλιξη του πληθυσμού πραγματοποιείται σε στάδια, που σε αντιστοιχία με την φύση, καλούνται γενιές (generations) ([10], [12]). Ο αρχικός πληθυσμός παράγεται μέσω τυχαίας δειγματοληψίας, ενώ οι επόμενες γενιές παράγονται με εφαρμογή των λεγόμενων γενετικών τελεστών (genetic operators), που είναι:

- η επιλογή (selection),
- η διασταύρωση (crossover) και
- η μετάλλαξη (mutation).

Κάθε μέλος της νέας γενιάς, δηλαδή κάθε νέα λύση που εντάσσεται στον πληθυσμό, ονομάζεται απόγονος (offspring), ενώ τα άτομα με βάση τα οποία έχει παραχθεί η λύση αυτή ονομάζονται γονείς (parents). Στην τυπική περίπτωση των λεγόμενων δυαδικών γενετικών αλγορίθμων (binary genetic algorithms), ο γονότυπος του ατόμου αναπαρίσταται υπό μορφή δυαδικής συμβολοσειράς (binary string), οπότε κάθε γονίδιο είναι μια δυαδική μεταβλητή που λαμβάνει τιμή 0 ή 1. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η γενική δομή ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με γενετικούς-εξελικτικούς αλγόριθμους.



Σχήμα 3.1: Γενική δομή ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με εξελικτικούς αλγόριθμους.

Το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού ορίζεται από τον χρήστη και, ως επί το πλείστον, διατηρείται σταθερό. Συνήθως ο αρχικός πληθυσμός δημιουργείται με τυχαίο τρόπο. Για κάθε νέα γενιά, μέσω του λεγόμενου τελεστή επιλογής (selection), καθορίζονται οι ευκαιρίες αναπαραγωγής κάθε ατόμου, αντιστοιχώντας σε κάθε μέλος του πληθυσμού μια συγκεκριμένη πιθανότητα επιβίωσης. Δημιουργείται η λεγόμενη δεξαμενή ζευγαρώματος (mating pool), στην οποία αντιγράφονται τα πλέον ικανά άτομα περισσότερες από μία φορές, ενώ και τα λιγότερο ικανά άτομα αντιγράφονται λιγότερες ή καμία φορά. Μέτρο της ικανότητας επιβίωσης είναι ο βαθμός καταλληλότητας (fitness rate), που αντιπροσωπεύει τα εξωτερικά χαρακτηριστικά του κάθε ατόμου, και ταυτίζεται, πρακτικά, με τη συνάρτηση στόχου του προβλήματος. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι στοχαστική ως και πλήρως προσδιοριστική και αποσκοπεί στην βελτίωση των μέσων χαρακτηριστικών του πληθυσμού, παρέχοντας σε άτομα-λύσεις υψηλότερης ποιότητας μεγαλύτερη πιθανότητα επιβίωσης στην επόμενη γενιά. Οι συνηθέστεροι μηχανισμοί επιλογής είναι οι εξής:

- Επιλογή μέσω του «τροχού της ρουλέτας» (roulette wheel): Διαμορφώνεται ένας εικονικός τροχός, με πλήθος εγκοπών όσο και το μέγεθος του πληθυσμού, ενώ το πλάτος κάθε εγκοπής είναι ανάλογο του βαθμού καταλληλότητας κάθε ατόμου, έτσι ώστε ακόμα και το πλέον αδύναμο μέλος να έχει μη μηδενική πιθανότητα επιλογής.

- Επιλογή με διαγωνισμό (tournament): Επιλέγονται τυχαία δύο ή περισσότερα μέλη του πληθυσμού, και το ισχυρότερο εξ αυτών αντιγράφεται στο βοηθητικό σύνολο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες απαιτείται για να συμπληρωθεί το μέγεθος του πληθυσμού.
- Εκλεκτικισμός (elitism): Η τρέχουσα βέλτιστη λύση στον πληθυσμό αντιγράφεται πάντοτε στη δεξαμενή ζευγαρώματος, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να χαθεί εξαιτίας της τυχειότητας της διαδικασίας επιλογής.
- Επιλογή βαθμολόγησης (rank selection): Η μέθοδος αυτή μειώνει την πίεση της επιλογής όταν η διασπορά των τιμών της συνάρτησης κόστους είναι μεγάλη και την αυξάνει σε αντίθετη περίπτωση, με σκοπό την αντιμετώπιση του φαινομένου της πρόωμης σύγκλισης.
- Επιλογή σταθερής κατάστασης (steady-state selection): Αντικαθίστανται λίγα άτομα σε κάθε γενιά, σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους. Ένας μικρός αριθμός των λιγότερο κατάλληλων ατόμων αντικαθίσταται από απογόνους των πιο ισχυρών χρωμοσωμάτων.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της επιλογής, και έχουν καθοριστεί τα άτομα που θα αποτελέσουν το νέο πληθυσμό, εφαρμόζεται η διαδικασία της διασταύρωσης (crossover). Από τη δεξαμενή ζευγαρώματος επιλέγονται τυχαία ζεύγη ατόμων-γονέων που, μέσω του τελεστή διασταύρωσης, ανταλλάσσουν την γενετική τους πληροφορία, με σκοπό την παραγωγή στατιστικά ισχυρότερων απογόνων, με δεδομένο ότι οι ισχυρότερες γονιδιακές δομές αντιγράφονται στις επόμενες γενιές. Για την απομίμηση του στοχαστικού χαρακτήρα της αντίστοιχης φυσικής διεργασίας, ορίζεται μια πιθανότητα (συχνότητα) διασταύρωσης, της τάξης του 60-90%. Συνεπώς, το υπόλοιπο μέρος του πληθυσμού δεν συμμετέχει στην διαδικασία αναπαραγωγής, και αντιγράφεται ως έχει στην επόμενη γενιά. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διασταύρωσης, οι κυριότερες είναι οι εξής:

- Διασταύρωση ενός σημείου (simple crossover)
- Αριθμητική διασταύρωση (arithmetic crossover)
- Ευρετική διασταύρωση (heuristic crossover)

- Διασταύρωση δέντρου (tree crossover)

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο τελεστής μετάλλαξης (mutation), που επιφέρει τυχαίες τροποποιήσεις σε πολύ μικρό ποσοστό των γενετικών χαρακτηριστικών της νέας γενιάς, αποσκοπώντας στην αύξηση της ποικιλίας του πληθυσμού και την διαφυγή από τοπικά ακρότατα. Η συχνότητα μετάλλαξης είναι της τάξης του 0.1-1%, ώστε να μην επιβραδύνεται η πορεία σύγκλισης. Τα κυριότερα είδη μετάλλαξης είναι τα εξής:

- Ομοιόμορφη μετάλλαξη (uniform mutation)
- Οριακή μετάλλαξη (boundary mutation)
- Ανομοιόμορφη μετάλλαξη (Non-uniform mutation)

Με την εφαρμογή και της διαδικασίας της μετάλλαξης, ολοκληρώνεται η δημιουργία μιας νέας γενιάς λύσεων - ατόμων. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο τερματισμού του αλγόριθμου, το οποίο ορίζεται εξαρχής από τον αναλυτή. Με τον τερματισμό του αλγόριθμου, έχουμε τον τελικό πληθυσμό των λύσεων του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Μια γενική υλοποίηση του κλασικού γενετικού αλγορίθμου φαίνεται παρακάτω στον Πίνακα 3.1:

Πίνακας 3.1 - Γενική υλοποίηση του κλασικού γενετικού αλγορίθμου

<p>Κύρια μέθοδος γενετικού αλγορίθμου:</p> <pre> { Αρχικοποίηση μετρητή $t = 0$; Αρχικοποίηση του πληθυσμού των λύσεων $P(t)$; Αξιολόγηση του αρχικού πληθυσμού $P(0)$; Όσο δεν ικανοποιείται κάποιο κριτήριο τερματισμού { $t = t + 1$; Επιλογή γονέων από τον πληθυσμό $P(t - 1)$ βάσει της συνάρτησης καταλληλότητας; } </pre>

Παραγωγή πληθυσμού νέων λύσεων $O(t)$ χρησιμοποιώντας ομοιόμορφη διασταύρωση (uniform crossover);

Γενετική Μετάλλαξη (mutation) των νέων λύσεων $O(t)$;

Αξιολόγηση των νέων λύσεων $O(t)$;

Δημιουργία νέου πληθυσμού $P(t)$ συνδυάζοντας τις νέες λύσεις $O(t)$ και τον πληθυσμό $P(t-1)$;

}

}

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τους γενετικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης, ο αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στην οικεία βιβλιογραφία ([9], [10], [12] και [22]).

3.3 Ο αλγόριθμος Pareto Ισχύος (SPEA)

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζεται ο αλγόριθμος Pareto Ισχύος (Strength Pareto Evolutionary Algorithm), ο οποίος παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Zitzler and Thiele το 1998. Μάλιστα, λίγο μετά την δημοσίευσή του, αναπτύχθηκε και βελτιωμένη εκδοχή του αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος Pareto Ισχύος χρησιμοποιεί ένα μείγμα από καθιερωμένες και νέες τεχνικές, έτσι ώστε να προσεγγίσει το σύνολο Pareto. Η κεντρική ιδέα συνίσταται στην διατήρηση ενός εξωτερικού συνόλου το οποίο χρησιμοποιείται, μεταξύ άλλων, για τον καθορισμό του μέτρου καταλληλότητας. Το μέγεθός του καθορίζεται εξ αρχής, κάτι που έχει ως συνέπεια την ύπαρξη συγκεκριμένου αριθμού εναλλακτικών επιλογών, μετά ο πέρασ της υπολογιστικής διαδικασίας. Λόγω του ιδιαίτερου χειρισμού του εξωτερικού συνόλου, ο αλγόριθμος SPEA θεωρείται η πρώτη από τις εκλεκτικές μεθόδους, δηλαδή τους πολυκριτηριακούς αλγορίθμους τρίτης γενιάς. Όπως και οι υπόλοιποι πολυκριτηριακοί εξελικτικοί αλγόριθμοι, ο αλγόριθμος Pareto Ισχύος έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Αποθηκεύει εκείνα τα άτομα που εξωτερικά αντιπροσωπεύουν ένα μη-κυριαρχούμενο μέτωπο μεταξύ όλων των εξεταζόμενων μέχρι τώρα λύσεων.

- Χρησιμοποιεί την έννοια της κυριαρχίας του μετώπου Pareto προκειμένου να ορίσει κλιμακωτές τιμές ικανότητας στα άτομα.
- Εκτελεί συγκέντρωση προκειμένου να μειώσει τον αριθμό των ατόμων που αποθηκεύονται εξωτερικά χωρίς να καταστρέφει τα χαρακτηριστικά του μετώπου ανταλλαγής.

Ο αλγόριθμος Pareto Ισχύος είναι μοναδικός από τέσσερις απόψεις γιατί:

- Συνδυάζει τις παραπάνω τρεις τεχνικές.
- Η ικανότητα ενός μέλους του πληθυσμού καθορίζεται μόνον από τα άτομα τα οποία είναι αποθηκευμένα στο εξωτερικό σύνολο.
- Όλα τα άτομα στο εξωτερικό σύνολο συμμετέχουν στην επιλογή.
- Εφαρμόζεται μια νέα μέθοδος τοποθέτησης βασισμένη στο μέτωπο Pareto προκειμένου να συντηρηθεί η ποικιλομορφία στον πληθυσμό.

Ο αλγόριθμος Pareto Ισχύος (SPEA) χρησιμοποιεί έναν κανονικό πληθυσμό και ένα αρχείο (εξωτερικό σύνολο). Τα κυριότερα βήματα του αλγορίθμου για κάθε γενιά παρουσιάζονται παρακάτω:

Βήμα 1: Δημιουργείται το αρχικό εξωτερικό σύνολο, που περιέχει όλες τις ισχυρά μη κυριαρχούμενες λύσεις του τρέχοντος πληθυσμού. Εάν υπάρχουν κυριαρχούμενες λύσεις ή λύσεις που εμφανίζονται δύο φορές (σχετικά με τις τιμές καταλληλότητάς τους), τότε αυτές απομακρύνονται από το αρχείο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενημέρωσης.

Βήμα 2: Αν το πλήθος των μελών του εξωτερικού συνόλου ξεπερνά ένα προκαθορισμένο όριο, τότε αφαιρούνται τα περίσσια άτομα-λύσεις μέσω μιας τεχνικής συγκέντρωσης, η οποία διατηρεί τα χαρακτηριστικά του μη-κυριαρχούμενου μετώπου. Με τον τρόπο αυτό, διαμορφώνονται δυο τελικά σύνολα: το πρώτο περιέχει τις ισχυρά μη κυριαρχούμενες λύσεις, ενώ το δεύτερο περιέχει όλα τα υπόλοιπα μέλη του πληθυσμού.

Βήμα 3: Υπολογίζονται οι τιμές καταλληλότητας ή ισχύος (στην πραγματικότητα, πρόκειται για τιμές ποινής) για τα μέλη τόσο του αρχείου όσο και του πληθυσμού, με βάση μια πρωτότυπη μέθοδο που βασίζεται στην έννοια της κυριαρχίας Pareto.

Βήμα 4: Εφαρμόζεται μια διαδικασία δυαδικής επιλογής με διαγωνισμό, με την οποία εντοπίζονται τα μέλη του βοηθητικού πληθυσμού. Αυτό γίνεται επιλέγοντας τυχαία δύο άτομα από όλον τον τρέχοντα πληθυσμό, και συγκρίνοντας τις καταλληλότητες αυτών (με τον τρόπο που ορίζονται οι τελευταίες, θεωρείται ότι υπερισχύει το άτομο με τη μικρότερη τιμή-ποινή).

Βήμα 5: Με εφαρμογή των τυπικών τελεστών διασταύρωσης και μετάλλαξης, παράγονται τα μέλη της επόμενης γενιάς.

Βήμα 6: Εφόσον πληρούνται οι συνθήκες τερματισμού του αλγορίθμου, τότε η βέλτιστη λύση του πολυκριτηριακού προβλήματος είναι το τελικό εξωτερικό σύνολο (αρχείο).

Ο παραπάνω κύκλος περιλαμβάνει δυο σημαντικές διαδικασίες. Η πρώτη αφορά στην αποτίμηση του μέτρου ποινής των μελών του πληθυσμού, και εκτελείται σε δύο στάδια. Για κάθε άτομο i μέσα στο αρχείο ορίζεται μια τιμή ισχύος (strength value) $S(i) \in [0,1]$, η οποία συγχρόνως αντιπροσωπεύει και την τιμή ικανότητας του ατόμου $F(i)$. Η τιμή $S(i)$ είναι ο αριθμός των μελών j του πληθυσμού που κυριαρχούνται ή είναι ισοδύναμα με το i αναφορικά με τις αντικειμενικές τιμές, διαιρούμενος με το μέγεθος του πληθυσμού συν ένα.

$$S(i) = \frac{j}{N+1} \quad (3.1)$$

όπου j είναι ο αριθμός των μελών του πληθυσμού που κυριαρχούνται ή είναι ισοδύναμα με το i και N είναι το μέγεθος του πληθυσμού.

Η ικανότητα $F(j)$ ενός ατόμου j στον πληθυσμό υπολογίζεται αθροίζοντας τις τιμές ισχύος (strength values) όλων των μελών i του αρχείου τα οποία κυριαρχούν ή είναι ισοδύναμα με το j και προσθέτοντας ένα στο τέλος:

$$F(i) = 1 + \sum_{\{i \in P, \wedge m(i) \geq m(j)\}} S(i) \quad (3.2)$$

όπου $\sum_{\{i \in P, \wedge m(i) \geq m(j)\}} S(i)$ είναι το άθροισμα των τιμών των δυνάμεων όλων των μελών i του αρχείου τα οποία κυριαρχούν ή είναι ισοδύναμα με το j . Στις παραπάνω εξισώσεις m είναι το μέτρο καταλληλότητας.

Ο Zitzler και η επιστημονική του ομάδα, αφού εντόπισαν ορισμένα μειονεκτήματα της μεθόδου SPEA, ανέπτυξαν μια βελτιωμένη εκδοχή της το 2002. Αυτή η εκδοχή ονομάστηκε βελτιωμένος εξελικτικός αλγόριθμος Pareto ισχύος (SPEA-II) και έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [10]:

- Ένα καινοτόμο σχήμα αποτίμησης της καταλληλότητας, το οποίο λαμβάνει υπόψη του τον αριθμό των ατόμων επί των οποίων κυριαρχεί και από τα οποία κυριαρχείται κάθε μέλος του πληθυσμού.
- Μια μέθοδο εκτίμησης της πυκνότητας του πληθυσμού, που επιτρέπει μια καλύτερη κατεύθυνση της διαδικασίας αναζήτησης.
- Μια εναλλακτική μέθοδο περικοπής του αρχείου, σε αντικατάσταση της μεθόδου συγκέντρωσης που χρησιμοποιεί η μέθοδος SPEA.

Μια επιπλέον διαφορά σε σχέση με την αρχική εκδοχή της μεθόδου SPEA είναι το γεγονός ότι το μέγεθος του αρχείου διατηρείται σταθερό. Αν λοιπόν σε μια γενιά ο αριθμός των μη κυριαρχούμενων ατόμων είναι μικρότερος από ένα προκαθορισμένο όριο, τότε το εξωτερικό σύνολο συμπληρώνεται από κυριαρχούμενα, και ως εκ τούτου μη βέλτιστα, άτομα-λύσεις.

Ο καθορισμός του μέτρου καταλληλότητας γίνεται ως εξής: Αρχικά, για κάθε μέλος i του πληθυσμού υπολογίζεται η ισχύς του, $S(i)$, που αντιστοιχεί στον αριθμό των ατόμων επί των οποίων κυριαρχεί. Αντίθετα, στον αρχικό αλγόριθμο, ο υπολογισμός της ισχύος γινόταν αποκλειστικά για τα μέλη του εξωτερικού συνόλου. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η αρχική καταλληλότητα $R(i)$, ως το άθροισμα όλων των τιμών $S(j)$ των ατόμων που κυριαρχούν επί του μέλους i . Η τιμή $R(i) = 0$ αντιστοιχεί αποκλειστικά στα μη κυριαρχούμενα μέλη του τρέχοντος πληθυσμού, ενώ όσο αυξάνει η τιμή αυτή τόσο αυξάνει ο αριθμός των ατόμων που κυριαρχούν επί του συγκεκριμένου μέλους i . Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει κατά πολύ μεγαλύτερη ποικιλία τιμών καταλληλότητας, καθώς ο έλεγχος της κυριαρχίας γίνεται με βάση το σύνολο του δείγματος, και όχι μόνο το εξωτερικό σύνολο, όπως συμβαίνει με τη μέθοδο SPEA.

Στην περίπτωση ύπαρξης ατόμων με ίδιες τιμές αρχικής καταλληλότητας, εισάγεται ως επιπλέον πληροφορία ένα μέτρο πυκνότητας ή γειννίασης. Η διαδικασία που εφαρμόζεται βασίζεται στη μέθοδο του k -πλησιέστερου γείτονα (k -th nearest neighbor), λαμβάνοντας ως εκτιμήτρια της πυκνότητας ενός σημείου i την απόσταση του k -οστού κοντινότερου σημείου του δείγματος. Η

ολική καταλληλότητα κάθε ατόμου προκύπτει προσθέτοντας στην αρχική τιμή το μέτρο πυκνότητας, δηλαδή:

$$F(i) = R(i) + D(i) \quad (3.3)$$

Σε κάθε γενιά αντιγράφονται στο εξωτερικό σύνολο όλες οι μη κυριαρχούμενες λύσεις, δηλαδή τα άτομα εκείνα για τα οποία ισχύει $R(i) = 0$, και συνεπώς $F(i) < 1$. Αν το μέγεθος του εξωτερικού συνόλου είναι μικρότερο από την προκαθορισμένη επιθυμητή τιμή, τότε σε αυτό αντιγράφονται τα καλύτερα μέλη από τον υπόλοιπο πληθυσμό και το προηγούμενο εξωτερικό σύνολο, ώσπου να συμπληρωθεί ο αριθμός. Αν το μέγεθος του εξωτερικού συνόλου, δηλαδή το πλήθος των μη κατωτέρων λύσεων, είναι μεγαλύτερο από την προκαθορισμένη επιθυμητή τιμή, τότε εφαρμόζεται μια διαδικασία περικοπής, που είναι ελαφρά διαφορετική σε σχέση με αυτή που περιγράφηκε για την αρχική μέθοδο SPEA. Συγκεκριμένα, πρόκειται για μια αναδρομική διαδικασία, στην οποία κάθε φορά απομακρύνεται το σημείο που έχει την ελάχιστη απόσταση σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα. Η διαδικασία αυτή θεωρείται ότι εξασφαλίζει τη διατήρηση των οριακών λύσεων, που είναι δυνατό να χαθούν με το σχήμα συγκέντρωσης που χρησιμοποιεί η SPEA.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον αλγόριθμο Pareto ισχύος (SPEA και SPEA-II), ο αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στην οικεία βιβλιογραφία ([1], [6], [10] και [12]).

4 Το πρόβλημα της διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων

4.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Με τον όρο «Διαχείριση Υδατικών Πόρων», αναφερόμαστε σε ένα σύνολο δραστηριοτήτων υπό τη μορφή έργων ή άλλων μέτρων, που αποσκοπούν στην εναρμόνιση με το περιβάλλον των σχετικών με το νερό ωφελμιστικών δραστηριοτήτων του ανθρώπου ([18]). Κύριος στόχος της διαχείρισης υδατικών πόρων είναι η προμήθεια νερού, ικανοποιητικής ποσότητας και κατάλληλης ποιότητας, στις ανθρώπινες κοινωνίες και το περιβάλλον. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας του αιώνα μας, διαμορφώθηκε μια ολοένα εντεινόμενη οικολογική - περιβαλλοντική συνείδηση και αντίληψη από τις ανθρώπινες κοινωνίες, σχετικά με τη διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Οι κλιματικές αλλαγές σε συνδυασμό με την ξηρασία και την ανεπάρκεια των διαθέσιμων πόρων, δημιούργησαν μια νέα κοινή βάση αντίληψης σχετικά με τη σχέση του ανθρώπου με το φυσικό περιβάλλον. Η ανάγκη για ορθολογική και αποτελεσματική διαχείριση των συστημάτων υδατικών πόρων κρίνεται πλέον επιτακτική. Στα πλαίσια της παραπάνω προσπάθειας, εντάσσεται και η τάση για τη βέλτιστη διαχείριση των συστημάτων ταμιευτήρων.

Το πρόβλημα της διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων αποτελεί σήμερα το αντικείμενο πολυάριθμων και εκτεταμένων ερευνών. Η επίλυσή του είναι μια εξαιρετικά επίπονη διαδικασία λόγω του μεγάλου αριθμού των μεταβλητών απόφασης, της στοχαστικής φύσης των υδρολογικών συνιστωσών, της μη γραμμικής δυναμικής των συστημάτων και της αβεβαιότητας ως προς τις τιμές κάποιων παραμέτρων. Οι δυο κύριες μέθοδοι προσέγγισης του προβλήματος είναι η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση. Το γενικό μοντέλο ανάλυσης συστημάτων ταμιευτήρων περιλαμβάνει τα εξής:

- Μια συνάρτηση στόχου, η οποία εκφράζει τον σκοπό του προβλήματος.
- Ένα μοντέλο κατάστασης του συστήματος, το οποίο περιγράφει τις συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα σε κάθε χρονική στιγμή. Περιλαμβάνει τις εισόδους, τις

εξόδους και άλλες μεταβλητές του συστήματος, καθώς και τους φυσικούς περιορισμούς του.

- Ένα μοντέλο συσχέτισης των εισόδων με τις εξόδους του συστήματος, δηλαδή τις εξισώσεις δυναμικής του συστήματος.
- Μια διαδικασία εποπτείας, ελέγχου και αξιολόγησης των εφικτών εναλλακτικών λύσεων.
- Ένα σύστημα επιλογής της βέλτιστης λύσης.

Στα προβλήματα διαχείρισης ταμιευτήρων έχουν εφαρμοστεί όλες οι γνωστές τεχνικές ανάλυσης συστημάτων. Η επιλογή της εκάστοτε καταλληλότερης μεθόδου εξαρτάται από το είδος της συνάρτησης στόχου, τη φύση των περιορισμών, τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης και τα γενικότερα χαρακτηριστικά του προβλήματος.

Για την επίλυση ενός προβλήματος προσομοίωσης ή βελτιστοποίησης είναι απαραίτητη η χρήση κάποιου υδρολογικού μοντέλου συστήματος ταμιευτήρα. Όπως ήδη αναφέρθηκε, το μοντέλο αυτό αναπαριστά, με απλουστευμένο τρόπο (και συνήθως αγνοώντας φαινόμενα ανώτερης τάξεως), τη λειτουργία του πραγματικού συστήματος. Το μοντέλο απαρτίζεται από έναν αριθμό εξισώσεων και φυσικών περιορισμών και περιλαμβάνει και τις μεταβλητές απόφασης. Εδώ θα διερευνηθεί μόνον η περίπτωση μεμονωμένου ταμιευτήρα. Χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις συνέχειας, ή ισοζυγίου. Οι μεταβλητές απόφασης αφορούν στην απόληψη νερού από τον ταμιευτήρα, στην εξάτμιση και στη βροχόπτωση και συνήθως είναι απαραίτητη η γνώση κάποιων δεδομένων σχετικά με αυτές (συνήθως μηνιαίες τιμές). Οι συναρτήσεις στόχου καταρτίζονται ως συναρτήσεις της απόληξης νερού και έχουν να κάνουν με την ικανοποίηση κάποιας ζήτησης, ενώ οι περιορισμοί του προβλήματος αφορούν σε φυσικές διεργασίες, οικονομοτεχνικούς περιορισμούς, και άλλους παράγοντες που έχουν ήδη αναφερθεί.

Τα κυριότερα υδρολογικά μεγέθη, που χρησιμοποιούνται στη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων, είναι κατά κύριο λόγο η απορροή υδατορευμάτων, και δευτερευόντως η βροχόπτωση και η εξατμισοδιαπνοή ([18]). Τα συγκεκριμένα μεγέθη χαρακτηρίζονται ως μη προβλέψιμα, καθώς επηρεάζονται από μια πληθώρα μη προβλέψιμων φυσικών διεργασιών, όπως παραδείγματος χάριν, τις τυρβώδεις ροές, τις διάφορες θερμοδυναμικές διεργασίες της ατμόσφαιρας και από υδρολογικές διεργασίες μεγάλης χωρικής ετερογένειας, όπως η διήθηση του νερού στο έδαφος ([18]).

Τα μεγέθη αυτά διατίθενται υπό τη μορφή χρονοσειρών που προκύπτουν με επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων από παρατηρήσεις μέσω μετρητικών οργάνων. Για τους υδατικούς πόρους του ελληνικού χώρου δεν διατίθενται χρονοσειρές μεγαλύτερες των 50 ετών και είναι εξαιρετικά δύσκολο να οριστούν οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας των ταμιευτήρων, πράγμα απαραίτητο για τη σωστή λειτουργία των υδρολογικών μοντέλων. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, και να εξαλειφθούν οι αβεβαιότητες και οι παραδοχές που αφορούν στις αρχικές συνθήκες, δημιουργούνται συνθετικές χρονοσειρές μακράς συνολικής περιόδου με στοχαστικά μοντέλα. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτή και η προβολή στο μέλλον των μεταβλητών που αναφέρονται σε δράσεις που θα πραγματοποιηθούν με βάση τις αποφάσεις μέσω μοντέλων. Οι συνθετικές χρονοσειρές και η διαδικασία παραγωγής τους θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

4.2 Κριτήρια επίδοσης συστημάτων ταμιευτήρων

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας και επίδοσης των συστημάτων ταμιευτήρων έχουν καθιερωθεί συγκεκριμένα κριτήρια και δείκτες επίδοσης. Τα κριτήρια αυτά αναφέρονται σε τρία κρίσιμα χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός συστήματος ταμιευτήρων, την αξιοπιστία (reliability), την τρωτότητα (vulnerability) και την ικανότητα ανάκαμψης (resilience). Οι δείκτες αξιοπιστίας, τρωτότητας και ικανότητας ανάκαμψης προτάθηκαν από τις ερευνητικές ομάδες των Hashimoto και Fiering το 1982 ([38], [49]).

Ένα εξαιρετικά κρίσιμο χαρακτηριστικό ενός συστήματος υδατικών πόρων είναι η αξιοπιστία, η οποία ορίζεται ως η πιθανότητα επίτευξης μιας συγκεκριμένης επίδοσης για καθορισμένο χρονικό διάστημα και καθορισμένες συνθήκες ([11]). Συμπληρωματική της έννοιας της αξιοπιστίας είναι η πιθανότητα αστοχίας. Σε ορισμένες απλές περιπτώσεις, η εκτίμηση της αξιοπιστίας ενός υδροσυστήματος είναι δυνατή με άμεσες μεθόδους, π.χ. με στατιστική ανάλυση των ιστορικών χρονοσειρών απόκρισης αυτού. Ωστόσο, σε ένα σύνθετο σύστημα, κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό, διότι τα υδραυλικά έργα διαταράσσουν το φυσικό καθεστώς υδροφορίας. Σε μια τέτοια περίπτωση, η εκτίμηση της αξιοπιστίας ή, ισοδύναμα, της πιθανότητας αστοχίας, δεν είναι εφικτή αναλυτικά, αλλά γίνεται εμπειρικά, υπολογίζοντας την συχνότητα ικανοποίησης της ζήτησης, από ένα επαρκώς μεγάλο δείγμα εκροών.

Η τρωτότητα ενός συστήματος υδατικών πόρων ορίζεται ως το μέτρο εκτίμησης της ικανότητας του συστήματος να ανακάμψει από μια αστοχία (failure) και να απορροφήσει τις συνέπειες της.

Ως αστοχία αναφέρεται η αδυναμία επίτευξης μιας συγκεκριμένης επίδοσης, δηλαδή η αδυναμία κάλυψης μιας συγκεκριμένης ζήτησης νερού.

Η ικανότητα ανάκαμψης ορίζεται ως η δυνατότητα ενός συστήματος να λειτουργήσει τεχνικά και θεσμικά, κατά τη διάρκεια ενός σύντομου χρονικού διαστήματος, μετά την εμφάνιση ενός καταστροφικού γεγονότος, με τρόπο ώστε οι απώλειες να παραμένουν σε ανεκτά πλαίσια. Ο δείκτης ικανότητα ανάκαμψης δίνει μια εκτίμηση της μελλοντικής συμπεριφοράς του ταμιευτήρα σε περίπτωση εμφάνισης κάποιου ακραίου γεγονότος και αποτελεί μέτρο εκτίμησης της ανθεκτικότητας του συστήματος.

Με βάση τα παραπάνω, οι δείκτες που προτάθηκαν από τον Hashimoto μπορούν να περιγραφούν ορίζοντας ένα κριτήριο Γ για κάθε πηγή παροχής νερού σε έναν ταμιευτήρα ([31]). Αν αυτή η πηγή δεν είναι ικανή να παρέχει την ποσότητα νερού που απαιτείται ορίζεται ως ανεπαρκής και παίρνει την τιμή U , ενώ σε αντίθετη περίπτωση ορίζεται ως επαρκής και λαμβάνει την τιμή S . Οι προαναφερθείσες τιμές καθορίζονται, σύμφωνα με το κριτήριο Γ . Υπολογίζονται οι χρονοσειρές κάλυψης της ζήτησης σε μηνιαία βάση, X_t . Αν ικανοποιείται η ζήτηση, είμαστε σε επαρκή κατάσταση. Ορίζεται ο δείκτης Z_t που καθορίζει αν η κατάσταση της πηγής είναι «επαρκής» ή «ανεπαρκής» και υπολογίζεται ο δείκτης μετάβασης από ανεπαρκή κατάσταση σε ικανοποιητική, W_t ως εξής:

$$Z_t = \begin{cases} 1, & \text{αν } X_t \in S \\ 0, & \text{αν } X_t \in U \end{cases} \quad (4.1)$$

και

$$W_t = \begin{cases} 1, & \text{αν } (X_t \in U) \text{ και } (X_{t+1} \in S) \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.2)$$

Αν οι περίοδοι ανεπαρκούς X_t οριστούν ως J_1, J_2, \dots, J_N , τότε ορίζονται οι δείκτες αξιοπιστίας C_R , τρωτότητας C_V και ικανότητας ανάκαμψης C_{RS} ως εξής:

$$C_R = \frac{\sum_{t=1}^T Z_t}{T} \quad (4.3)$$

$$C_V = \max \left(\sum_{t \in J_i} \Gamma - X_t, i = 1, 2, \dots, N \right) \quad (4.4)$$

$$C_{RS} = \frac{\sum_{t=1}^T W_t}{T - \sum_{t=1}^T Z_t} \quad (4.5)$$

Επίσης, οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι και κοινά αποδεκτοί μαθηματικοί ορισμοί των μεγεθών της αξιοπιστίας Rel, της τρωτότητας Vul και της ικανότητας ανάκαμψης Res, που προέκυψαν από την εξέλιξη των προτάσεων του Hashimoto είναι οι εξής ([34], [36]):

$$\text{Rel} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T} \quad (4.6)$$

$$\text{Vul} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v(j) \quad (4.7)$$

$$\text{Res} = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1} \quad (4.8)$$

όπου $d(j)$ είναι η διάρκεια του j -οστού γεγονότος αστοχίας, $v(j)$ είναι ο όγκος νερού του ελλείμματος που προκλήθηκε από το συγκεκριμένο γεγονός αστοχίας και M είναι ο συνολικός αριθμός των γεγονότων αστοχίας.

Τονίζεται ότι κάθε χρήση σε ένα σύστημα υδατικών πόρων, ανάλογα με την κρισιμότητά της, μελετάται με διαφορετικό επίπεδο αξιοπιστίας. Για παράδειγμα, μια υδρευτική χρήση οφείλει να ικανοποιείται με πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με μια αρδευτική. Όσο μεγαλύτερο το επίπεδο αξιοπιστίας τόσο μεγαλύτερο οφείλει να είναι το δείγμα των εισροών που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση. Συνήθως, τα ιστορικά δείγματα δεν είναι κατάλληλα για την εκτίμηση υψηλών επιπέδων αξιοπιστίας ή, ισοδύναμα, μικρών πιθανοτήτων αστοχίας, δεδομένου ότι αδυνατούν να αναπαράγουν τις ακραίες τιμές των σχετικών κατανομών πιθανοτήτων. Ο περιορισμός αυτός καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση μεθοδολογιών στοχαστικής προσομοίωσης για την ανάλυση τέτοιων συστημάτων.

4.3 Το μονοκριτηριακό πρόβλημα – Επίλυση μέσω προσομοίωσης

Η προσομοίωση είναι μια διαδικασία ανάλυσης ενός υδροσυστήματος, κατά την οποία αναπαρίσταται η λειτουργία του για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και με συγκεκριμένο χρονικό βήμα, με χρήση ενός υδρολογικού μοντέλου. Στην παρούσα ανάλυση εξετάζεται ένα σύστημα ταμιευτήρα και με τη διαδικασία της προσομοίωσης υπολογίζονται οι απολήψεις και τα αποθέματα του ταμιευτήρα. Σαν δεδομένα του προβλήματος δίνονται η απορροή, η βροχόπτωση και η εξάτμιση και το μοντέλο προσομοίωσης υπολογίζει τις απολήψεις για κύρια και περιβαλλοντική χρήση, και άλλα μεγέθη.

Θεωρούμε μια λεκάνη απορροής με φράγμα στην έξοδο της. Ο ταμιευτήρας που δημιουργείται θεωρείται μεμονωμένος. Ο ταμιευτήρας θεωρείται ότι εξυπηρετεί μόνο δύο χρήσεις νερού: την ύδρευση και την περιβαλλοντική διατήρηση. Η πρώτη χαρακτηρίζεται από την ετήσια ζήτηση νερού D . Η δεύτερη εκφράζεται ως απαίτηση για διατήρηση μιας ελάχιστης παροχής νερού, γνωστής ως οικολογικής παροχής. Η οικολογική παροχή θεωρείται γνωστός μηνιαίος όγκος νερού που μεταβάλλεται από μήνα σε μήνα, αλλά όχι από το ένα υδρολογικό έτος στο άλλο. Θεωρείται επίσης η γνωστή ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα K (όγκος από τη στάθμη υδροληψίας). Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις που συγκροτούν το μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμιευτήρα. Ως χρονική κλίμακα χρησιμοποιείται ο μήνας. Ο χρόνος σε όλα τα υδρολογικά μεγέθη παριστάνεται με δύο δείκτες: i , για το υδρολογικό έτος, και j για το μήνα. Στο υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα συμβάλλουν τα παρακάτω μεγέθη ([18]):

Εισροές:

- Συνολική απορροή υδατορευμάτων $Q_{i,j}$ το μήνα (i,j) σε όρους όγκου νερού
- Βροχόπτωση πάνω στην επιφάνεια του ταμιευτήρα $P_{i,j}$ το μήνα (i,j) σε όρους ύψους νερού

Εκροές:

- Εξάτμιση από την επιφάνεια του ταμιευτήρα $E_{i,j}$ το μήνα (i,j) σε όρους ύψους νερού
- Υπόγεια διαφυγή $L_{i,j}$ το μήνα (i,j) σε όρους όγκου νερού

- Απόληψη για περιβαλλοντική διατήρηση $RE_{i,j}$ το μήνα (i,j) σε όρους όγκου νερού
- Απόληψη για ύδρευση $R_{i,j}$ το μήνα (i,j) σε όρους όγκου νερού
- Υπερχείλιση $SP_{i,j}$ το μήνα (i,j) σε όρους όγκου νερού

Ωφέλιμο απόθεμα νερού: (ίσο με 0.0 στην κατώτατη και K στην ανώτατη στάθμη λειτουργίας)

- Στην αρχή του μήνα (i,j) , $S_{i,j}$
- Στο τέλος του μήνα (i,j) , $S_{i,j+1}$

Στην ανάλυση που ακολουθεί, αγνοείται η υπόγεια διαφυγή. Πρώτα θεωρείται ότι εισρέει το νερό της απορροής και της βροχόπτωσης και μετά πραγματοποιείται η εξάτμιση. Έτσι το προσωρινά διαθέσιμο νερό (για κάθε χρήση) το μήνα (i,j) είναι:

$$SA_{i,j} = S_{i,j} + Q_{i,j} + \gamma P_{i,j} A_{i,j} - \gamma E_{i,j} A_{i,j} \quad (4.9)$$

όπου γ είναι συντελεστής μετατροπής των μονάδων και $A_{i,j}$ είναι το εμβαδόν της επιφάνειας καθρέφτη του ταμιευτήρα στην αρχή του μήνα (i,j) . Η τιμή του $A_{i,j}$ υπολογίζεται συνήθως ως συνάρτηση του ωφέλιμου όγκου του ταμιευτήρα στην αρχή του μήνα (i,j) . Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η απόληψη για περιβαλλοντική διατήρηση σύμφωνα με ορισμένο κανόνα που λέγεται «κανόνας λειτουργίας». Συνήθης είναι η χρήση του τυπικού κανόνα λειτουργίας που βασίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

- Εφόσον το νερό στον ταμιευτήρα επαρκεί, λαμβάνεται ποσότητα ακριβώς ίση με τη ζήτηση νερού για περιβαλλοντική διατήρηση τον εξεταζόμενο μήνα j , q_j .
- Στην αντίθετη περίπτωση λαμβάνεται όλο το διαθέσιμο νερό.

Ο κανόνας γράφεται ως εξής:

$$RE_{i,j} = \min(SA_{i,j}, q_j) \quad (4.10)$$

Στη συνέχεια από το διαθέσιμο νερό που απομένει $(SA_{i,j} - RE_{i,j})$, πραγματοποιείται απόληψη για ύδρευση σύμφωνα με τον ίδιο κανόνα ως εξής:

$$R_{i,j} = \min(SA_{i,j} - RE_{i,j}, D_j) \quad (4.11)$$

Με βάση το νερό που απομένει $(SA_{i,j} - RE_{i,j} - R_{i,j})$, γίνεται έλεγχος της ενδεχόμενης υπερχειλίσης. Αν $(SA_{i,j} - RE_{i,j} - R_{i,j}) > K$ ή, ισοδύναμα $(SA_{i,j} - RE_{i,j} - R_{i,j} - K) > 0$, η ποσότητα που υπερβαίνει την χωρητικότητα K υπερχειλίζει. Αλλιώς η υπερχειλίση είναι μηδενική. Σε αναλυτική μορφή:

$$SP_{i,j} = \max(SA_{i,j} - RE_{i,j} - R_{i,j}, 0) \quad (4.12)$$

Αν υπάρχει υπερχειλίση, αυτή μπορεί να καλύψει μέρος, ή το σύνολο, της οικολογικής παροχής.

Η εξίσωση συνέχεια (ή υδατικού ισοζυγίου) γράφεται ως εξής:

$$S_{i,j+1} = SA_{i,j} - RE_{i,j} - R_{i,j} - SP_{i,j} \quad (4.13)$$

Οι πέντε εξισώσεις 4.9 ως 4.13 έχουν πέντε άγνωστα μεγέθη: τα $S_{i,j+1}$, $SA_{i,j}$, $RE_{i,j}$, $R_{i,j}$ και $SP_{i,j}$ και η διαδοχική εφαρμογή τους αρκεί για τον υπολογισμό των αγνώστων. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι:

1. Q_{ij} : Μηνιαία απορροή το μήνα (i,j)
2. P_{ij} : Επιφανειακό ύψος βροχής ανηγμένο στη μέση στάθμη του ταμιευτήρα το μήνα (i,j)
3. E_{ij} : Εξάτμιση το μήνα (i,j)
4. q_j : Απαιτούμενος όγκος νερού για περιβαλλοντική διατήρηση (οικολογική παροχή) το μήνα j
5. λ_j : Συντελεστής ανισοκατανομής της ζήτησης το μήνα j .
6. D_j : Απαιτούμενος όγκος νερού για καταναλωτική χρήση (ύδρευση) τον μήνα j . Ισχύει ο τύπος:

$$D_j = \lambda_j \cdot D \quad (4.14)$$

όπου D είναι η ετήσια ζήτηση νερού

7. A_{ij} : Εμβαδόν της επιφάνειας (καθρέφτη) του ταμιευτήρα στην αρχή του μήνα (i,j) που υπολογίζεται ως συνάρτηση του S_{ij} .

Η διαδικασία της προσομοίωσης εφαρμόζεται για όλους τους μήνες, ξεκινώντας από τον πρώτο και καταλήγοντας στον τελευταίο μήνα κάθε έτους j .

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την προσομοίωση υδροσυστημάτων και τις εξισώσεις ισοζυγίου, ο αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στην οικεία βιβλιογραφία ([12],[14],[17],[18],[19] και [21]).

4.4 Το πολυκριτηριακό πρόβλημα

Στο παρόν κεφάλαιο ορίζεται μαθηματικά το πολυκριτηριακό πρόβλημα που θα αναλυθεί. Η προσέγγιση του προβλήματος στην παρούσα εργασία είναι καθαρά υδρολογική. Τα κριτήρια βελτιστοποίησης συνοψίζονται στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ της ζήτησης που παρουσιάζει ο ταμιευτήρας και μιας μειωμένης επιθυμητής απόληψης (εδώ ονομάζεται απόληψη-στόχος) και στην ελαχιστοποίηση του ελλείμματος (επιθυμητή μείον πραγματική απόληψη), πρόκειται δηλαδή για κριτήρια που εκφράζονται καθαρά μέσω της απόληψης-στόχου. Οι αναλυτικοί ορισμοί των δυο κριτηρίων παρουσιάζονται παρακάτω:

Κριτήριο 1:

Ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόκλισης μεταξύ μηνιαίας ζήτησης και απόληψης – στόχου σε όλο τον χρονικό ορίζοντα T :

$$\min f_1 = \min \left(\max_{t=1}^T (D_t - RT_t) \right) \quad (4.15)$$

όπου D_t είναι η ζήτηση για τον μήνα t , RT_t είναι η απόληψη-στόχος το μήνα t .

Κριτήριο 2:

Ελαχιστοποίηση του μέγιστου ελλείμματος (απόληψη-στόχος μείον πραγματική απόληψη) σε όλο τον χρονικό ορίζοντα και σε όλες τις πραγματοποιήσεις:

$$\min f_2 = \min \left(\max_{t=1}^T \max_{i=1}^N (RT_t - R_{t,i}) \right) \quad (4.16)$$

όπου N ο αριθμός των πραγματοποιήσεων ($i = 1, 2, \dots, N$), και R_i η πραγματική απόληψη τον μήνα t κατά την πραγματοποίηση i .

Ο ορισμός των παραπάνω κριτηρίων ουσιαστικά αφορά στην ελαχιστοποίηση ενός προγραμματισμένου ελλείμματος. Το πρόβλημα ανάγεται στον καθορισμό μιας απόληξης στόχου, η οποία θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ζήτηση, που θα ελαχιστοποιεί τη μέγιστη διαφορά ζήτησης και στόχου, αλλά και θα ελαχιστοποιεί τη μέγιστη διαφορά ανάμεσα σε πραγματική απόληψη και απόληψη-στόχο.

Τα δύο αυτά κριτήρια πολυκριτηριακού προβλήματος υπόκεινται σε ταυτόχρονη βελτιστοποίηση και αναζητούνται οι πιθανές λύσεις που τα ικανοποιούν. Οι περιορισμοί του προβλήματος αφορούν στην διατήρηση θετικών τιμών στις μεταβλητές απόφασης, στη διαφορά ζήτησης στην πραγματική απόληψη και στην απόληψη στόχου. Μαθηματικά οι περιορισμοί περιγράφονται παρακάτω ([12]):

$$\begin{cases} D_t \geq 0 \\ R_t \geq 0 \\ RT_t \geq 0 \\ D_t - RT_t \geq 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

5 Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών

5.1 Γενικά

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα κύρια υδρολογικά μεγέθη που συναντώνται στη διαχείριση υδατικών πόρων, δηλαδή η απορροή υδατορευμάτων, η βροχόπτωση και η εξατμισοδιαπνοή, είναι μη προβλέψιμα μεγέθη. Για τη διαχείριση προβλημάτων διαχείρισης και λήψης αποφάσεων κρίνεται επιτακτική η αντιμετώπιση τέτοιας φύσεως μεταβλητών μέσω της πρόβλεψης τους. Η αβεβαιότητα ή τυχαιότητα των φυσικών αυτών υδρολογικών μεγεθών αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας μεθόδους βασισμένες στις θεωρίες των πιθανοτήτων και της στατιστικής ([18]).

Από την οπτική γωνία της θεωρίας πιθανοτήτων, οι υδρολογικές διεργασίες αντιμετωπίζονται ως στοχαστικές ανελίξεις. Για παράδειγμα, η βροχόπτωση ή η παροχή ενός ποταμού σε μια συγκεκριμένη θέση κατά την χρονική στιγμή t είναι μια τυχαία μεταβλητή, δεδομένου ότι δεν υπάρχει προσδιοριστική μέθοδος καθορισμού της τιμής της με πλήρη βεβαιότητα. Συνεπώς, η εν λόγω διεργασία είναι μια στοχαστική ανέλιξη σε συνεχή μάλιστα χρόνο, ενώ μια σειρά μετρήσεών της ανά τακτά χρονικά διαστήματα αποτελεί μια χρονοσειρά.

Τα υδρολογικά μεγέθη περιγράφονται με τη βοήθεια χρονοσειρών, οι οποίες προκύπτουν έπειτα από επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων, τα οποία λαμβάνονται από μετρητικά όργανα. Οι χρονοσειρές που δημιουργούν αυτά τα πρωτογενή δεδομένα ονομάζονται «ιστορικές χρονοσειρές». Με βάση αυτές τις ιστορικές χρονοσειρές, και χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της στατιστικής τους ανάλυσης, παράγονται συνθετικές χρονοσειρές, ως μέσο προβολής σε μέλλοντα χρόνο της συμπεριφοράς του υπό εξέταση μεγέθους. Στην ειδική περίπτωση που τα χαρακτηριστικά μιας χρονοσειράς δε μεταβάλλονται με το χρόνο, αυτή ονομάζεται στάσιμη.

Οι συνθετικές χρονοσειρές εισήχθησαν στην υδρολογία, και μάλιστα σε μελέτες αξιοπιστίας υδατικών πόρων, στις αρχές του 20ου αιώνα. Ο Hazen (1914) θέλοντας να παραγάγει συνθετικές χρονοσειρές απορροών, χρησιμοποίησε μία εμπειρική μέθοδο βάσει της οποίας οι συνθετικές

χρονοσειρές αποτελούσαν προϊόν ιστορικών χρονοσειρών διαφορετικών ποταμών που είχαν συνδυαστεί μεταξύ τους μετά από κατάλληλη προσαρμογή ([35]).

Στον τομέα των υδατικών πόρων το πρώτο καθοριστικό βήμα έγινε από τον Barnes (1954) με την παραγωγή ασυσχέτιστων ετήσιων δεδομένων για μία θέση ενδιαφέροντος που ακολουθούν κανονική κατανομή ([23]). Ακολουθούν οι εργασίες των Maass et al.(1962) και Thomas & Fiering (1962) πάνω στην παραγωγή χρονικά συσχετισμένων ασύμμετρων συνθετικών χρονοσειρών, οι οποίες περιέχονται στο βιβλίο Design of Water Resource Systems ([43], [48]). Πρώτος ο Beard (1965) και αργότερα ο Matalas (1967) δημοσιεύουν τις εργασίες τους πάνω στην ταυτόχρονη παραγωγή συσχετισμένων ιστορικών χρονοσειρών για περισσότερες από μία θέσεις ενδιαφέροντος ([24], [25]). Το 1970 κυκλοφορεί το βιβλίο Time Series Analysis, Forecasting and Control (Box & Jenkins, 1970) που πραγματεύεται την ανάλυση και την σύνθεση χρονοσειρών, την ταξινόμηση των στοχαστικών μοντέλων και την εφαρμογή τους στην προσομοίωση και την πρόγνωση ([26]). Το 1976 στο κλασικό βιβλίο Systems Approach to Water Management (Matalas et al., 1976) πραγματοποιείται η κωδικοποίηση των διάφορων μοντέλων πολυμεταβλητής στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών ([45]), ενώ το 1985 κυκλοφορεί το βιβλίο Random Functions in Hydrology (Bras et al., 1985) που εμβάθυνε στην χρήση της στοχαστικής υδρολογίας ([28]).

Ανάλογα με τη χρονική κλίμακα που χρησιμοποιείται, οι χρονοσειρές των υδρολογικών μεγεθών, κατατάσσονται ως εξής ([18]):

- Χρονοσειρές χρονικής κλίμακας μικρότερης της ημέρας.
- Χρονοσειρές χρονικής κλίμακας μεγαλύτερης της ημέρας.
- Χρονοσειρές ετήσιας χρονικής κλίμακας.

Ως μοντέλο χρονοσειρών ορίζεται «ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφουν την εξέλιξη στο χρόνο των υπό μελέτη μεγεθών, με τρόπο που να διατηρούνται ορισμένα στατιστικά χαρακτηριστικά τους» ([18]).

Για την μοντελοποίηση ακολουθούνται τα παρακάτω στάδια ([18]):

- Προκαταρκτική επεξεργασία δεδομένων: Αυτή περιλαμβάνει την ανίχνευση, μοντελοποίηση και αφαίρεση των τάσεων, τον εντοπισμό και την απαλοιφή εξαιρετικά ακραίων τιμών, την αφαίρεση περιοδικοτήτων και την προσαρμογή κατάλληλων συναρτήσεων κατανομής στα δεδομένα.
- Προσδιορισμός του σχήματος μοντελοποίησης: Λαμβάνεται η απόφαση σχετικά με το είδος των μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν, με βάση την εμπειρία και τα χαρακτηριστικά του προς επίλυση προβλήματος.
- Προσδιορισμός του τύπου του μοντέλου: Με βάση τη γνώση του αναλυτή σε ότι αφορά τη συμπεριφορά των μοντέλων και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των προς μοντελοποίηση χρονοσειρών, επιλέγεται ο τύπος του μοντέλου (π. χ. AR, MA, ARMA κλπ.).
- Επιλογή συγκεκριμένου μοντέλου μιας κατηγορίας: Το μοντέλο αυτό έχει πλέον συγκεκριμένη δομή, συγκεκριμένες άγνωστες σταθερές προς εκτίμηση που αναφέρονται ως παράμετροι, και γνωστές ιδιότητες σε ότι αφορά τη στατιστική συμπεριφορά του.
- Προσαρμογή του μοντέλου (στις παρατηρημένες χρονοσειρές που διατίθενται): Στο στάδιο αυτό, πραγματοποιείται η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου, διαδικασία που είναι γνωστή ως βαθμονόμηση.
- Έλεγχος της καταλληλότητας του μοντέλου: Στο στάδιο αυτό, ελέγχεται η ισχύς των υποθέσεων που έγιναν στα προηγούμενα στάδια.
- Εκτίμηση της αβεβαιότητας (τόσο στις προγνώσεις του μοντέλου για την ανέλιξη που μοντελοποιείται, όσο και τις παραμέτρους του μοντέλου).

Ένα από τα πιο κρίσιμα χαρακτηριστικά των υδρολογικών χρονοσειρών είναι η μακροπρόθεσμη εμμονή. Η μακροπρόθεσμη εμμονή των υδρολογικών χρονοσειρών ανακαλύφθηκε από τον Hurst (1951) ([39]) στα πλαίσια μελέτης του φράγματος του Ασουάν (Aswan High Dam). Ο Hurst μελετώντας τις υδρολογικές χρονοσειρές του Νείλου, διαπίστωσε την ιδιότητα των υγρών και ξηρών ετών να εμφανίζονται κατά ομάδες σχηματίζοντας υγρές και ξηρές περιόδους αντίστοιχα. Προς τιμήν του η μακροπρόθεσμη εμμονή των φυσικών χρονοσειρών πήρε την

ονομασία «φαινόμενο Hurst» (Hurst phenomenon) ενώ αργότερα εισήχθη από τον Mandelbrot (1977) ο εναλλακτικός όρος «φαινόμενο Ιωσήφ» (Joseph effect) ([44]). Τα τελευταία χρόνια, τόσο η προέλευση της μακροπρόθεσμης εμμονής όσο και η συνθετική αναπαραγωγή της αποτελούν αντικείμενο ιδιαίτερου ερευνητικού ενδιαφέροντος λόγω της σχέσεως του φαινομένου με την παρατηρούμενη κλιματική αλλαγή. Πράγματι, το φαινόμενο φαίνεται να σχετίζεται με την εμφάνιση παρατεταμένων ξηρασιών ([46]).

Η αναπαραγωγή της εμμονής θεωρείται κρίσιμος παράγοντας σε ότι αφορά στον ορθολογικό σχεδιασμό και τη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων. Κατά συνέπεια κρίνεται επιτακτική η ανάγκη εντοπισμού και ποσοτικοποίησής της. Η μακροπρόθεσμη εμμονή των φυσικών χρονοσειρών εμφανίζεται με τη μορφή υψηλών θετικών τιμών των συντελεστών αυτοσυσχέτισης της στάσιμης χρονοσειράς ακόμα και για μεγάλα βήματα χρονικής μετατόπισης, της τάξεως των εκατοντάδων ετών ([6]).

Για τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών χρησιμοποιούνται στοχαστικά υδρολογικά μοντέλα, τα οποία αποτελούνται από ένα σύνολο εξισώσεων που περιγράφουν στατιστικά τις συσχετίσεις των υδρολογικών διεργασιών. Στα μοντέλα αυτά περιλαμβάνονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μετρούμενων υδρολογικών μεγεθών (ιστορικές χρονοσειρές). Οι στοχαστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των χρονοσειρών υλοποιούνται σε δυο χρονικά επίπεδα. Έτσι, έχουμε το πρώτο χρονικό επίπεδο, που αναφέρεται σε χρονοσειρές αραιής χρονικής κλίμακας και καθορίζει την περίοδο, και το δεύτερο επίπεδο, που αναφέρεται σε πυκνή χρονική κλίμακα και ορίζει την υποπερίοδο. Ως αραιή κλίμακα επιλέγεται η ετήσια, για την οποία οι στοχαστικές χρονοσειρές θεωρούνται στάσιμες και ως πυκνή η μηνιαία, που είναι και η πιο συνήθης στη διαχείριση υδατικών πόρων.

5.2 Παραγωγή ετήσιων χρονοσειρών

Κατά την παραγωγή ετήσιων χρονοσειρών, ορίζεται για κάθε ετήσια μεταβλητή μια θεωρητική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, η οποία περιγράφει τη μακροπρόθεσμη εμμονή της αντίστοιχης υδρολογικής διεργασίας. Η δομή της αυτοσυσχέτισης αναπαράγεται μέσω ενός στάσιμου μοντέλου συμμετρικά κινούμενων μέσων όρων (μοντέλο SMA), οι παράμετροι του οποίου εκτιμώνται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των ετήσιων ιστορικών χρονοσειρών ([8]).

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης εξαρτάται από το είδος του μοντέλου που χρησιμοποιείται. Για την αναπαραγωγή των ξηρασιών ακολουθούνται διεθνώς δύο ειδών προσεγγίσεις. Στην πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιούνται συνήθη στοχαστικά μοντέλα που ανήκουν στην οικογένεια των μοντέλων τύπου ARMA(p, q). Τα μοντέλα ARMA(p, q) είναι συνδυασμένα σχήματα αυτοπαλινδρόμησης τάξης p και κινούμενων μέσων όρων τάξης q . Τα μοντέλα αυτά είναι βραχείας μνήμης, με αυτοσυσχετόγραμμα που φθίνει εκθετικά με τον χρόνο, και για τους λόγους αυτούς κρίνονται ακατάλληλα για την αναπαραγωγή της μακροπρόθεσμης εμμοής των υδρολογικών διεργασιών. Η δεύτερη προσέγγιση συνίσταται στη μαθηματική περιγραφή της εμμοής, και την αναπαραγωγή της μέσω εξειδικευμένων στοχαστικών σχημάτων, όπως τα μοντέλα κλασματικού γκαουσιανού θορύβου (τύπου FGN). Τα μοντέλα FGN προσομοιώνουν διεργασίες με μακροπρόθεσμη εμμοή, θεωρώντας συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς της παρακάτω μορφής ([6], [8]):

$$\gamma_j = \frac{1}{2} \gamma_0 \left[(j-1)^{2H} - 2j^{2H} + (j+1)^{2H} \right] \quad (5.1)$$

όπου H είναι μέτρο της μακροπρόθεσμης εμμοής, που καλείται συντελεστής Hurst και λαμβάνει τιμές στο διάστημα $0.5 \leq H \leq 1$ και j το βήμα υστέρησης (Bras and Rodriguez-Iturbe, 1993), ([27]).

Για μεγάλα χρονικά βήματα, οι θεωρητικές συναρτήσεις αυτοσυνδιασποράς τόσο των ARMA όσο και των FGN ανελιξων μπορούν να θεωρηθούν ως ειδικές περιπτώσεις της λεγόμενης γενικευμένης συνάρτησης αυτοσυνδιασποράς ([50]):

$$\gamma_j = \gamma_0 \left[1 + \kappa \beta j \right]^{-1/\beta} \quad (5.2)$$

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

Κάθε στοχαστική ανέλιξη X_i με γνωστή ακολουθία αυτοσυνδιασπορών γ_j μπορεί να γραφεί ως ένα σταθμισμένο άθροισμα άπειρων τυχαίων μεταβλητών ως εξής:

$$X_t = \sum_{j=-\infty}^0 \alpha_{-j} V_{t+j} = \dots + \alpha_2 V_{t-2} + \alpha_1 V_{t-1} + \alpha_0 V_t \quad (5.3)$$

όπου α_j οι συντελεστές στάθμισης που προσδιορίζονται από την ακολουθία των αυτοσυνδιασπορών γ_j , και V_t ο λευκός θόρυβος. Εναλλακτικά ονομάζονται μεταβλητές ανανέωσης (innovations), που θεωρείται ότι είναι στοχαστικά ανεξάρτητες μεταξύ τους και έχουν μοναδιαία διασπορά. Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπαραγωγής της εμμοής είναι το γνωστό σχήμα γέννησης κινούμενων προς τα πίσω μέσων όρων (BMA, backward moving average), το οποίο εισήχθη από τους Box and Jenkins (1970, σ. 46). Οι συντελεστές α_j συνδέονται με τις αυτοσυνδιασπορές γ_j μέσω ενός συστήματος εξισώσεων της μορφής:

$$\gamma_i = \sum_{j=0}^{+\infty} \alpha_j \alpha_{i+j} \quad (5.4)$$

Στην πράξη, το πλήθος των μεταβλητών ανανέωσης δεν είναι άπειρο, καθώς το πλήθος των συνθετικών τιμών X_t είναι πάντοτε πεπερασμένο, και οι συντελεστές α_j τείνουν να μηδενιστούν όσο αυξάνει το χρονικό βήμα j , οπότε όλοι οι όροι της ακολουθίας μπορούν να αμεληθούν μετά κάποιο πεπερασμένο όριο $j > -s$. Συνεπώς, οι απειροσειρές (5.3) και (5.4) μπορούν να προσεγγιστούν από πεπερασμένες ακολουθίες:

Για ευκολότερη εκτίμηση των συντελεστών του μοντέλου, ο Κουτσογιάννης (2000) εισήγαγε μια εναλλακτική διατύπωση ([40]). Αρχικά, υπέθεσε ότι η στοχαστική ανέλιξη X_t προκύπτει ως σταθμισμένο άθροισμα τόσο άπειρων προηγούμενων όσο και άπειρων επόμενων τυχαίων μεταβλητών, ορίζοντας έτσι το λεγόμενο σχήμα γέννησης κινούμενων μέσων όρων διπλής κατεύθυνσης (BFMA, backward forward moving average), που είναι μια απειροσειρά της μορφής:

$$X_t = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \alpha_j V_{t+j} = \dots + \alpha_{-1} V_{t-1} + \alpha_0 V_t + \alpha_1 V_{t+1} + \dots \quad (5.5)$$

Στην συνέχεια, όρισε μια ειδική περίπτωση του σχήματος γέννησης BFMA, το λεγόμενο σχήμα γέννησης συμμετρικών κινούμενων μέσων όρων (SMA, symmetric moving average), με την

θεώρηση της συνθήκης συμμετρίας $\alpha_j = \alpha_{-j}$. Αν θεωρηθεί ότι αμελούνται οι όροι α_j μετά από κάποιο όριο $|i| > s$, το σχήμα SMA προσεγγίζεται από την παρακάτω πεπερασμένη ακολουθία:

$$X_i = \sum_{j=-s}^s \alpha_{|j|} V_{i+j} = \alpha_s V_{i-s} \dots + \alpha_1 V_{i-1} + \alpha_0 V_i + \alpha_1 V_{i+1} + \dots + \alpha_s V_{i+s} \quad (5.6)$$

Οι συντελεστές α_j συνδέονται με τις αυτοσυνδιασπορές γ_j μέσω ενός συστήματος $2s+1$ εξισώσεων της μορφής:

$$\gamma_i = \sum_{j=-s}^{s-i} \alpha_{|j|} \alpha_{|i+j|} \quad (5.7)$$

Το πλήθος των συντελεστών α_j είναι ίσο με $s+1$. Το μοντέλο αναπαράγει τους πρώτους $s+1$ όρους της ακολουθίας των αυτοσυνδιασπορών γ_j (που εκτιμώνται από την θεωρητική συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς της ανέλιξης), ενώ και οι επόμενοι όροι μέχρι $j=2s$ εξακολουθούν να είναι μη μηδενικοί.

Το σχήμα γέννησης SMA χρησιμοποιείται για την γέννηση των ετήσιων υδρολογικών μεταβλητών που θεωρούνται στάσιμες, καθώς στην κλίμακα αυτή εξαφανίζονται οι ενδοετήσιες περιοδικότητες. Το εν λόγω σχήμα, συνδυαζόμενο με την γενικευμένη συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς, είναι κατάλληλο για την αναπαραγωγή της μακροπρόθεσμης εμμονής των μεταβλητών.

Ο Κουτσογιάννης ([43]) γενίκευσε το μοντέλο SMA, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί για την ταυτόχρονη γέννηση πολλών μεταβλητών που είναι στοχαστικά εξαρτημένες. Αυτό γίνεται εύκολα, με την παραγωγή συσχετισμένου (πολυμεταβλητού) λευκού θορύβου ([50]).

5.3 Παραγωγή μηνιαίων χρονοσειρών

Με δεδομένο ότι η μακροπρόθεσμη εμμονή των υδρολογικών διεργασιών αναπαράγεται σε ετήσια κλίμακα, η έμφαση στην κατώτερη, δηλαδή τη μηνιαία, κλίμακα δίνεται στην αναπαραγωγή της περιοδικότητας. Κάθε μηνιαία στοχαστική ανέλιξη θεωρείται κυκλοστάσιμη, που σημαίνει ότι διατηρεί σταθερά στατιστικά χαρακτηριστικά σε κάθε χρονική υποπερίοδο (μήνα). Για την παραγωγή των μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών, χρησιμοποιείται ένα

περιοδικό σχήμα αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης, που ονομάζεται PAR(1), που έχει γενικευτεί για πολυμεταβλητή προσομοίωση ([6], [8]).

Έστω το διάνυσμα $X_\tau = (X_{\tau 1}, \dots, X_{\tau m})^T$, το οποίο αντιπροσωπεύει την ταυτόχρονη πραγματοποίηση m στοχαστικά εξαρτημένων ανεξίτητων κατά την υποπερίοδο τ . Το πολυμεταβλητό μοντέλο PAR(1) περιγράφει μαθηματικά την απλούστερη εξάρτηση των μεταβλητών X_τ ως προς τον χρόνο, με μια γραμμική αναδρομική σχέση της μορφής:

$$X_t = a_\tau X_{t-1} + b_\tau V_\tau \quad (5.8)$$

όπου a_τ , b_τ μητρώα παραμέτρων και V_τ διάνυσμα στοχαστικά ανεξάρτητων μεταβλητών (λευκός θόρυβος), μοναδιαίας διασποράς. Οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμώνται με βάση τα από κοινού στατιστικά χαρακτηριστικά του ιστορικού δείγματος (αυτοσυσχετίσεις και ετεροσυσχετίσεις). Οι τυχαίες μεταβλητές V_τ παράγονται μέσω μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών που θεωρείται ότι ακολουθούν κατανομή γάμα τριών παραμέτρων.

Οι εξισώσεις βάσει των οποίων εκτιμώνται οι παράμετροι του μοντέλου PAR(1) περιέχουν μόνο τις ροπές των μεταβλητών X^l , είτε των περιθωρίων τάξης 1 ως 3 είτε των από κοινού τάξης 2. Αν θεωρηθεί ότι το μητρώο a_τ είναι διαγώνιο, τότε το μοντέλο παραγωγής έχει πλέον την εξής μαθηματική έκφραση:

$$X_\tau^l = a_\tau^l X_{\tau-1}^l + \sum_{k=1}^m b_\tau^{lk} V_\tau^k \quad (5.9)$$

Το παραπάνω μοντέλο αναπαράγει τις διασπορές, τις αυτοσυσχετίσεις για υστέρηση l και τις ετεροσυσχετίσεις των μεταβλητών για μηδενική υστέρηση, ενώ δεν αναπαράγει τις ετεροσυσχετίσεις για μοναδιαία υστέρηση.

5.4 Το Πρόγραμμα «Κασταλία»

Η «Κασταλία» είναι ένα λογισμικό στοχαστικής προσομοίωσης και πρόγνωσης υδρομετεωρολογικών διεργασιών. Η «Κασταλία», ανάλογα με την μεθοδολογία μεταγλώττισης, μπορεί να αποτελέσει υποσύστημα του λογισμικού συστήματος «Υδρογνώμων» από το οποίο τροφοδοτείται με στοιχεία ιστορικών χρονοσειρών είτε να αποτελέσει αυτόνομο λογισμικό

σύστημα το οποίο μπορεί να λειτουργήσει με αυτόνομα αρχεία κειμένου χρονοσειρών είτε σε συνεργασία με λογιστικά φύλλα τύπου Excel είτε και σε συνεργασία με την κεντρική βάση δεδομένων. Οι λειτουργίες που επιτελεί το πρόγραμμα σε αυτόνομη μορφή είτε ως υποσύστημα του Υδρογνώμονα είναι ([6], [8]):

- Ανάκτηση ιστορικών και διαχείριση συνθετικών χρονοσειρών.
- Υπολογισμός στατιστικών χαρακτηριστικών ιστορικών δεδομένων και εκτίμηση παραμέτρων στοχαστικών μοντέλων.
- Γέννηση ετήσιων και μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών σε μία ή περισσότερες θέσεις.
- Παρουσίαση υπό μορφή πινάκων και γραφημάτων των χρονοσειρών, των στατιστικών μεγεθών τους και των παραμέτρων του μοντέλου.

Η βασική οντότητα της Κασταλίας είναι το υδρολογικό σενάριο, δηλαδή το σύνολο των δεδομένων και πληροφοριών που συνιστούν ένα πλήρες πρόβλημα σύνθεσης χρονοσειρών. Κάθε σενάριο περιλαμβάνει μία τουλάχιστον μεταβλητή, η οποία αναφέρεται σε συγκεκριμένη υδρολογική διεργασία και σε συγκεκριμένη γεωγραφική οντότητα (π.χ. απορροή ταμειυτήρα). Κάθε μεταβλητή μπορεί να αναφέρεται το πολύ σε μία ιστορική χρονοσειρά, ενώ αντίθετα μια χρονοσειρά μπορεί να αντιστοιχεί σε περισσότερες από μία μεταβλητές, υπό την προϋπόθεση ότι κάθε μία ανήκει σε διαφορετικό σενάριο. Τέλος, σε κάθε μεταβλητή αντιστοιχεί μία ή περισσότερες συνθετικές χρονοσειρές.

Η αναφορά στο πρώτο χρονικό επίπεδο έχει να κάνει με χρονοσειρές αραιής χρονικής κλίμακας, δηλαδή ετήσιες, ενώ το δεύτερο χρονικό επίπεδο, αφορά σε χρονοσειρές πυκνότερης χρονικής κλίμακας, δηλαδή μηνιαίες. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να μελετηθούν, να εκτιμηθούν και να αναπαρασταθούν ταυτόχρονα τα φαινόμενα της μακροπρόθεσμης εμμοής και της περιοδικότητας που χαρακτηρίζουν τις υδρολογικές χρονοσειρές. Οι τελικά παραγόμενες συνθετικές χρονοσειρές πρέπει να τα συνδυάζουν και τα δύο.

Σε ότι αφορά στην ετήσια κλίμακα, η διαδικασία παραγωγής των χρονοσειρών βασίζεται στη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 5.2. Η αναπαραγωγή της εμμοής γίνεται χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο SMA, όπου η εκτίμηση των παραμέτρων γίνεται συναρτήσει των

στατιστικών χαρακτηριστικών που υπολογίζονται στο αρχικό βήμα. Σε ότι αφορά στη μηνιαία κλίμακα, η διαδικασία παραγωγής των χρονοσειρών βασίζεται στη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 5.3. Η περιοδικότητα περιγράφεται με ένα μοντέλο PAR(1), με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνιαίων ιστορικών χρονοσειρών. Το μοντέλο περιλαμβάνει μια διαδικασία γραμμικής αναγωγής που αποκαθιστά τη συνέπεια μεταξύ μηνιαίων και ετήσιων χρονοσειρών, με αποτέλεσμα στο τέλος να προκύπτουν μηνιαίες χρονοσειρές, συνεπείς με τις ετήσιες, που περιλαμβάνουν το φαινόμενο της μακροπρόθεσμης εμμονής.

Παρακάτω, στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών για τη στοχαστική προσομοίωση συστημάτων υδατικών πόρων σε μηνιαία χρονική κλίμακα, για n συνολικά έτη ([8]):

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών υδρολογικών μεγεθών και σχετικά με το πρόγραμμα «Κασταλία», ο αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στην οικεία βιβλιογραφία ([6], [8], [9], [13], [46] και [50]).



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών σε μηνιαία χρονική κλίμακα, για n συνολικά έτη ([6]).

6 Εφαρμογή στη διαχείριση του ταμιευτήρα του Μόρνου

6.1 Περιγραφή του ταμιευτήρα

Ο ποταμός Μόρνος ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας. Το Υδατικό Διαμέρισμα της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας είναι γενικά πλεονασματικό σε νερό. Οι κύριοι επιφανειακοί υδατικοί πόροι του διαμερίσματος εκτός από το Μόρνο, είναι οι ποταμοί Αχελώος, Εύηνος καθώς και η λίμνη Τριχωνίδα, ενώ υπάρχουν και σημαντικοί υπόγειοι υδροφορείς, όπως εκείνοι του συστήματος Αμφιλοχίας, που παραμένουν γενικά ανεκμετάλλευτοι. Στις σημερινές συνθήκες, ένα μέρος (8,6% σε ετήσια βάση) του εκμεταλλεύσιμου υδατικού δυναμικού του διαμερίσματος και ειδικότερα των δύο λεκανών Μόρνου και Ευήνου, εκτρέπεται προς το Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής για υδρευτικούς σκοπούς ([11], [15]).

Ο ποταμός Μόρνος πηγάζει από την νότια Οίτη σε υψόμετρο 700 m. Δέχεται τις απορροές των Βαρδουσιών και της Γκιώνας, έχει μήκος 70 χλμ και εκβάλλει στον Κορινθιακό κόλπο, ανατολικά της Ναυπάκτου, όπου σχηματίζει Δέλτα. Ο ποταμός έχει χαρακτηριστικά που πληρούν βασικά κριτήρια για άρδευση και απόληψη πόσιμου νερού. Έτσι, στην κοίτη του ποταμού Μόρνου 7 χιλιόμετρα δυτικά του Λιδορικού στο Νομό Φωκίδος δημιουργήθηκε με την κατασκευή χωμάτινου φράγματος ο Ταμιευτήρας Μόρνου. Το χωμάτινο φράγμα Μόρνου, μαζί με τα έργα του εξωτερικού υδραγωγείου, κατασκευάστηκε σταδιακά κατά την διάρκεια 8 περίπου χρόνων, στην δεκαετία του 1970. Στην κατασκευή του συνένωσαν τις δυνάμεις τους οι μεγαλύτερες τότε ελληνικές κατασκευαστικές εταιρίες, καθώς και ξένοι τεχνικοί σύμβουλοι πέραν των ελληνικών μελετητικών γραφείων (οι υδραυλικές δοκιμές των σιηράγγων εκτροπής και εκκένωσης πραγματοποιήθηκαν στο Πολυτεχνείο του Βερολίνου, και οι εδαφομηχανικές δοκιμές στο Πολυτεχνείο του Darmstadt) ([11], [16]).

Οι εργασίες κατασκευής του υδραγωγείου ξεκίνησαν τον Μάιο του 1969, ενώ αυτές του φράγματος τον Ιούλιο του 1972, με προοπτική περάτωσης στο τέλος του έτους 1976. Η θέση του φράγματος επελέγη επί του ποταμού Μόρνου 7 περίπου χιλιόμετρα δυτικά του Λιδορικού, μετά την συμβολή του με τον ποταμό Κόκκινο. Η τεχνητή λίμνη που θα δημιουργούνταν είχε

εκτιμηθεί να είναι χωρητικότητας $780 \times 10^6 \text{ m}^3$ και θα εξασφάλιζε απόληψη περίπου $300 \times 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως για την ύδρευση της Αθήνας. Το υδραγωγείο με συνολικού μήκους 186 περίπου χιλιομέτρων αποτελείται από σήραγγες, σίφωνες και διώρυγες με παροχτευτική ικανότητα περίπου $23 \text{ m}^3/\text{s}$. Το συνολικό μήκος των σηράγγων εκτιμάται περίπου σε 67 km. Μεγαλύτερη από αυτές είναι η σήραγγα της Γκιώνας κάτω από το ομώνυμο βουνό, που εκτείνεται σε μήκος 15 km. Πέραν των τυπικών έργων κατασκευής όπως η θεμελίωση και η στεγάνωση του σώματος του φράγματος απαιτήθηκε η στεγάνωση μιας ολόκληρης λωρίδος στην ανατολική πλαγιά του ταμιευτήρα μήκους περί τα 2,5 km. (περιοχή του Πύρνου), αφού οι υδρογεωλογικές μελέτες και δοκιμές έδειξαν ότι η στεγανότητα δεν εξασφαλιζόταν από τη λιθολογία της πλαγιάς (καρστικοί ασβεστόλιθοι κυρίως) ([16]).

Το φράγμα, ένα από τα μεγαλύτερα της Ευρώπης, αποτελείται από αδιαπέραστο αργιλικό πυρήνα, μεταβατικές ζώνες φίλτρων εκατέρωθεν του πυρήνα, σώματα στήριξης του πυρήνα ανάντη - κατάντη από αμμοχάλικο και προστατευτική λιθορριπή στην ανάντη πλευρά. Ο ανάντη πόδας του φράγματος είναι διαμορφωμένος σε πρόφραγμα με στεγανό αργιλικό πυρήνα.

Παρακάτω, στο Σχήμα 6.1, φαίνεται σε φωτογραφία η τεχνητή λίμνη του Μόρνου:



Σχήμα 6.1: Φωτογραφία του Ταμιευτήρα Μόρνου (πηγή: www.greekscapes.gr)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα βασικά αριθμητικά στοιχεία της κατασκευής φράγματος και ταμειυτήρα:

Πίνακας 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Φράγματος Μόρνου

Τύπος φράγματος	Χωμάτινο
Μέγιστο ύψος φράγματος	126 m (από θεμελίωση)
Μέγιστο πλάτος στη βάση	595 m
Πλάτος στέψης	10 m
Μήκος στέψης	815 m
Όγκος υλικού Φράγματος	$17 \times 10^6 \text{ m}^3$
Υψόμετρο στέψης	+ 446.50 m.a.s.l.
Υψόμετρο ανωτάτης στάθμης ύδατος	+ 443.50 m.a.s.l.
Κλίσεις πρανών	Ανάντη 1:2.4 - Κατάντη 1:2
Στάθμη υπερχειλιστή	+ 435 m.a.s.l.
Παροχή σφραγγοειδούς υπερχειλιστή	$1300 \text{ m}^3 / \text{s}$
Παροχή σήραγγας εκκένωσης	$400 \text{ m}^3 / \text{s}$
Κατωτάτη στάθμη εκκένωσης	+ 347.50 m.a.s.l.

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά Ταμιευτήρα Μόρνου

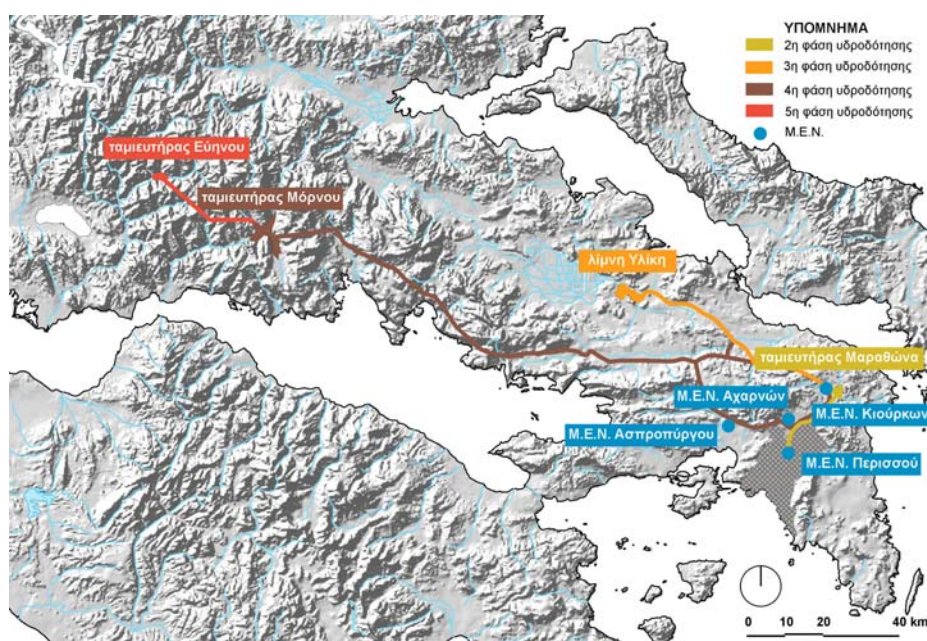
Επιφάνεια στη στάθμη υπερχειλίσης	19.9 km ²
Λεκάνη απορροής	588 km ²
Μέσο υψόμετρο λεκάνης απορροής	1082 m.a.s.l.
Μέση βροχόπτωση	950 mm/έτος (τυπική απόκλιση 210 mm)
Μέση απορροή	235 εκατ. m ³ /έτος
Μέση απόληψη	210 εκατ. m ³ /έτος
Μέγιστη χωρητικότητα	780 εκατ. m ³
Μέγιστος ωφέλιμος όγκος	670 εκατ. m ³
Απολήψιμος όγκος	113 m ³ /έτος
Κανονική στάθμη λειτουργίας πύργου υδροληψίας	+394 m.a.s.l.
Ελάχιστη στάθμη υδροληψίας	+ 378 m.a.s.l.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΥΔΑΠ (Υπουργείο Δημόσιων Έργων, Υδραυλική Υπηρεσία Δ5), η τροφοδοσία της πρωτεύουσας με νερό από το φράγμα άρχισε για πρώτη φορά στο τέλος του 1981. Η τροφοδοσία του ταμιευτήρα Μόρνου από αυτόν του Εύηνου ξεκίνησε τον Απρίλιο του 1995. Η τροφοδοσία της ύδρευσης της Αθήνας αρχίζει περίπου το 1982 με ποσότητες που φτάνουν και τα 1.5×10^6 m³/ημέρα (~17 m³/s) και από το 1995 και έπειτα είναι συνεχής. Η εξωτερική τροφοδοσία από τον Εύηνο αρχίζει από το 1995 με τιμές που φτάνουν και τα 70×10^6 m³/μήνα (~27 m³/s), και είναι διαλείπουσα (κατά διαστήματα μηδενίζεται), κυρίως από το 2000 και μετά. Ο μέσος όρος, ανά μήνα, της συμμετοχής του ταμιευτήρα του Εύηνου στο ισοζύγιο του Μόρνου για την τελευταία δεκαετία, είναι 14.63×10^6 m³ με μέγιστη τιμή 70.24×10^6 m³. Ο αντίστοιχος μέσος όρος ανά μήνα εκροών για την Αθήνα είναι 31.35×10^6 m³ με μέγιστη τιμή 47.51×10^6 m³. Οι αθροιστικές ποσότητες, στην δεκαετία 1996-2005, είναι για τον Εύηνο 1785×10^6 m³ και για την Γκιώνα 3826×10^6 m³ αντίστοιχα. Τα παραπάνω στοιχεία μας δίνουν

μέσους υπερετήσιους όρους $178.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ για την εισροή από Εύηνο και $382.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ για τις εκροές προς Αθήνα αντίστοιχα ([4], [5], [11]).

Από το φράγμα εξυπηρετούνται πρακτικά και άλλοι σκοποί, πέραν του ότι υδρεύεται το λεκανοπέδιο της Αττικής, προστατεύεται θεσμικά από τη ρύπανση και τη μόλυνση. Ο ταμιευτήρας φαίνεται να μην αντιμετωπίζει πρόβλημα ευτροφισμού (πράγμα που επιδρά δραστικά και στη διαδικασία διαχείρισης του).

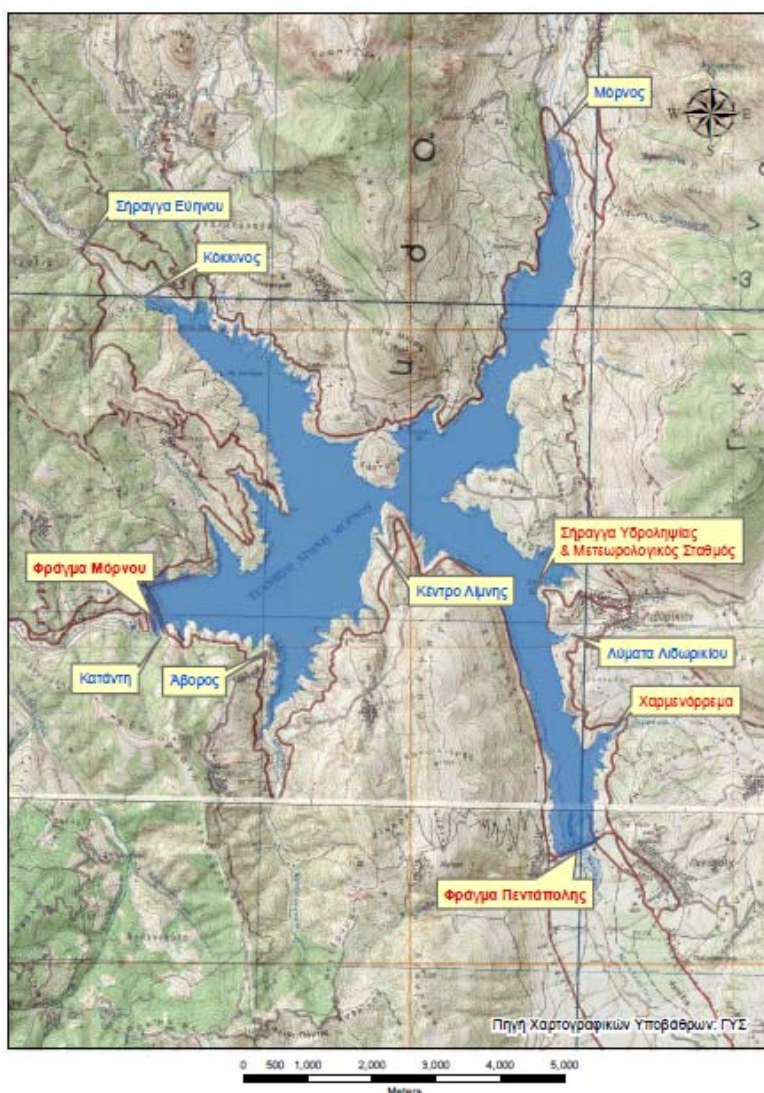
Παρακάτω, στο Σχήμα 6.2, παρουσιάζεται ο χάρτης υδροδότησης της Αθήνας για τα έτη 1969 – 2001:



Σχήμα 6.2: χάρτης υδροδότησης της Αθήνας για τα έτη 1969 – 2001 (πηγή: www.greekscapes.gr)

Η περιοχή άμεσης επιρροής – λεκάνη απορροής του Μόρνου ανάντη του ταμιευτήρα – περιλαμβάνει το Δήμο Λιδορικού και τις κοινότητες Αβόρου, Αθανασίου Διάκου, Αμυγδαλίας, Βραΐλας, Δάφνου, Διακοπίου, Διχωρίου, Δωρικού, Καλλίου, Καλοσκοπής, Καστριωτίσσης, Κοκκίνου, Κονιάκου, Λευκαδιτίου, Μαλανδρίνου, Μαυρολιθαρίου, Μηλέας, Μουσουνίτσης, Πανουργίας, Πενταγιών, Πενταπόλεως, Περιβολίου, Πυράς, Στρόμη, Συκέας, Σωταίνης, Τριστένου και Υψηλού Χωριού.

Παρακάτω, στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η τεχνητή λίμνη του Μόρνου σε χάρτη υπό κλίμακα 1:50.000 (πηγή: ΓΥΣ).



Σχήμα 6.3: Η τεχνητή λίμνη στο χάρτη κλίμακας 1:50.000 (Πηγή: ΓΥΣ)

Παρακάτω, στο σχήμα 6.4, φαίνεται η υποδιαίρεση της λεκάνης του ταμιευτήρα σε τέσσερις υπολεκάνες στο χάρτη (πηγή ΓΥΣ). Αυτή του Μόρνου, του Κόκκινου, του Χαρμενορρέματος και του Αβορού. Επίσης δείχνονται τα κέντρα βάρους των υπολεκανών και οι μακρύτερες υδάτινες διαδρομές.



Σχήμα 6.4: Οι τέσσερις υπολεκάνες του ταμιευτήρα (Πηγή: ΓΥΣ)

Ο Πίνακας 6.3 που ακολουθεί συνοψίζει τα βασικά μεγέθη υδρολογικού και φυσιογραφικού ενδιαφέροντος για τον ταμιευτήρα του Μόρνου:

Πίνακας 6.3: Κύρια φυσιογραφικά και υδρογραφικά χαρακτηριστικά μεγέθη των υπολεκανών απορροής

	Μόρνος	Κόκκινος	Μπελεσίτσα
Επιφάνεια Α (km ²)	266.7	136.8	162.9
Περίμετρος Π (km)	113.8	69.7	87.2
Λόγος Α/Π	2.34	1.96	1.86
Μέσο Υψόμετρο (m)	1138.5	793.6	608.5
Μήκος μεγαλύτερου υδατορέματος (km)	38.5	26.3	22.2
Μήκος από το κεντροειδές (km)	17.5	11.6	10.0
Μέση κλίση λεκάνης (%)	42.33	38.45	34.06

Πρέπει να αναφέρουμε ότι από την λεκάνη της Μπελεσίτσας μόνο ένα μέρος θεωρούμε ότι εκβάλλει στον ταμιευτήρα (το τμήμα που αντιστοιχεί στη λεκάνη απορροής του Χαρμενορέματος), ενώ το υπόλοιπο αποτελεί την λεκάνη απορροής του φράγματος της Πεντάπολης. Η τελική λοιπόν κατανομή των επιφανειών των τεσσάρων υδατορεμάτων που εκβάλλουν στον ταμιευτήρα, φαίνεται παρακάτω, στον Πίνακα 6.4:

Πίνακας 6.4: Τα εμβαδά των επιμέρους λεκανών του ταμιευτήρα

Ποταμός	Επιφάνεια Α (Km²)	Ποσοστό της συνολικής
Μόρνος	267	53%
Κόκκινος	137	27%
Χαρμενόρεμα	81	16%
Αβρός	19	4%
ΣΥΝΟΛΟ	504	100%

6.1.1 Πληθυσμιακά στοιχεία

Ο συνολικός πληθυσμός της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με την απογραφή του 1991 ανέρχεται σε 6614 κατοίκους. Όπως αναφέρεται στη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων με τίτλο «Διαχείριση απορριμμάτων στην λεκάνη απορροής του Μόρνου ανάντη του ταμιευτήρα» που έγινε για λογαριασμό της ΕΥΔΑΠ, παρατηρείται έντονη διακύμανση του πληθυσμού κατά τη διάρκεια του χρόνου. Πιο αναλυτικά ο πληθυσμός της περιοχής υποδιπλασιάζεται το χειμώνα και φτάνει τους 3.500 κάτοικους περίπου, ενώ το καλοκαίρι τετραπλασιάζεται και φτάνει τους 13.500 κατοίκους περίπου ([16]).

Στον Πίνακα 6.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα πληθυσμιακά δεδομένα ανά Δήμο και Κοινότητα της υπό μελέτη περιοχής όπως προκύπτουν από την απογραφή της ΕΣΥΕ του 1991.

Πίνακας 6.5: Δήμοι και κοινότητες που περιέχονται στη περιοχή μελέτης του Μόρνου

ΔΗΜΟΙ / ΚΟΙΝΟΤΗΤΕΣ	ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ (1991)
ΑΒΟΡΟΥ	129
ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΔΙΑΚΟΥ	308
ΑΜΥΓΔΑΛΙΑΣ	569
ΒΡΑΙΛΑΣ	133
ΔΑΦΝΟΥ	114
ΔΙΑΚΟΠΙΟΥ	200
ΔΙΧΩΡΙΟΥ	103
ΔΩΡΙΚΟΥ	89
ΚΑΛΛΙΟΥ	117
ΚΑΛΟΣΚΟΠΗΣ	334
ΚΑΡΟΥΤΩΝ	111
ΚΑΣΤΡΙΩΤΙΣΣΗΣ	102
ΚΟΚΚΙΝΟΥ	216
ΚΟΝΙΑΚΟΥ	263
ΛΕΥΚΑΔΙΤΙΟΥ	231
ΛΙΔΟΡΙΚΙΟΥ	985
ΜΑΛΑΝΔΡΙΝΟΥ	393
ΜΑΥΡΟΛΙΘΑΡΙΟΥ	222
ΜΗΛΕΑΣ	119
ΜΟΥΣΟΥΝΙΤΣΗΣ	118
ΠΑΝΟΥΡΓΙΑ	164
ΠΕΝΤΑΓΙΩΝ	134
ΠΕΝΤΑΠΟΛΕΩΣ	563
ΠΕΡΙΒΟΛΙΟΥ	117
ΠΥΡΑΣ	119
ΣΤΡΟΜΗΣ	146
ΣΥΚΕΑΣ	226
ΣΩΤΑΙΝΗΣ	58
ΤΡΙΣΤΕΝΟΥ	86
ΥΨΗΛΟΥ ΧΩΡΙΟΥ	145
ΣΥΝΟΛΟ	6614

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι εγκαταστάθηκε μια μονάδα φυλακών στην περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα η μονάδα βρίσκεται στην περιοχή Ασπρόκαμπος, ανάμεσα στις κοινότητες Βράιλα και Μαλανδρινό, και ο συνολικός πληθυσμός, κρατούμενοι και εργαζόμενοι, είναι 500 άτομα περίπου. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι υπάρχει μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και πως η φυλακή είναι δίπλα σε ένα χείμαρρο και σε μικρή απόσταση (<2km) από τον ταμιευτήρα.

6.1.2 Χρήσεις γης

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης κυρίαρχη χρήση είναι τα βοσκοτόπια και ακολουθούν οι καλλιέργειες και τα δάση. Στον Πίνακα 6.6 που ακολουθεί, παρουσιάζονται στοιχεία τις Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας για την περιοχή μελέτης. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά το μεγαλύτερο ποσοστό των χρήσεων γης της περιοχής υπό μελέτη χαρακτηρίζονται ως μικτές γεωργικές / κτηνοτροφικές. Από αυτοψία που έγινε στην περιοχή από το Εργαστήριο Ποιότητας Υδάτων και Αέρα του Πανεπιστήμιο Αιγαίου το 2003, προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι βοσκότοποι εκτείνονται σε βάρος των καλλιεργούμενων εκτάσεων και οι αμιγείς γεωργικές εκτάσεις είναι περιορισμένες ([16]).

Πίνακας 6.6: Κατανομή των εκτάσεων της περιοχής του Μόρνου σε κατηγορίες χρήσεων γης (πηγή: ΕΣΥΕ 1991)

Κατηγορίες χρήσης γης	Εκτάσεις σε στρέμματα	Ποσοστό κάλυψης
Μικτές Γεωργικές/Κτηνοτροφικές	23121	69.4
Γεωργικές	2967	8.4
Κτηνοτροφικές	38	0.1
Μη καλλιεργούμενες/ Άγονοι βοσκότοποι/ Δάση/ Βοηθητικοί χώροι	9487	26.6
Σύνολο	35613	100

6.1.3 Υποδομές της περιοχής

Η περιοχή του Μόρνου υδρεύεται από πηγές ενώ οι ανάγκες για αποχέτευση καλύπτονται με τη χρήση βόθρων ή με απ' ευθείας διάθεση σε χείμαρρους όπως στην περίπτωση του Λιδορικίου. Στο Λιδορίκι υπάρχει μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που ανήκει στην ΕΥΔΑΠ. Η μονάδα αυτή δεν έχει ποτέ λειτουργήσει από το 1998 που κατασκευάστηκε.

Σε καμία από τις κοινότητες και τον Δήμο δεν υπάρχει πρόγραμμα ολοκληρωμένης διαχείρισης των απορριμμάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κάθε κοινότητα να διαχειρίζεται μεμονωμένα τα απορρίματα που παράγει και τα διαθέτει σε ένα ή περισσότερους χώρους διάθεσης εντός των διοικητικών της ορίων. Η πρακτική που ακολουθείται περιλαμβάνει κυρίως ανεξέλεγκτη διάθεση, ενώ σε μερικές περιπτώσεις, γίνεται μερική διευθέτηση, περιοδική καύση και στοιχειώδη επιχωμάτωση των απορριμμάτων με μπάζα ([16]).

Συνολικά υπάρχουν 47 ανεξέλεγκτοι χώροι διάθεσης που βρίσκονται κυρίως σε ρέματα, πρανή δρόμων, βοσκοτόπια και δασικές εκτάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο ένας από τους χώρους διάθεσης των απορριμμάτων του Δήμου Λιδορικού που βρίσκεται σε γειτονία με τον ταμιευτήρα του Μόρνου.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι έχει γίνει για λογαριασμό της ΕΥΔΑΠ μελέτη για την συνολική διαχείριση των απορριμμάτων στην λεκάνη του Μόρνου ανάντη του ταμιευτήρα που προβλέπει κατασκευή ΧΥΤΑ ανάντη του φράγματος.

6.2 Δεδομένα

Στην λεκάνη απορροής του Μόρνου, στο παρελθόν, έχουν λειτουργήσει δύο υδρομετρικοί σταθμοί στις θέσεις Στενό και Περιβόλι, που ήταν εγκατεστημένοι ανάντη της θέσης του φράγματος. Συγκεκριμένα, στην θέση Στενό διατίθενται ημερήσιες σταθμημετρικές παρατηρήσεις από το 1950 ως το 1974, αραιές μετρήσεις παροχής από το 1950 ως το 1956 και συστηματικές υδρομετρήσεις κατά την περίοδο από τον Αύγουστο του 1963 ως τον Οκτώβριο του 1968. Από την άλλη πλευρά, στην θέση Περιβόλι διατίθενται ημερήσιες παρατηρήσεις στάθμης από το 1964 ως το 1974, και συστηματικές υδρομετρήσεις κατά την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1963 ως τον Οκτώβριο του 1968. Στα πλαίσια ερευνητικών έργων του ΕΜΠ έγινε αξιολόγηση και επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, με σκοπό την εξαγωγή των ημερήσιων δειγμάτων παροχής, ενοποίηση των δειγμάτων και μεταφορά της παροχομετρικής πληροφορίας στην θέση του φράγματος Μόρνου, με χρήση κατάλληλων συντελεστών αναγωγής ([5],[9]).

Επίσης, υλοποιήθηκε ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης του ποταμού Μόρνου, που τοποθετήθηκε στην παλαιά γέφυρα του δρόμου Λευκαδιτίου-Κονιάκου και ελέγχει περίπου το 70% των απορροών της λεκάνης ανάντη του φράγματος Μόρνου. Εξαιτίας της πολύ μικρής

περιόδου λειτουργίας του εν λόγω υδρομετρικού σταθμού και της διενέργειας δύο μόλις πιλοτικών υδρομετρήσεων, δεν είναι ακόμα δυνατή η αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων ([5], [9]).

Από την επεξεργασία των δεδομένων των υδρομετρικών σταθμών στις θέσεις Στενό και Περιβόλι προέκυψε ένα αξιόπιστο δείγμα μηνιαίας απορροής μήκους δέκα υδρολογικών ετών, που καλύπτει τις περιόδους 1951-52 ως 1955-56 και 1963-64 ως 1967-68. Πρόκειται για τις περιόδους κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν υδρομετρήσεις, οπότε ήταν δυνατή η εξαγωγή σχέσεων στάθμης-παροχής. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος συνοψίζονται στον Πίνακα 6.7. Τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς απορροής συνοψίζονται στον Πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.7: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Μόρνου στη θέση του φράγματος για τα υδρολογικά έτη 1951-52 ως 1955-56 και 1963-64 ως 1967-68 (hm³) ([9])

	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Έτος
Μέση Τιμή	15.6	39.4	51.0	62.2	58.1	38.5	34.0	23.3	13.3	6.0	3.9	4.2	349.6
Τυπική Απόκλιση	19.0	30.0	27.5	42.4	33.6	16.7	12.6	12.6	7.1	4.2	1.9	2.0	89.8
Μέγιστο	2.2	4.8	6.3	22.7	20.5	10.7	16.0	9.7	4.6	1.5	1.7	0.4	200.0
Ελάχιστο	60.2	93.6	90.8	131.5	127.8	65.5	51.3	44.8	28.4	16.6	7.0	6.9	461.0

Πίνακας 6.8: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Μόρνου στη θέση του φράγματος για τα υδρολογικά έτη 1979-80 ως 2002-03 (hm³) ([9])

	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Έτος
Μέση Τιμή	6.7	22.2	39.2	31.3	32.2	31.7	28.7	20.2	9.8	6.4	4.5	4.5	237.4
Τυπική Απόκλιση	5.8	15.5	26.7	21.3	18.4	15.4	8.6	8.0	3.7	2.8	3.2	3.1	82.9
Μέγιστο	23.2	63.1	104.0	78.0	74.3	67.1	45.3	34.9	16.3	11.3	11.2	11.8	418.6
Ελάχιστο	0.0	5.8	5.7	2.9	3.9	5.8	11.0	3.9	3.1	2.0	0.0	0.0	86.5

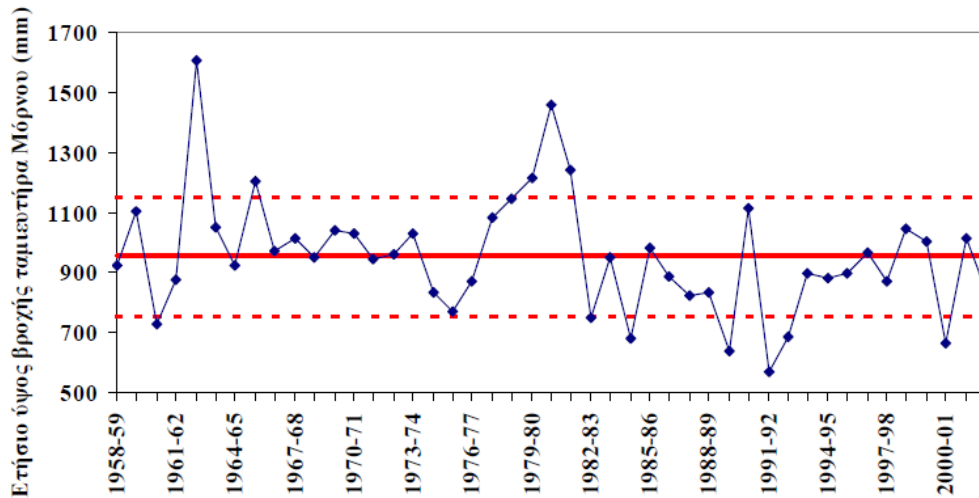
Η χρονοσειρά μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Μόρνου προέκυψε με απευθείας μεταφορά της χρονοσειράς βροχόπτωσης του σταθμού Λιδορικού και χωρίς υψομετρική αναγωγή, δεδομένου ότι ο σταθμός βρίσκεται πολύ κοντά στον ταμιευτήρα. Τα διαθέσιμα δεδομένα καλύπτουν την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1958 ως τον Ιανουάριο του 2002.

Από τον Φεβρουάριο του 2002, η βροχόπτωση στον ταμιευτήρα Μόρνου μετράται από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που έχει εγκαταστήσει η ΕΥΔΑΠ στην περιοχή. Μέχρι τώρα η λειτουργία του σταθμού δεν είναι πλήρως ικανοποιητική, και τα δεδομένα που λαμβάνονται είναι σχετικά μειωμένης αξιοπιστίας. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ενοποιημένου δείγματος συνοψίζονται στον Πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9: Στατιστικά χαρακτηριστικά του ενοποιημένου δείγματος βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Μόρνου για τα υδρολογικά έτη 1958-59 ως 2002-03 (mm) ([9])

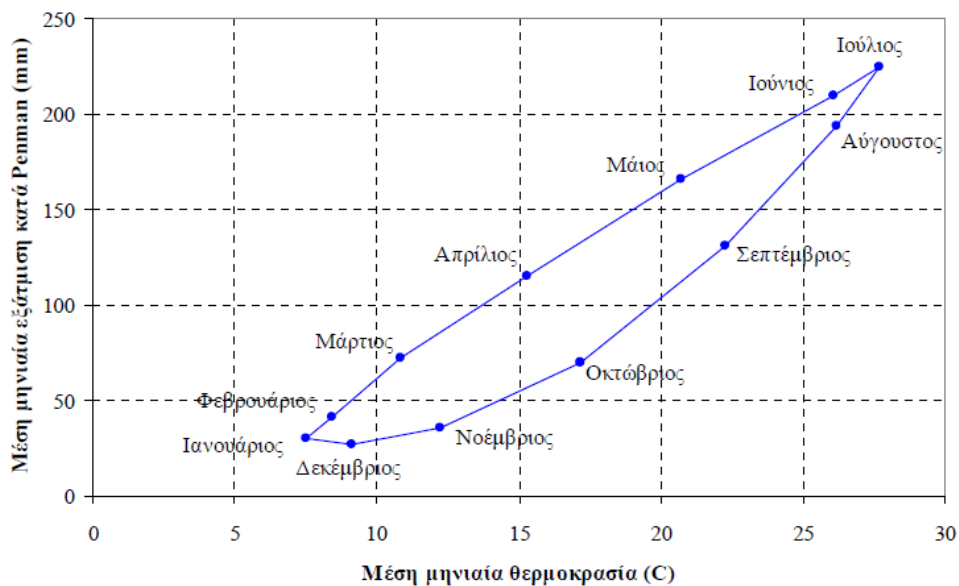
	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Έτος
Μέση Τιμή	89.2	187.2	182.3	118.8	137.1	93.7	94.5	57.5	30.2	22.2	27.4	45.0	1085.1
Τυπική Απόκλιση	65.3	89.7	106.2	78.3	75.7	55.9	57.0	32.0	21.2	27.3	22.4	41.8	229.9
Μέγιστο	258.7	373.3	468.4	308.7	276.8	244.6	253.7	114.3	76.5	133.4	84.2	168.3	1414.5
Ελάχιστο	0.3	19.8	40.6	0.0	5.3	1.4	16.1	8.1	0.0	0.0	0.0	0.8	620.3

Παρακάτω, στο Σχήμα 6.5, φαίνεται η γραφική παράσταση της χρονοσειράς ετήσιας βροχόπτωσης στον Ταμιευτήρα Μόρνου:



Σχήμα 6.5: Γραφική παράσταση της χρονοσειράς ετήσιας βροχόπτωσης στον Ταμειυτήρα Μόρνου ([9])

Παρακάτω, στο Σχήμα 6.6, παρατίθεται ο βρόχος εξάτμισης του ταμειυτήρα του Μόρνου, ενώ στον Πίνακα 6.10 παρατίθενται τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς εξάτμισης του ταμειυτήρα:



Σχήμα 6.6: Βρόχος εξάτμισης Ταμειυτήρα Μόρνου ([15])

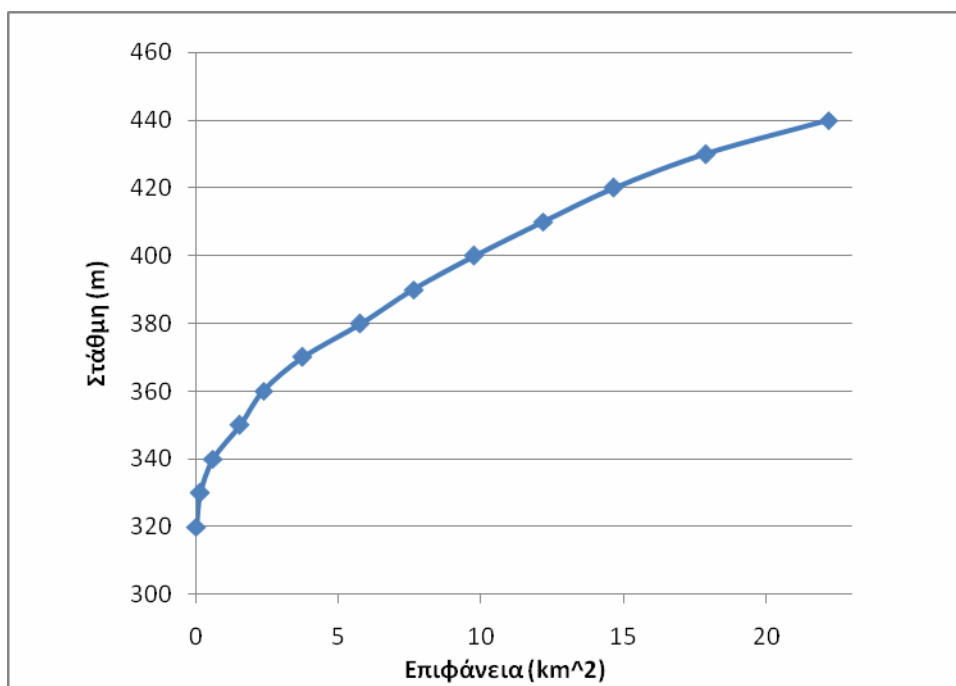
Πίνακας 6.10: Στατιστικά χαρακτηριστικά του ενοποιημένου δείγματος εξάτμισης Μόρνου για τα υδρολογικά έτη 1970-71 ως 2002-03 (mm) ([9])

	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Έτος
Μέση Τιμή	68.7	34.0	23.7	27.8	40.4	74.2	109.8	156.4	196.2	217.3	186.9	123.2	1259.6
Τυπική Απόκλιση	4.5	2.6	2.0	3.1	3.0	7.5	10.9	11.7	10.9	16.4	14.0	9.9	51.7
Μέγιστο	76.5	40.6	29.6	35.2	47.7	86.6	134.2	176.3	211.3	267.9	213.3	140.0	1392.3
Ελάχιστο	60.3	27.2	19.8	21.0	32.6	56.9	85.4	131.2	172.4	192.4	161.5	95.2	1162.5

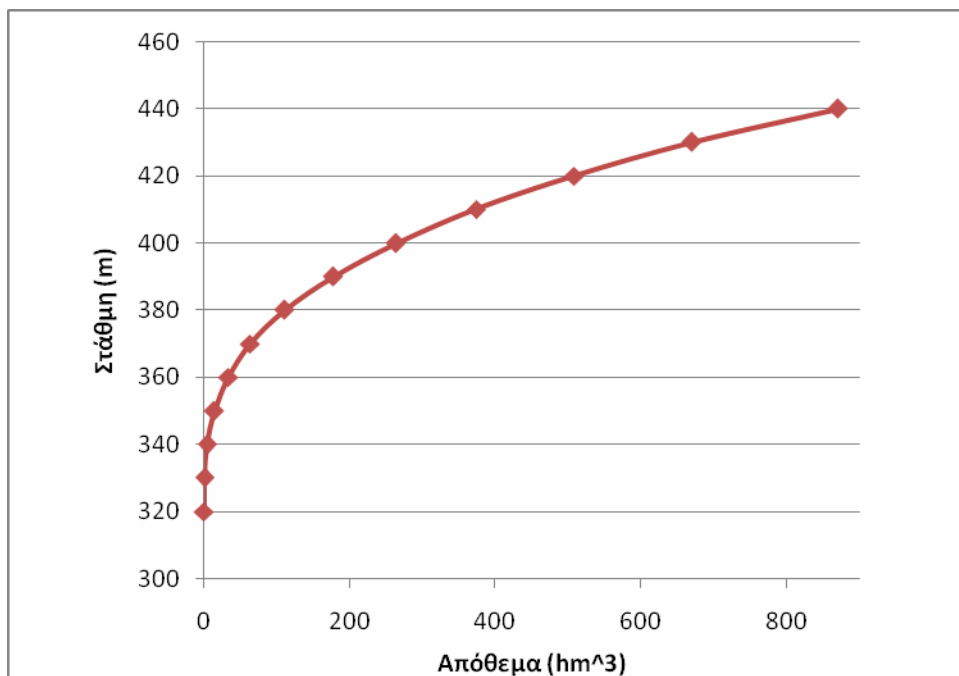
Τα πρωτογενή στοιχεία για την κατασκευή της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Μόρνου ελήφθησαν από την ΕΥΔΑΠ. Υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη αποθέματος, ήτοι η συνολική χωρητικότητα (763.7 hm³), ο νεκρός όγκος (133.5 hm³) και η ωφέλιμη χωρητικότητα, ως διαφορά των δύο προηγούμενων μεγεθών (630.2 hm³). Σημειώνεται ότι, ακόμη και αν τα αποθέματα κατέλθουν κάτω από την στάθμη υδροληψίας, υπάρχει, θεωρητικά, η δυνατότητα χρήσης πλωτών αντλιοστασίων, μέσω των οποίων εξασφαλίζονται περί τα 100 hm³ επιπλέον νερού. Η δυνατότητα αυτή δεν έχει ποτέ δοκιμαστεί στην πράξη, και δεν θεωρείται σκόπιμο να λαμβάνεται υπόψη στις εκτιμήσεις του επιφανειακού υδατικού δυναμικού του συστήματος. Παρακάτω, στον Πίνακα 6.11, παρουσιάζονται τα δεδομένα για την κατασκευή των καμπυλών στάθμης-αποθέματος και στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Μόρνου. Στα σχήματα 6.7 και 6.8 παρατίθενται οι καμπύλες στάθμης-αποθέματος και στάθμης-επιφάνειας αντίστοιχα ([9], [15]):

Πίνακας 6.11: Δεδομένα για την κατασκευή των καμπυλών στάθμης-αποθέματος και στάθμης-επιφάνειας του Ταμιευτήρα Μόρνου

Στάθμη (m)	Επιφάνεια (km ²)	Απόθεμα (hm ³)
320	0	0
330	0.13	0.41
340	0.58	3.67
350	1.53	13.78
360	2.36	33.13
370	3.74	63.36
380	5.75	110.4
390	7.63	177.1
400	9.76	263.85
410	12.19	373.39
420	14.66	507.47
430	17.89	669.94
440	22.18	869.84



Σχήμα 6.7: Καμπύλη στάθμης-επιφάνειας του Ταμιευτήρα Μόρνου



Σχήμα 6.8: Καμπύλη στάθμης-αποθέματος του Ταμιευτήρα Μόρνου

Οι απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας διοχετεύονται στο Υδραγωγείο Μόρνου, μήκους 188 km. Το υδραγωγείο, παροχευτικότητας 18.0 m³/s στο ανάντη του μεριστή τμήμα του και 15.5 m³/s στο κατόντη, μεταφέρει νερό με βαρύτητα από τον ταμιευτήρα Μόρνου στις μονάδες επεξεργασίας Μάνδρας και Μενιδίου, ενώ συνδέεται με το Υδραγωγείο Υλίκης στην θέση Δαφνούλα, μέσω του ενωτικού υδραγωγείου Μαραθώνα.

Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα Μόρνου, το οποίο έχει καταρτιστεί από τον Νοέμβριο του 1979 και έκτοτε, είναι ([5], [15]):

- Μεταβολή αποθέματος ταμιευτήρα: Με γνωστή την στάθμη την πρώτη ημέρα κάθε μήνα και την καμπύλη στάθμης-αποθέματος, υπολογίζεται το αντίστοιχο απόθεμα του ταμιευτήρα και η μηνιαία μεταβολή του. Επισημαίνεται ότι πλήρεις (χωρίς κενά) χρονοσειρές ημερήσιας στάθμης διατίθενται από την 1/1/1985. Για τα προηγούμενα έτη, και συγκεκριμένα από την 1/2/1979 υπάρχουν δεδομένα στάθμης με ελλείψεις.
- Απορροή ανάντη λεκάνης: Πρόκειται για την άγνωστη συνιστώσα του ταμιευτήρα, ως προς την οποία επιλύεται η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου του.

- Βροχόπτωση στον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες εισροές λόγω επιφανειακής βροχόπτωσης εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος βροχής επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα. Η τελευταία υπολογίζεται μέσω της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα. Το ύψος βροχόπτωσης στον ταμιευτήρα μετράται στον αυτόματο τηλεμετρικό σταθμό του φράγματος, που βρίσκεται σε λειτουργία από τον Φεβρουάριο του 2002. Για την συμπλήρωση των έως τότε δεδομένων, χρησιμοποιείται το δείγμα βροχόπτωσης του σταθμού Λιδορικού.
- Εισροές από τον Εύηνο: Πρόκειται για τις ποσότητες που διοχετεύονται από τον Εύηνο, μέσω της σήραγγας εκτροπής.
- Απώλειες λόγω εξάτμισης από τον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες λόγω επιφανειακής εξάτμισης εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος εξάτμισης επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα. Από τον Αύγουστο του 2003, το ύψος εξάτμισης υπολογίζεται εφαρμόζοντας την αναλυτική μέθοδο Penman, και με βάση τα αναγκαία μετεωρολογικά δεδομένα που λαμβάνονται από τον αυτόματο τηλεμετρικό σταθμό του φράγματος. Για την επέκταση της χρονοσειράς εξάτμισης προς τα πίσω, χρησιμοποιείται το λεγόμενο παλαιό δείγμα, που υπολογίζεται με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα άλλων σταθμών ([5]).
- Απώλειες στη σήραγγα Γκιώνας: Η συνιστώσα αυτή εισάγεται επειδή η μέτρηση των απολήψεων γίνεται στην έξοδο της σήραγγας Γκιώνας. Μέχρι τον Δεκέμβριο 1983, οι εν λόγω απώλειες ήταν σημαντικές και ανέρχονταν σε 1.0 m³/s. Στις αρχές του 1984 έγιναν επεμβάσεις στεγανοποίησης στη σήραγγα, με αποτέλεσμα τον δραστικό περιορισμό (πρακτικά μηδενισμό) των απωλειών.
- Απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών από τον ταμιευτήρα: Οι απώλειες λόγω διαφυγών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τις διηθήσεις που συγκεντρώνονται στις δύο από τις τρεις σήραγγες αποστράγγισης της στοάς του Πύρνου, όπου υπάρχουν κατάλληλες διατάξεις για την μέτρησή τους (υπερχειλιστές λεπτής στέψης). Στην δεύτερη κατηγορία απωλειών εντάσσονται: (α) οι διαφυγές από το φράγμα και την θεμελίωσή του, (β) οι διαφυγές από την κουρτίνα τσιμεντενέσεων του Πύρνου, (γ) οι άμεσες διαφυγές από την περιοχή του Πύρνου που δεν διέρχονται μέσω της στοάς

και των σηράγγων, και (δ) τυχόν άλλες διαφυγές από διάφορα σημεία της λεκάνης κατάκλυσης. Βάσει ορισμένων παραδοχών, οι συνολικές διαφυγές σε μηνιαία βάση προκύπτουν με διπλασιασμό των υπολογισμένων απωλειών του Πύρνου.

- Υπερχείλιση ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες λόγω υπερχείλισης υπολογίζονται αθροίζοντας τα ημερήσια στοιχεία που προκύπτουν με βάση τις ημερήσιες τιμές της στάθμης υπερχείλισης και την καμπύλη στάθμης-παροχής του υπερχειλιστή.
- Εκροές από τη σήραγγα Γκιώνας: Οι μηνιαίες ποσότητες νερού που προορίζονται για ύδρευση της Αθήνας υπολογίζονται αθροίζοντας τις αντίστοιχες ημερήσιες τιμές, οι οποίες προκύπτουν βάσει μετρήσεων στον υπερχειλιστή παχείας στέψης που βρίσκεται στην έξοδο της σήραγγας Γκιώνας.

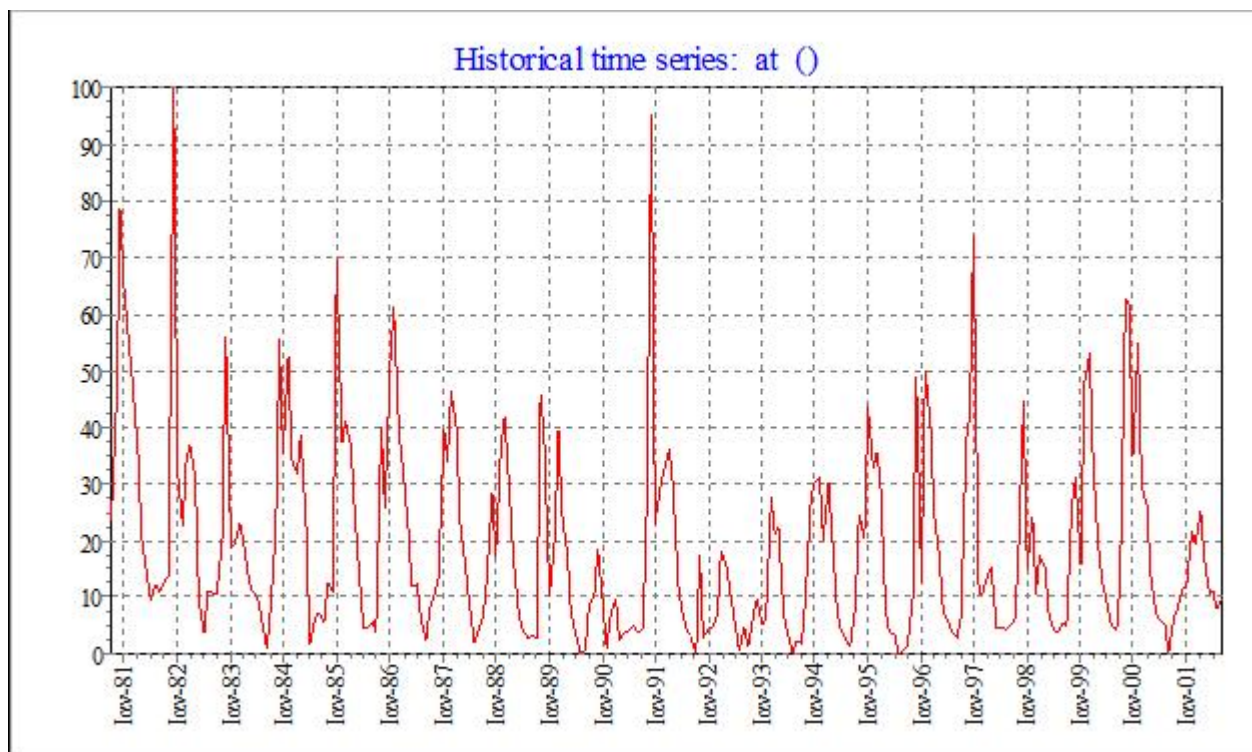
Η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα Μόρνου επιλύεται ως προς την άγνωστη συνιστώσα του, που είναι η μηνιαία απορροή. Η τελευταία μετατρέπεται σε ισοδύναμο ύψος διαιρώντας με την καθαρή έκταση της ανάντη λεκάνης, ήτοι την επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάντη του φράγματος (588.1 km^2) μείον τη μέση επιφάνεια του ταμιευτήρα για τον μήνα αναφοράς.

6.3 Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών εισροής

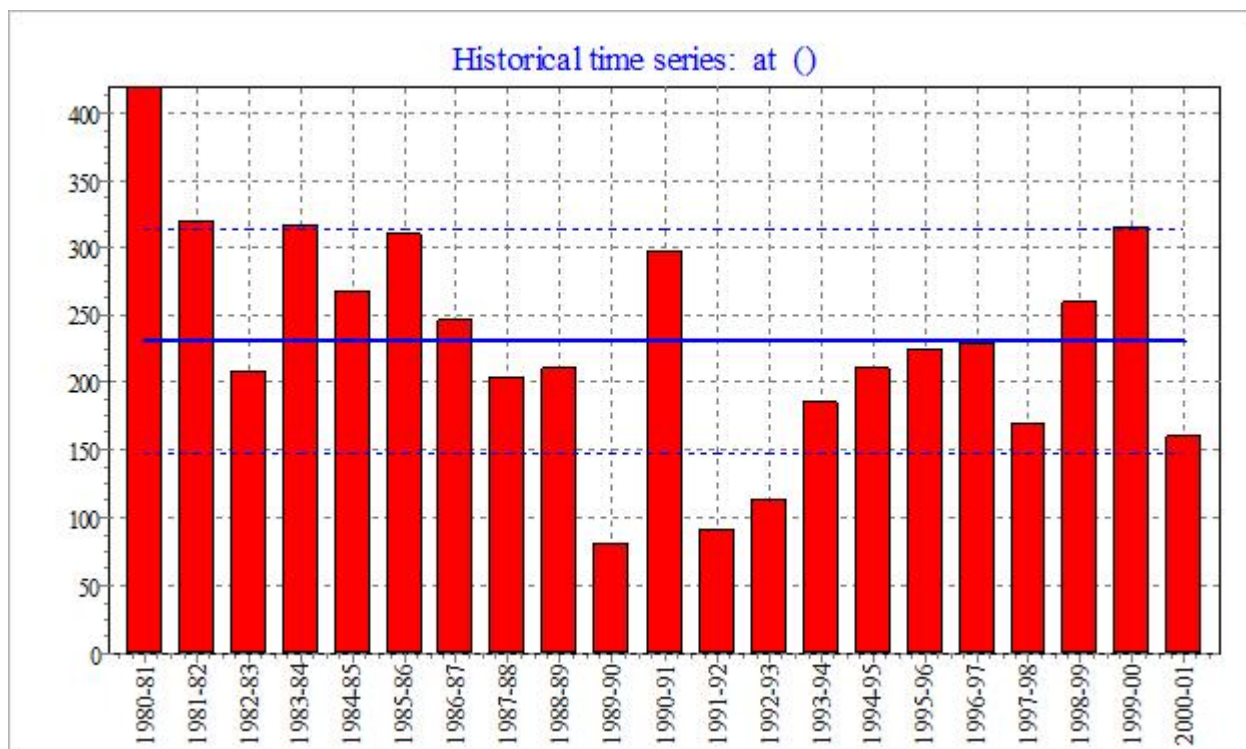
Η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών εισροής έχει σκοπό την επέκταση του διαθέσιμου ιστορικού δείγματος των εισροών. Ουσιαστικά, μας παρέχει μια προβολή των εισροών σε μέλλοντα χρόνο με σκοπό τη λήψη αποφάσεων για την καλύτερη αξιοποίηση και προστασία των υδατικών πόρων του ταμιευτήρα του Μόρνου. Οι συνθετικές χρονοσειρές παράγονται με τη χρήση του προγράμματος «Κασταλία», με τη διαδικασία που περιγράφηκε αναλυτικά στο πέμπτο κεφάλαιο.

Υπάρχει διαθέσιμη ιστορική χρονοσειρά εισροών στον ταμιευτήρα Μόρνου, η οποία αναφέρεται σε χρονική περίοδο 21 ετών (υδρολογικά έτη 1980-81 ως 2000-01) σε μηνιαίο βήμα. Με βάση αυτή θα παραχθεί η συνθετική χρονοσειρά εισροής υπό τη μορφή πρόγνωσης. Η ιστορική χρονοσειρά εισάγεται ως είσοδος στο πρόγραμμα «Κασταλία», το οποίο παράγει ως έξοδο τη ζητούμενη συνθετική χρονοσειρά πρόβλεψης των εισροών. Οι χρονοσειρά πρόγνωσης είναι επίσης σε μηνιαίο βήμα και έχει χρονικό ορίζοντα τριών υδρολογικών ετών (δηλαδή 36 μηνών).

Η μοναδική διαθέσιμη ιστορική χρονοσειρά εισροής δημιουργεί ένα πλήθος συνθετικών χρονοσειρών, που καλούνται σενάρια. Ο αριθμός των διαφορετικών σεναρίων που θα παραχθούν επαφίεται στη διακριτική ευχέρεια του αναλυτή-μηχανικού, και εξαρτάται από τη φύση και την πολυπλοκότητα του εκάστοτε υπό μελέτη συστήματος. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας επιλέγεται αριθμός των σεναρίων 500. Άρα, δημιουργούνται 500 διαφορετικές συνθετικές χρονοσειρές εισροής. Η διαθέσιμη ιστορική χρονοσειρά για την εισροή στον ταμιευτήρα Μόρνου παρατίθεται στα σχήματα 6.9 και 6.10, σε μηνιαία και ετήσια χρονική βάση αντίστοιχα:



Σχήμα 6.9: Η ιστορική χρονοσειρά εισροής του Μόρνου, με μηνιαίο χρονικό βήμα

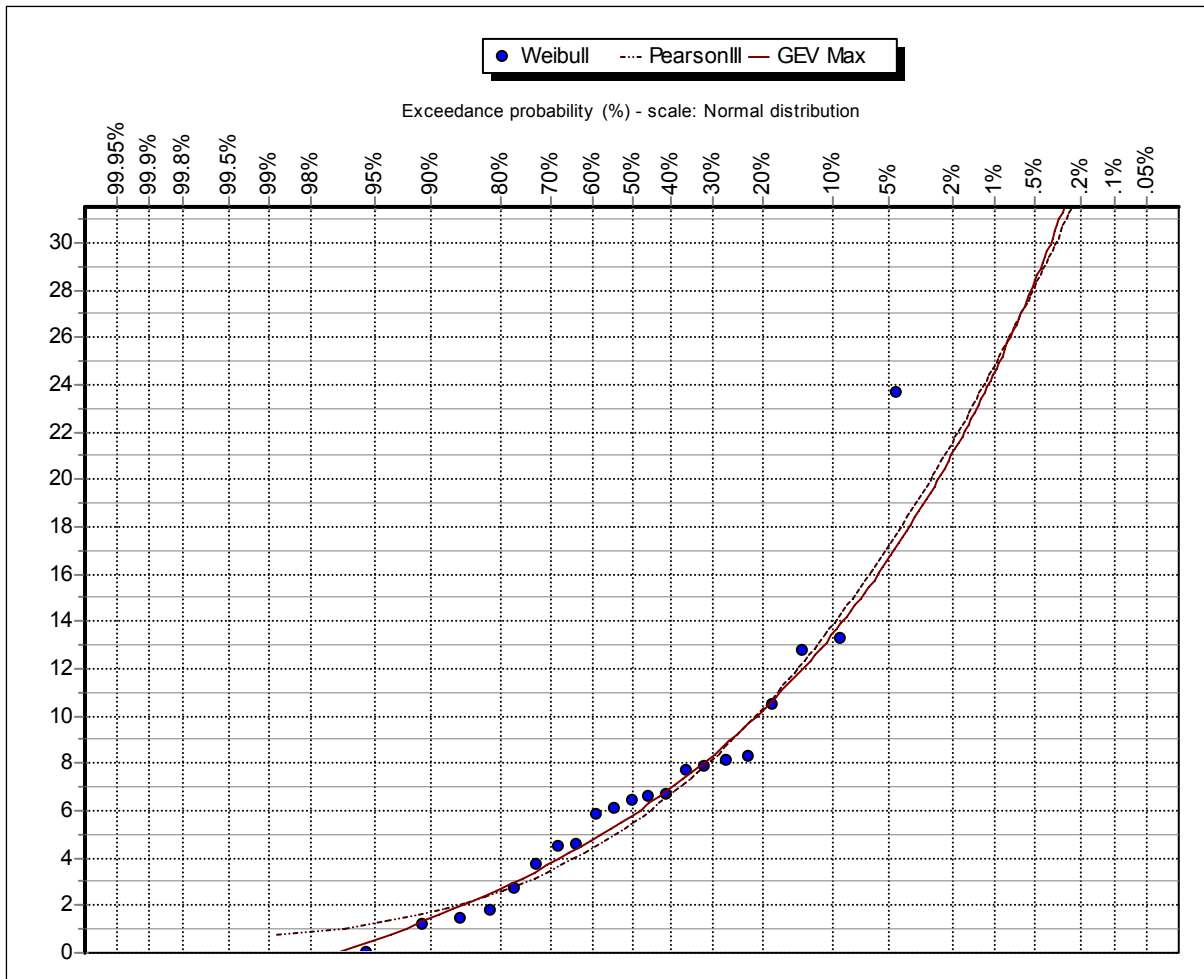


Σχήμα 6.10: Η ιστορική χρονοσειρά εισροής του Μόρνου, με ετήσιο χρονικό βήμα

Με βάση τη στατιστική ανάλυση της παραπάνω χρονοσειράς υπολογίστηκαν οι απαραίτητες στατιστικές παράμετροι για την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η μέση τιμή, η διασπορά, η κεντρική τρίτη ροπή, ο συντελεστής ασυμμετρίας και η δειγματική αυτοσυνδιασπορά. Στον Πίνακα 6.12 παρατίθενται τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά και στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης. Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις κατανομής του δείγματος.

Πίνακας 6.12: Βασικά Στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής χρονοσειράς

	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Σύνολο
Σύνολο Δεδομένων	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	252
Μ.Ο.	6.85	22.45	39.11	29.4	31.17	30.5	27.21	19.21	9.81	6.06	4.51	4.24	19.21
Τ.Α.	5.26	15.2	27.6	21.3	17.74	13.79	8.27	8	4.45	2.96	3.29	3.2	17.73
3 ^η Κεντρική Ροπή	243.22	4509.25	18387.65	8208.14	67.08	1037.76	228.31	214.09	89.53	19.44	25.75	30.05	8583.48
Συντελεστής Ασυμμετρίας	1.67	1.28	0.87	0.85	0.01	-0.4	-0.4	0.42	1.02	0.75	0.72	0.92	1.54



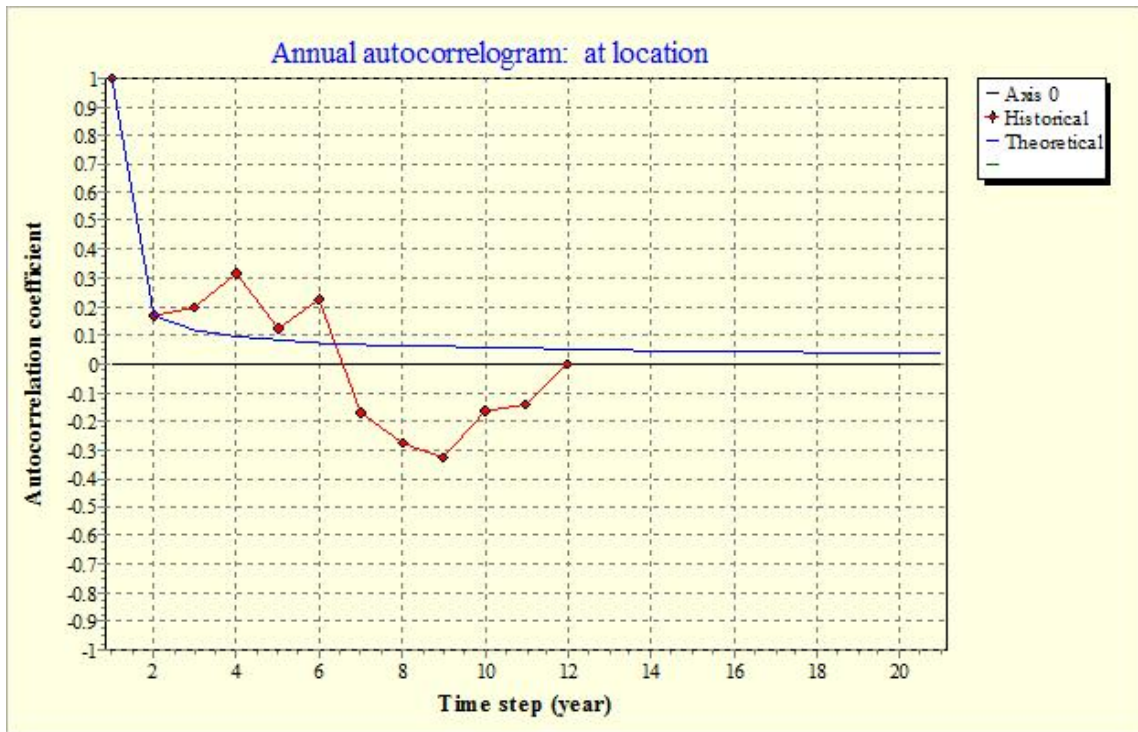
Σχήμα 6.11: Συναρτήσεις κατανομής του δείγματος (Σημεία=ιστορική χρονοσειρά, μαύρη γραμμή=κατανομή γάμα τριών παραμέτρων Pearson 3, κόκκινη γραμμή=κατανομή μεγίστων ή γενική ακραίων τιμών GEV)

Στη συνέχεια προσδιορίζεται η θεωρητική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, η οποία χρησιμοποιείται για την αναπαραγωγή της μακροπρόθεσμης εμμονής των υδρολογικών διεργασιών. Στο πρόγραμμα «Κασταλία» χρησιμοποιείται συνήθως το στάσιμο μοντέλο των συμμετρικά κινούμενων μέσων όρων (μοντέλο SMA). Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης περιγράφεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση:

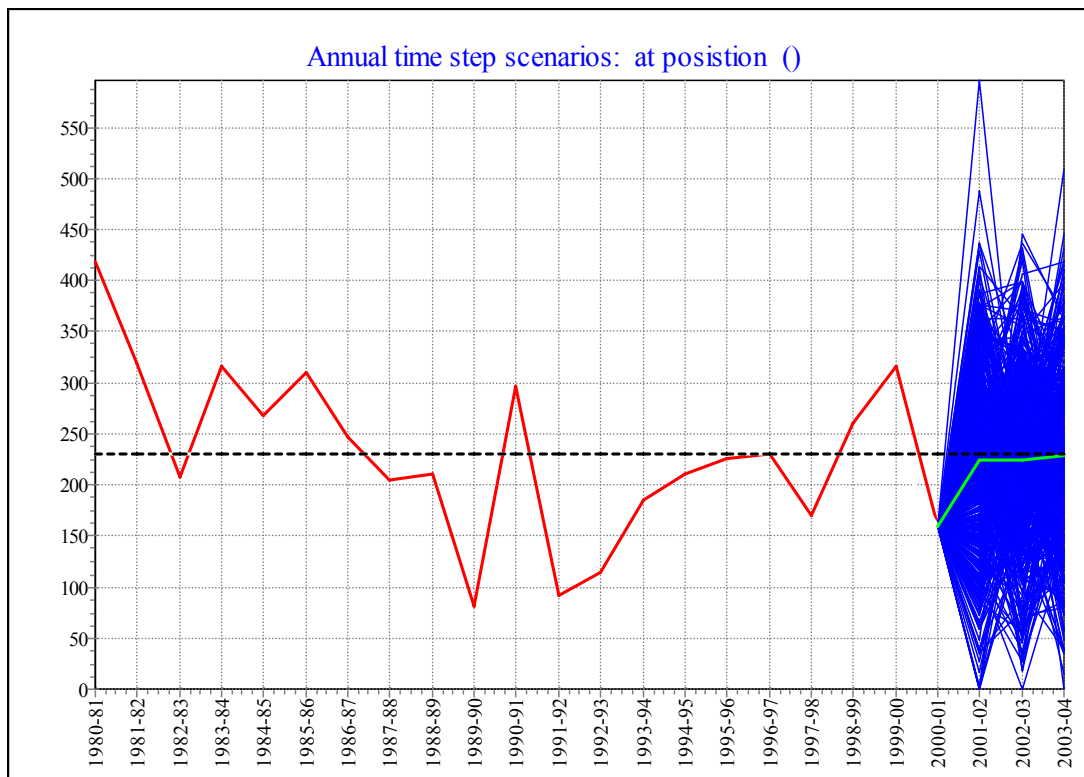
$$\gamma_j = [1 + 30.939j]^{-0.5} \quad (6.1)$$

όπου $\beta=2$ και $k=15.469$ (βλέπε κεφάλαιο 5).

Παρακάτω, στο Σχήμα 6.13, παρατίθεται η ιστορική χρονοσειρά εισροής και τα 500 εναλλακτικά σενάρια πρόβλεψης για τον ταμειωτήρα Μόρνου.



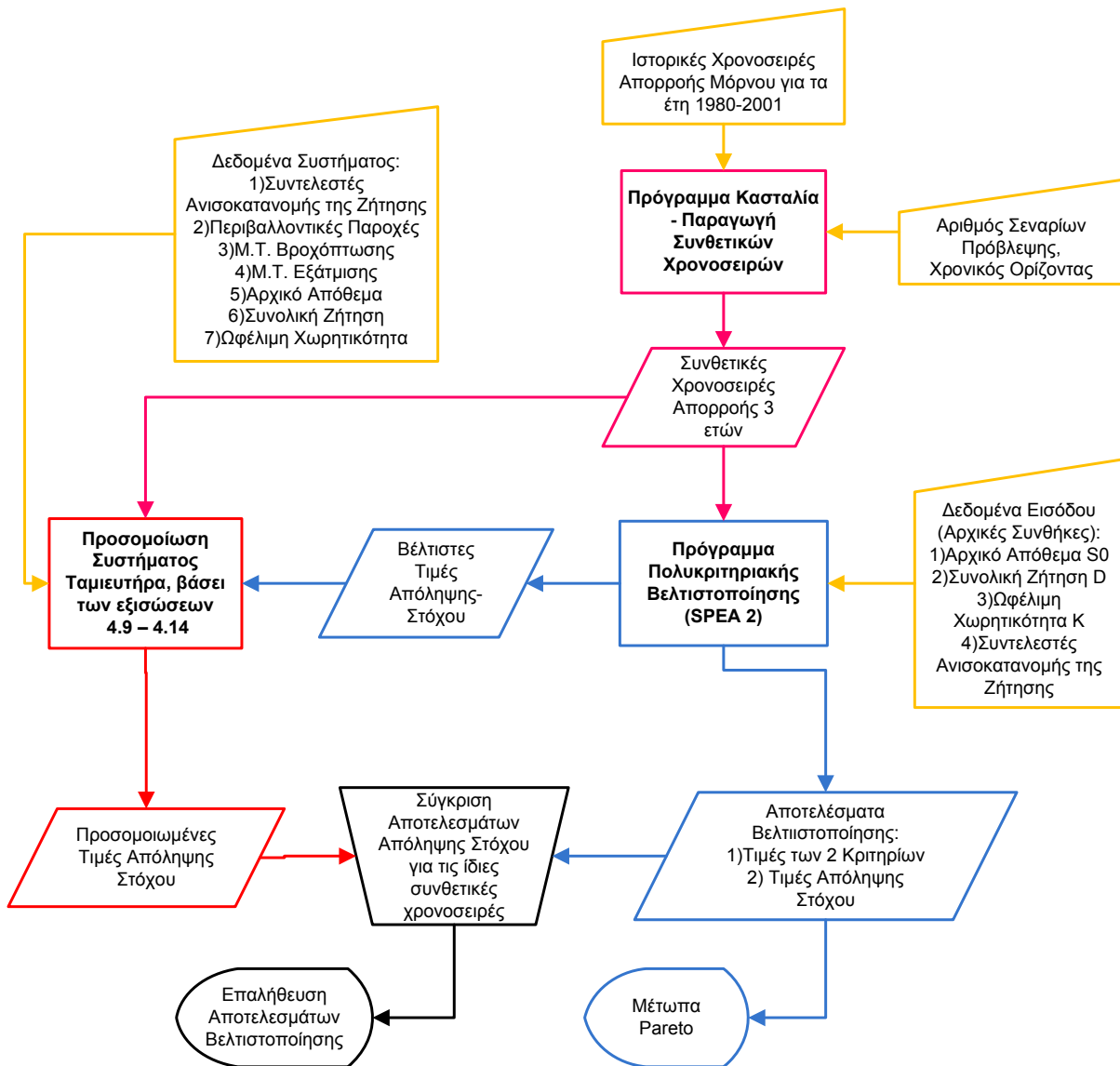
Σχήμα 6.12: Διάγραμμα αυτοσυσχέτισης



Σχήμα 6.13: Ιστορική χρονοσειρά εισροής και τα 500 εναλλακτικά σενάρια πρόβλεψης

6.4 Αποτελέσματα

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας συλλογής των απαραίτητων δεδομένων εισόδου για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης του ταμιευτήρα, την επιλογή του μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος και του αλγόριθμου βελτιστοποίησης, η βήμα προς βήμα περιγραφή των επιμέρους διεργασιών για την τελική εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων περιγράφεται παρακάτω, στο Σχήμα 6.14. Στον Πίνακα 6.13 επεξηγούνται οι επιμέρους διεργασίες.



Σχήμα 6.14: Διάγραμμα της διαδικασίας εξαγωγής αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.13: Επεξήγηση των τεσσάρων βασικών διεργασιών

-----	Διαδικασία παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών
-----	Διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης
-----	Διαδικασία προσομοίωσης συστήματος
-----	Διαδικασία σύγκρισης αποτελεσμάτων

Η διαδικασία παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών από ιστορικές χρονοσειρές με χρήση του προγράμματος «Κασταλία» περιγράφηκε με λεπτομέρειες στο προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Η διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης πραγματοποιείται με χρήση εξειδικευμένου κώδικα, ο οποίος παρεχωρήθη από τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής κ. Ναλμπάντη και εφαρμόζει τον αλγόριθμο SPEA 2, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το πρόγραμμα βελτιστοποίησης δέχεται τα δεδομένα εισόδου σε ένα ASCII αρχείο. Τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου είναι οι αρχικές συνθήκες του συστήματος, δηλαδή το αρχικό ωφέλιμο απόθεμα, η συνολική ζήτηση και η ωφέλιμη χωρητικότητα. Επίσης, χρειάζεται τους συντελεστές ανισοκατανόησης της ζήτησης και τις τιμές των συνθετικών χρονοσειρών απορροής για όλα τα σενάρια που παρήχθησαν από την προηγούμενη διαδικασία. Έξοδος του προγράμματος είναι ένας πίνακας που περιέχει τις βέλτιστες τιμές των δύο κριτηρίων βελτιστοποίησης, συγκεκριμένα 100 σε αριθμό για κάθε επιμέρους διεργασία, από τις οποίες σχεδιάζονται τα μέτωπα Pareto, και τις τιμές της απόληψης-στόχου, όπως προκύπτουν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Πραγματοποιούνται αναλύσεις για επτά διαφορετικές τιμές συνολικής ζήτησης και δυο διαφορετικές τιμές αρχικού ωφέλιμου αποθέματος. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται αναλύσεις για τιμές αρχικού αποθέματος ίσο με το 5% και το 10% της συνολικής ωφέλιμης χωρητικότητας ($630.23 \times 10^6 \text{ m}^3$) και για τιμές της ζήτησης ίσες με 150, 200, 250, 300, 350, 400 και $450 \times 10^6 \text{ m}^3$. Επίσης, εφαρμόζονται διαδικασίες βελτιστοποίησης για τέσσερις διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες, ήτοι για 6 μήνες, 12 μήνες, 24 μήνες και 36 μήνες. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται στο αρχείο εισόδου, για όλα τα προαναφερθέντα σενάρια, παρουσιάζονται παρακάτω, στον Πίνακα 6.14. Στον Πίνακα 6.15 δίνονται οι τιμές των συντελεστών ανισοκατανομής της ζήτησης.

Πίνακας 6.14: Περιγραφή σεναρίων βελτιστοποίησης

Χρονικός Ορίζοντας		6 Μήνες	12 Μήνες	24 Μήνες	36 Μήνες
Ζήτηση (10 ⁶ m ³)	Αρχικό Ωφέλιμο	Σενάριο (Case Study)			
	Απόθεμα (10 ⁶ m ³)				
150	0.1×630.23	D1S1_6	D1S1_12	D1S1_24	D1S1_36
200	0.1×630.23	D2S1_6	D2S1_12	D2S1_24	D2S1_36
250	0.1×630.23	D3S1_6	D3S1_12	D3S1_24	D3S1_36
300	0.1×630.23	D4S1_6	D4S1_12	D4S1_24	D4S1_36
350	0.1×630.23	D5S1_6	D5S1_12	D5S1_24	D5S1_36
400	0.1×630.23	D6S1_6	D6S1_12	D6S1_24	D6S1_36
450	0.1×630.23	D7S1_6	D7S1_12	D7S1_24	D7S1_36
150	0.05×630.23	D1S2_6	D1S2_12	D1S2_24	D1S2_36
200	0.05×630.23	D2S2_6	D2S2_12	D2S2_24	D2S2_36
250	0.05×630.23	D3S2_6	D3S2_12	D3S2_24	D3S2_36
300	0.05×630.23	D4S2_6	D4S2_12	D4S2_24	D4S2_36
350	0.05×630.23	D5S2_6	D5S2_12	D5S2_24	D5S2_36
400	0.05×630.23	D6S2_6	D6S2_12	D6S2_24	D6S2_36
450	0.05×630.23	D7S2_6	D7S2_12	D7S2_24	D7S2_36

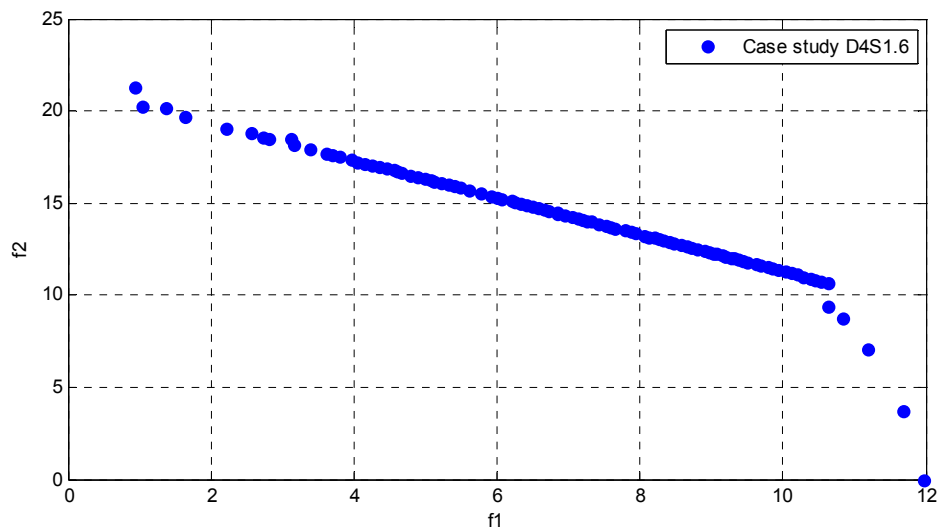
Πίνακας 6.15: Τιμές συντελεστών ανισοκατανόησης της ζήτησης

Μήνας	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
λ_j	0,084	0,074	0,074	0,069	0,063	0,071	0,073	0,083	0,090	0,137	0,094	0,088

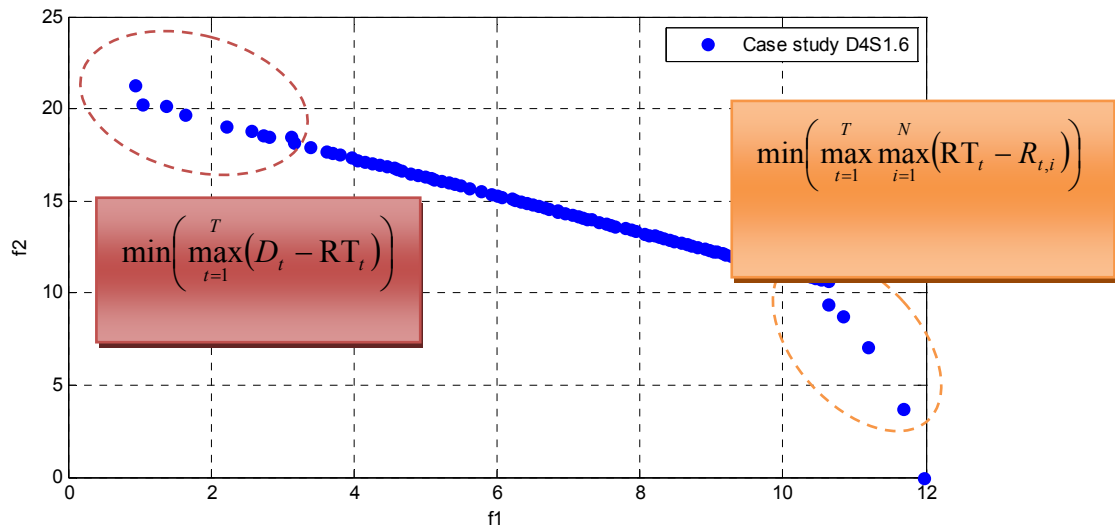
Η διαδικασία προσομοίωσης στηρίζεται στο μοντέλο του ταμιευτήρα, όπως αυτό περιγράφεται από τις εξισώσεις 4.9 ως 4.14, με τις εξής απλουστεύσεις και παραδοχές: 1) το ρόλο της μηνιαίας ζήτησης τον παίζει πλέον η απόληψη-στόχος, με τις τιμές που προκύπτουν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης, 2) επειδή στο πρόγραμμα αγνοήθηκε η βροχόπτωση και η εξάτμιση δεν χρειάζεται να γίνει υπολογισμός της επιφάνειας A_{ij} και άρα δεν χρησιμοποιούνται οι καμπύλες στάθμης επιφάνειας και στάθμης-όγκου και 3) η οικολογική παροχή λαμβάνεται μηδενική όπως είναι και στην πραγματικότητα για τον Ταμιευτήρα Μόρνου.

Από τη διαδικασία της προσομοίωσης εξετάζεται αν ικανοποιούνται οι απολήψεις-στόχοι και σε ποιο βαθμό. Πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για έναν αριθμό συνθετικών χρονοσειρών για κάθε χρονικό ορίζοντα ανάλυσης και για την ιστορική χρονοσειρά. Έτσι πραγματοποιείται και μια σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Ορίζουμε ως βασικό σενάριο βελτιστοποίησης κάθε χρονικού ορίζοντα το σενάριο με τιμή ζήτησης $D=300 \times 10^6 \text{ m}^3$ και αρχικού ωφέλιμου αποθέματος $S_0=0.1 \times 630.23 \times 10^6 \text{ m}^3$. Παρακάτω, στο Σχήμα 6.15, παρουσιάζεται το μέτωπο Pareto που προκύπτει για το βασικό σενάριο για χρονικό ορίζοντα 6 μηνών. Στο Σχήμα 6.16 παρουσιάζεται η ανάλυση του με βάση τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης.



Σχήμα 6.15: Μέτωπο Pareto που προκύπτει για το βασικό σενάριο για χρονικό ορίζοντα 6 μηνών

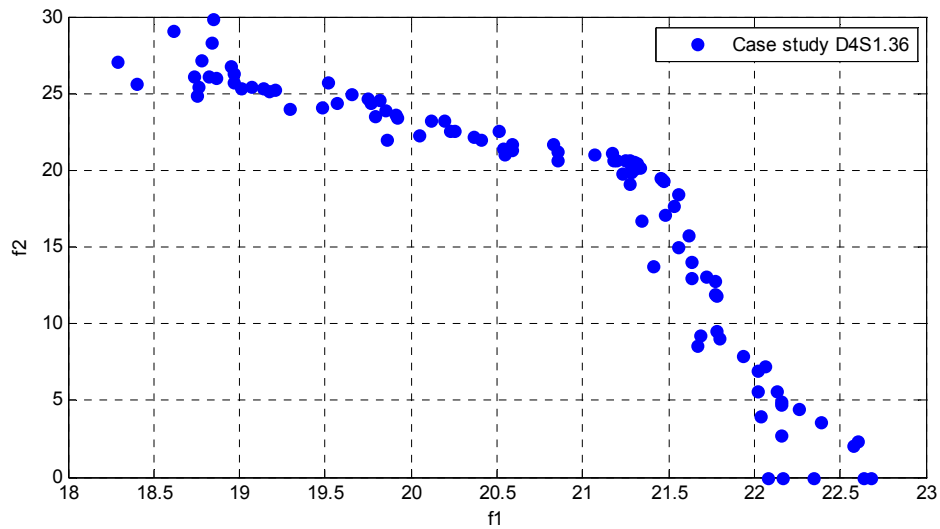


Σχήμα 6.16: Ανάλυση του Μετώπου Pareto που προκύπτει για το παραπάνω σενάριο

Η συνετή επιλογή της στρατηγικής διαχείρισης και προγραμματισμού της απόληξης στόχου από τον ταμιευτήρα, που να μην οδηγεί σε αλόγιστη και αυθαίρετη απόληξη από αυτόν αλλά ούτε και σε ελλιπή, είναι μια διαδικασία που επαφίεται στην κρίση του αναλυτή. Η βέλτιστη λύση αναζητείται μέσα από το μέτωπο Pareto, όπως αυτό προέκυψε από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα ανάγεται στον καθορισμό μιας απόληξης στόχου, η οποία θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ζήτηση, που θα ελαχιστοποιεί τη μέγιστη διαφορά ζήτησης και στόχου, αλλά και θα ελαχιστοποιεί τη μέγιστη διαφορά ανάμεσα σε πραγματική απόληξη και απόληξη-στόχο. Η πάνω αριστερά λύση είναι η ακραία λύση που εξασφαλίζει το δυνατόν μικρότερο μέγιστο προγραμματισμένο έλλειμμα ικανοποίησης της ζήτησης (ζήτηση – απόληξη στόχος), ενώ η κάτω δεξιά είναι λύση που εξασφαλίζει το ελάχιστο των μεγίστων ελλειμμάτων (μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής απόληξης).

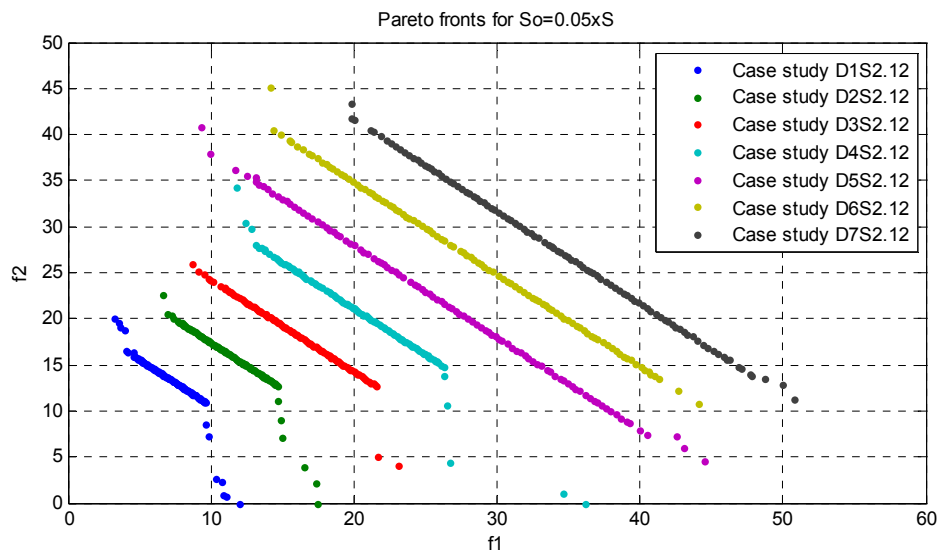
Η τελική επιλογή στρατηγικής διαχείρισης του ταμιευτήρα, και η χάραξη μιας γενικότερης πολιτικής, μπορεί να γίνει εφόσον μελετηθούν όλα τα πιθανά σενάρια ανάλυσης και διερευνηθεί η συμπεριφορά του ταμιευτήρα υπό το πρίσμα διαφορετικών προσεγγίσεων. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, διερευνήθηκαν οι προοπτικές βελτιστοποίησης της διαχείρισης για βραχυπρόθεσμους χρονικούς ορίζοντες (μέχρι 36 μήνες) και με δυσμενείς αρχικές συνθήκες (πολύ χαμηλό αρχικό ωφέλιμο απόθεμα). Με τα διαφορετικά σενάρια που αναλύθηκαν δημιουργήθηκε ένα διευρυμένο σύνολο λύσεων για κάθε χρονικό ορίζοντα, και μια ανάλυση της συμπεριφοράς του ταμιευτήρα για διαφορετικές τιμές ζήτησης και αρχικού αποθέματος.

Παρακάτω, στο Σχήμα 6.17, παρουσιάζεται το μέτωπο Pareto που προκύπτει για το βασικό σενάριο για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών.

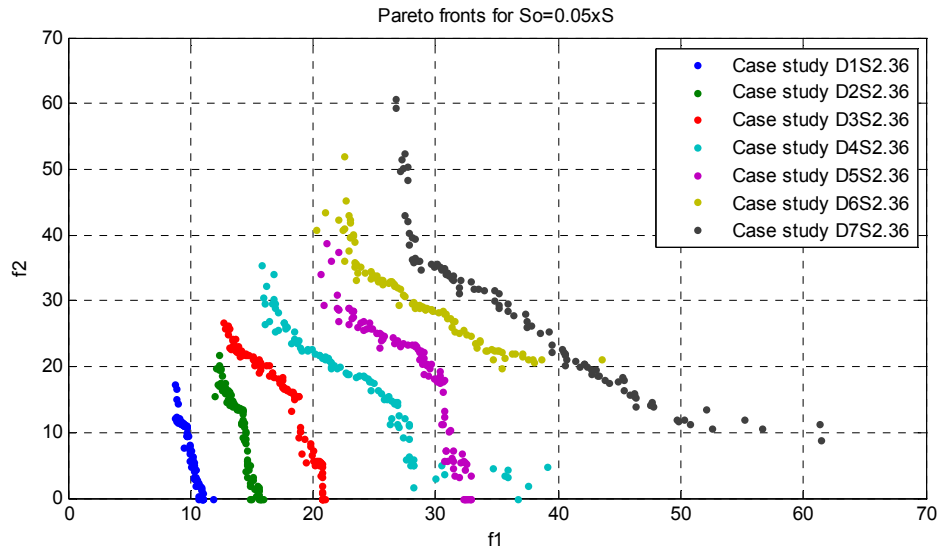


Σχήμα 6.17: Μέτωπο Pareto που προκύπτει για το βασικό σενάριο για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών

Παρακάτω, στα σχήματα 6.18 και 6.19, παρουσιάζονται τα μέτωπα Pareto για όλες τις πιθανές τιμές ζήτησης και με τιμή αρχικού αποθέματος το 5% του συνολικού ωφέλιμου, για χρονικούς ορίζοντες 12 και 36 μηνών (μέτωπα σταθερού αρχικού αποθέματος).

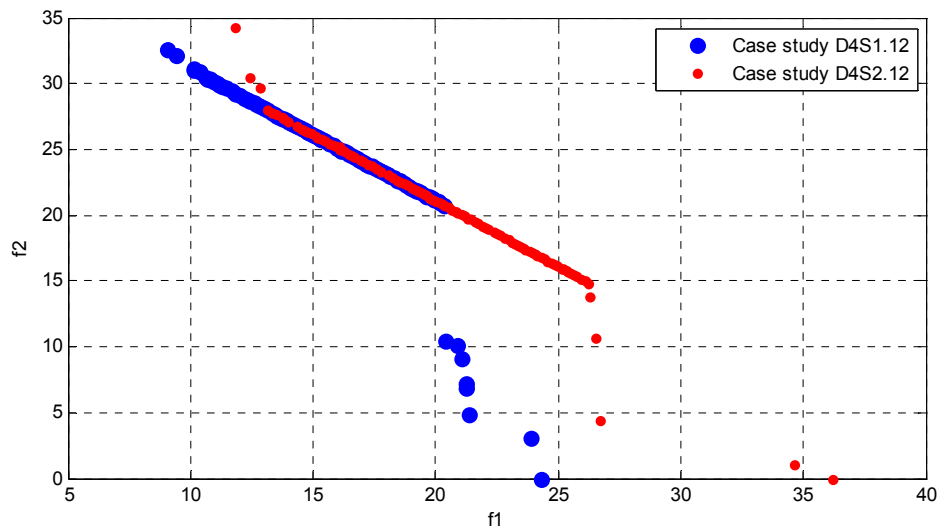


Σχήμα 6.18: Μέτωπα Pareto για όλες τις πιθανές τιμές ζήτησης και τιμή αρχικού αποθέματος το 5% του συνολικού ωφέλιμου για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών

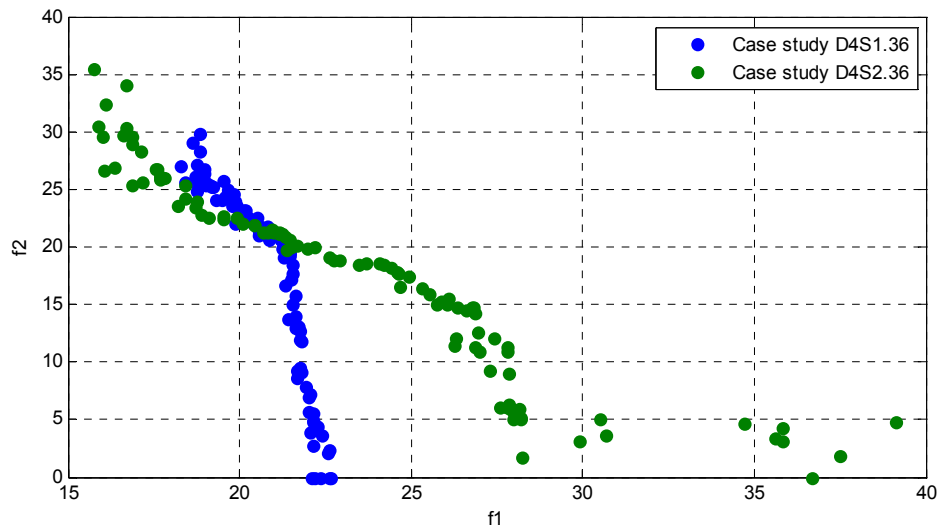


Σχήμα 6.19: Μέτωπα Pareto για όλες τις πιθανές τιμές ζήτησης και τιμή αρχικού αποθέματος το 5% του συνολικού ωφέλιμου για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών

Παρακάτω, στα σχήματα 6.20 και 6.21, παρουσιάζονται τα Pareto για τιμές ζήτησης $D=300 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών (μέτωπα σταθερής ζήτησης).



Σχήμα 6.20: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=300 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% (κόκκινο) και το 10% (μπλε) αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών



Σχήμα 6.21: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=300 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% (πράσινο) και το 10% (μπλε) αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να γίνουν κάποιες εύλογες παρατηρήσεις (για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Παράρτημα Α). Διαπιστώνεται ότι ο πιο καθοριστικός παράγοντας στη διαμόρφωση των μετώπων Pareto, και άρα στην παραγωγή των βέλτιστων λύσεων, είναι η τιμή της ζήτησης. Για διαφορετικές τιμές ζήτησης τα μέτωπα διαφέρουν κατά πολύ, και, κατ' επέκταση, και οι βέλτιστες λύσεις. Παρατηρούμε ότι όταν αλλάζουμε τιμή στην παράμετρο που αφορά στη συνολική ζήτηση το μέτωπο Pareto μετακινείται σε γενικές γραμμές παράλληλα, πηγαίνοντας σε υψηλότερες τιμές και των δύο κριτηρίων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, για μεγάλες τιμές ζήτησης και για ανάλυση μεγάλου χρονικού ορίζοντα (36 μήνες) το μέτωπο φαίνεται να στρέφεται λίγο αντίθετα στη φορά του ρολογιού. Αποδεικνύεται λοιπόν ο ισχυρισμός ότι σε προβλήματα διαχείρισης ταμειυτήρων η τιμή της ζήτησης είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει στο μεγαλύτερο βαθμό τις μελλοντικές δράσεις.

Αντίθετα, παρατηρούμε ότι για διαφορετικές τιμές αρχικού ωφέλιμου αποθέματος τα μέτωπα δεν διαφέρουν σε αντίστοιχο βαθμό, και, κατ' επέκταση, ούτε οι βέλτιστες λύσεις. Μικρές μεταβολές στο αρχικό ωφέλιμο απόθεμα (ούτως ή άλλως εξετάζουμε δυο κοντινές, δυσμενείς περιπτώσεις) δεν επιφέρουν τόσο μεγάλες διαφοροποιήσεις όσο επιφέρουν αντίστοιχες αλλαγές στην τιμή της ζήτησης. Πιο συγκεκριμένα, για χρονικούς ορίζοντες 6, 12 και 24 μηνών τα μέτωπα αλλάζουν ελάχιστα, κυρίως στις ακραίες καταστάσεις, ενώ για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών το μέτωπο στρέφεται ελαφρώς αντίθετα στη φορά του ρολογιού, γύρω από το κεντρικό σημείο του. Γενικότερα, το μεσαίο σημείο του μετώπου κινείται σχεδόν γραμμικά, απομακρυνόμενο από την αρχή των αξόνων όσο αυξάνεται η τιμή της συνολικής ζήτησης. Όταν αλλάζει η τιμή του αρχικού ωφέλιμου αποθέματος το σημείο παραμένει πρακτικά αμετακίνητο.

Ο έλεγχος των βελτιστοποιήσεων που εφαρμόστηκαν στην εργασία, έγινε για το βασικό σενάριο κάθε χρονικού ορίζοντα. Εφαρμόστηκε η διαδικασία της προσομοίωσης για τρεις πραγματοποιήσεις της συνθετικής χρονοσειράς κάθε χρονικού ορίζοντα, καθώς και τμήματος της ιστορικής χρονοσειράς. Από τις διαδικασίες βελτιστοποίησης προκύπτουν οι εξής τιμές απόληψης στόχου, ως μέσος όρος των αθροισμάτων της μηνιαίας απόληψης-στόχου ανηγμένων στο έτος, για τα τέσσερα βασικά σενάρια:

6 μήνες : $232.116 \times 10^6 \text{ m}^3$

12 μήνες : $189.886 \times 10^6 \text{ m}^3$

24 μήνες : $116.860 \times 10^6 \text{ m}^3$

36 μήνες : $123.021 \times 10^6 \text{ m}^3$

Οι τιμές αυτές προκύπτουν ως εξής:

Για παράδειγμα για μια διαδικασία βελτιστοποίησης χρονικού ορίζοντα 12 μηνών το αρχείο εξόδου της βελτιστοποίησης έχει 15 στήλες. Η πρώτη είναι ο αύξων αριθμός, η δεύτερη και η τρίτη είναι οι τιμές των κριτηρίων και οι υπόλοιπες 12 είναι οι μηνιαίες τιμές απόληψης στόχου. Ο πίνακας έχει 100 σειρές-σενάρια. Για κάθε στήλη υπολογίζεται η μέση τιμή της απόληψης στόχου, δηλαδή ο μέσος όρος των 100 διαφορετικών σεναρίων από τα οποία το καθένα αντιστοιχεί σε ένα σημείο του μετώπου Pareto. Έτσι προκύπτουν 12 τιμές απόληψης στόχου, μία για κάθε μήνα. Ο μέσος όρος των μηνιαίων τιμών αυτών επί την εκάστοτε τιμή συνολικής ζήτησης δίνει την προσεγγιστική τιμή της απόληψης στόχου.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για μια τυχαία συνθετική χρονοσειρά εισόδου και χρονικό ορίζοντα 12 μηνών, ζήτηση $300 \times 10^6 \text{ m}^3$ και αρχικό απόθεμα 10% του συνολικού:

Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα προσομοίωσης για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών

i	j	$Q_{i,j}$	q_j	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	13,79	0	0,084	0,737	300	63,1	73,1	18,6
1	2	27,26	0	0,074	0,6152	300	54,5	77,1	13,7
1	3	41,11	0	0,074	0,6718	300	63,4	139,1	15,0
1	4	68,4	0	0,069	0,6607	300	124,1	180,9	13,6
1	5	48,16	0	0,063	0,5706	300	167,3	189,8	10,8
1	6	29,33	0	0,071	0,6112	300	179,0	204,7	13,1
1	7	29,69	0	0,073	0,5403	300	191,6	203,3	11,8
1	8	15,03	0	0,083	0,6794	300	191,5	203,1	17,0
1	9	8,08	0	0,090	0,6061	300	186,1	190,7	16,3
1	10	9,06	0	0,137	0,6209	300	174,5	177,6	25,5
1	11	1,23	0	0,094	0,6597	300	152,1	153,7	18,5
1	12	1,9	0	0,088	0,6224	300	135,2	143,6	16,4
Άθροισμα									190,3

Το αποτέλεσμα για την απόληψη στο τέλος του υδρολογικού έτους, $190,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ είναι πολύ κοντά στην υπολογισμένη τιμή ζήτησης από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, ήτοι $189,886 \times 10^6 \text{ m}^3$ για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοίωσης για μια τυχαία συνθετική χρονοσειρά εισόδου και χρονικό ορίζοντα 36 μηνών, ζήτηση $300 \times 10^6 \text{ m}^3$ και αρχικό απόθεμα 10% του συνολικού:

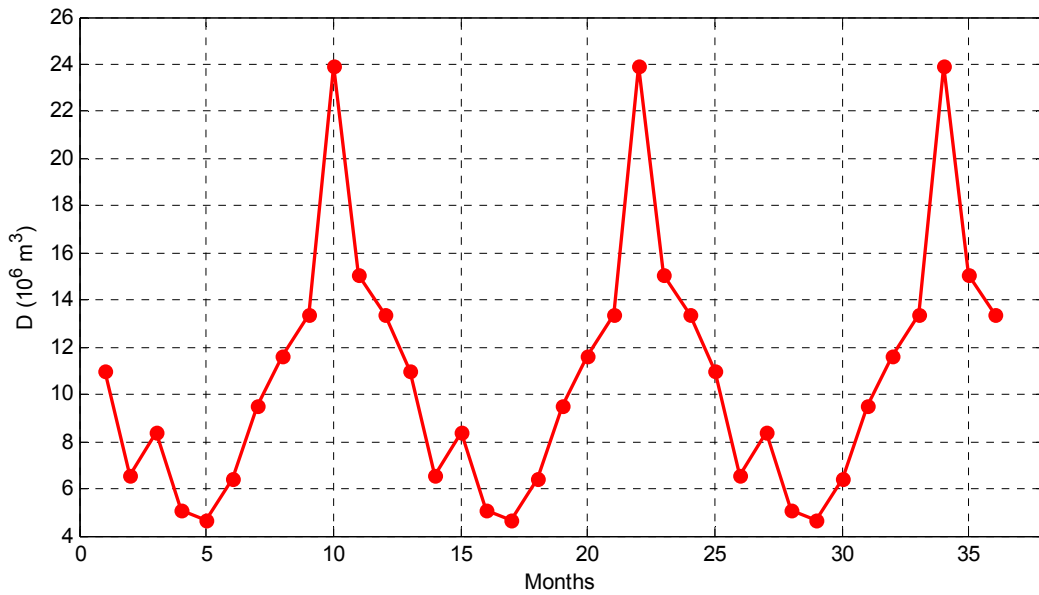
Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα προσομοίωσης – 36 μήνες

i	j	$Q_{i,j}$	q_j	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	9,12	0	0,084	0,437153	300	63,1	72,2	11,0
1	2	20,08	0	0,074	0,293679	300	61,2	81,3	6,6
1	3	60,19	0	0,074	0,375941	300	74,7	134,9	8,4
1	4	39,32	0	0,069	0,246731	300	126,5	165,8	5,1
1	5	31,18	0	0,063	0,245525	300	160,8	191,9	4,7
1	6	28,66	0	0,071	0,29792	300	187,3	215,9	6,4
1	7	19,46	0	0,073	0,434219	300	209,6	229,0	9,5
1	8	10,32	0	0,083	0,463998	300	219,6	229,9	11,6
1	9	3,96	0	0,090	0,499943	300	218,3	222,3	13,4
1	10	5,79	0	0,137	0,582338	300	208,8	214,6	23,9
1	11	3,33	0	0,094	0,536787	300	190,7	194,0	15,1
1	12	2,45	0	0,088	0,506616	300	179,0	181,4	13,4
2	1	9,15	0	0,084	0,437153	300	168,0	177,2	11,0
2	2	8,61	0	0,074	0,293679	300	166,2	175,1	6,6
2	3	20,08	0	0,074	0,375941	300	168,6	189,3	8,4
2	4	9,77	0	0,069	0,246731	300	180,9	191,2	5,1
2	5	43,79	0	0,063	0,245525	300	186,1	230,4	4,7
2	6	29,85	0	0,071	0,29792	300	225,7	255,8	6,4
2	7	24,22	0	0,073	0,434219	300	249,4	273,5	9,5
2	8	12,58	0	0,083	0,463998	300	264,1	275,9	11,6
2	9	10,95	0	0,090	0,499943	300	264,3	273,7	13,4
2	10	7,3	0	0,137	0,582338	300	260,2	265,5	23,9
2	11	2,42	0	0,094	0,536787	300	241,6	241,9	15,1
2	12	5,46	0	0,088	0,506616	300	226,8	230,8	13,4
3	1	4,43	0	0,084	0,437153	300	217,5	222,4	11,0
3	2	30,39	0	0,074	0,293679	300	211,3	244,0	6,6
3	3	20,29	0	0,074	0,375941	300	237,5	260,9	8,4
3	4	53,27	0	0,069	0,246731	300	252,6	307,8	5,1
3	5	72,71	0	0,063	0,245525	300	302,7	377,2	4,7
3	6	49,86	0	0,071	0,29792	300	372,6	423,0	6,4
3	7	35,56	0	0,073	0,434219	300	416,6	451,9	9,5
3	8	16,11	0	0,083	0,463998	300	442,4	456,6	11,6
3	9	7,74	0	0,090	0,499943	300	445,0	449,1	13,4
3	10	4,51	0	0,137	0,582338	300	435,7	435,6	23,9
3	11	2,13	0	0,094	0,536787	300	411,7	409,5	15,1
3	12	0,41	0	0,088	0,506616	300	394,4	391,9	13,4
Άθροισμα									386,8

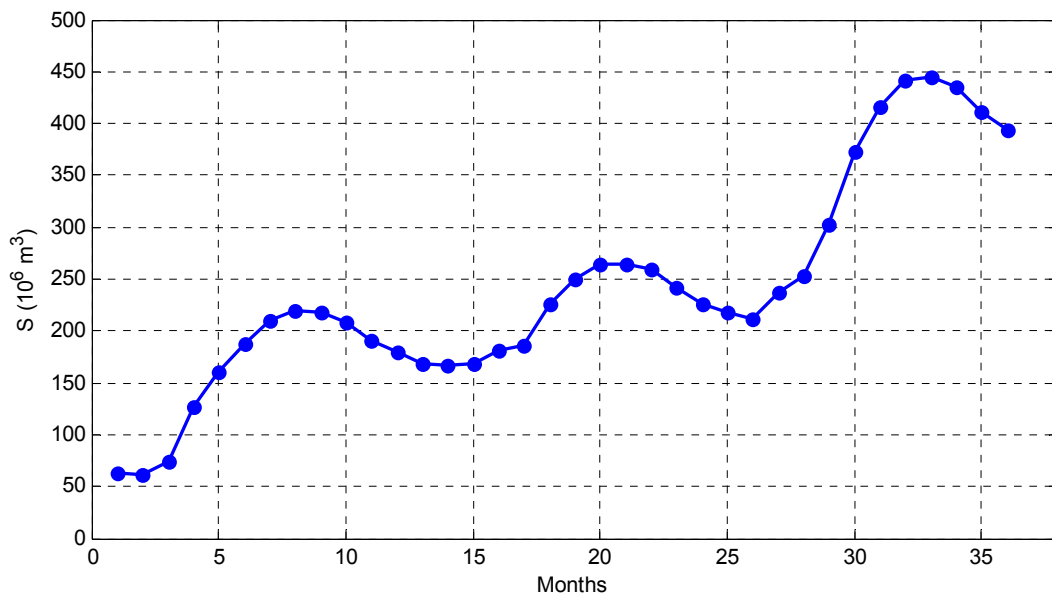
Το αποτέλεσμα $386,8/3=128,933 \times 10^6 \text{ m}^3$ είναι πολύ κοντά στο υπολογισμένο από τη βελτιστοποίηση $123,021 \times 10^6 \text{ m}^3$ για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών.

Οι όποιες διαφορές οφείλονται στις παραδοχές που κάναμε: ότι αγνοήσαμε βροχόπτωση και εξάτμιση και στο ομολογουμένως μικρό μέγεθος της ιστορικής χρονοσειράς που ενδεχομένως να μην έδωσε καλή πρόβλεψη.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα της προβολής σε ορίζοντα 36 μηνών της ζήτησης και του ωφέλιμου αποθέματος:



Σχήμα 6.22: Διάγραμμα προβολής της ζήτησης (χρονικός ορίζοντας 36 μηνών)



Σχήμα 6.23: Διάγραμμα προβολής ωφέλιμου αποθέματος (χρονικός ορίζοντας 36 μηνών)

7 Συμπεράσματα

Η διαχείριση των υδάτων ενός ταμιευτήρα με χρήση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι η μόνη λύση για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο εγκλωβισμού σε μία μονοσήμαντη λύση, της οποίας η αντικειμενικότητα τίθεται εν γένει υπό αμφισβήτηση, λόγω της φύσεως της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Είναι πολύ σημαντικό για το μηχανικό του σήμερα να μπορεί να προτείνει αλλά και να αξιολογήσει μια πληθώρα εναλλακτικών λύσεων και δράσεων. Επίσης, η ανάγκη ένταξης περιβαλλοντικών κριτηρίων στη διαχείριση των υδατικών πόρων κρίνεται επιτακτική στις μέρες μας, στα πλαίσια της διαμόρφωσης μιας γενικότερης οικολογικής συνείδησης.

Το πρόβλημα της διαχείρισης ενός συστήματος ταμιευτήρων προκαλεί δυσκολίες εν τη γενέσει του, τόσο λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος, όσο και λόγω της έλλειψης ιστορικών δεδομένων για τον ελλαδικό χώρο. Όπως φάνηκε και από την ανάλυση για τον ταμιευτήρα Μόρνου, οι διαθέσιμες ιστορικές χρονοσειρές είναι πολύ βραχείς με αποτέλεσμα η αξιοπιστία των προβλέψεων με βάση συνθετικές χρονοσειρές να μην είναι δεδομένη. Αυτή η έλλειψη μακρών ιστορικών χρονοσειρών, από μετρητικά στοιχεία, αποτελεί σοβαρό πρόβλημα στη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης της λειτουργίας τέτοιων συστημάτων.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, η προσέγγιση του προβλήματος διαχείρισης αφορά στον ταμιευτήρα Μόρνου, και είναι καθαρά υδρολογική. Τα κριτήρια βελτιστοποίησης συνοψίζονται στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ της ζήτησης νερού από τον ταμιευτήρα και της επιθυμητής απόληψης από αυτόν και στην ελαχιστοποίηση του ελλείμματος, που είναι η απόκλιση της πραγματικής από την επιθυμητή απόληψη. Πρόκειται δηλαδή για κριτήρια που εκφράζονται καθαρά μέσω των απολήψεων από τον ταμιευτήρα. Άρα, το πρόβλημα ανάγεται στην ορθολογική επιλογή μιας στρατηγικής διαχείρισης και προγραμματισμού της απόληψης στόχου από τον ταμιευτήρα, που να μην οδηγεί σε αλόγιστη και αυθαίρετη απόληψη από αυτόν αλλά ούτε και σε μεγάλα ανεξέλεγκτα ελλείματα. Αυτή είναι μια διαδικασία που επαφίεται στην κρίση του αναλυτή, και του δίνει την ελευθερία να αξιολογήσει διαφορετικές υλοποιήσεις, εξετάζοντας λύσεις είτε πιο οικολογικές ή πιο αναπτυξιακές.

Στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, η βέλτιστη λύση αναζητείται μέσα από το μέτωπο Pareto, όπως αυτό προκύπτει από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα είναι ένα σύνολο λύσεων ή ένα μέτωπο βελτίστων. Η τελική επιλογή στρατηγικής διαχείρισης του ταμιευτήρα, και η χάραξη μιας γενικότερης πολιτικής, μπορεί να γίνει εφόσον μελετηθούν όλα τα πιθανά σενάρια ανάλυσης και διερευνηθεί η συμπεριφορά του ταμιευτήρα υπό το πρίσμα διαφορετικών προσεγγίσεων. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, διερευνήθηκαν οι προοπτικές

βελτιστοποίησης της διαχείρισης του ταμιευτήρα Μόρνου για βραχείς χρονικούς ορίζοντες (από 6 μέχρι 36 μήνες) και με δυσμενείς αρχικές συνθήκες (πολύ χαμηλό αρχικό ωφέλιμο απόθεμα, 5% έως 10% της συνολικής ωφέλιμης χωρητικότητας) και για διαφορετικές τιμές ετήσιας ζήτησης νερού. Με τα διαφορετικά σενάρια που αναλύθηκαν δημιουργήθηκε ένα διευρυμένο σύνολο λύσεων για κάθε χρονικό ορίζοντα, και μια ανάλυση της συμπεριφοράς του ταμιευτήρα για διαφορετικές τιμές ζήτησης και αρχικού αποθέματος.

Πιο συγκεκριμένα, η επίδραση του χρονικού ορίζοντα στην βέλτιστη τιμή της απόληψης στόχου διερευνήθηκε μέσα από την προσέγγιση του βασικού σεναρίου, για το οποίο υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των απολήψεων-στόχων σε κάθε χρονικό ορίζοντα. Από τις διαδικασίες βελτιστοποίησης παρατηρήθηκε ότι για μικρό χρονικό ορίζοντα η απόληψη-στόχος είναι αρκετά μεγάλη και προσεγγίζει την τιμή της ζήτησης ($232.116 \times 10^6 \text{ m}^3$ για χρονικό ορίζοντα 6 μηνών και $189.886 \times 10^6 \text{ m}^3$ για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών). Για μεγαλύτερους χρονικούς ορίζοντες η απόληψη στόχος παίρνει μικρότερες τιμές ($116.860 \times 10^6 \text{ m}^3$ για χρονικό ορίζοντα 24 μηνών και $123.021 \times 10^6 \text{ m}^3$ για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών). Από τα αποτελέσματα φαίνεται η ικανότητα του ταμιευτήρα να καλύψει μια παροδική μεγάλη ζήτηση, η οποία όμως δεν μπορεί να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Εξετάστηκαν πάρα πολλά σενάρια, για διαφορετικές τιμές συνολικής ζήτησης και αρχικού ωφέλιμου αποθέματος. Διαπιστώνεται ότι ο πιο καθοριστικός παράγοντας στη διαμόρφωση των μετώπων Pareto, και άρα στην παραγωγή των βέλτιστων λύσεων, είναι η τιμή της ζήτησης. Μικρές μεταβολές στο αρχικό ωφέλιμο απόθεμα δεν επιφέρουν τόσο μεγάλες διαφοροποιήσεις όσο επιφέρουν αντίστοιχες αλλαγές στην τιμή της ζήτησης. Αποδεικνύεται λοιπόν ο ισχυρισμός ότι σε προβλήματα διαχείρισης ταμιευτήρων η τιμή της ζήτησης είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει στο μεγαλύτερο βαθμό τις μελλοντικές δράσεις. Από όλες τις πιθανές καταστάσεις που αναλύθηκαν το χειρότερο σενάριο είναι αυτό κατά το οποίο έχουμε το μικρότερο διαθέσιμο απόθεμα και τη μεγαλύτερη ζήτηση (D7S2), ενώ το πιο ευνοϊκό σενάριο είναι αυτό που έχουμε το μεγαλύτερο διαθέσιμο απόθεμα και τη μικρότερη ζήτηση (D1S1). Αντίστοιχες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και σχετικά με το βασικό σενάριο.

Το γενικότερο πλαίσιο ανάλυσης και περιγραφής διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας του ταμιευτήρα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή προσεγγίζει την πραγματικότητα αλλά δεν ταυτίζεται με αυτήν. Οι όποιες διαφορές οφείλονται αφενός στο γεγονός ότι αγνοήσαμε τις συνεισφορές βροχόπτωσης και εξάτμισης στο πρόβλημα βελτιστοποίησης και κυρίως στο ομολογουμένως μικρό μέγεθος της ιστορικής χρονοσειράς που ενδεχομένως να μην έδωσε καλή πρόβλεψη και καλής ποιότητας συνθετικές χρονοσειρές. Κρίνεται λοιπόν επιτακτική η ανάγκη για δημιουργία περισσότερων μετρητικών σταθμών και συλλογή καλής ποιότητας δεδομένων, ώστε να υφίσταται μια ολοκληρωμένη αποτύπωση της πραγματικότητας και να επιτραπεί η καλύτερη αξιοποίηση των ελλαδικών υδατικών πόρων.

Αναφορές

Στην ελληνική γλώσσα

- [1] Γεωργοπούλου Χ., *Η Τεχνική SPEA2 στην Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση. Εφαρμογή στο Σχεδιασμό Μονάδας Συνδυασμένου Κύκλου με Επιλογή από Εμπορικά Μοντέλα Αεριοστροβίλων*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005.
- [2] Διαλέξεις στα πλαίσια του μαθήματος: «ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ» 9ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών.
- [3] Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, *Ολοκληρωμένο Μεθοδολογικό Πλαίσιο Υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων για την Αξιολόγηση των Επιπτώσεων από την Εισαγωγή Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών στη Βιομηχανία (DAF-BAT)*, 6ο Πακέτο Εργασίας, Παραδοτέο 13, «Εργαλείο Υποστήριξης Αποφάσεων με ενσωμάτωση μαθηματικού μοντέλου»
- [4] Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής Τράπεζας της Ελλάδος, *Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στα Επιφανειακά και Υπόγεια Υδατικά Σώματα του Ελλαδικού Χώρου*, Αθήνα, 2011.
- [5] Εταιρία Ύδρευσης και Αποχέτευσης της Πρωτεύουσας, *Σχέδιο Διαχείρισης του Υδροδοτικού Συστήματος της Αθήνας Υδρολογικό έτος 2008–2009*, Αθήνα 2009.
- [6] Ευστρατιάδης Α. και Κουτσογιάννης Δ., *Κασταλία: Σύστημα Στοχαστικής Προσομοίωσης Υδρολογικών Μεταβλητών, Εκσυγχρονισμός της Εποπτείας και Διαχείρισης του Συστήματος των Υδατικών Πόρων Ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 9, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.
- [7] Ευστρατιάδης Α., Ζερβός Ν., *Βέλτιστη Διαχείριση Συστημάτων Ταμιευτήρων – Εφαρμογή στο Σύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- [8] Ευστρατιάδης Α., Κουτσογιάννης Δ., και Κοζάνης Σ., *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξεληγμένο Υπολογιστικό Σύστημα Οδυσσεύς*, Τεύχος 3, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005.
- [9] Ευστρατιάδης Α., Μαμάσης Ν., *Εκσυγχρονισμός της Εποπτείας και Διαχείρισης του Συστήματος των Υδατικών Πόρων Ύδρευσης της Αθήνας, Τεύχος 17: Υδρομετεωρολογικά Δεδομένα Και Επεξεργασίες*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.

- [10] Ευστρατιάδης Α., *Μη Γραμμικές Μέθοδοι σε Πολυκριτηριακά Προβλήματα Βελτιστοποίησης Υδατικών Πόρων, με Έμφαση στη Βαθμονόμηση Υδρολογικών Μοντέλων*, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2008.
- [11] Καραλής Σ.-Θ., *Τρισδιάστατη Προσομοίωση Ποιότητας Νερού στον Ταμιευτήρα του Μόρνου*, Διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.
- [12] Καραφέρης Γ., *Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της διαχείρισης ταμιευτήρα με ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια- Εφαρμογή στη Λίμνη Πλαστήρα*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009.
- [13] Λαγγούσης Α., *Ανάπτυξη Κυκλοστάσιμων Στοχαστικών Υδρολογικών Μοντέλων με Διατήρηση της Βραχυπρόθεσμης Μνήμης και της Μακροπρόθεσμης Εμμονής*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2003.
- [14] Μαλλιαρός Α., *Διαχείριση Υδατικών Αποθεμάτων Ταμιευτήρων σε Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής – Εφαρμογή στους Ταμιευτήρες Πλαστήρα και Σμοκόβου Θεσσαλίας*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
- [15] Μαμάσης Ν., Ναλμπάντης Ι., Κουτσογιάννης Δ., *Διερεύνηση των υδρολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών Μόρνου και Βοιωτικού Κηφισού-Υλίκης*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Σχολή Πολιτικών μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, .
- [16] Μηνασίδου Κ., *Μεταβολή της Ποιότητας του Νερού κατά την Ταμίευση*, Μεταπτυχιακή εργασία, Θεοφράστειο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Περιβαλλοντική και Οικολογική Μηχανική», Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη 2005.
- [17] Ναλμπάντης Ι., *Μεθοδολογίας Κατάρτησης Υδατικών Ισοζυγίων*, Ερευνητικό έργο «Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας», Φάση Β, Τεύχος 16.
- [18] Ναλμπάντης Ι., *Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.
- [19] Οικονόμου Α., *Αξιολόγηση της Μεθόδου Παραμετροποίησης-Προσομοίωσης-Βελτιστοποίησης στη Διαχείριση Συστημάτων Ταμιευτήρων*, Διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.

- [20] Πανταζής Ι., *Επισκόπηση Μεθόδων επίλυσης του Προβλήματος της Υδροθερμικής Συνεργασίας*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005.
- [21] Ρηγόπουλος Θ., *Διαχείριση Υδατικών Πόρων Υδρολογικής Λεκάνης Ποταμού Σελινόυντα Βόρειας Πελοποννήσου*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009.
- [22] Σταμούλης Μ., *Επίλυση Βέλτιστης Ροής Φορτίου σε ΣΗΕ υπό Περιβαλλοντικούς Περιορισμούς με τη Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009.

Ξενόγλωσσες

- [23] Barnes, F.B., *Storage requirements for a city water supply*, J. Inst. Eng., Aust. 26, pp. 198–200, 1954.
- [24] Beard, L. R., *Use of interrelated records to simulate streamflow*, Proc. A.S.C.E. 91(HY5):13-22, 1965.
- [25] Benson, M. A. & Matalas, N. C., *Synthetic hydrology based on regional statistical parameters*, Wat. Resour. Res. 3 (4), 931-93, 1967.
- [26] Box, G.E.P. and Jenkins, G.M., *Time Series Analysis Forecasting and Control*, San Fransisco: Holden-Day, 1970.
- [27] Bras R.L. and Rodríguez-Iturbe I., *Random Functions and Hydrology*, Dover, New York, 1993.
- [28] Bras, R.L. and Rodriguez-Iturbe, I., *Random Functions in Hydrology*, Addison-Wesley, Reading, MA, 559 p, 1985.
- [29] Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988.
- [30] Coello Coello, C. A., *Recent trends in evolutionary multiobjective optimization*, in: *Evolutionary Multiobjective Optimization: Theoretical Advances and Applications*, A. Abraham, L. Jain and R. Goldberg (editors), 7-32, Springer-Verlag, London, 2005.
- [31] Cohon, J. L., and D. H. Marks, *A review and evaluation of multi-objective programming techniques*, Water Resources Research, 11(2), 208-220, 1975.
- [32] Fiering, M. B., *Alternative indices of resilience*, Water Resources Research, 18, 33-39, 1982.

- [33] Fowler, H. J., C. G. Kilsby, and P. E. O'Connell, Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system, *Water Resources Research*, 39(8), 2003.
- [34] Goldberg, D. E., and K. Deb, *A comparison of selection schemes used in genetic algorithms*, in: *Foundations of Genetic Algorithms*, G. A. Rawlins (editor), 69-93, San Mateo, California, Morgan Kaufman, 1991.
- [35] Grygier, J.C. and Stedinger, J.R., *SPIGOT, A synthetic streamflow generation software package*, Technical description, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY., Version 2.5, 1990.
- [36] Hadjibiros, K., A. Katsiri, A. Andreadakis, D. Koutsoyiannis, A. Stamou, A. Christofides, A. Efstratiadis, and G.-F. Sargentis, *Multi-criteria reservoir water management*, *Global Network for Environmental Science and Technology*, 7(3), 386-394, 2005.
- [37] Hashimoto T, Stedinger Jr and Loucks Dp, *Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance and evaluation*, *Water Resources Research*, 18 (1) 14-20, 1982.
- [38] Holland, J. H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [39] Hurst, H. E., *Long-term strong capacity of reservoirs*, *Transactions of the American society of civil engineers* 116: 770–799, 1951.
- [40] Koutsoyiannis D., *A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series*, *Water Resources Research*, 1519-1434, Athens, 2000.
- [41] Koutsoyiannis D., *Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics*, *Hydrological Sciences Journal*, 3-24, 2003.
- [42] Koutsoyiannis. D., *Optimal Decomposition of Covariance matrices for multivariable Stochastic Models in Hydrology*, *Wat. Resour Res.* 35(4), 1219-1229, 1999.
- [43] Maass A., Hufschmidt M., Dorfman R., Thomas A., Marglen A. and Fair M., *Design of Water-Resource Systems, New Techniques for Relating Economic Objectives Engineering Analysis and Government Planning*, Harvard University Press, Cambridge, 1962.
- [44] Mandelbrot, B. B., *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, New York, 1977.

- [45] Matalas, N.C. & Wallis, J.R., *Generation of synthetic flow sequences, in Systems Approach to Water Management*, A.K. Biswas editor, McGraw Hill, 1976.
- [46] Newsha K. Ajami, George M. Hornberger, David L. Sunding, David N. Yates, and David R. Purkey, *Impacts of Hydrological Uncertainty on Management of Water Resources*, Water Resources Research, 2009.
- [47] Thomas Rodding Kjeldsen & Dan Rosbjerg, *Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems*, Hydrological Sciences Journal, 49(5), 2004.
- [48] Thomas, H.A. and Fiering, M.B., *Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation. In: Design of Water Resources Systems*, (Ed. by A. Maas et al.) Chapter 12. Harvard University Press, Cambridge, 1962.
- [49] Zitzler, E., *Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications*, PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 1999.
- [50] Zitzler, E., K. Deb, and L. Thiele, *Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results*, Evolutionary Computation, 8(2), 173-195, 2000.

Παράρτημα Α: Πίνακες

Πίνακας Α.1: Μηνιαία απορροή ταμειυτήρα Μόρνου (hm³)

Υδρ. Έτος	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μαϊ.	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	Έτος
1980-81	23,7	44,4	78,6	65,4	54,6	48,1	35,6	20,5	14,3	9,6	12,3	10,9	418,1
1981-82	12,8	13,8	100	32,1	22,7	34,2	36,9	31,2	9,2	3,9	11,07	10,7	318,7
1982-83	10,5	20,2	55,9	18,8	19,1	23,1	19,7	12,9	10,9	9,8	6,4	0,9	208,2
1983-84	7,7	22	55,6	35,2	52,8	34,3	31,9	38,8	22,4	1,7	6,3	7,3	316,1
1984-85	5,8	12,7	11	69,6	37,1	41,1	36,9	25,5	12,6	4,8	4,7	5,7	267,5
1985-86	3,7	40,1	25,8	51,6	61,1	38,5	33	22,5	12	12,4	6,6	2,3	309,7
1986-87	7,9	10,7	13,7	39,7	34,1	46,4	40,1	23,2	15,7	9,6	1,9	3,9	246,9
1987-88	6,6	13,4	28,5	17,2	37,1	42	26,9	16	6,8	4,4	2,9	3,2	205
1988-89	2,7	45,7	38,1	10	20,5	39,5	24,6	17,8	7,2	3,3	0,4	0,7	210,5
1989-90	8,3	10,4	18,6	8,3	0,9	6,6	9,9	2,4	3,7	4	5,1	3,7	82
1990-91	4,5	18,9	95,2	23	29,2	32,6	35,9	30	12,4	7,6	3,8	3	296,1
1991-92	0	17,2	2,9	4,5	5	7,3	18,4	15,3	11	4,6	0,5	4,8	91,5
1992-93	1,2	7	9,8	5,1	6,6	27,7	21,1	22,3	6,9	3,8	0	2,3	113,6
1993-94	1,8	9,5	26,7	30,2	31,2	20,2	30,3	20,8	7	4,1	2,5	1,4	185,5
1994-95	8,1	24,6	20,5	43,4	32,9	35,5	30,3	7,5	3,7	3,5	0	0,7	210,6
1995-96	1,4	9,9	48,9	12,5	50,1	40,5	24,7	17	7,7	5,7	3,8	2,9	225,2
1996-97	6,7	37,9	42,4	73,8	10,7	10,7	14	15	4,4	4,8	4,5	4,9	229,6
1997-98	6,1	16	44,6	15	24,3	10,7	17,3	15,6	7,4	4	3,8	5,5	170,4
1998-99	4,6	26,1	31,2	15,8	48,1	52,9	32,7	18,4	12,5	8,6	5,1	4,2	260,2
1999-00	13,3	62,9	61,5	34,6	54,8	29,5	26,1	14	7,4	6,1	5,2	0,2	315,4
2000-01	6,4	8	11,8	11,7	21,7	19,2	25,2	16,8	10,8	10,9	7,9	9,9	160,2
Μέση τιμή	6,847619	22,45	39,11	29,40	31,17	30,50	27,21	19,21	9,81	6,06	4,51	4,24	230,52
Τοπ. απόκ.	5,260572	15,20	27,60	21,30	17,74	13,79	8,27	8,00	4,45	2,96	3,29	3,20	83,12

Πίνακας Α.2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των κριτηρίων f1 και f2 (χρονικός οριζοντας 6 μηνών)

D1S1 6		D2S1 6		D3S1 6		D4S1 6		D5S1 6		D6S1 6		D7S1 6	
f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2
0.01	2.11	0.81	13.39	5.77	11.98	5.06	16.24	13.97	10.88	11.95	16.45	19.78	12.17
0.00	2.14	2.11	12.09	0.36	17.39	1.65	19.68	7.57	17.35	16.36	12.04	7.83	25.47
0.00	2.14	1.08	13.12	0.54	17.21	3.40	17.95	1.48	23.86	18.34	10.06	3.67	31.70
0.00	2.15	2.09	12.11	5.57	12.18	4.05	17.25	9.34	15.51	16.51	11.89	6.74	26.27
0.02	2.09	1.34	12.86	5.02	12.73	8.40	12.90	9.97	14.88	9.24	19.16	8.30	24.93
0.04	1.96	0.08	14.12	5.43	12.32	6.85	14.45	11.24	13.61	13.93	14.47	17.01	14.94
0.01	2.12	2.52	11.68	4.46	13.29	6.24	15.06	11.16	13.69	14.41	13.99	19.52	12.43
0.00	2.15	0.68	13.52	1.28	16.50	10.03	11.27	2.56	23.23	7.86	20.54	19.05	12.90
0.00	2.14	2.97	8.67	0.79	16.96	8.90	12.40	13.35	11.50	16.78	11.62	19.85	12.10
0.06	1.86	3.62	13.58	6.58	11.17	11.68	3.69	13.09	11.76	17.43	10.97	19.96	11.99
0.01	2.10	1.55	12.65	3.96	13.79	11.97	0.00	10.57	14.28	16.99	11.41	21.36	10.59
0.49	0.00	0.49	13.71	2.98	14.77	10.28	11.02	18.94	14.19	14.21	21.77	10.18	
0.03	2.02	1.59	12.61	4.26	13.49	9.14	12.16	12.96	11.89	14.81	13.59	17.35	14.60
0.05	1.90	0.94	13.26	0.68	17.07	5.91	15.39	12.77	12.08	18.97	8.96	22.51	7.14
0.26	1.04	1.22	12.98	2.14	15.61	7.19	14.11	7.45	17.40	4.13	27.28	20.47	11.48
0.10	1.72	0.72	13.48	1.81	15.94	7.59	13.71	12.29	12.57	13.71	14.69	20.61	11.39
0.30	0.94	3.87	3.99	0.18	17.57	6.21	15.15	11.09	13.76	17.33	11.07	20.75	11.20
0.10	1.84	1.19	13.01	1.65	16.10	6.33	14.97	10.15	14.70	17.16	11.24	20.95	11.00
0.21	1.28	0.27	13.93	0.30	17.45	8.72	12.58	9.50	15.44	12.57	15.83	23.67	0.15
0.02	2.09	0.39	13.81	6.08	11.67	10.38	10.92	13.88	10.97	14.06	14.34	18.45	13.64
0.00	2.14	0.79	13.41	4.19	13.56	9.32	11.98	7.19	17.66	17.49	10.91	9.59	22.57
0.02	2.05	0.99	13.21	4.39	13.56	3.96	17.34	7.08	17.77	15.10	13.30	9.21	22.78
0.01	2.12	0.04	14.19	2.77	14.98	6.05	14.65	14.69	14.16	14.50	12.67	13.36	18.59
0.00	2.15	2.24	11.98	3.67	14.08	7.66	13.64	14.46	10.39	8.89	19.79	20.39	11.56
0.10	1.77	1.51	12.69	1.13	16.62	3.61	17.69	12.60	12.25	16.92	11.48	19.35	12.60
0.01	2.13	2.42	11.78	5.83	11.92	7.94	13.56	10.81	14.04	13.02	15.47	20.88	11.07
0.04	2.02	2.39	11.81	6.94	9.25	7.42	13.88	13.43	11.42	18.24	10.16	13.33	18.99
0.23	1.11	3.09	8.59	5.13	12.62	6.41	14.89	15.46	3.30	11.39	17.01	21.90	7.77
0.08	1.78	2.50	11.62	5.22	15.43	8.66	12.64	13.75	11.10	16.59	11.81	11.89	20.06
0.00	2.14	2.47	11.49	2.47	15.28	8.46	12.84	14.52	10.33	4.80	26.52	21.83	10.08
0.01	2.12	2.01	12.19	4.66	13.09	2.56	18.79	10.51	14.34	5.66	24.65	18.29	13.66
0.07	1.86	0.12	14.08	6.42	11.33	3.13	18.52	14.41	10.44	16.43	11.97	19.10	12.85
0.56	0.08	0.33	13.87	2.71	15.04	4.24	17.06	12.43	12.42	19.95	0.00	9.89	22.06
0.02	2.09	0.96	13.24	0.73	17.02	7.26	14.04	12.67	12.18	16.83	11.55	18.97	13.11
0.01	2.12	2.26	11.44	1.57	16.18	8.33	12.97	13.63	11.22	12.98	15.56	12.70	19.25
0.01	2.09	2.14	12.06	5.51	12.24	9.43	11.87	10.64	14.24	15.64	12.76	14.05	18.36
0.02	2.08	2.20	12.00	0.24	17.53	4.98	16.32	9.90	14.95	7.60	21.24	21.03	10.92
0.01	2.11	1.31	12.89	1.42	16.33	9.02	12.28	7.84	17.01	17.08	11.33	21.06	10.89
0.02	2.09	1.73	12.47	4.13	13.62	8.13	13.17	2.81	22.78	9.95	18.68	21.55	10.40
0.00	2.15	1.16	13.04	3.12	14.63	10.63	9.40	8.70	16.15	4.34	27.20	22.62	3.58
0.01	2.11	0.30	13.90	1.34	16.41	5.12	16.18	5.79	19.89	16.04	12.36	11.82	20.91
0.15	1.56	2.66	11.54	7.26	4.10	8.06	13.24	8.41	16.65	11.69	16.72	5.63	27.67
0.59	0.00	1.42	12.78	5.33	12.42	8.26	13.04	11.72	13.13	15.70	12.70	16.83	15.41
0.01	2.12	1.65	12.55	5.08	12.67	9.78	11.52	12.54	12.31	15.41	12.99	12.78	19.17
0.01	2.13	1.46	12.74	0.60	17.15	4.14	17.16	12.19	12.66	17.96	10.44	8.26	25.33
0.58	0.06	0.84	13.36	1.05	16.70	8.96	12.34	13.02	11.83	12.50	16.04	17.15	14.80
0.04	2.01	0.36	13.84	6.66	11.09	10.12	11.18	9.57	15.28	13.32	15.08	7.81	25.83
0.28	0.98	1.12	13.08	4.94	12.81	9.63	11.67	11.56	13.29	17.72	10.68	12.34	19.81
0.02	2.08	1.89	12.31	5.64	12.11	4.60	16.70	13.28	10.57	10.51	18.02	22.60	6.05
0.08	1.85	2.36	11.84	3.59	14.16	1.36	20.20	6.15	19.87	17.64	10.76	10.68	21.27
0.03	2.03	4.53	0.37	3.46	14.29	9.26	12.04	11.41	13.44	18.35	9.06	22.57	6.64
0.48	0.19	1.29	12.91	3.78	13.97	9.94	11.36	6.89	17.96	8.92	19.48	19.71	12.24
0.04	1.99	3.73	5.16	2.54	15.21	3.70	17.60	14.03	10.82	15.00	13.40	19.01	12.94
0.02	2.07	1.03	13.17	2.64	15.11	5.48	15.82	15.35	5.03	18.09	10.31	20.24	11.71
0.01	2.13	0.87	13.33	5.70	12.05	2.22	19.08	15.83	0.20	16.18	12.22	18.50	13.45
0.00	2.15	1.76	12.44	2.82	14.93	10.62	10.68	7.34	17.51	15.94	12.46	20.18	11.77
0.30	0.72	3.59	6.16	8.47	0.00	4.56	16.84	13.16	11.69	12.37	16.13	14.41	17.54
0.01	2.13	2.55	11.65	3.90	13.85	4.65	16.65	12.36	12.49	13.25	15.20	8.39	24.74
0.01	2.12	2.75	11.45	4.58	13.17	0.93	21.25	14.80	6.18	12.14	16.26	15.81	16.73
0.01	2.11	1.97	12.23	7.48	3.24	5.32	15.98	7.69	17.33	14.71	13.69	19.90	12.05
0.00	2.14	2.45	11.75	3.23	14.52	9.68	11.62	9.01	15.84	10.20	13.20	16.34	15.83
0.05	1.95	2.78	11.42	2.90	14.85	7.13	14.17	11.81	13.08	12.89	15.62	21.19	10.76
0.01	2.11	1.97	13.45	1.90	15.85	9.07	12.23	16.77	0.00	14.48	13.92	20.01	11.94
0.02	2.10	1.69	12.51	0.97	16.78	5.21	16.09	11.96	16.25	12.15	9.81	22.32	
0.33	0.46	0.90	13.30	6.36	11.39	10.53	10.77	12.83	12.02	16.67	11.73	21.70	10.25
0.12	1.70	2.49	11.71	4.33	13.42	5.40	15.90	12.45	15.95	19.74	1.26	14.22	17.75
0.00	2.14	2.78	8.75	6.30	11.45	5.62	15.68	14.26	10.59	14.91	13.49	8.80	24.70
0.01	2.11	2.33	11.87	2.39	15.36	5.77	15.53	3.01	21.89	12.51	15.91	22.29	7.27
0.00	2.13	1.92	12.28	5.99	11.76	6.57	14.73	10.07	14.78	13.64	14.76	19.39	12.56
0.08	1.86	1.25	12.95	4.79	12.96	9.51	11.79	4.41	21.07	14.00	14.40	20.30	11.65
0.39	0.37	2.30	11.90	0.49	17.26	1.04	20.26	3.64	21.30	11.46	16.94	11.84	20.33
0.03	2.05	3.83	4.30	5.90	11.85	4.45	16.87	14.61	10.24	6.95	22.02	21.83	10.14
0.21	1.23	0.15	14.05	8.01	2.20	9.20	12.10	10.72	14.13	4.58	27.16	19.17	12.78
0.03	2.04	4.59	0.08	10.25	16.25	8.81	12.49	11.32	13.53	14.56	13.84	10.24	21.71
0.12	1.58	3.88	3.80	2.27	15.48	11.20	7.07	14.79	10.06	17.55	10.85	21.29	10.66
0.00	2.14	3.55	6.71	1.73	18.02	6.49	14.81	9.09	15.76	12.64	15.76	21.63	10.32
0.01	2.13	4.42	0.48	6.51	11.28	8.57	12.73	11.63	13.22	15.76	12.64	19.60	12.35
0.01	2.11	0.56	13.64	7.85	2.43	7.79	13.51	5.09	20.16	13.11	15.29	18.57	13.38
0.04	1.99	0.01	14.19	3.84	13.91	2.81	18.53	11.98	12.87	19.38	2.90	16.47	15.63
0.15	1.47	0.05	14.15	6.96	7.53	6.72	14.58	14.14	10.71	11.01	17.39	12.57	19.38
0.21	1.19	1.63	12.57	3.28	14.47	7.52	13.78	14.20	10.65	13.47	14.93	16.84	15.11
0.00	2.14	1.82	12.38	4.72	13.03	10.45	10.85	8.46	16.39	14.63	13.77	17.88	14.07
0.01	2.13	3.96	1.36	5.22	12.53	7.05	14.25	14.35	10.50	17.25	11.15	11.07	20.92
0.42	0.19	2.62	11.58	6.24	11.51	6.84	14.53	3.61	21.70	15.29	13.11	18.04	13.91
0.01	2.11	0.23	13.97	3.50	14.25	4.89	16.42	10.43	14.42	15.35	13.05	23.80	0.00
0.17	1.30	0.65	13.55	8.15	0.82	6.66	14.64	11.90	12.95	11.33	17.22	17.81	14.14
0.02	2.08	0.45	13.75	3.06	14.69	3.16	18.14	13.81	11.04				

Πίνακας Α.3: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των κριτηρίων f1 και f2 (χρονικός ορίζοντας 6 μηνών)

D1S2 6		D2S2 6		D3S2 6		D4S2 6		D5S2 6		D6S2 6		D7S2 6	
f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2
2.53	8.32	5.97	8.33	12.76	4.99	8.94	13.36	13.17	12.73	10.76	19.70	21.85	12.16
0.82	9.84	8.18	6.02	7.15	11.20	8.53	13.73	15.36	11.05	18.96	11.19	15.33	17.97
1.70	8.97	9.17	5.03	10.48	7.34	16.48	4.86	20.11	5.34	10.85	19.66	12.74	20.88
2.02	8.63	8.25	5.95	11.21	6.54	14.40	6.90	19.04	5.81	14.39	15.42	27.40	4.55
4.20	6.45	4.62	9.58	11.79	5.96	12.94	8.59	7.74	18.16	24.52	3.88	24.39	7.97
3.43	7.23	6.96	7.24	9.73	8.02	16.86	4.44	14.32	11.58	15.13	14.72	16.52	17.67
3.12	7.53	7.21	7.00	11.07	6.75	10.58	11.73	18.83	6.20	7.75	23.31	12.09	22.40
5.02	5.63	3.93	10.27	11.08	6.70	16.45	4.85	20.32	4.53	8.59	21.85	3.94	32.52
4.45	6.20	8.39	5.81	11.15	6.60	8.23	14.01	21.30	1.44	6.88	25.33	28.30	1.14
5.84	1.84	8.71	5.49	11.70	6.05	7.12	15.28	10.90	15.15	21.81	7.22	10.17	24.69
5.99	0.00	8.50	5.70	9.85	7.90	5.69	16.76	5.51	22.48	24.74	1.67	23.95	9.43
5.14	5.51	7.10	7.10	9.36	8.40	15.50	5.80	17.98	7.56	13.40	16.27	28.16	4.18
4.57	6.08	7.41	6.79	10.63	7.12	6.42	15.78	17.44	8.49	10.11	19.95	19.05	14.56
2.95	7.70	9.49	4.48	7.78	9.97	13.38	8.18	20.12	4.73	21.16	7.44	26.62	5.33
3.60	7.05	2.07	13.64	11.08	6.67	6.64	15.56	13.90	12.11	10.95	19.39	9.69	25.30
3.80	6.85	6.86	7.34	6.42	12.37	6.42	15.78	20.76	1.35	9.56	20.25	4.54	30.36
3.10	7.57	8.66	5.54	8.76	8.99	15.39	6.01	8.10	17.80	23.98	2.68	7.32	27.03
3.16	7.49	8.58	5.62	4.08	14.52	16.52	4.81	17.21	8.85	17.40	12.52	4.09	30.92
4.36	6.29	6.29	7.91	6.92	11.34	17.31	3.11	14.14	12.01	13.50	17.20	3.47	30.61
5.19	5.46	7.03	7.17	13.66	1.13	5.24	17.36	15.62	10.56	19.96	9.85	28.12	3.20
4.66	5.99	8.74	5.46	12.23	5.52	14.27	7.50	19.15	5.70	8.97	21.12	6.84	28.58
1.98	8.67	7.55	6.65	8.68	9.07	9.29	13.16	15.22	11.08	18.04	12.08	16.61	16.69
3.03	7.62	7.75	6.45	7.77	10.08	14.36	6.94	20.04	5.41	9.49	20.45	5.19	29.41
3.83	6.82	4.44	9.89	10.76	7.00	13.67	7.81	6.34	20.17	11.34	19.17	23.93	9.57
1.80	8.85	8.46	5.74	3.64	14.90	5.17	20.65	18.29	7.07	22.03	7.34	26.80	5.15
3.97	6.68	6.51	7.73	12.54	5.29	8.59	13.63	21.39	1.04	25.11	0.71	4.58	29.12
3.71	6.94	9.12	5.08	9.39	8.36	15.22	6.08	10.82	15.20	19.22	10.90	14.73	19.60
3.20	7.45	5.69	8.51	3.21	15.82	4.71	17.49	8.03	17.87	15.06	14.80	9.34	24.92
4.33	6.32	8.29	5.91	11.38	6.57	7.50	14.70	11.37	14.53	24.32	4.08	7.75	26.84
4.23	6.42	2.40	13.26	7.74	10.27	5.01	20.77	17.90	2.88	7.84	24.99	11.51	23.44
1.28	9.39	2.89	12.33	12.33	9.42	13.33	6.87	16.89	10.68	19.75	11.42	21.59	21.59
1.56	9.26	8.22	5.98	13.05	3.41	6.96	15.34	13.32	13.72	18.72	11.64	27.75	4.45
2.12	8.53	9.97	0.00	10.92	6.83	6.07	16.24	11.70	14.39	13.02	17.05	28.20	3.82
3.63	7.02	8.42	5.78	11.35	6.40	11.96	12.30	7.70	18.20	15.15	18.20	10.10	4.35
4.16	6.49	6.49	7.78	6.59	12.30	17.29	0.92	6.25	21.45	16.39	13.21	25.28	7.09
4.71	5.94	7.82	6.38	11.62	6.13	10.32	11.92	6.28	20.47	15.10	14.98	5.12	30.21
2.49	8.16	3.80	10.62	12.58	5.17	14.20	7.59	6.33	21.10	22.36	6.22	3.87	30.39
4.51	6.14	8.54	5.67	8.23	9.66	6.41	15.79	9.48	16.63	15.78	13.88	22.43	11.77
4.06	6.59	4.98	9.34	12.89	4.86	12.58	8.91	10.52	15.67	13.85	15.75	19.90	13.40
5.31	4.70	2.37	13.60	11.53	6.22	11.63	10.67	21.41	0.45	9.98	20.04	15.50	17.80
2.56	8.09	8.02	6.18	13.70	0.00	6.94	15.41	12.15	13.75	16.48	13.12	13.69	20.26
4.03	6.62	5.84	8.36	4.67	13.91	7.93	14.27	15.40	10.67	21.63	7.44	26.20	6.34
4.13	6.52	7.85	6.35	10.73	7.02	8.34	13.91	8.87	17.32	20.06	9.84	2.74	33.23
4.89	5.76	7.71	6.49	5.14	13.67	6.18	16.06	20.01	5.61	23.07	5.36	6.48	28.65
2.07	8.58	8.98	5.22	11.84	5.91	15.82	5.48	15.06	11.08	24.46	3.94	3.80	33.08
4.48	6.17	6.25	8.02	7.46	10.30	10.83	11.37	17.04	8.86	16.21	13.95	6.75	28.22
5.06	5.59	6.66	7.54	12.61	5.03	8.05	14.15	8.02	18.11	9.78	20.30	11.59	23.96
4.81	5.84	8.86	5.34	10.01	7.74	8.93	13.38	19.64	5.62	19.42	10.39	23.74	10.94
2.30	8.35	5.25	9.01	8.61	9.01	8.81	13.39	20.11	3.34	9.15	20.96	15.31	18.41
0.68	10.10	8.82	5.38	6.25	12.59	15.02	6.51	12.50	13.40	23.05	6.35	24.25	7.81
4.63	6.02	9.17	4.53	9.30	8.45	15.96	5.34	19.15	5.70	23.91	4.49	11.64	22.87
4.97	5.68	4.46	9.74	12.07	5.68	17.14	4.16	20.12	4.75	12.76	17.55	18.25	16.06
1.85	8.80	7.50	6.70	13.60	1.39	13.53	7.96	7.88	18.02	11.52	18.91	15.15	18.48
2.74	9.05	9.05	5.15	11.58	6.17	15.86	5.44	15.62	9.54	23.70	4.14	23.31	11.11
1.11	9.54	8.09	6.11	13.27	2.99	16.19	5.11	14.99	11.11	13.05	16.55	8.11	26.13
5.31	5.34	7.97	6.23	12.55	5.20	18.10	10.00	5.99	22.25	14.54	15.31	21.63	12.21
2.28	8.42	6.13	8.07	10.80	6.95	9.96	12.25	20.82	2.34	25.34	0.00	11.63	22.27
2.33	8.32	6.62	7.60	8.95	8.83	5.62	16.82	18.80	6.67	22.69	6.26	13.05	20.75
0.47	10.62	6.07	8.13	10.67	7.09	8.97	13.24	9.55	16.35	24.87	0.82	28.87	0.00
2.66	7.99	7.35	6.85	6.09	10.69	11.63	14.28	11.64	14.40	24.40	4.00	19.20	14.00
4.84	5.81	7.60	6.60	7.97	9.78	13.03	8.34	17.74	7.92	25.51	0.00	3.11	32.22
3.56	7.09	6.44	7.81	11.47	6.28	16.72	4.58	5.71	20.19	7.85	23.29	2.49	32.10
4.54	6.11	7.24	6.96	4.54	13.96	9.44	12.89	11.16	14.82	16.26	13.55	7.07	28.33
2.60	8.05	8.13	6.07	5.08	13.86	15.85	5.45	11.37	16.63	17.32	12.86	28.19	3.92
5.27	5.38	8.33	5.87	5.23	13.27	16.25	5.05	6.27	20.94	18.59	11.70	28.55	0.07
2.70	7.95	9.87	0.63	11.30	6.45	17.38	0.00	21.01	1.84	7.48	22.75	9.20	25.54
2.81	7.84	7.45	6.75	8.40	9.35	11.53	11.02	10.22	16.03	19.34	10.64	18.55	14.98
2.88	7.77	6.25	7.95	4.41	14.09	10.09	12.11	10.94	15.06	24.32	4.08	26.81	5.14
3.29	7.36	6.82	7.38	3.93	14.61	7.86	14.47	13.37	12.53	16.28	13.22	26.46	5.86
4.75	5.90	7.00	9.91	7.84	9.97	12.23	16.94	8.96	19.93	9.56	17.81	16.40	16.40
0.52	10.13	5.73	8.47	11.74	6.01	16.83	4.47	20.19	4.66	20.53	8.18	28.23	1.41
2.23	8.44	3.47	11.01	8.59	9.33	16.33	4.97	11.83	14.07	24.85	0.44	24.01	8.79
4.60	6.05	2.29	13.58	12.07	5.79	9.59	12.73	12.50	13.40	11.67	18.00	8.00	26.99
4.40	6.25	7.28	6.92	9.05	8.70	11.68	10.16	7.67	18.23	23.66	5.17	18.58	14.95
5.60	3.53	8.78	5.42	11.88	5.87	15.11	6.37	14.97	11.39	12.68	17.27	12.61	21.49
3.24	7.41	6.32	7.88	7.38	10.67	12.13	9.17	14.42	11.56	11.27	19.46	25.51	6.44
4.28	6.37	7.88	6.32	12.44	5.31	8.38	13.82	8.02	17.88	14.78	15.12	11.07	24.39
3.89	6.76	6.56	7.64	4.31	14.23	7.58	14.62	21.45	0.00	24.71	2.62	2.82	30.85
1.41	9.45	9.69	1.45	11.50	6.25	8.78	13.62	9.32	17.10	23.18	6.27	19.63	13.78
3.36	7.29	5.50	8.70	12.38	5.37	11.55	10.88	5.45	21.45	8.61	21.22	21.87	11.83
3.76	6.89	6.74	7.46	12.26	5.49	9.71	12.49	7.60	18.37	6.59	25.40	24.76	7.54
5.23	5.42	7.31	6.89	12.92	3.56	15.90	5.40	7.25	19.54	24.43	3.97	25.19	7.01
3.52	7.13	8.62	5.58	10.39	7.36	12.51	9.15	18.42	6.43	12.45	17.63	20.60	12.80
3.42	7.27	7.64	6.56	12.81	4.94	10.67	11.69	7.48	18.75	19.10	11.01	23.01	11.63
2.45	8.21	7.68	6.52	6.98	11.33	9.82	12.38	17.50	8.40	23.09	5.31	25.97	6.49
3.33	7.32	5.67	8.61	10.25	7.63	5.23	16.97	20.51	3.35	14.53	15.71	28.47	0.00
1.58	9.07	8.94	5.26	13.27	1.68	11.32	11.19	18.83	6.22	8.46	21.25	27.77	4.18
1.89	8.76	8.91	5.29	11.43	6.36	13.53	7.89	9.00	17.23				

Πίνακας Α.4: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των κριτηρίων f1 και f2 (χρονικός ορίζοντας 12 μηνών)

	D1S1 12		D2S1 12		D3S1 12		D4S1 12		D5S1 12		D6S1 12		D7S1 12	
f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	
7.00	6.05	11.37	9.33	14.46	19.79	21.34	4.91	12.52	35.43	32.84	21.96	38.70	22.95	
4.97	15.58	8.46	18.94	9.38	24.87	11.98	29.12	16.66	31.29	23.37	31.43	17.72	43.93	
5.59	12.01	5.32	26.05	14.53	19.72	18.98	22.12	22.68	25.27	30.42	24.38	23.24	38.41	
5.14	15.98	12.02	5.43	12.93	21.32	10.35	30.93	13.61	34.34	12.87	42.53	37.47	24.18	
6.25	7.26	9.24	18.16	14.40	19.85	21.25	7.24	14.75	33.20	29.20	25.60	30.79	30.86	
5.32	15.50	8.74	18.66	14.33	19.92	12.79	28.31	21.03	26.92	25.47	29.33	38.31	23.34	
7.20	5.87	7.86	19.54	11.64	22.61	9.44	32.19	19.33	28.02	24.32	30.48	23.86	37.79	
7.28	5.38	9.72	17.68	9.79	24.46	24.30	0.00	16.81	31.14	25.11	29.69	34.24	27.41	
7.91	0.99	9.15	18.25	12.72	21.53	17.47	23.63	15.21	32.74	22.11	32.69	34.50	27.15	
7.63	1.45	7.36	20.04	11.30	22.95	13.42	27.68	14.04	33.91	31.85	22.95	15.85	46.74	
8.10	0.00	8.42	18.98	8.32	26.03	11.26	29.84	14.90	33.05	27.41	27.39	33.22	28.43	
5.30	15.35	10.12	17.28	14.54	19.08	9.06	32.60	11.28	36.67	24.12	30.68	32.48	29.17	
5.32	15.40	9.31	18.09	10.40	23.85	10.70	30.40	14.62	33.33	17.35	37.45	28.04	33.61	
5.69	12.30	9.42	17.98	8.44	25.81	19.19	21.91	23.36	24.59	26.55	28.25	26.17	35.48	
7.22	5.83	8.05	19.35	11.35	22.90	17.81	23.32	16.93	31.02	16.42	38.38	55.32	6.33	
7.48	3.65	10.09	17.31	16.81	0.00	10.79	30.31	18.11	29.84	20.15	34.65	35.67	25.98	
7.93	0.73	7.51	19.89	13.72	20.53	15.83	25.27	27.31	5.35	15.13	39.92	26.97	34.68	
8.00	0.14	8.23	19.17	13.12	21.13	27.96	23.07	24.88	25.87	28.93	31.53	30.12		
4.96	15.75	11.41	7.82	13.05	21.20	18.79	22.31	15.81	32.14	12.96	41.84	29.79	31.86	
7.72	1.40	10.20	17.20	14.78	18.18	16.17	24.93	22.29	25.66	24.93	29.87	32.15	29.50	
5.12	15.85	7.20	20.20	11.96	22.29	14.69	26.41	23.93	24.02	23.12	31.68	35.04	26.61	
7.08	5.97	8.09	19.31	8.00	26.28	19.40	21.70	12.37	35.58	29.36	25.44	38.01	23.64	
6.17	8.30	7.89	19.51	16.34	0.31	12.42	28.68	20.68	27.27	22.31	32.49	32.29	29.36	
5.65	13.32	9.83	17.57	7.77	26.48	20.32	20.78	13.85	34.10	18.54	36.26	27.61	34.04	
5.38	0.00	8.57	18.83	10.73	23.52	20.18	20.92	22.41	25.54	15.91	38.89	39.23	22.42	
6.82	6.23	9.57	17.83	10.67	23.58	15.21	25.89	20.41	27.54	27.00	27.80	23.54	38.11	
7.39	3.08	7.45	19.95	11.10	23.15	15.48	25.62	20.56	27.39	32.05	22.75	38.91	22.74	
7.52	1.62	9.87	17.53	15.27	12.19	17.93	23.17	21.62	26.33	27.19	27.61	29.92	31.73	
4.73	17.14	9.06	18.34	10.18	24.07	17.09	24.01	24.07	23.88	24.53	30.27	17.44	44.61	
7.12	5.93	8.88	18.52	14.22	20.03	14.57	26.53	17.87	30.08	23.88	30.92	18.23	43.42	
6.15	8.26	9.27	18.13	12.32	21.93	16.86	24.24	20.73	27.22	21.91	32.89	36.67	24.98	
5.38	15.30	9.19	18.21	12.08	22.17	16.35	24.75	12.19	35.76	26.13	28.67	23.73	37.92	
6.00	8.91	10.17	17.23	11.16	23.09	19.64	21.46	19.79	28.16	27.63	27.15	35.53	26.12	
6.75	6.75	10.44	17.16	9.46	24.70	13.30	27.89	15.05	33.30	16.84	37.96	39.84	9.77	
5.97	8.95	8.27	19.13	9.71	24.54	16.25	24.85	18.26	29.69	15.59	39.21	26.31	35.34	
6.61	6.88	8.35	19.05	14.02	20.23	18.70	22.40	19.65	28.30	30.11	24.69	34.62	27.03	
7.28	5.77	8.98	18.42	11.23	23.02	18.40	22.70	18.68	29.27	18.75	36.05	19.15	42.50	
7.71	1.23	8.53	18.87	14.14	20.11	10.16	31.00	16.36	31.59	22.57	32.23	28.32	33.33	
5.64	13.01	7.30	20.10	8.80	25.45	16.78	24.32	10.90	37.65	31.37	23.43	20.87	40.78	
4.72	18.54	8.19	19.21	12.50	21.75	14.89	26.21	19.11	28.84	33.02	21.78	26.83	34.82	
6.84	6.21	6.62	20.78	11.77	22.48	14.11	26.99	27.63	0.00	28.68	26.12	36.79	24.86	
5.41	14.27	9.01	18.39	11.84	22.41	14.32	26.78	20.10	27.85	18.31	36.49	28.88	32.77	
6.89	6.16	7.25	20.15	10.28	23.97	20.07	21.03	14.48	33.47	15.18	39.67	37.23	24.42	
7.08	5.33	7.54	19.86	9.25	25.00	14.45	26.65	14.33	33.62	25.29	29.51	29.05	32.60	
5.37	14.12	8.61	18.79	11.51	22.74	10.99	30.11	24.64	14.59	31.64	23.16	39.74	21.91	
6.27	7.94	5.79	21.83	9.87	24.38	20.89	10.08	16.48	31.47	28.36	26.44	34.05	27.60	
4.59	15.96	7.67	19.73	13.51	20.74	21.25	6.91	11.63	36.32	30.28	24.52	32.87	28.78	
7.23	5.82	7.71	19.69	15.66	10.23	13.80	27.30	18.82	29.13	13.72	41.73	25.71	35.94	
6.98	6.19	8.77	18.63	7.41	26.87	17.28	23.82	27.18	5.86	17.57	37.23	29.67	32.03	
7.56	2.91	8.94	18.46	11.90	22.35	14.78	26.32	21.96	25.99	23.63	31.17	33.60	28.05	
6.42	7.31	12.00	6.50	15.92	6.82	19.94	21.16	16.11	31.84	21.49	33.31	30.26	31.39	
7.90	0.87	9.79	17.61	10.97	23.28	15.30	25.80	17.27	30.68	34.91	9.39	22.93	38.72	
6.98	6.07	8.82	18.57	8.39	25.86	12.91	28.19	17.40	30.55	29.73	25.07	27.43	34.22	
6.77	6.39	9.06	26.79	14.28	19.97	17.00	24.10	24.54	23.41	21.70	33.10	19.65	42.08	
7.04	6.03	6.88	20.52	11.03	23.22	15.38	25.72	12.63	35.32	19.18	35.62	22.58	39.07	
6.20	8.22	9.36	18.04	7.01	28.34	10.14	31.19	12.99	35.02	28.84	25.96	22.05	39.68	
5.76	10.02	8.65	18.75	13.30	20.95	18.87	22.23	10.96	36.99	29.00	25.80	52.22	9.43	
7.04	6.01	6.67	20.73	13.95	20.30	15.12	25.98	17.07	30.88	26.78	28.02	31.04	30.61	
4.94	17.40	9.45	17.95	9.55	24.70	17.18	23.92	24.22	23.73	15.39	39.41	36.49	25.16	
8.01	0.00	8.00	19.40	11.70	22.55	16.45	24.65	11.82	36.13	18.06	36.74	22.26	39.39	
7.11	5.94	7.82	19.58	12.02	22.23	14.00	27.10	23.23	24.72	19.80	35.00	30.08	31.57	
6.32	7.44	8.50	18.90	7.15	28.21	12.30	28.80	15.96	31.99	22.80	32.00	26.60	35.05	
7.35	3.53	10.67	9.85	9.63	23.63	18.38	22.83	24.88	23.55	19.44	35.36	33.25	30.36	
6.68	6.37	9.51	17.89	12.44	21.81	11.47	29.63	19.50	28.45	16.62	38.18	29.32	32.33	
5.83	11.82	8.93	21.47	12.65	21.60	11.67	29.43	26.87	7.02	20.54	34.26	25.23	36.42	
6.01	8.47	7.13	20.27	8.63	25.78	13.03	28.07	21.22	26.73	28.07	26.73	21.16	40.49	
7.29	4.85	9.12	18.28	14.79	14.60	20.37	10.46	10.27	37.68	37.49	0.00	20.05	41.69	
6.25	8.13	6.75	20.65	13.18	21.07	11.17	29.93	14.18	33.77	28.53	26.27	24.55	37.11	
6.58	6.47	7.95	19.45	8.77	25.58	15.95	25.15	16.25	31.70	27.87	26.93	21.42	40.23	
5.21	15.34	8.39	19.01	7.59	26.77	18.03	23.07	23.50	24.45	20.95	33.85	20.64	41.01	
5.24	14.37	9.99	17.41	9.94	24.31	15.06	23.54	12.01	35.94	34.04	20.76	16.06	46.65	
4.50	16.05	12.75	0.00	10.62	23.63	13.52	27.58	7.83	40.12	17.79	37.01	32.00	29.65	
7.68	2.40	7.02	20.38	13.46	20.79	17.68	23.42	13.12	34.83	33.30	21.50	25.96	35.69	
4.97	16.82	9.96	17.44	12.87	21.38	13.62	27.48	15.52	32.43	33.90	21.00	28.48	33.17	
5.27	15.58	9.67	17.73	10.49	23.76	10.61	30.49	22.84	25.11	19.65	35.15	36.08	25.57	
7.16	5.90	7.06	20.34	13.86	20.39	21.07	9.14	19.24	28.71	30.58	24.22	25.29	36.82	
7.28	5.77	6.16	21.24	12.99	21.26	14.23	26.87	18.53	29.42	26.33	28.47	36.39	25.26	
6.32	7.43	6.09	21.31	8.95	25.30	13.89	27.21	15.67	32.28	20.33	34.47	37.70	23.95	
6.93	6.12	6.97	20.43	12.58	21.67	14.98	26.12	20.86	27.09	30.73	24.07	38.51	23.14	
7.16	5.89	10.05	17.35	15.06	13.40	17.71	22.49	17.71	30.24	24.74	34.06	30.46	31.19	
5.63	9.57	6.93	20.47	12.81	21.44	11.08	30.02	21.79	26.16	14.56	40.24	35.33	26.32	
4.92	17.02	5.72	22.95	13.65	20.60	18.14	22.96	17.55	30.40	24.73	30.07	34.80	26.85	
6.54	6.93	8.32	19.08	13.38	20.87	15.66	25.44	10.00	37.95	17.15	37.65	33.04	24.61	
4.43	16.12	7.78	19.62	10.56	23.69	19.08	22.02	25.31	8.43	14.80	40.00	25.59	36.06	
6.41	7.42	10.25	13.97	12.37	21.88	19.29	21.81	11.18	36.77	31.21	23.59</			

Πίνακας Α.5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των κριτηρίων f1 και f2 (χρονικός ορίζοντας 12 μηνών)

f1	D1S2 12		D2S2 12		D3S2 12		D4S2 12		D5S2 12		D6S2 12		D7S2 12	
	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2
5,00	15,85	11,01	14,39	11,83	17,82	21,33	17,77	23,33	37,30	10,65	35,51	19,29	41,83	13,80
4,87	15,68	12,45	14,95	9,07	25,18	25,40	15,70	27,61	20,34	25,01	29,79	21,94	39,81	19,81
5,73	14,82	10,85	16,55	11,17	23,08	15,21	25,88	42,60	7,20	21,44	33,36	39,33	22,32	22,32
6,72	13,83	11,83	15,57	23,12	4,02	15,82	25,28	32,74	15,11	16,80	38,00	35,74	25,91	25,91
6,07	14,48	13,74	13,66	15,52	18,73	24,57	16,63	37,91	10,04	23,14	31,66	43,32	18,33	18,33
11,08	0,75	17,49	0,00	15,81	18,44	23,11	17,99	36,80	11,15	25,23	29,57	25,35	36,30	36,30
8,46	12,09	11,57	15,83	21,57	12,68	14,53	26,57	24,70	23,25	33,38	21,42	19,77	43,34	43,34
8,74	11,81	10,31	17,09	21,17	13,08	22,16	18,94	30,07	17,88	33,85	20,95	44,45	17,20	17,20
5,61	14,94	11,17	16,23	13,22	21,03	22,50	18,60	13,92	34,03	35,20	19,60	40,47	21,18	21,18
8,80	11,75	14,21	13,19	14,84	19,41	17,20	23,90	34,93	13,02	30,97	23,83	25,60	36,05	36,05
6,78	13,77	11,76	15,64	16,71	17,54	15,47	25,63	14,25	33,70	18,50	36,30	31,85	29,80	29,80
8,65	11,90	8,87	18,53	12,53	21,72	24,43	16,67	25,25	22,70	17,07	37,73	26,11	35,54	35,54
7,93	12,62	9,86	17,54	12,42	21,83	18,25	22,85	17,40	30,55	24,42	30,38	30,43	31,22	31,22
8,71	11,84	11,66	15,74	18,38	15,76	25,11	15,99	11,72	36,23	25,82	28,98	35,14	26,51	26,51
6,19	14,36	12,07	15,33	17,57	16,68	19,38	21,72	34,06	13,89	26,71	28,09	32,87	28,78	28,78
6,03	14,52	11,07	16,33	19,73	14,52	24,31	16,79	31,39	16,56	14,82	39,98	29,05	32,60	32,60
5,99	14,56	12,38	15,02	12,30	21,95	21,32	19,78	32,49	15,46	36,60	18,20	42,49	19,16	19,16
3,66	19,10	8,96	18,44	14,11	20,14	25,64	15,46	22,04	25,91	40,33	14,47	41,45	20,20	20,20
6,96	13,59	14,59	12,81	18,89	15,36	17,55	23,55	12,48	35,47	22,92	31,88	31,57	30,08	30,08
8,50	12,05	12,82	14,58	17,47	16,78	20,50	20,60	39,24	8,71	25,48	29,32	26,67	34,98	34,98
8,34	12,21	9,78	17,62	17,16	17,09	26,72	4,41	19,98	27,97	18,26	35,54	45,12	16,53	16,53
5,42	15,13	9,07	18,33	9,48	24,77	14,33	26,77	35,49	12,46	32,46	22,34	44,76	16,89	16,89
4,10	16,56	10,92	16,48	14,66	19,59	22,65	18,45	30,35	17,60	23,65	31,15	20,03	41,62	41,62
7,13	13,42	8,12	19,31	16,47	17,78	19,11	21,99	28,60	19,35	41,34	13,46	30,96	30,69	30,69
8,04	12,51	9,37	18,03	19,35	14,90	26,25	14,85	14,67	33,28	30,73	24,07	33,28	28,37	28,37
7,82	12,73	8,20	19,20	18,28	15,97	23,66	17,44	35,76	12,19	40,75	14,05	45,44	16,21	16,21
8,40	12,15	6,65	22,57	16,22	18,03	15,37	25,73	31,65	16,30	39,35	15,53	48,69	13,49	13,49
9,50	11,05	9,69	17,71	19,86	14,39	17,76	23,34	43,09	5,96	37,70	17,10	24,15	37,50	37,50
6,24	14,31	11,99	15,41	15,09	19,16	20,37	20,73	24,45	23,50	41,05	13,75	26,45	35,20	35,20
6,80	13,65	6,96	20,55	11,41	22,84	20,44	20,96	36,50	11,45	31,89	22,91	49,95	12,90	12,90
8,10	12,45	14,44	12,06	12,00	22,25	16,90	16,90	24,20	27,53	15,44	29,26	44,04	17,61	17,61
9,24	11,31	8,47	18,93	13,79	20,46	12,38	30,48	26,06	21,89	14,34	40,46	34,22	27,43	27,43
7,27	13,28	8,76	18,64	13,43	20,82	19,97	21,13	37,62	10,33	39,09	15,71	19,83	41,82	41,82
4,21	16,34	9,14	18,26	13,11	21,14	23,56	17,54	18,54	29,41	38,58	16,22	33,36	29,29	29,29
4,55	16,31	8,31	19,09	14,21	20,04	16,67	24,43	19,01	28,94	26,34	28,46	26,89	34,76	34,76
3,26	20,03	13,88	13,52	17,06	17,19	18,54	22,56	22,86	25,09	38,33	16,47	36,96	24,69	24,69
7,05	13,50	10,53	16,87	11,62	22,63	23,81	17,29	21,37	26,66	20,22	34,58	41,14	20,51	20,51
9,37	11,18	7,38	20,02	18,70	15,55	13,52	27,65	24,99	22,96	34,68	20,12	30,69	30,96	30,96
6,35	14,20	14,02	13,38	21,01	13,24	21,92	19,18	40,52	7,43	29,11	25,69	36,67	24,98	24,98
3,98	18,75	8,05	19,35	17,90	16,35	12,85	29,74	40,03	7,92	30,05	24,75	45,31	15,53	15,53
5,87	14,68	8,53	18,87	19,98	14,27	20,65	18,27	27,14	20,81	38,73	15,07	38,27	23,38	23,38
4,72	15,91	11,91	15,49	15,44	18,81	15,09	26,01	31,03	16,92	34,95	19,85	34,70	26,95	26,95
5,28	15,27	10,76	16,65	12,99	21,26	15,65	25,45	21,84	26,11	35,75	19,05	39,07	22,58	22,58
7,61	12,94	14,87	8,99	21,63	5,07	16,56	24,54	28,28	19,67	33,63	21,17	36,48	25,17	25,17
9,19	11,36	16,51	3,88	12,87	11,39	23,71	31,98	13,98	15,97	19,65	35,15	24,66	36,99	36,99
6,54	14,01	15,01	7,18	13,34	20,91	23,23	17,87	39,06	8,93	22,17	32,63	43,09	18,56	18,56
9,38	11,09	7,80	19,60	15,71	18,54	24,96	16,14	37,05	10,90	18,02	36,78	29,55	32,10	32,10
6,44	14,11	14,35	13,05	21,31	12,94	16,23	21,42	19,68	22,64	25,04	42,62	12,18	29,30	32,35
6,65	13,90	14,28	13,12	18,02	16,23	21,42	19,68	22,64	25,04	25,04	42,62	12,18	29,30	32,35
7,56	12,99	7,65	19,75	21,44	12,81	14,62	26,48	33,46	14,49	30,72	34,08	50,74	11,19	11,19
5,14	15,41	14,65	12,75	15,20	19,05	15,93	25,17	38,69	9,26	37,98	16,82	39,61	22,04	22,04
7,52	13,03	12,16	15,24	20,76	13,49	20,25	20,85	18,78	29,17	28,39	26,41	47,61	14,59	14,59
8,60	11,95	7,23	20,33	20,22	14,03	16,06	25,17	13,08	34,87	40,61	14,29	28,09	33,56	33,56
7,32	13,23	13,34	14,06	18,38	15,87	21,58	19,52	9,95	38,00	27,38	27,42	31,20	30,45	30,45
8,17	12,38	14,72	11,07	19,13	15,12	21,04	20,06	29,16	18,79	23,42	31,38	41,94	19,71	19,71
8,28	12,27	13,19	14,21	13,74	20,57	13,33	19,72	19,72	28,23	36,04	18,76	45,82	15,83	15,83
8,97	11,58	9,30	18,10	15,31	18,94	19,01	22,09	44,46	4,54	32,90	21,90	21,34	40,31	40,31
9,64	10,91	13,69	13,71	14,95	19,30	18,41	22,69	20,93	27,02	21,24	33,56	21,12	40,53	40,53
10,89	10,84	12,23	15,17	20,58	13,67	34,61	1,04	35,22	12,73	36,30	18,50	42,25	19,40	19,40
6,49	14,06	7,87	19,53	15,60	18,65	14,00	27,10	30,69	17,26	17,77	37,03	34,47	27,18	27,18
7,88	12,67	12,58	14,82	18,80	15,45	25,91	15,80	22,68	32,15	22,68	32,12	27,20	34,45	34,45
4,78	15,77	10,65	16,75	18,14	16,11	36,18	0,00	27,37	20,58	28,12	26,68	33,93	27,72	27,72
8,86	11,69	10,17	17,23	20,34	13,91	26,52	10,67	13,08	35,45	19,06	35,74	33,63	28,02	28,02
8,55	12,00	9,22	18,18	18,54	15,71	22,03	19,07	24,19	23,76	40,04	14,76	23,20	38,45	38,45
5,35	15,20	10,45	16,95	19,24	15,01	18,71	22,39	25,77	22,18	23,86	30,94	25,13	36,52	36,52
5,23	15,32	10,99	16,41	16,85	17,40	19,23	21,87	16,06	31,89	21,94	32,86	23,83	37,82	37,82
5,65	14,90	14,14	13,26	17,65	16,60	19,50	21,60	26,85	21,10	34,43	20,37	32,62	29,03	29,03
7,22	13,33	14,51	12,89	10,66	23,59	17,02	24,08	33,04	14,91	16,40	38,40	41,70	19,95	19,95
6,83	13,72	9,45	17,95	20,48	13,77	16,45	24,65	17,76	30,19	27,87	26,93	24,41	37,24	37,24
7,66	12,89	8,41	18,99	19,02	15,23	11,82	34,27	32,19	15,76	37,04	17,76	39,89	21,76	21,76
6,13	14,42	11,49	15,91	13,87	20,38	25,53	15,57	21,62	26,33	30,39	24,41	27,84	33,81	33,81
9,57	10,98	7,97	19,43	16,34	17,91	25,21	15,89	29,85	18,10	39,68	15,12	28,35	33,30	33,30
9,64	8,48	13,41	13,99	19,46	14,79	26,11	14,99	36,13	11,82	16,00	38,80	35,98	25,67	25,67
9,06	11,49	9,61	17,79	14,00	20,25	18,83	22,27	34,68	13,27	14,20	45,06	25,86	35,79	35,79
5,13	15,53	10,59	16,81	14,33	19,92	16,09	25,01	15,23	32,77	44,09	10,71	35,42	26,23	26,23
8,23	12,32	13,61	13,79	14,74	19,51	23,94	17,16	14,96	32,99	32,17	22,63	33,78	27,87	27,87
4,73	15,82	13,25	14,15	10,19	24,06	24,86	16,24	20,67	27,28	20,47	34,33	32,11	29,54	29,54
10,38	2,71	12,66	34,74	11,48	22,77	21,18	19,92	29,63	18,32	27,67	27,17	28,56	33,09	33,09
7,71	12,84	7,97	19,51	15,91	18,34									

Πίνακας Α.6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των κριτηρίων f1 και f2 (χρονικός ορίζοντας 24 μηνών)

f1	D2S1 24		D2S1 24		D3S1 24		D4S1 24		D5S1 24		D6S1 24		D7S1 24	
	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2
8.61	0.64	13.38	8.16	18.25	8.00	16.53	25.49	25.89	12.99	32.25	34.21	23.0	36.41	36.41
6.23	15.00	12.96	2.48	12.17	27.08	17.38	29.94	16.87	34.02	27.14	28.02	40.08	21.73	21.73
8.78	1.38	12.02	8.47	14.17	20.08	19.97	20.14	16.49	41.22	45.78	14.51	41.60	20.43	20.43
6.24	15.51	11.45	13.74	15.77	18.48	20.91	14.69	29.81	7.28	33.72	21.84	28.14	33.64	33.64
6.88	10.28	10.42	16.98	17.23	4.51	21.80	5.17	30.80	0.00	40.89	15.82	20.66	48.37	48.37
8.30	1.96	12.83	2.81	17.57	6.78	18.73	23.72	18.99	29.63	33.41	21.76	23.16	38.49	38.49
8.89	0.04	10.36	17.17	13.75	21.83	21.89	3.86	19.71	28.86	37.13	18.81	39.92	20.82	20.82
7.11	8.93	12.66	4.77	16.77	18.64	21.80	4.99	28.23	16.80	35.22	19.58	36.38	25.42	25.42
8.96	0.00	9.39	18.86	16.33	8.29	20.13	19.45	30.26	5.04	21.37	35.52	30.07	31.58	31.58
8.46	3.17	12.41	7.47	16.22	18.03	20.30	12.45	30.26	1.63	40.92	16.85	26.23	35.42	35.42
8.21	3.43	12.94	1.19	17.23	8.91	22.39	0.00	23.57	25.27	44.02	16.38	30.79	31.26	31.26
8.74	0.00	12.15	7.27	15.43	18.82	21.07	8.90	30.65	0.00	49.30	14.14	32.78	29.75	29.75
6.59	9.29	13.28	2.51	17.55	0.35	19.10	23.16	16.23	41.49	35.17	19.86	24.77	31.79	31.79
7.46	6.29	13.42	0.55	13.29	21.84	17.25	27.86	29.00	13.19	25.44	29.96	30.31	37.96	37.96
8.61	1.37	10.73	17.11	15.34	19.10	22.16	0.00	24.60	23.49	31.18	23.66	22.03	45.75	45.75
7.97	3.48	11.25	16.89	15.68	18.94	21.27	10.22	25.33	18.48	28.94	25.86	20.19	48.56	48.56
7.27	8.19	12.55	6.23	16.04	18.21	17.99	23.79	29.77	0.00	37.67	18.87	22.32	43.04	43.04
7.28	5.77	12.81	3.74	16.32	18.50	21.25	8.42	22.15	25.88	22.53	34.68	33.76	28.15	28.15
8.88	0.30	13.30	1.15	18.20	0.00	18.58	22.75	25.44	22.51	34.87	19.93	22.99	39.40	39.40
7.23	7.21	10.32	17.98	15.57	21.06	17.91	23.42	20.34	27.61	24.50	30.87	24.11	37.54	37.54
7.51	6.74	10.74	16.88	18.15	1.80	19.32	22.73	20.37	27.76	21.70	35.06	38.32	23.95	23.95
7.15	8.84	12.50	5.58	13.21	21.89	18.00	25.91	24.81	23.14	38.33	17.65	26.34	35.90	35.90
7.23	6.83	13.27	2.66	17.42	6.94	19.43	21.67	23.71	24.73	32.70	22.10	38.24	29.38	29.38
7.18	8.44	11.40	15.42	13.40	21.90	18.33	24.90	19.04	29.10	36.78	16.94	29.85	32.12	32.12
7.22	8.35	13.41	0.00	12.92	22.23	20.89	12.79	17.79	30.40	49.04	15.03	30.74	30.91	30.91
7.96	4.38	13.53	0.55	15.29	19.15	21.05	7.86	17.25	33.41	52.40	14.77	22.84	44.23	44.23
6.92	10.07	13.68	0.00	11.88	22.37	21.42	7.48	28.17	11.42	44.17	12.84	28.30	33.60	33.60
7.26	6.64	13.36	2.28	16.42	15.58	21.28	9.22	30.53	0.00	37.75	17.86	36.09	25.87	25.87
7.94	3.24	10.56	16.84	18.26	0.00	18.76	23.06	30.00	10.84	30.21	24.70	34.96	27.08	27.08
6.23	18.60	10.42	17.38	12.35	32.11	21.97	0.46	16.23	45.54	31.08	24.28	38.96	22.73	22.73
6.85	9.42	9.94	18.18	15.43	18.82	22.16	0.00	23.87	24.08	28.11	27.61	40.28	16.23	16.23
6.90	9.53	11.97	8.86	17.07	11.98	17.93	26.33	25.18	17.27	20.17	40.96	32.88	29.61	29.61
8.67	0.90	8.90	21.48	17.12	10.54	19.98	21.40	20.20	27.84	31.80	23.00	35.20	26.82	26.82
8.62	2.88	11.52	15.31	15.62	18.63	17.19	26.98	26.64	13.97	20.71	35.67	38.03	23.62	23.62
8.54	3.11	10.58	16.96	11.32	24.93	22.01	0.00	21.33	26.62	19.67	46.60	37.21	24.44	24.44
6.08	17.07	13.37	0.69	17.33	7.68	21.89	3.78	17.57	30.88	22.96	32.53	27.21	34.65	34.65
6.45	14.50	8.99	20.89	14.17	20.70	20.35	18.54	21.67	26.28	32.80	22.00	30.79	30.86	30.86
6.45	14.27	11.64	14.23	13.24	21.40	22.06	0.00	20.98	27.27	33.86	20.23	27.07	35.17	35.17
7.83	5.73	12.59	4.17	15.70	18.56	20.88	14.75	16.98	36.46	24.90	31.28	26.88	35.09	35.09
8.82	0.00	11.85	11.24	12.35	22.45	19.76	21.34	23.90	24.05	29.55	25.25	27.47	34.18	34.18
7.18	9.28	10.25	17.60	15.89	18.80	16.43	26.47	25.80	17.88	27.05	28.53	28.32	32.49	32.49
6.58	14.03	12.45	6.67	14.59	19.66	18.77	23.62	23.14	24.81	20.08	51.99	28.81	32.84	32.84
8.41	2.72	9.16	20.01	17.03	11.90	20.43	18.91	24.16	23.79	21.88	34.82	40.65	21.00	21.00
6.66	10.60	9.96	18.55	16.37	13.27	20.66	15.78	22.63	25.32	20.56	36.54	24.28	38.02	38.02
6.93	9.27	12.60	4.85	17.98	2.61	21.60	5.86	23.88	24.10	30.20	24.60	31.91	29.90	29.90
6.96	9.68	9.90	18.19	14.18	20.44	21.98	0.00	30.18	8.11	42.76	15.64	35.31	26.84	26.84
6.40	15.24	8.84	18.88	15.79	18.75	20.07	22.28	24.45	23.63	18.07	50.59	24.31	38.46	38.46
7.71	5.34	12.58	4.51	17.42	5.70	21.80	5.82	19.75	28.35	30.08	24.72	24.48	38.16	38.16
8.01	3.65	13.61	0.00	15.61	18.39	17.80	28.05	23.65	24.84	47.84	15.21	22.47	53.99	53.99
6.04	15.32	10.08	17.98	17.69	0.00	19.18	22.11	15.69	46.88	34.31	20.50	24.30	39.04	39.04
6.42	15.20	13.47	0.00	17.61	3.58	20.51	15.66	24.71	23.74	42.62	15.26	42.23	16.23	16.23
6.21	16.97	13.53	0.00	13.80	21.04	21.56	8.39	20.89	27.65	30.62	24.18	28.09	33.67	33.67
6.25	16.42	11.95	10.98	14.92	19.54	18.57	23.24	22.37	25.82	25.33	30.61	19.68	45.07	45.07
6.45	14.89	12.56	4.97	16.25	18.47	18.00	24.71	20.70	27.71	23.56	32.22	23.38	40.40	40.40
6.39	14.40	9.95	18.25	17.07	10.91	16.08	32.72	17.32	30.63	21.73	34.83	20.80	48.97	48.97
7.42	6.85	13.02	1.06	13.83	21.35	22.13	0.33	17.54	32.74	31.44	23.39	27.74	34.03	34.03
8.97	0.00	13.63	0.00	17.50	4.44	21.30	9.12	19.21	28.94	28.43	26.66	34.61	27.38	27.38
8.01	4.23	10.95	16.74	18.38	0.00	17.23	29.65	28.67	28.08	26.99	25.53	36.34	36.34	36.34
7.70	5.62	10.73	16.69	14.70	19.55	17.83	26.16	22.48	25.71	20.24	39.71	27.28	34.90	34.90
7.44	6.81	12.30	8.33	15.18	19.07	20.94	10.68	30.15	21.04	25.76	29.10	36.73	32.31	32.31
7.53	5.88	8.61	19.66	17.05	12.18	19.10	22.80	25.82	12.91	27.44	28.09	29.51	32.28	32.28
8.35	3.28	12.30	5.51	17.10	12.91	22.14	0.17	18.50	30.23	21.69	34.81	27.21	35.05	35.05
6.28	15.78	8.66	18.74	12.39	25.28	21.01	7.39	25.62	18.09	32.38	22.42	32.38	28.93	28.93
6.29	14.50	11.44	8.30	12.63	23.34	20.17	14.93	16.46	45.12	27.56	27.80	43.71	17.59	17.59
5.99	15.35	12.89	3.43	15.61	19.02	20.15	19.70	20.46	27.49	29.59	25.79	25.83	36.47	36.47
7.96	4.94	11.78	12.98	16.49	12.84	19.77	22.31	16.20	37.96	31.55	23.25	26.95	35.21	35.21
6.48	11.24	12.39	7.76	17.83	3.13	21.13	10.77	15.16	47.70	25.27	29.81	33.25	29.43	29.43
8.02	4.26	9.02	22.42	17.25	1.70	22.02	0.00	16.39	46.88	38.02	18.47	40.75	21.00	21.00
8.82	0.00	10.37	17.23	16.15	18.59	21.80	8.51	16.52	35.28	51.08	15.04	32.58	29.90	29.90
7.76	5.31	13.37	2.43	15.69	18.56	19.81	22.39	16.44	35.94	28.18	26.62	41.29	20.58	20.58
6.20	15.80	9.67	19.09	17.64	3.57	18.20	22.90	17.29	30.80	28.48	26.54	23.25	39.63	39.63
8.98	0.00	11.84	11.79	12.09	27.40	21.89	4.49	22.45	25.50	29.10	26.12	28.35	33.30	33.30
6.55	14.71	12.79	4.80	16.35	18.36	18.36	25.00	20.15	28.66	43.67	16.66	28.05	33.89	33.89
8.81	1.11	8.78	19.51	17.24	7.82	21.04	12.56	25.14	23.26	41.43	14.09	21.02	47.42	47.42
6.21	15.15	13.17	1.92	14.63	19.94	21.67	5.49	30.20	0.00	33.87	20.93	39.70	22.26	22.26
7.19	9.05	9.61	18.13	18.30	0.54	17.31	28.14	22.30	26.15	31.14	23.84	25.30	36.92	36.92
6.48	14.68	11.88	8.75	17.27	7.26	18.37	23.43	15.77	47.62	20.21	43.71	26.67	34.98	34.98
8.79	1.56	10.86	17.06	12.68	22.13	22.89	0.00	29.92	0.00	25.85	28.95	22.28	43.83	43.83
8.06	3.78	8.81	24.10	13.39	21.54	22.05	2.64	17.95	30.00	19.05	44.67	37.02	24.63	24.63
8.16	3.09	12.39												

Πίνακας Α.7: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των κριτηρίων f1 και f2 (χρονικός ορίζοντας 24 μηνών)

D1S2 24		D2S2 24		D3S2 24		D4S2 24		D5S2 24		D6S2 24		D7S2 24	
f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2
7.32	14.68	13.70	13.31	16.13	18.12	22.78	18.32	25.97	23.22	22.07	22.07	49.01	23.30
9.19	11.26	12.60	14.82	17.29	16.96	20.98	20.13	23.81	24.14	29.90	25.67	40.69	22.03
8.96	11.59	12.65	14.75	19.91	6.88	25.87	9.59	23.16	25.10	32.08	22.82	26.26	35.89
8.38	12.17	13.52	13.88	15.20	19.05	22.24	18.89	18.43	36.56	33.79	21.41	26.25	36.13
9.24	11.31	14.80	0.00	17.08	17.17	19.23	22.11	29.00	19.92	27.12	27.68	30.53	31.12
9.11	11.44	11.77	15.85	12.87	21.74	23.90	17.20	26.64	21.31	22.34	34.90	23.66	38.38
9.59	10.96	11.86	15.85	17.48	16.77	24.54	16.56	28.35	20.34	44.84	18.65	32.77	28.88
9.68	10.87	12.92	14.61	18.12	16.13	20.38	21.18	31.79	16.16	23.84	32.43	28.99	32.66
9.07	11.48	14.00	12.75	13.13	21.12	22.07	19.48	19.63	28.51	31.03	24.32	27.08	34.91
8.21	12.24	14.79	4.00	18.73	15.52	17.36	23.85	22.11	26.33	39.16	18.52	37.34	25.56
8.52	12.03	11.89	15.80	18.64	15.61	24.98	16.12	31.21	17.38	34.57	20.23	28.85	33.30
8.43	12.12	14.02	8.41	17.59	16.66	23.03	18.47	26.57	31.21	23.59	33.59	35.74	26.78
8.04	12.51	13.63	13.77	17.94	16.31	18.48	23.47	30.99	17.46	28.01	27.67	26.29	35.48
9.53	11.02	14.03	10.59	18.51	15.83	19.83	21.27	33.28	15.68	28.94	26.28	38.32	23.33
9.26	11.29	12.02	15.38	16.01	18.24	21.07	20.28	30.98	17.34	21.52	50.69	24.03	39.47
8.97	11.58	14.71	4.31	18.13	16.12	21.64	19.54	31.44	16.51	36.53	19.99	37.30	25.46
7.69	13.96	13.90	13.23	16.35	17.90	15.09	28.77	31.81	16.17	32.05	22.79	38.82	22.83
9.41	11.14	10.94	16.69	12.44	22.58	19.46	21.72	29.69	18.26	21.95	44.00	24.03	37.87
9.31	11.24	13.31	14.09	15.02	19.23	20.77	20.33	19.17	30.51	40.91	18.78	40.04	22.59
9.16	11.39	11.51	16.48	18.18	16.07	18.36	22.97	19.62	28.60	33.33	21.47	28.36	34.27
8.01	12.78	12.03	15.67	16.36	17.89	18.01	23.73	20.23	28.20	27.82	27.70	35.65	37.48
11.04	2.17	14.16	8.11	18.06	16.19	28.76	8.00	34.83	13.12	25.06	29.87	30.99	36.20
8.99	11.56	14.53	6.03	15.52	18.74	22.54	18.56	30.60	18.32	24.61	30.33	25.89	36.20
9.40	11.15	11.16	21.27	18.54	15.71	18.76	22.47	22.51	26.21	37.30	18.83	22.17	48.92
9.08	11.47	14.08	9.55	16.19	18.06	34.13	7.55	20.43	28.26	26.82	28.89	29.36	32.67
9.05	11.50	12.52	15.51	17.41	16.84	21.77	19.71	21.21	26.74	33.39	21.78	37.85	24.06
9.43	11.12	13.91	11.61	16.25	18.00	34.75	7.34	29.06	19.46	28.50	27.12	38.13	23.76
9.83	10.72	12.05	15.35	16.74	17.51	23.84	17.26	28.16	20.55	39.29	17.37	28.80	33.70
8.87	11.68	13.47	13.93	15.62	18.63	26.13	8.67	26.06	21.89	23.54	32.58	28.89	33.86
8.40	12.15	13.32	14.05	17.39	16.90	23.94	17.48	26.00	21.99	28.15	27.65	36.75	26.70
8.60	11.95	16.65	12.72	16.53	17.72	21.60	19.50	24.58	24.69	20.41	23.44	44.49	20.47
9.63	10.92	14.12	8.86	20.92	0.00	23.61	17.49	18.87	31.15	25.26	29.54	22.96	43.86
8.47	12.08	13.36	14.04	16.60	17.65	25.79	8.12	20.82	27.13	31.12	23.68	43.99	21.42
7.80	13.58	12.76	15.15	17.30	16.95	35.24	7.48	28.10	20.52	29.35	25.73	24.02	40.23
8.76	11.79	12.92	14.64	17.44	16.81	23.74	17.36	30.75	17.68	38.40	18.85	41.86	21.10
7.90	13.10	13.13	14.46	16.80	17.45	15.57	26.32	35.05	12.90	31.61	23.41	27.70	34.41
9.85	10.70	13.86	13.56	18.15	16.10	15.90	26.09	25.03	23.29	30.58	24.78	28.94	33.02
8.94	11.61	15.10	3.73	15.29	18.96	23.07	18.13	18.79	30.55	24.70	30.40	21.89	52.47
9.64	10.91	13.77	13.63	16.88	17.37	22.84	18.26	20.75	27.33	37.19	19.51	23.67	38.99
9.35	11.20	13.69	14.71	18.90	8.37	16.22	35.59	28.39	19.73	38.75	35.52	44.40	20.47
9.52	11.03	12.32	15.63	17.51	16.74	15.63	26.66	26.48	21.71	22.00	33.27	23.58	46.51
10.60	4.63	11.73	16.26	18.83	15.42	21.85	19.38	18.43	33.44	30.65	34.69	25.60	36.05
9.03	11.52	12.02	15.38	20.72	4.23	25.20	15.04	23.65	24.33	40.89	18.24	28.73	34.11
10.30	5.53	14.04	9.46	16.95	17.30	25.06	16.04	22.81	25.24	23.50	32.95	25.56	36.87
8.35	12.20	15.77	0.00	12.12	23.60	20.46	20.64	28.65	19.95	24.15	30.73	42.48	21.75
9.74	10.81	13.69	13.71	16.29	17.96	23.33	17.77	25.71	22.84	33.79	21.01	31.42	30.74
8.82	11.73	12.44	15.53	15.33	18.92	24.27	16.84	24.27	23.68	29.97	24.83	38.97	23.05
9.62	10.93	14.20	7.48	19.64	7.91	23.07	18.03	22.60	25.61	26.22	29.06	49.41	19.94
9.75	10.80	13.49	13.91	16.18	18.07	16.46	24.64	25.91	22.75	31.46	23.83	34.75	28.04
9.55	11.00	11.27	18.50	12.20	22.97	16.89	24.70	27.29	20.93	36.72	19.25	38.15	23.85
9.49	11.06	13.75	13.65	14.75	19.50	25.55	9.46	32.52	16.08	39.43	19.17	38.69	22.96
9.70	10.85	11.78	15.96	16.67	17.58	26.03	7.42	35.87	9.66	36.77	19.26	21.97	51.85
9.30	11.25	11.36	16.55	11.79	25.49	25.87	8.09	24.39	23.86	29.05	26.02	24.87	37.34
11.52	0.00	14.03	11.46	14.87	19.41	25.95	7.21	34.42	13.53	22.29	35.17	23.53	44.84
9.44	11.11	13.49	13.97	13.12	21.15	23.78	15.80	27.38	20.79	21.63	44.08	24.73	36.92
9.93	9.49	12.58	15.40	18.35	15.90	17.37	23.81	31.99	15.96	24.26	30.70	22.72	48.26
8.85	11.70	11.14	17.82	14.03	20.85	24.84	16.26	34.50	13.45	22.63	33.77	21.91	52.11
9.09	11.46	11.18	18.15	18.22	16.03	19.54	21.56	22.13	26.08	36.16	20.03	22.78	47.30
9.67	10.98	13.76	12.68	17.74	16.51	25.31	10.91	32.25	16.13	30.37	25.34	22.06	51.19
9.77	10.78	14.80	0.19	16.31	17.84	23.23	17.87	28.38	20.32	33.74	32.14	48.77	20.61
9.34	11.22	12.16	15.70	18.21	16.04	24.00	15.21	41.29	11.09	21.78	46.32	35.79	25.95
8.79	11.76	14.41	7.90	18.79	15.46	24.64	16.46	31.06	17.41	25.41	29.67	49.01	19.82
8.77	11.78	12.70	14.70	18.37	15.88	21.32	34.97	21.32	30.90	30.90	24.11	37.82	23.95
9.60	10.95	14.14	8.01	14.93	19.32	16.94	24.82	21.39	26.73	26.35	28.92	47.19	20.92
9.17	11.38	13.23	14.59	18.63	15.62	19.92	37.08	10.87	26.50	29.12	45.15	18.71	21.71
9.61	10.94	13.57	13.83	18.85	15.40	26.33	8.06	19.76	28.31	27.68	28.13	40.06	22.49
9.82	10.73	15.55	0.00	16.64	17.61	15.83	25.71	25.60	22.79	23.47	32.81	34.90	27.93
9.79	10.76	13.68	13.72	17.65	16.60	34.46	3.15	26.97	21.44	22.10	43.10	22.56	51.46
8.92	11.63	12.54	15.48	17.25	17.00	20.91	20.56	18.59	36.88	30.43	24.53	54.29	20.40
9.72	10.83	13.54	13.86	18.99	8.28	25.58	10.43	21.39	27.00	24.19	31.54	24.11	37.78
8.75	11.84	14.56	4.46	16.87	17.38	23.56	17.54	26.75	21.56	32.32	22.66	23.62	41.45
10.26	8.34	15.13	0.00	18.69	15.56	22.69	9.94	29.38	19.11	37.97	16.83	41.85	21.16
8.70	11.85	12.59	15.32	15.97	18.28	20.76	20.34	33.69	14.26	29.22	25.58	27.73	34.04
9.47	11.08	12.63	15.18	15.99	18.26	25.04	16.06	35.09	12.51	22.27	45.78	33.91	27.74
10.18	8.70	11.79	16.21	17.78	16.47	17.15	24.21	29.82	18.77	27.92	26.88	21.88	50.23
10.47	5.04	10.33	24.14	18.28	15.97	15.74	31.02	23.88	24.07	21.66	50.59	47.59	20.42
8.89	11.66	11.57	17.31	17.18	17.07	35.96	6.29	25.88	22.31	22.60	37.73	27.71	35.00
8.69	11.86	13.31	14.09	14.22	20.03	17.66	23.86	32.59	15.36	26.01	29.31	31.82	30.10
9.45	11.10	14.14	8.60	13.69	20.90	26.68	16.42	25.17	23.11	39.98	18.49	39.14	22.60
9.65	10.90	10.31	18.44	20.27	4.58	14.85	27.23	33.29	14.66	22.75	32.37	49.53	20.30
9.00	11.55	13.42	13.98	16.63	17.62	21.13	19.97	17.83	30.12	32.76	22.12	22.82	40.43
8.84	11.71	11.56	16.80	18.23	16.02	17.84	23.66	21.05	27.48	28.99	26.31	33.50	29.78
8.56	11.99	10.92	17.47	14.36	20.00	19.46	21.91	18.60	30.61	23.94	30.92	43.74	21.57
9.57	10.98	13.83	13.57	16.68	17.57	16.97	24.36	19.52	29.32	22.85	32.54	46.	

Πίνακας Α.8: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των κριτηρίων f1 και f2 (χρονικός ορίζοντας 36 μηνών)

f1	D2S1 36		D2S1 36		D3S1 36		D4S1 36		D5S1 36		D6S1 36		D7S1 36	
	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2
7.46	13.69	12.21	17.73	6.27	19.74	24.63	38.85	18.06	26.34	39.58	33.03	30.03	30.03	30.03
8.70	2.03	13.52	6.20	15.62	19.89	21.23	19.84	23.20	29.08	25.11	38.79	28.36	37.01	37.01
9.26	0.00	11.89	14.10	14.35	23.72	22.60	2.38	28.93	10.63	28.61	28.74	39.94	22.97	22.97
8.41	3.97	13.69	1.22	17.98	5.88	19.92	23.48	25.46	23.48	37.70	0.68	31.00	34.53	34.53
7.73	8.06	10.95	17.97	14.68	22.08	22.67	0.00	25.25	24.44	31.41	23.39	34.66	31.72	31.72
9.23	0.61	11.19	18.76	14.88	20.61	19.01	25.32	22.48	30.50	29.38	26.95	35.02	29.84	29.84
8.43	3.36	13.54	3.37	14.47	23.34	18.85	29.83	29.25	10.82	23.86	37.85	40.16	20.80	20.80
8.22	3.71	12.39	10.96	13.48	30.96	20.22	22.58	28.49	15.33	27.25	29.80	24.71	48.77	48.77
7.63	14.69	12.32	8.01	17.63	10.12	22.58	2.06	23.98	27.02	28.10	29.19	23.69	54.48	54.48
9.13	1.49	11.30	17.45	18.13	0.00	22.15	2.71	25.70	22.41	25.85	30.58	33.28	32.69	32.69
7.58	7.05	14.17	0.00	17.63	8.82	21.69	9.21	29.05	3.69	29.25	26.63	32.46	33.49	33.49
7.64	15.10	11.77	14.32	13.84	30.56	22.02	6.98	27.23	18.76	35.82	0.61	37.27	27.92	27.92
8.74	1.62	13.50	2.83	14.06	31.45	22.07	7.22	28.61	17.70	28.92	26.48	33.16	33.17	33.17
9.03	1.43	11.66	16.98	14.47	23.36	19.65	25.01	23.19	28.19	35.84	6.88	38.50	23.97	23.97
8.03	5.24	13.70	3.03	17.02	17.11	18.61	29.10	22.48	28.82	35.71	0.00	41.74	20.92	20.92
8.57	2.97	11.04	18.35	16.54	17.67	18.29	27.04	24.92	25.12	29.11	27.24	23.23	61.44	61.44
8.52	2.95	12.75	6.59	19.18	0.00	19.13	25.40	28.90	12.44	28.37	28.76	23.89	54.91	54.91
9.04	1.76	11.82	15.43	16.37	17.88	21.53	17.70	28.25	0.00	28.97	27.71	28.60	36.76	36.76
7.35	11.09	11.96	15.27	14.09	30.87	21.77	12.76	22.11	31.07	35.62	8.96	30.91	33.92	33.92
8.52	3.46	10.56	17.35	14.59	22.86	18.75	24.85	27.17	19.28	29.44	27.02	43.88	6.96	6.96
9.32	0.00	12.58	7.62	14.03	29.96	18.76	25.48	27.07	19.45	34.16	2.59	26.16	39.09	39.09
8.09	5.71	12.12	9.64	16.38	18.21	18.77	27.16	22.09	32.49	25.56	32.07	42.53	20.43	20.43
8.77	2.83	11.70	15.79	14.11	24.77	21.30	20.06	25.48	22.48	29.76	25.58	37.88	25.87	25.87
7.67	7.15	13.76	0.00	14.04	33.36	22.26	4.45	21.08	35.37	34.36	7.77	29.87	36.78	36.78
7.67	10.27	14.14	0.00	13.54	21.48	17.15	26.40	20.90	25.32	36.61	42.85	18.02	37.05	37.05
7.87	7.00	12.58	9.49	17.52	10.62	20.85	21.22	23.20	29.03	25.03	41.34	31.71	34.05	34.05
8.81	2.16	13.04	7.50	13.78	26.62	22.08	0.00	21.85	35.42	25.09	52.47	28.89	37.14	37.14
8.03	4.29	11.90	11.54	13.89	32.60	21.27	19.16	23.57	28.80	31.07	25.28	28.18	38.60	38.60
7.97	6.32	11.96	15.12	14.14	20.79	21.45	19.50	25.19	24.48	32.06	19.96	30.08	36.78	36.78
8.98	1.85	12.41	6.66	16.55	18.90	18.95	26.79	29.91	0.00	32.35	18.16	42.49	17.38	17.38
7.97	5.99	13.05	6.40	18.36	1.08	19.07	25.46	23.62	25.43	35.43	5.64	26.68	28.35	28.35
7.78	7.19	12.23	11.82	17.98	4.54	19.17	25.20	22.43	30.98	29.58	26.84	27.97	12.57	12.57
9.24	0.00	12.07	14.93	18.10	5.65	20.36	22.19	29.46	9.62	37.59	0.00	30.63	35.30	35.30
7.64	11.64	12.10	13.19	14.75	21.43	19.93	7.87	21.25	36.76	33.55	11.95	30.55	32.14	32.14
9.06	1.38	13.50	3.93	15.43	19.64	21.62	15.75	22.03	31.81	36.21	0.00	35.00	31.01	31.01
7.80	8.28	12.31	9.64	16.85	13.72	21.31	20.21	29.57	0.00	25.00	52.70	37.85	27.73	27.73
7.95	6.51	13.88	2.82	14.38	22.59	20.85	20.68	23.23	25.80	25.06	42.37	26.08	39.92	39.92
8.61	2.75	12.72	7.18	14.35	24.94	21.20	20.67	22.81	29.49	26.02	32.81	40.85	21.25	21.25
8.11	3.61	10.44	23.40	15.02	20.08	22.16	4.75	27.48	15.12	27.60	29.74	37.73	27.07	27.07
7.73	11.09	13.70	0.00	13.69	30.17	22.17	0.00	28.89	11.12	37.88	0.00	23.42	37.72	37.72
7.84	8.14	13.39	5.81	17.73	7.09	17.25	20.62	24.09	27.69	31.12	34.58	44.65	15.60	15.60
9.21	0.22	11.98	15.42	17.64	8.97	18.86	26.06	24.71	25.60	25.33	35.44	40.62	34.79	34.79
9.20	0.00	13.26	4.78	17.00	12.55	21.17	21.17	28.93	12.62	35.50	7.70	32.29	18.05	18.05
7.57	11.01	12.44	10.16	17.03	11.75	19.85	23.90	25.33	25.04	37.41	0.00	22.03	42.66	42.66
7.65	10.36	12.51	7.01	14.78	22.63	21.72	13.05	21.48	37.05	33.62	12.42	39.62	23.66	23.66
8.90	2.53	13.55	0.00	14.47	23.25	21.66	8.57	24.15	26.12	29.68	26.04	45.95	15.32	15.32
7.76	5.90	10.96	17.44	17.90	6.69	19.21	25.30	25.08	24.08	37.53	0.00	40.41	17.89	17.89
8.13	5.77	12.62	8.59	17.86	30.40	20.19	23.25	23.84	28.31	39.31	0.00	23.73	41.64	41.64
9.11	0.00	13.47	3.02	13.59	30.40	18.82	26.11	20.74	33.18	30.68	14.00	23.97	59.80	59.80
8.20	4.81	11.88	15.76	16.90	15.96	20.59	21.35	30.65	0.00	28.27	28.41	47.77	13.67	13.67
8.09	3.94	14.01	1.79	17.29	9.58	20.54	21.43	24.08	27.98	33.31	15.10	24.37	60.24	60.24
9.11	0.00	11.51	16.19	16.47	17.19	26.10	26.25	18.75	26.61	30.59	38.99	22.33	34.79	34.79
7.63	10.47	11.85	15.55	13.97	33.15	21.79	9.08	21.54	42.93	25.92	30.99	26.11	40.73	40.73
7.35	11.52	11.34	17.59	14.87	20.36	19.81	24.59	22.03	32.89	35.57	9.51	22.48	59.52	59.52
7.85	6.76	13.12	6.10	14.17	29.66	21.47	19.28	21.52	35.71	25.06	42.06	27.42	37.66	37.66
7.11	17.49	11.03	17.70	15.58	20.07	21.77	9.56	29.42	3.33	24.02	52.35	37.32	27.86	27.86
7.28	14.09	14.16	0.00	18.03	4.28	21.30	20.61	21.99	32.74	27.11	28.93	24.12	51.68	51.68
8.18	3.74	13.98	1.93	17.57	8.81	20.04	22.30	23.93	25.75	30.78	25.31	28.14	36.59	36.59
7.76	8.81	11.61	17.09	17.94	4.11	19.85	21.98	23.80	28.72	41.61	0.00	26.69	39.23	39.23
8.94	0.86	13.13	6.83	16.69	18.54	18.96	25.77	24.49	30.14	31.94	23.14	25.87	39.36	39.36
8.65	1.77	12.50	9.41	17.01	17.12	20.51	22.61	23.09	29.77	40.38	0.00	32.74	33.22	33.22
8.62	2.58	13.15	6.66	14.35	22.96	19.48	24.12	22.27	29.95	25.14	39.66	25.74	42.66	42.66
7.42	10.61	11.30	18.71	17.27	11.92	17.77	11.92	25.62	24.31	33.79	10.22	42.47	19.66	19.66
7.68	11.09	13.55	3.83	14.75	22.09	21.34	16.73	24.99	25.61	30.39	25.29	35.10	28.94	28.94
8.55	3.22	14.14	0.00	18.26	0.05	21.56	18.46	21.89	32.86	32.97	17.65	44.88	14.96	14.96
7.53	11.26	11.11	18.09	16.15	20.06	21.07	21.04	30.60	0.00	25.16	38.31	25.66	45.97	45.97
7.76	10.09	14.10	0.00	17.24	13.32	20.59	21.74	23.26	28.67	31.96	18.40	24.77	52.30	52.30
7.89	6.77	13.24	3.12	13.89	33.38	21.46	19.43	25.82	19.19	23.27	39.95	40.07	21.24	21.24
8.24	2.90	12.41	10.86	18.44	0.00	20.11	23.21	22.06	29.69	24.59	35.82	43.88	18.33	18.33
9.25	0.00	11.79	14.21	17.05	5.72	22.13	5.62	20.79	36.40	24.88	37.01	46.15	14.56	14.56
8.77	2.73	13.86	0.68	18.31	2.30	20.82	21.74	22.46	31.07	28.31	28.73	38.47	25.53	25.53
8.80	2.65	11.16	17.25	18.43	0.00	22.04	3.95	21.84	36.81	29.44	27.02	33.59	31.11	31.11
7.79	6.18	11.25	15.69	17.75	7.72	19.52	25.76	27.63	14.32	36.31	2.15	44.61	17.04	17.04
8.01	4.71	12.07	14.63	18.27	4.21	21.33	20.19	22.25	30.31	28.91	27.61	42.94	13.45	13.45
7.68	9.85	12.42	6.36	13.96	33.82	21.32	20.49	28.80	11.71	30.86	23.99	44.20	17.45	17.45
8.73	1.62	11.74	16.85	13.51	33.81	20.41	22.00	21.74	32.56	35.55	0.00	44.09	15.24	15.24
7.58	11.79	10.96	17.48	14.34	23.55	22.38	3.60	30.33	0.00	39.12	0.00	24.28	41.41	41.41
9.09	0.96	13.31	3.20	17.63	9.01	21.63	14.02	22.55	29.91	25.48	31.84	40.86	18.44	18.44
7.79	7.87	11.71	16.44	13.34	34.25	22.35	0.00	26.48	20.03	28.66	27.71	27.71	38.67	38.67
8.31	4.12	14.14	0.											

Πίνακας Α.9: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης των κριτηρίων f1 και f2 (χρονικός ορίζοντας 36 μηνών)

f1	D2S2 36		D2S2 36		D3S2 36		D4S2 36		D5S2 36		D6S2 36		D7S2 36	
	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2	f1	f2
11.00	0.00	13.63	14.05	15.70	16.86	19.99	26.98	33.34	0.00	35.56	31.31	34.78	29.99	34.78
8.92	14.43	14.73	4.99	20.68	1.92	20.66	21.28	23.83	26.75	25.55	33.24	30.41	34.76	34.76
9.56	11.08	14.16	11.31	14.09	22.13	22.90	18.88	31.47	3.56	28.22	28.99	28.81	34.83	34.83
9.34	11.50	14.80	1.88	12.84	25.85	16.70	34.09	23.57	26.12	22.47	52.03	45.34	17.90	17.90
10.20	5.94	14.75	4.42	20.69	3.15	20.94	21.52	30.95	5.77	23.01	39.70	40.50	20.21	20.21
9.47	11.21	12.55	17.41	13.02	26.20	21.69	20.17	32.85	0.00	22.99	42.45	27.62	48.48	48.48
10.98	0.71	14.25	9.31	17.59	16.98	26.94	12.62	32.29	0.00	30.75	28.07	28.49	36.13	36.13
9.43	11.20	14.27	13.34	20.74	0.00	15.89	30.52	28.99	18.98	30.78	28.03	27.98	39.62	39.62
9.35	11.36	12.53	16.94	13.76	22.27	26.85	14.23	27.72	23.39	21.00	43.53	46.17	16.04	16.04
9.57	10.98	12.89	14.58	20.71	0.00	26.26	11.40	32.88	0.00	37.56	21.15	43.14	38.77	38.77
10.38	3.10	13.39	14.73	20.59	3.36	26.31	12.12	32.88	0.00	32.88	24.61	29.57	35.74	35.74
9.11	11.67	13.92	13.73	13.32	22.60	27.85	9.00	21.37	36.13	30.51	38.52	47.55	14.10	14.10
9.47	11.08	14.21	12.85	14.55	21.76	28.13	5.97	32.50	5.25	23.84	35.13	47.59	14.25	14.25
10.58	0.32	15.57	0.01	18.42	15.83	21.47	20.66	29.23	20.41	28.00	29.71	27.83	40.30	40.30
9.26	11.42	13.43	14.08	13.92	22.59	19.93	22.61	22.02	27.03	27.49	30.67	39.45	23.34	23.34
10.38	4.41	12.81	15.92	18.86	10.09	36.68	0.00	25.52	24.86	26.44	32.69	47.46	14.19	14.19
10.87	1.41	13.11	16.21	19.84	6.71	18.89	22.86	31.33	6.05	29.14	28.96	44.87	17.83	17.83
8.79	16.63	12.52	18.40	15.10	18.40	18.69	23.50	32.58	0.00	24.75	34.04	30.35	35.16	35.16
11.04	0.00	15.63	0.00	12.71	26.81	19.09	22.58	29.51	19.80	43.48	21.09	33.09	31.94	31.94
10.51	2.73	12.81	16.74	20.27	5.80	17.68	26.19	31.41	7.28	34.53	22.69	61.39	8.61	8.61
10.24	4.91	14.36	8.73	14.17	21.74	34.69	4.66	30.57	17.67	23.47	35.67	41.42	20.99	20.99
10.22	5.50	15.60	0.00	20.10	5.07	28.17	5.14	22.06	28.83	25.62	32.46	28.30	36.55	36.55
9.63	9.88	15.44	0.66	18.03	16.22	26.84	11.31	32.51	0.00	29.59	28.76	39.21	25.45	25.45
8.91	12.19	12.37	17.60	20.70	4.80	24.62	17.74	25.61	24.32	32.52	24.97	45.82	15.83	15.83
10.30	3.29	15.80	0.00	18.69	15.56	27.94	5.83	29.57	20.56	29.26	28.92	26.77	60.69	60.69
9.62	10.93	11.89	15.51	20.74	0.00	27.58	6.02	23.28	27.61	31.13	27.41	46.13	15.52	15.52
8.87	15.08	12.46	17.05	13.43	23.04	21.96	19.87	30.65	18.08	37.01	21.97	43.32	18.52	18.52
8.77	11.83	15.39	1.85	13.40	24.15	26.81	14.71	23.27	28.51	26.15	32.80	40.44	22.35	22.35
10.40	1.98	12.97	15.20	19.98	7.19	27.80	6.07	29.01	21.43	31.44	27.05	47.68	13.97	13.97
9.94	8.21	13.74	14.03	14.02	22.28	28.19	5.01	30.34	17.61	28.88	29.04	43.38	20.07	20.07
9.48	7.82	13.86	17.58	13.84	23.87	15.23	24.53	26.63	37.84	21.17	43.05	20.37	32.18	32.18
9.38	11.17	12.17	17.37	16.11	20.25	24.58	17.78	24.67	25.84	22.94	41.99	37.24	28.01	28.01
10.67	1.87	14.72	5.11	14.43	22.04	27.82	6.05	28.97	22.25	27.09	31.76	46.20	15.80	15.80
9.23	11.32	14.44	9.96	13.00	26.08	27.80	10.97	26.63	23.48	34.21	22.57	37.44	26.86	26.86
8.83	12.18	13.50	14.17	20.57	5.29	27.28	9.21	24.75	25.78	33.14	23.62	35.16	19.00	19.00
9.63	9.46	14.33	10.80	20.66	5.33	19.53	22.72	30.70	5.74	29.06	28.94	44.15	27.50	27.50
10.37	4.36	15.34	0.41	18.91	10.27	21.32	20.95	25.71	24.61	37.06	21.58	31.01	33.87	33.87
9.67	10.88	14.17	13.35	17.22	17.66	22.61	19.07	22.03	28.66	29.67	28.58	29.87	35.31	35.31
10.29	4.16	15.24	1.45	14.03	21.68	26.07	15.54	25.44	22.87	38.54	21.20	43.08	19.67	19.67
10.75	1.94	13.03	16.48	16.40	20.14	23.84	6.38	30.80	7.38	29.55	28.75	31.91	32.18	32.18
10.07	5.69	13.32	14.83	15.09	21.60	26.76	14.73	28.75	21.43	24.18	24.25	31.25	33.51	33.51
10.42	3.25	15.87	0.00	16.66	19.23	24.41	18.16	30.99	10.24	36.50	22.08	30.69	34.96	34.96
8.98	12.07	14.11	13.47	13.06	25.60	20.09	22.01	30.68	12.51	35.15	22.44	31.97	33.11	33.11
9.39	11.16	12.39	19.77	15.11	21.03	24.92	17.50	26.86	24.07	34.70	22.41	52.49	10.67	10.67
8.66	12.20	14.79	2.38	13.49	23.42	18.21	23.57	28.06	23.28	26.34	32.88	28.22	39.38	39.38
9.36	11.19	12.48	19.51	15.70	19.56	29.91	3.13	30.84	7.16	25.20	33.52	35.90	28.59	28.59
9.31	11.55	13.31	15.69	17.46	18.36	35.81	3.19	29.34	18.75	23.54	34.22	27.72	50.39	50.39
9.61	10.94	14.57	5.36	20.71	4.01	27.40	12.10	31.18	10.44	34.66	21.11	35.81	29.60	29.60
9.13	11.42	14.01	13.72	18.20	13.25	20.82	21.26	22.88	26.49	31.47	25.30	27.49	43.12	43.12
9.88	6.88	15.51	1.79	13.68	24.17	18.40	24.19	24.05	27.00	30.66	28.17	31.45	33.25	33.25
9.69	10.86	15.60	1.17	14.73	21.81	24.20	18.46	29.81	18.14	25.20	33.84	38.50	25.25	25.25
9.68	10.87	14.23	12.04	18.80	15.45	22.73	18.80	31.88	3.21	31.50	26.99	45.20	18.42	18.42
9.68	9.55	13.81	13.84	17.64	16.61	27.96	5.08	28.66	22.16	20.29	40.91	27.36	50.31	50.31
10.04	4.90	15.64	0.00	15.17	21.00	20.99	21.24	22.83	29.04	38.00	20.62	50.23	12.06	12.06
9.21	11.44	12.36	17.16	19.31	9.05	16.01	29.56	25.38	25.11	23.43	33.11	31.34	33.81	33.81
8.93	11.95	14.56	4.96	17.17	18.15	30.49	5.11	29.22	20.23	22.03	42.41	28.09	36.38	36.38
10.91	0.00	14.48	4.08	20.64	5.20	26.99	10.96	28.35	23.11	25.66	33.10	27.03	49.67	49.67
10.87	0.00	13.90	13.50	17.04	26.33	17.04	26.33	17.04	26.33	24.71	33.40	28.61	36.01	36.01
10.28	2.91	15.54	0.59	18.73	9.21	30.67	3.66	32.71	0.00	22.87	43.13	55.18	12.04	12.04
9.12	12.13	13.66	14.08	14.16	22.44	25.75	15.00	28.60	21.23	22.50	41.04	46.29	14.07	14.07
9.64	10.91	14.44	9.12	19.40	5.45	26.04	15.06	23.12	27.37	23.32	35.94	34.74	31.68	31.68
9.45	11.24	13.19	14.67	14.48	21.79	16.85	25.37	31.34	5.62	22.88	37.60	27.62	42.20	42.20
10.40	2.86	13.52	14.23	13.20	25.90	39.10	4.82	31.33	5.97	26.57	32.53	27.23	51.63	51.63
10.90	1.60	14.54	5.78	16.65	19.04	37.51	1.85	32.16	6.88	30.90	27.36	30.85	34.76	34.76
8.75	17.33	13.79	13.65	18.49	15.60	21.48	20.01	30.40	11.30	33.52	23.71	40.50	21.17	21.17
11.83	0.00	14.08	13.50	13.13	22.89	35.84	4.29	24.08	25.65	28.12	29.88	49.65	12.00	12.00
9.21	11.63	13.12	14.92	13.46	22.84	25.31	16.38	32.42	4.45	35.42	19.68	42.72	19.55	19.55
9.86	7.20	13.25	14.93	20.73	0.98	17.16	25.64	20.65	34.19	29.09	28.81	47.56	14.76	14.76
9.69	9.48	13.96	13.44	20.33	8.64	17.13	28.28	30.51	11.18	22.66	45.25	56.64	10.72	10.72
9.49	11.06	13.61	13.92	19.70	8.05	17.61	26.76	28.33	23.28	26.57	32.26	26.71	59.48	59.48
9.41	11.32	15.08	2.82	20.45	5.72	24.65	16.54	32.05	5.41	24.63	34.65	30.12	35.73	35.73
9.07	11.51	12.80	16.84	20.46	5.09	25.52	15.92	27.02	23.17	27.30	30.97	40.34	22.79	22.79
10.53	2.50	14.31	11.52	20.76	0.00	17.56	26.77	24.33	25.78	22.39	40.82	27.79	38.68	38.68
9.62	10.93	14.80	0.00	17.89	16.55	16.06	26.59	25.19	25.22	23.34	35.20	33.42	31.76	31.76
10.30	4.64	12.33	20.34	15.62	20.68	26.61	14.49	22.88	29.05	29.14	28.74	31.93	31.26	31.26
9.44	11.22	13.46	14.38	17.78	8.42	21.38	19.75	22.00	37.49	26.23	32.96	35.11	31.24	31.24
9.76	9.41	14.24	13.43	20.97	0.00	19.51	22.39	27.31	23.51	28.39	29.50	42.74	18.91	18.91
10.05	7.57	14.55	5.87	20.50	5.49	23.70	18.56	30.28	19.26	30.16	28.19	37.44	26.00	26.00
10.61	0.00	13.50	16.35	13.07	24.99	21.17	21.17	28.87	20.57	28.67	29.41			

Πίνακας Α.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης συνθετικής χρονοσειράς 12 μηνών

i	j	$Q_{i,j}$	q_j	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	9,95	0	0,084	0,737	300	63,1	73,1	18,6
1	2	22,63	0	0,074	0,6152	300	54,5	77,1	13,7
1	3	75,73	0	0,074	0,6718	300	63,4	139,1	15,0
1	4	56,83	0	0,069	0,6607	300	124,1	180,9	13,6
1	5	22,49	0	0,063	0,5706	300	167,3	189,8	10,8
1	6	25,68	0	0,071	0,6112	300	179,0	204,7	13,1
1	7	11,69	0	0,073	0,5403	300	191,6	203,3	11,8
1	8	11,6	0	0,083	0,6794	300	191,5	203,1	17,0
1	9	4,61	0	0,090	0,6061	300	186,1	190,7	16,3
1	10	3,18	0	0,137	0,6209	300	174,5	177,6	25,5
1	11	1,6	0	0,094	0,6597	300	152,1	153,7	18,5
1	12	8,4	0	0,088	0,6224	300	135,2	143,6	16,4
Άθροισμα									190,3

Πίνακας Α.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης συνθετικής χρονοσειράς 12 μηνών

i	j	$Q_{i,j}$	q_j	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	13,79	0	0,084	0,737	300	63,1	76,9	18,6
1	2	27,26	0	0,074	0,6152	300	58,3	85,6	13,7
1	3	41,11	0	0,074	0,6718	300	71,8	113,0	15,0
1	4	68,4	0	0,069	0,6607	300	98,0	166,4	13,6
1	5	48,16	0	0,063	0,5706	300	152,7	200,9	10,8
1	6	29,33	0	0,071	0,6112	300	190,1	219,4	13,1
1	7	29,69	0	0,073	0,5403	300	206,3	236,0	11,8
1	8	15,03	0	0,083	0,6794	300	224,2	239,3	17,0
1	9	8,08	0	0,090	0,6061	300	222,3	230,4	16,3
1	10	9,06	0	0,137	0,6209	300	214,1	223,2	25,5
1	11	1,23	0	0,094	0,6597	300	197,7	198,9	18,5
1	12	1,9	0	0,088	0,6224	300	180,4	182,3	16,4
Άθροισμα									190,3

Πίνακας Α.12: Αποτελέσματα προσομοίωσης συνθετικής χρονοσειράς 12 μηνών

i	j	$Q_{i,j}$	q_j	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	1,67	0	0,084	0,737	300	63,1	64,8	18,6
1	2	16,01	0	0,074	0,6152	300	46,2	62,2	13,7
1	3	3,3	0	0,074	0,6718	300	48,5	51,8	15,0
1	4	21,26	0	0,069	0,6607	300	36,8	58,0	13,6
1	5	31,06	0	0,063	0,5706	300	44,4	75,5	10,8
1	6	38,09	0	0,071	0,6112	300	64,6	102,7	13,1
1	7	33,22	0	0,073	0,5403	300	89,7	122,9	11,8
1	8	21,49	0	0,083	0,6794	300	111,1	132,6	17,0
1	9	9,79	0	0,090	0,6061	300	115,6	125,4	16,3
1	10	5,47	0	0,137	0,6209	300	109,1	114,6	25,5
1	11	0,54	0	0,094	0,6597	300	89,1	89,7	18,5
1	12	0	0	0,088	0,6224	300	71,1	71,1	16,4
Άθροισμα									190,3

Πίνακας Α.13: Αποτελέσματα προσομοίωσης συνθετικής χρονοσειράς 24 μηνών

i	j	$Q_{i,j}$	q_i	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	9,12	0	0,084	0,419175	300	63,1	72,2	10,6
1	2	20,08	0	0,074	0,317528	300	61,7	81,7	7,1
1	3	60,19	0	0,074	0,255319	300	74,6	134,8	5,7
1	4	39,32	0	0,069	0,347016	300	129,1	168,5	7,2
1	5	31,18	0	0,063	0,222234	300	161,3	192,5	4,2
1	6	28,66	0	0,071	0,309683	300	188,3	216,9	6,6
1	7	19,46	0	0,073	0,339522	300	210,3	229,8	7,4
1	8	10,32	0	0,083	0,440488	300	222,4	232,7	11,0
1	9	3,96	0	0,090	0,45936	300	221,7	225,6	12,3
1	10	5,79	0	0,137	0,590599	300	213,3	219,1	24,2
1	11	3,33	0	0,094	0,511018	300	194,8	198,2	14,3
1	12	2,45	0	0,088	0,462466	300	183,8	186,3	12,2
2	1	9,15	0	0,084	0,419175	300	174,1	183,3	10,6
2	2	8,61	0	0,074	0,317528	300	172,7	181,6	7,1
2	3	20,08	0	0,074	0,255319	300	174,5	195,3	5,7
2	4	9,77	0	0,069	0,347016	300	189,6	199,8	7,2
2	5	43,79	0	0,063	0,222234	300	192,7	237,0	4,2
2	6	29,85	0	0,071	0,309683	300	232,8	262,8	6,6
2	7	24,22	0	0,073	0,339522	300	256,2	280,3	7,4
2	8	12,58	0	0,083	0,440488	300	272,9	284,7	11,0
2	9	10,95	0	0,090	0,45936	300	273,7	283,1	12,3
2	10	7,3	0	0,137	0,590599	300	270,7	276,0	24,2
2	11	2,42	0	0,094	0,511018	300	251,7	252,0	14,3
2	12	5,46	0	0,088	0,462466	300	237,7	241,7	12,2
Άθροισμα									245,8

Πίνακας Α.14: Αποτελέσματα προσομοίωσης συνθετικής χρονοσειράς 24 μηνών

i	j	$Q_{i,j}$	q_i	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	1,67	0	0,084	0,419175	300	63,1	64,8	10,6
1	2	16,01	0	0,074	0,317528	300	54,2	70,2	7,1
1	3	3,3	0	0,074	0,255319	300	63,1	66,4	5,7
1	4	21,26	0	0,069	0,347016	300	60,7	82,0	7,2
1	5	31,06	0	0,063	0,222234	300	74,8	105,9	4,2
1	6	38,09	0	0,071	0,309683	300	101,7	139,8	6,6
1	7	33,22	0	0,073	0,339522	300	133,2	166,4	7,4
1	8	21,49	0	0,083	0,440488	300	159,0	180,4	11,0
1	9	9,79	0	0,090	0,45936	300	169,5	179,2	12,3
1	10	5,47	0	0,137	0,590599	300	166,9	172,4	24,2
1	11	0,54	0	0,094	0,511018	300	148,1	148,7	14,3
1	12	0	0	0,088	0,462466	300	134,3	134,3	12,2
2	1	11,32	0	0,084	0,419175	300	122,1	133,5	10,6
2	2	12,57	0	0,074	0,317528	300	122,9	135,8	7,1
2	3	52,74	0	0,074	0,255319	300	128,7	182,1	5,7
2	4	44,98	0	0,069	0,347016	300	176,4	221,9	7,2
2	5	7,25	0	0,063	0,222234	300	214,7	222,5	4,2
2	6	10,51	0	0,071	0,309683	300	218,3	229,0	6,6
2	7	18,97	0	0,073	0,339522	300	222,3	241,2	7,4
2	8	10,11	0	0,083	0,440488	300	233,8	243,1	11,0
2	9	4,45	0	0,090	0,45936	300	232,1	235,0	12,3
2	10	2,42	0	0,137	0,590599	300	222,7	223,0	24,2
2	11	2,92	0	0,094	0,511018	300	198,8	199,6	14,3
2	12	1,53	0	0,088	0,462466	300	185,3	185,4	12,2
Άθροισμα									245,8

Πίνακας Α.15: Αποτελέσματα προσομοίωσης συνθετικής χρονοσειράς 24 μηνών

i	j	$Q_{i,j}$	q_i	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	3,68	0	0,084	0,419175	300	63,1	66,8	10,6
1	2	44,82	0	0,074	0,317528	300	56,2	101,0	7,1
1	3	39,88	0	0,074	0,255319	300	93,9	133,8	5,7
1	4	52,4	0	0,069	0,347016	300	128,1	180,5	7,2
1	5	19,03	0	0,063	0,222234	300	173,4	192,4	4,2
1	6	33,26	0	0,071	0,309683	300	188,2	221,4	6,6
1	7	31,95	0	0,073	0,339522	300	214,8	246,8	7,4
1	8	18,56	0	0,083	0,440488	300	239,4	257,9	11,0
1	9	7,68	0	0,090	0,45936	300	246,9	254,6	12,3
1	10	1,96	0	0,137	0,590599	300	242,3	244,2	24,2
1	11	5,53	0	0,094	0,511018	300	220,0	225,5	14,3
1	12	3,48	0	0,088	0,462466	300	211,2	214,6	12,2
2	1	3,44	0	0,084	0,419175	300	202,4	205,9	10,6
2	2	26,43	0	0,074	0,317528	300	195,3	222,1	7,1
2	3	17,22	0	0,074	0,255319	300	215,0	232,9	5,7
2	4	26,22	0	0,069	0,347016	300	227,2	253,9	7,2
2	5	30,69	0	0,063	0,222234	300	246,7	277,9	4,2
2	6	32,54	0	0,071	0,309683	300	273,7	306,5	6,6
2	7	29,02	0	0,073	0,339522	300	299,8	328,8	7,4
2	8	40,42	0	0,083	0,440488	300	321,4	361,0	11,0
2	9	16,45	0	0,090	0,45936	300	350,0	364,9	12,3
2	10	6,01	0	0,137	0,590599	300	352,5	356,5	24,2
2	11	5,45	0	0,094	0,511018	300	332,2	335,6	14,3
2	12	3,85	0	0,088	0,462466	300	321,2	323,7	12,2
Άθροισμα									245,8

Πίνακας Α.16: Αποτελέσματα προσομοίωσης συνθετικής χρονοσειράς 36 μηνών

i	j	$Q_{i,j}$	q_i	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	9,12	0	0,084	0,437153	300	63,1	72,2	11,0
1	2	20,08	0	0,074	0,293679	300	61,2	81,3	6,6
1	3	60,19	0	0,074	0,375941	300	74,7	134,9	8,4
1	4	39,32	0	0,069	0,246731	300	126,5	165,8	5,1
1	5	31,18	0	0,063	0,245525	300	160,8	191,9	4,7
1	6	28,66	0	0,071	0,29792	300	187,3	215,9	6,4
1	7	19,46	0	0,073	0,434219	300	209,6	229,0	9,5
1	8	10,32	0	0,083	0,463998	300	219,6	229,9	11,6
1	9	3,96	0	0,090	0,499943	300	218,3	222,3	13,4
1	10	5,79	0	0,137	0,582338	300	208,8	214,6	23,9
1	11	3,33	0	0,094	0,536787	300	190,7	194,0	15,1
1	12	2,45	0	0,088	0,506616	300	179,0	181,4	13,4
2	1	9,15	0	0,084	0,437153	300	168,0	177,2	11,0
2	2	8,61	0	0,074	0,293679	300	166,2	175,1	6,6
2	3	20,08	0	0,074	0,375941	300	168,6	189,3	8,4
2	4	9,77	0	0,069	0,246731	300	180,9	191,2	5,1
2	5	43,79	0	0,063	0,245525	300	186,1	230,4	4,7
2	6	29,85	0	0,071	0,29792	300	225,7	255,8	6,4
2	7	24,22	0	0,073	0,434219	300	249,4	273,5	9,5
2	8	12,58	0	0,083	0,463998	300	264,1	275,9	11,6
2	9	10,95	0	0,090	0,499943	300	264,3	273,7	13,4
2	10	7,3	0	0,137	0,582338	300	260,2	265,5	23,9
2	11	2,42	0	0,094	0,536787	300	241,6	241,9	15,1
2	12	5,46	0	0,088	0,506616	300	226,8	230,8	13,4
3	1	4,43	0	0,084	0,437153	300	217,5	222,4	11,0
3	2	30,39	0	0,074	0,293679	300	211,3	244,0	6,6
3	3	20,29	0	0,074	0,375941	300	237,5	260,9	8,4
3	4	53,27	0	0,069	0,246731	300	252,6	307,8	5,1
3	5	72,71	0	0,063	0,245525	300	302,7	377,2	4,7
3	6	49,86	0	0,071	0,29792	300	372,6	423,0	6,4
3	7	35,56	0	0,073	0,434219	300	416,6	451,9	9,5
3	8	16,11	0	0,083	0,463998	300	442,4	456,6	11,6
3	9	7,74	0	0,090	0,499943	300	445,0	449,1	13,4
3	10	4,51	0	0,137	0,582338	300	435,7	435,6	23,9
3	11	2,13	0	0,094	0,536787	300	411,7	409,5	15,1
3	12	0,41	0	0,088	0,506616	300	394,4	391,9	13,4
Άθροισμα									386,8

Πίνακας Α.17: Αποτελέσματα προσομοίωσης συνθετικής χρονοσειράς 36 μηνών

i	j	$Q_{i,j}$	q_i	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	4,55	0	0,084	0,437153	300	63,1	67,7	11,0
1	2	22,82	0	0,074	0,293679	300	56,6	79,5	6,6
1	3	63,49	0	0,074	0,375941	300	72,9	136,4	8,4
1	4	49,43	0	0,069	0,246731	300	128,0	177,4	5,1
1	5	45,71	0	0,063	0,245525	300	172,3	218,0	4,7
1	6	40,56	0	0,071	0,29792	300	213,4	254,0	6,4
1	7	27,77	0	0,073	0,434219	300	247,6	275,4	9,5
1	8	26,85	0	0,083	0,463998	300	265,9	292,7	11,6
1	9	14,21	0	0,090	0,499943	300	281,1	295,4	13,4
1	10	2,33	0	0,137	0,582338	300	281,9	284,2	23,9
1	11	6,88	0	0,094	0,536787	300	260,3	267,2	15,1
1	12	5,13	0	0,088	0,506616	300	252,2	257,3	13,4
2	1	4,78	0	0,084	0,437153	300	243,9	248,7	11,0
2	2	4,15	0	0,074	0,293679	300	237,7	242,2	6,6
2	3	54,59	0	0,074	0,375941	300	235,6	290,9	8,4
2	4	25,84	0	0,069	0,246731	300	282,5	308,8	5,1
2	5	10,51	0	0,063	0,245525	300	303,7	314,7	4,7
2	6	21,43	0	0,071	0,29792	300	310,1	331,7	6,4
2	7	15,37	0	0,073	0,434219	300	325,3	340,6	9,5
2	8	5,3	0	0,083	0,463998	300	331,1	335,7	11,6
2	9	1,96	0	0,090	0,499943	300	324,1	324,5	13,4
2	10	5,76	0	0,137	0,582338	300	311,0	314,7	23,9
2	11	7,14	0	0,094	0,536787	300	290,8	295,9	15,1
2	12	4,18	0	0,088	0,506616	300	280,8	283,5	13,4
3	1	12,49	0	0,084	0,437153	300	270,2	283,1	11,0
3	2	37,84	0	0,074	0,293679	300	272,1	312,2	6,6
3	3	66,54	0	0,074	0,375941	300	305,7	375,4	8,4
3	4	12,39	0	0,069	0,246731	300	367,0	381,4	5,1
3	5	22,32	0	0,063	0,245525	300	376,3	400,4	4,7
3	6	30,66	0	0,071	0,29792	300	395,7	427,0	6,4
3	7	30,24	0	0,073	0,434219	300	420,6	450,6	9,5
3	8	18,84	0	0,083	0,463998	300	441,1	458,0	11,6
3	9	7,97	0	0,090	0,499943	300	446,4	450,7	13,4
3	10	7,03	0	0,137	0,582338	300	437,3	439,8	23,9
3	11	5,87	0	0,094	0,536787	300	415,9	417,3	15,1
3	12	3,83	0	0,088	0,506616	300	402,3	403,2	13,4
Άθροισμα									386,8

Πίνακας Α.18: Αποτελέσματα προσομοίωσης συνθετικής χρονοσειράς 36 μηνών

i	j	$Q_{i,j}$	q_i	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	2,17	0	0,084	0,437153	300	63,1	65,3	11,0
1	2	3,54	0	0,074	0,293679	300	54,3	57,8	6,6
1	3	29,78	0	0,074	0,375941	300	51,2	81,0	8,4
1	4	0,41	0	0,069	0,246731	300	72,6	73,0	5,1
1	5	24,35	0	0,063	0,245525	300	67,9	92,3	4,7
1	6	39,09	0	0,071	0,29792	300	87,6	126,7	6,4
1	7	31,13	0	0,073	0,434219	300	120,4	151,5	9,5
1	8	14,12	0	0,083	0,463998	300	142,0	156,1	11,6
1	9	5,66	0	0,090	0,499943	300	144,6	150,2	13,4
1	10	4,33	0	0,137	0,582338	300	136,8	141,1	23,9
1	11	1,76	0	0,094	0,536787	300	117,2	119,0	15,1
1	12	0,26	0	0,088	0,506616	300	103,9	104,2	13,4
2	1	9,44	0	0,084	0,437153	300	90,8	100,3	11,0
2	2	33,26	0	0,074	0,293679	300	89,2	122,8	6,6
2	3	34,37	0	0,074	0,375941	300	116,3	151,3	8,4
2	4	31,41	0	0,069	0,246731	300	142,9	174,8	5,1
2	5	40,48	0	0,063	0,245525	300	169,7	210,7	4,7
2	6	21,37	0	0,071	0,29792	300	206,0	227,6	6,4
2	7	21,67	0	0,073	0,434219	300	221,2	242,8	9,5
2	8	16,72	0	0,083	0,463998	300	233,3	249,3	11,6
2	9	9,58	0	0,090	0,499943	300	237,7	245,7	13,4
2	10	9,22	0	0,137	0,582338	300	232,3	239,4	23,9
2	11	7,02	0	0,094	0,536787	300	215,5	220,4	15,1
2	12	4,43	0	0,088	0,506616	300	205,4	208,4	13,4
3	1	2,88	0	0,084	0,437153	300	195,0	198,3	11,0
3	2	35,5	0	0,074	0,293679	300	187,3	225,1	6,6
3	3	38,32	0	0,074	0,375941	300	218,6	260,1	8,4
3	4	75,07	0	0,069	0,246731	300	251,7	328,7	5,1
3	5	42,69	0	0,063	0,245525	300	323,6	368,1	4,7
3	6	46,86	0	0,071	0,29792	300	363,5	410,9	6,4
3	7	39,19	0	0,073	0,434219	300	404,5	443,4	9,5
3	8	44,35	0	0,083	0,463998	300	434,0	476,4	11,6
3	9	18,02	0	0,090	0,499943	300	464,8	479,1	13,4
3	10	3,05	0	0,137	0,582338	300	465,7	464,2	23,9
3	11	3,54	0	0,094	0,536787	300	440,3	439,5	15,1
3	12	6,42	0	0,088	0,506616	300	424,4	427,9	13,4
Άθροισμα									386,8

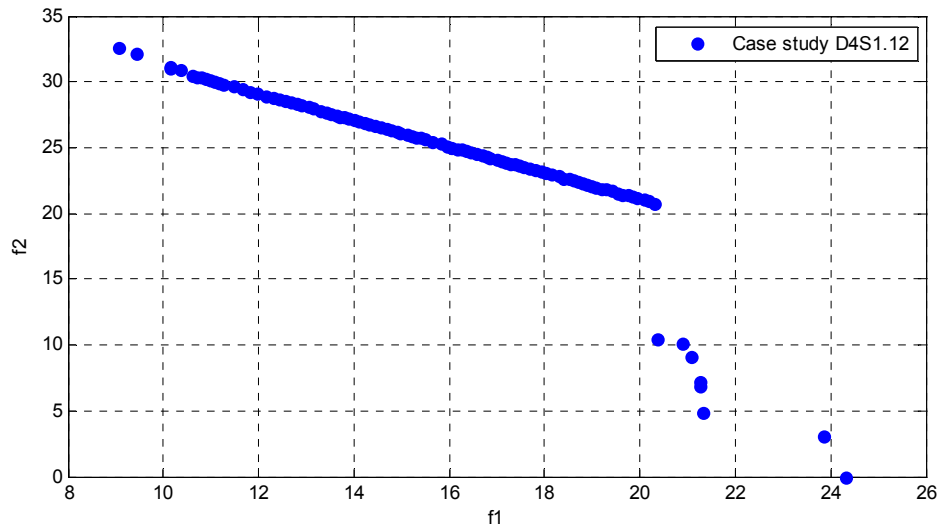
Πίνακας Α.19: Αποτελέσματα προσομοίωσης ιστορικής χρονοσειράς 1980 - 1983

i	j	$Q_{i,j}$	q_j	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$SP_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	23,7	0	0,084	0,437153	300	63,1	86,8	0,00	11,0
1	2	44,4	0	0,074	0,293679	300	75,8	120,2	0,00	6,6
1	3	78,6	0	0,074	0,375941	300	113,6	192,2	0,00	8,4
1	4	65,4	0	0,069	0,246731	300	183,8	249,2	0,00	5,1
1	5	54,6	0	0,063	0,245525	300	244,1	298,7	0,00	4,7
1	6	48,1	0	0,071	0,29792	300	294,1	342,2	0,00	6,4
1	7	35,6	0	0,073	0,434219	300	335,8	371,4	0,00	9,5
1	8	20,5	0	0,083	0,463998	300	361,9	382,4	0,00	11,6
1	9	14,3	0	0,090	0,499943	300	370,9	385,2	0,00	13,4
1	10	9,6	0	0,137	0,582338	300	371,7	381,3	0,00	23,9
1	11	12,3	0	0,094	0,536787	300	357,4	369,7	0,00	15,1
1	12	10,9	0	0,088	0,506616	300	354,7	365,6	0,00	13,4
2	1	12,8	0	0,084	0,437153	300	352,2	365,0	0,00	11,0
2	2	13,8	0	0,074	0,293679	300	354,0	368,1	0,00	6,6
2	3	100	0	0,074	0,375941	300	361,6	462,2	0,00	8,4
2	4	32,1	0	0,069	0,246731	300	453,8	486,4	0,00	5,1
2	5	22,7	0	0,063	0,245525	300	481,3	504,5	0,00	4,7
2	6	34,2	0	0,071	0,29792	300	499,9	534,3	0,00	6,4
2	7	36,9	0	0,073	0,434219	300	527,9	564,7	0,00	9,5
2	8	31,2	0	0,083	0,463998	300	555,2	585,7	0,00	11,6
2	9	9,2	0	0,090	0,499943	300	574,1	581,7	0,00	13,4
2	10	3,9	0	0,137	0,582338	300	568,3	570,1	0,00	23,9
2	11	11,07	0	0,094	0,536787	300	546,2	555,2	0,00	15,1
2	12	10,7	0	0,088	0,506616	300	540,1	549,4	0,00	13,4
3	1	10,5	0	0,084	0,437153	300	536,0	547,0	0,00	11,0
3	2	20,2	0	0,074	0,293679	300	535,9	558,4	0,00	6,6
3	3	55,9	0	0,074	0,375941	300	551,9	611,0	0,00	8,4
3	4	18,8	0	0,069	0,246731	300	602,6	623,4	0,00	5,1
3	5	19,1	0	0,063	0,245525	300	618,3	639,1	4,39	4,7
3	6	23,1	0	0,071	0,29792	300	630,1	653,8	17,30	6,4
3	7	19,7	0	0,073	0,434219	300	630,1	649,5	9,95	9,5
3	8	12,9	0	0,083	0,463998	300	630,1	641,1	0,00	11,6
3	9	10,9	0	0,090	0,499943	300	629,5	636,7	0,00	13,4
3	10	9,8	0	0,137	0,582338	300	623,3	628,5	0,00	23,9
3	11	6,4	0	0,094	0,536787	300	604,6	606,6	0,00	15,1
3	12	0,9	0	0,088	0,506616	300	591,6	589,6	0,00	13,4
Άθροισμα										386,8

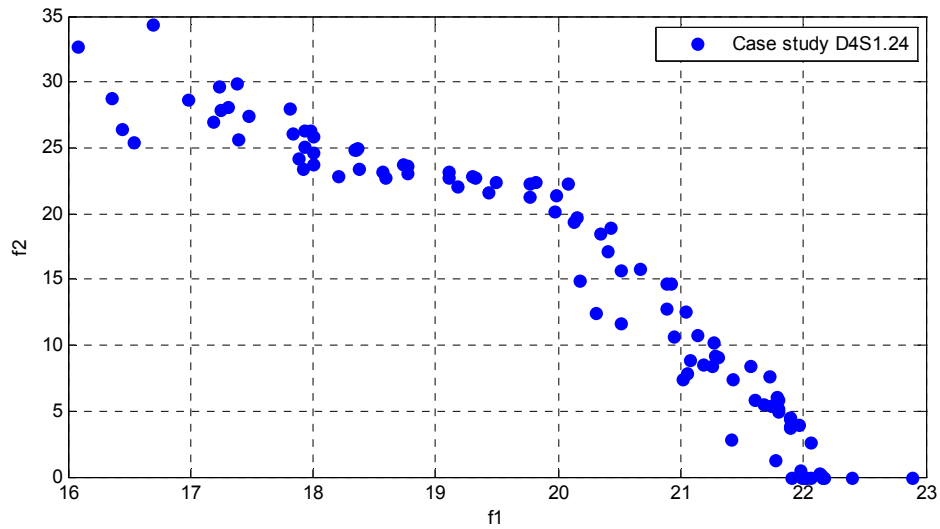
Πίνακας Α.20: Αποτελέσματα προσομοίωσης ιστορικής χρονοσειράς 1998 - 2001

i	j	$Q_{i,j}$	q_j	λ_j	x_j	D	$S_{i,j}$	$SA_{i,j}$	$SP_{i,j}$	$R_{i,j}$
1	1	4,6	0	0,084	0,437153	300	63,1	67,7	0,00	11,0
1	2	26,1	0	0,074	0,293679	300	56,7	82,8	0,00	6,6
1	3	31,2	0	0,074	0,375941	300	76,2	107,4	0,00	8,4
1	4	15,8	0	0,069	0,246731	300	99,0	114,8	0,00	5,1
1	5	48,1	0	0,063	0,245525	300	109,7	157,8	0,00	4,7
1	6	52,9	0	0,071	0,29792	300	153,2	206,1	0,00	6,4
1	7	32,7	0	0,073	0,434219	300	199,7	232,4	0,00	9,5
1	8	18,4	0	0,083	0,463998	300	222,9	241,3	0,00	11,6
1	9	12,5	0	0,090	0,499943	300	229,8	242,3	0,00	13,4
1	10	8,6	0	0,137	0,582338	300	228,8	237,4	0,00	23,9
1	11	5,1	0	0,094	0,536787	300	213,5	218,6	0,00	15,1
1	12	4,2	0	0,088	0,506616	300	203,6	207,8	0,00	13,4
2	1	13,3	0	0,084	0,437153	300	194,4	207,7	0,00	11,0
2	2	62,9	0	0,074	0,293679	300	196,7	259,9	0,00	6,6
2	3	61,5	0	0,074	0,375941	300	253,4	315,5	0,00	8,4
2	4	34,6	0	0,069	0,246731	300	307,1	342,2	0,00	5,1
2	5	54,8	0	0,063	0,245525	300	337,1	392,4	0,00	4,7
2	6	29,5	0	0,071	0,29792	300	387,8	417,5	0,00	6,4
2	7	26,1	0	0,073	0,434219	300	411,1	437,1	0,00	9,5
2	8	14	0	0,083	0,463998	300	427,6	440,9	0,00	11,6
2	9	7,4	0	0,090	0,499943	300	429,3	435,1	0,00	13,4
2	10	6,1	0	0,137	0,582338	300	421,7	425,7	0,00	23,9
2	11	5,2	0	0,094	0,536787	300	401,8	404,9	0,00	15,1
2	12	0,2	0	0,088	0,506616	300	389,8	388,6	0,00	13,4
3	1	6,4	0	0,084	0,437153	300	375,2	382,1	0,00	11,0
3	2	8	0	0,074	0,293679	300	371,1	381,4	0,00	6,6
3	3	11,8	0	0,074	0,375941	300	374,8	389,8	0,00	8,4
3	4	11,7	0	0,069	0,246731	300	381,4	395,1	0,00	5,1
3	5	21,7	0	0,063	0,245525	300	390,0	413,5	0,00	4,7
3	6	19,2	0	0,071	0,29792	300	408,8	428,6	0,00	6,4
3	7	25,2	0	0,073	0,434219	300	422,2	447,2	0,00	9,5
3	8	16,8	0	0,083	0,463998	300	437,7	452,5	0,00	11,6
3	9	10,8	0	0,090	0,499943	300	441,0	448,1	0,00	13,4
3	10	10,9	0	0,137	0,582338	300	434,7	441,0	0,00	23,9
3	11	7,9	0	0,094	0,536787	300	417,1	420,6	0,00	15,1
3	12	9,9	0	0,088	0,506616	300	405,5	412,6	0,00	13,4
Άθροισμα										386,8

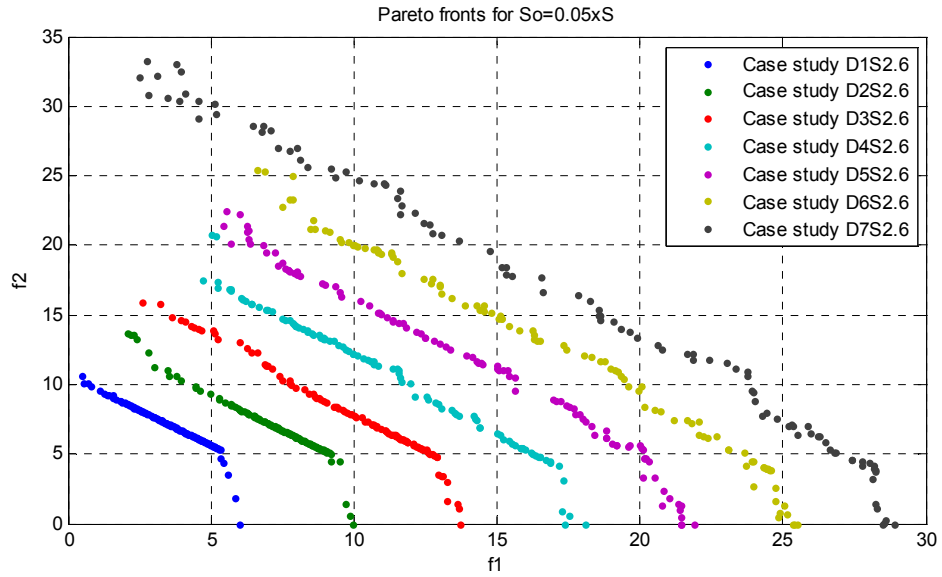
Παράρτημα Β: Σχήματα



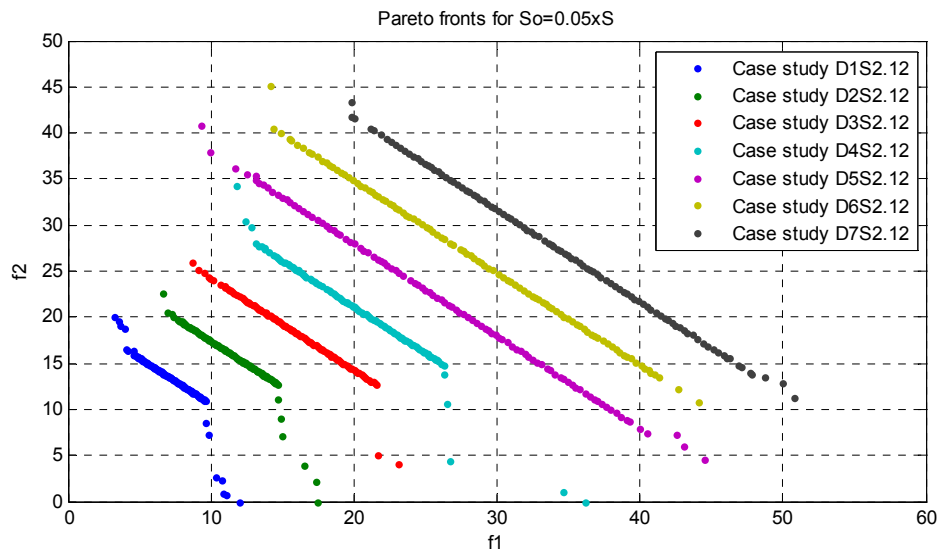
Σχήμα Β.1: Μέτωπο Pareto που προκύπτει για το βασικό σενάριο για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών



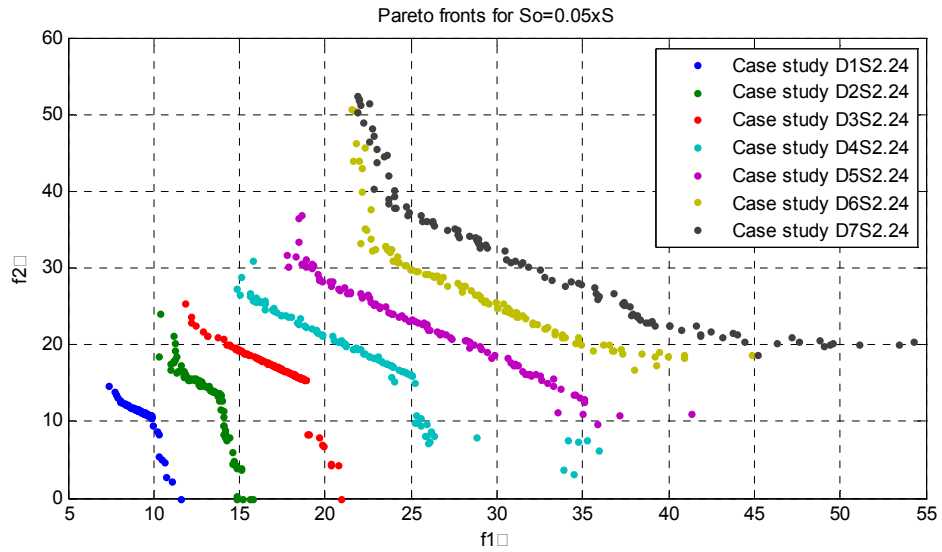
Σχήμα Β.2: Μέτωπο Pareto που προκύπτει για το βασικό σενάριο για χρονικό ορίζοντα 24 μηνών



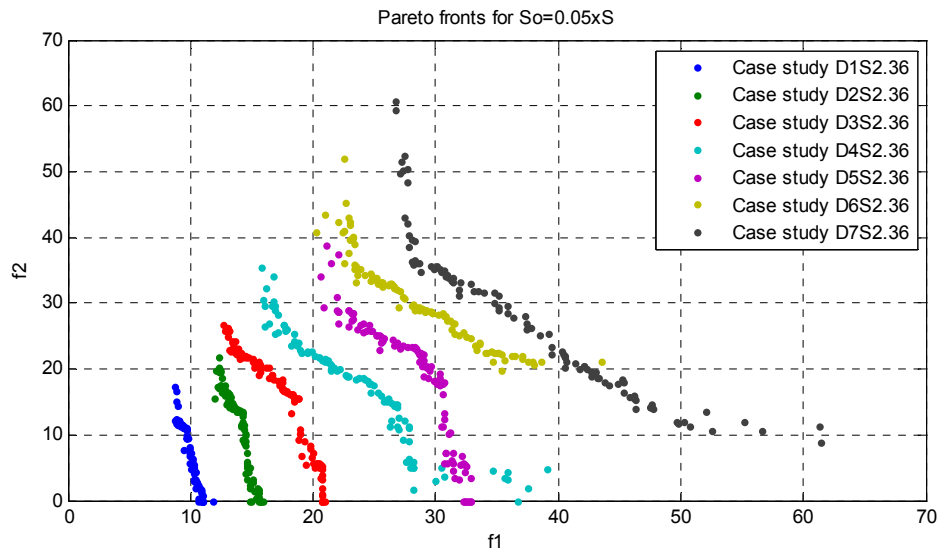
Σχήμα Β.3: Μέτωπα Pareto για όλες τις πιθανές τιμές ζήτησης και τιμή αρχικού αποθέματος το 5% του συνολικού ωφέλιμου για χρονικό ορίζοντα 6 μηνών



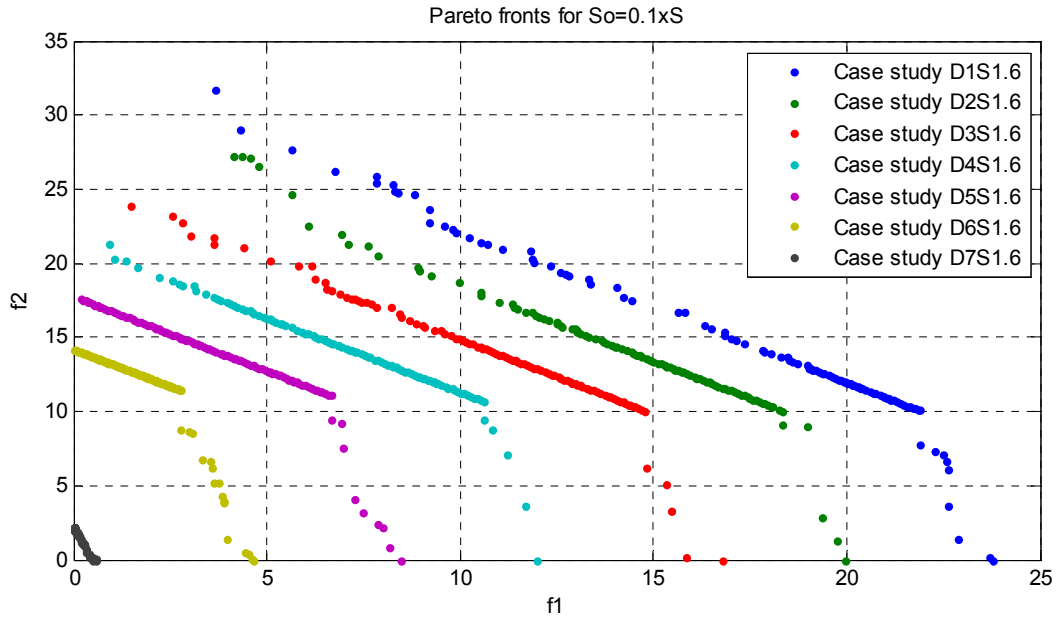
Σχήμα Β.4: Μέτωπα Pareto για όλες τις πιθανές τιμές ζήτησης και τιμή αρχικού αποθέματος το 5% του συνολικού ωφέλιμου για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών



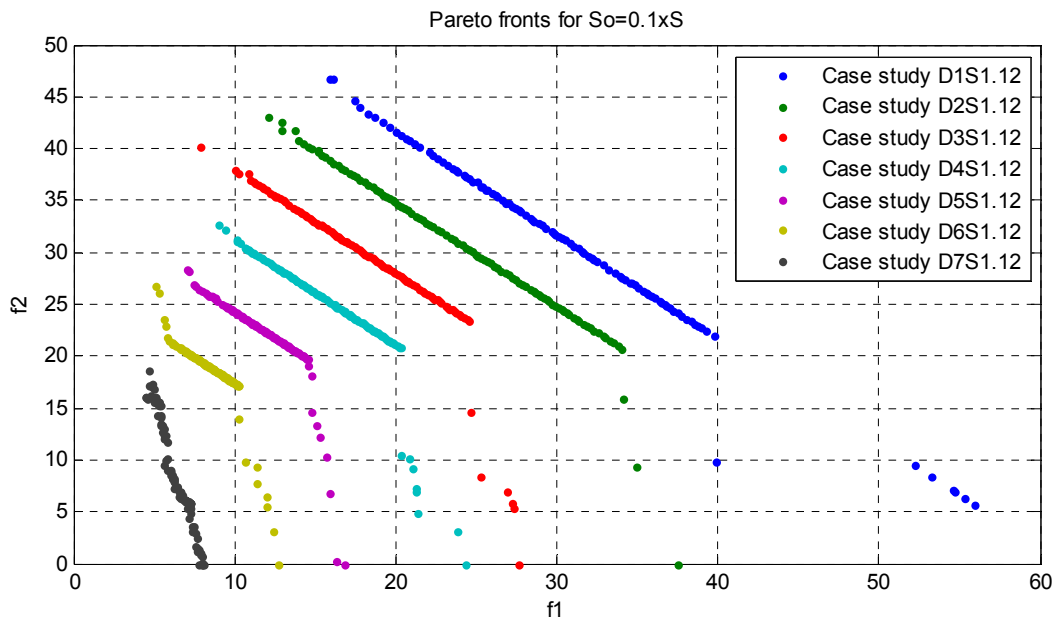
Σχήμα Β.5: Μέτωπα Pareto για όλες τις πιθανές τιμές ζήτησης και τιμή αρχικού αποθέματος το 5% του συνολικού ωφέλιμου για χρονικό ορίζοντα 24 μηνών



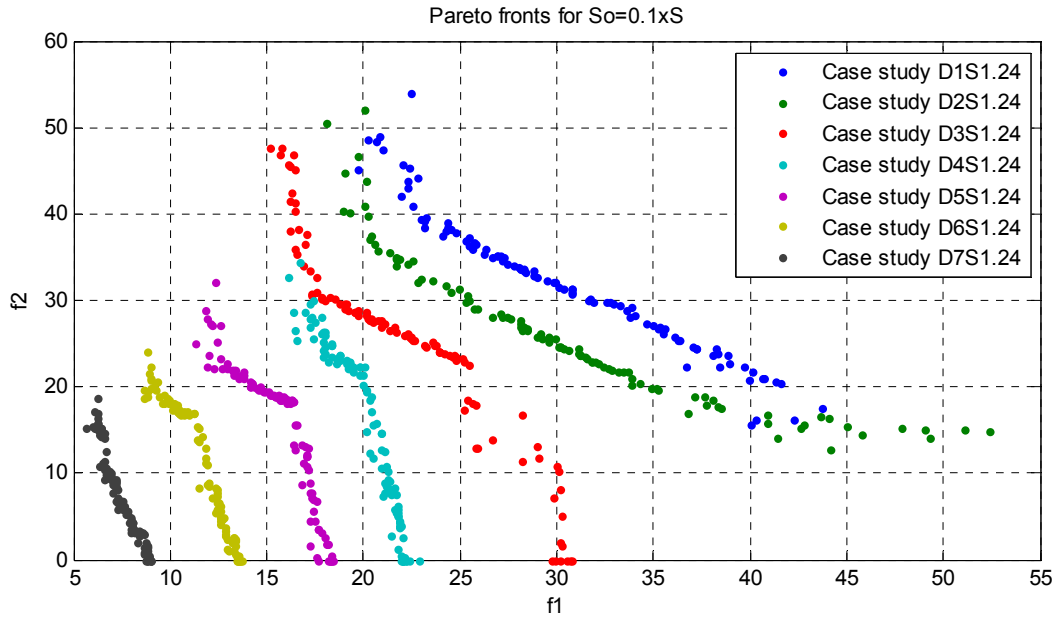
Σχήμα Β.6: Μέτωπα Pareto για όλες τις πιθανές τιμές ζήτησης και τιμή αρχικού αποθέματος το 5% του συνολικού ωφέλιμου για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών



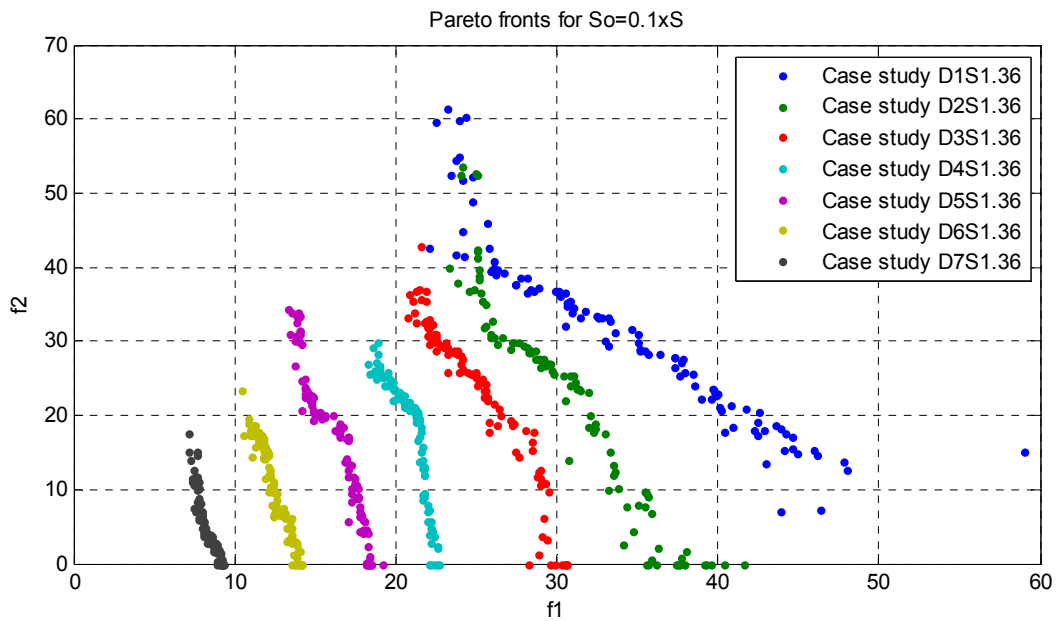
Σχήμα Β.7: Μέτωπα Pareto για όλες τις πιθανές τιμές ζήτησης και τιμή αρχικού αποθέματος το 10% του συνολικού ωφέλιμου για χρονικό ορίζοντα 6 μηνών



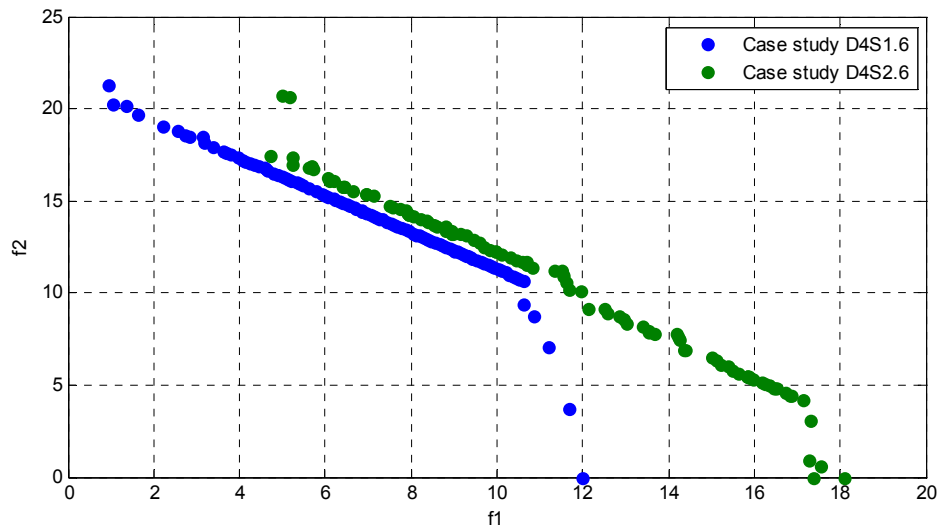
Σχήμα Β.8: Μέτωπα Pareto για όλες τις πιθανές τιμές ζήτησης και τιμή αρχικού αποθέματος το 10% του συνολικού ωφέλιμου για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών



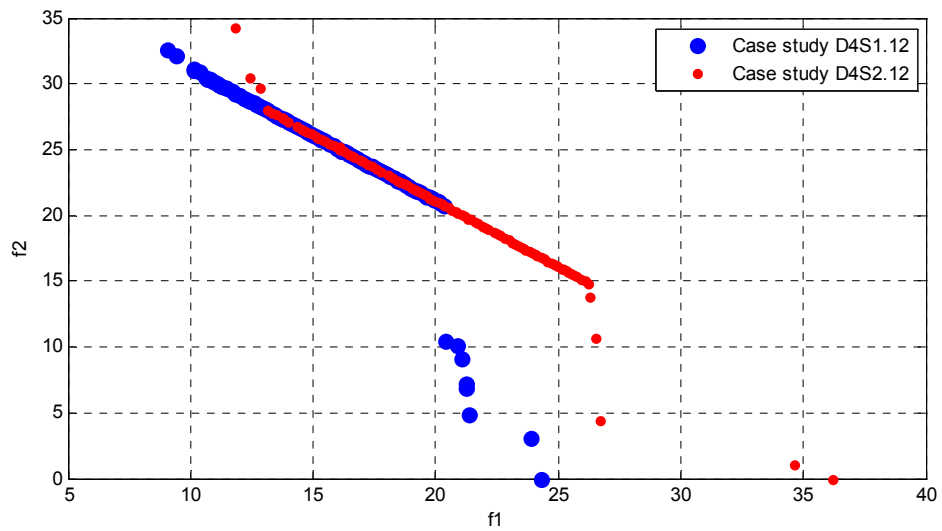
Σχήμα Β.9: Μέτωπα Pareto για όλες τις πιθανές τιμές ζήτησης και τιμή αρχικού αποθέματος το 10% του συνολικού ωφέλιμου για χρονικό ορίζοντα 24 μηνών



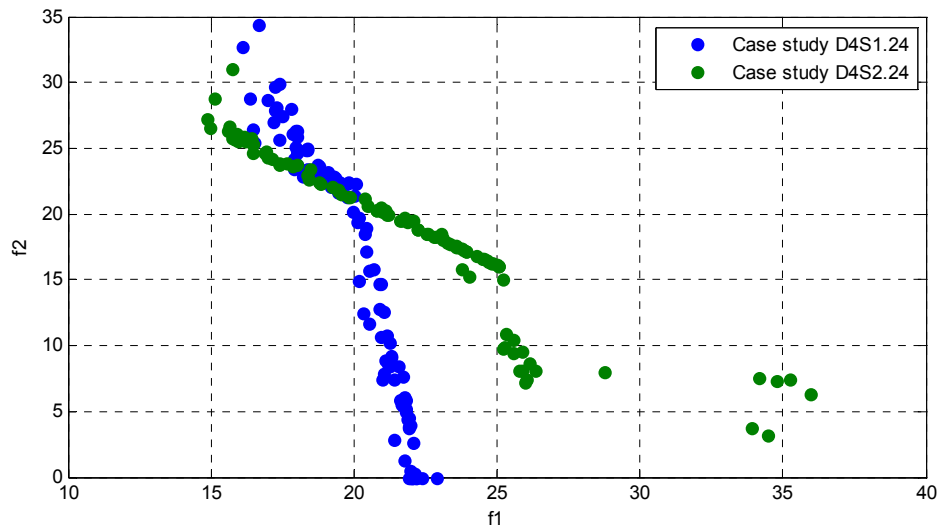
Σχήμα Β.10: Μέτωπα Pareto για όλες τις πιθανές τιμές ζήτησης και τιμή αρχικού αποθέματος το 10% του συνολικού ωφέλιμου για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών



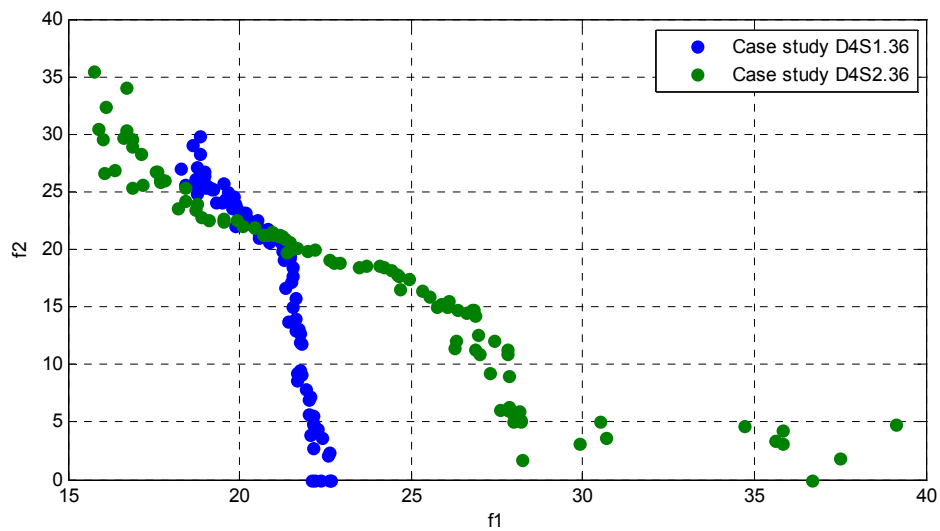
Σχήμα Β.11: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=300 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 6 μηνών



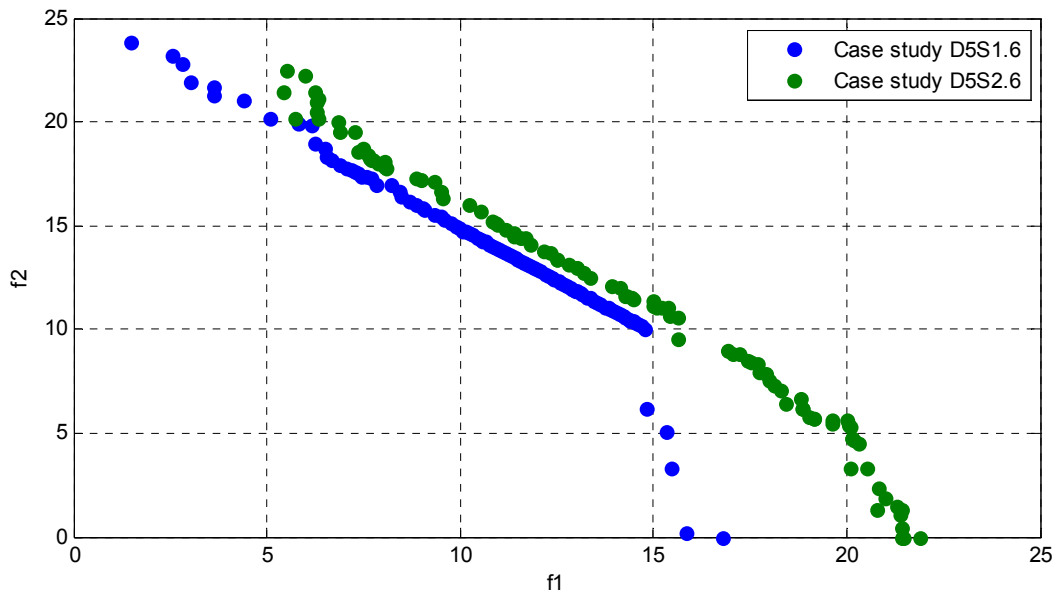
Σχήμα Β.12: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=300 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών



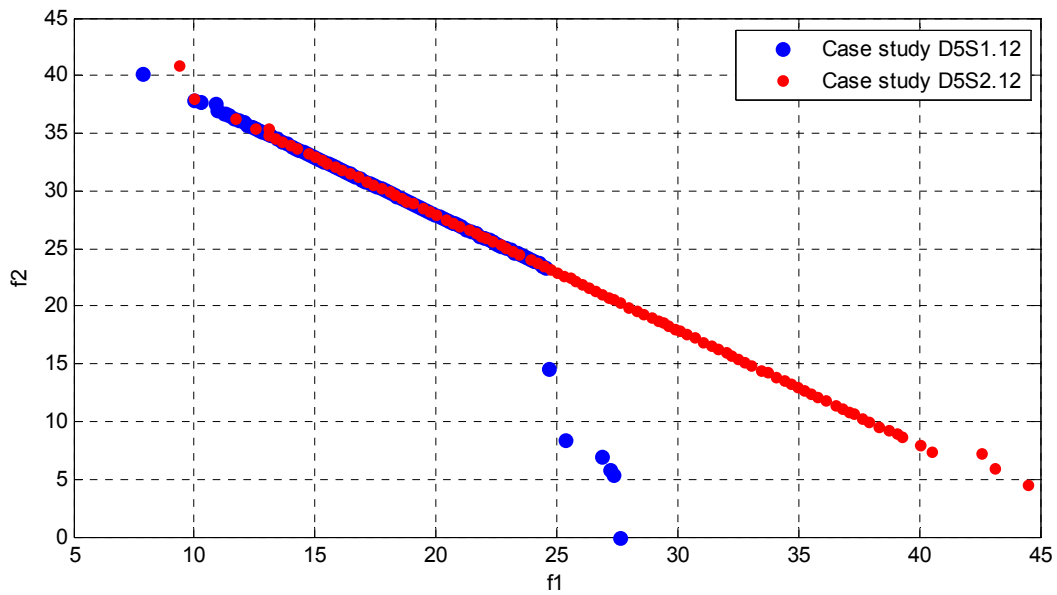
Σχήμα Β.13: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=300 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 24 μηνών



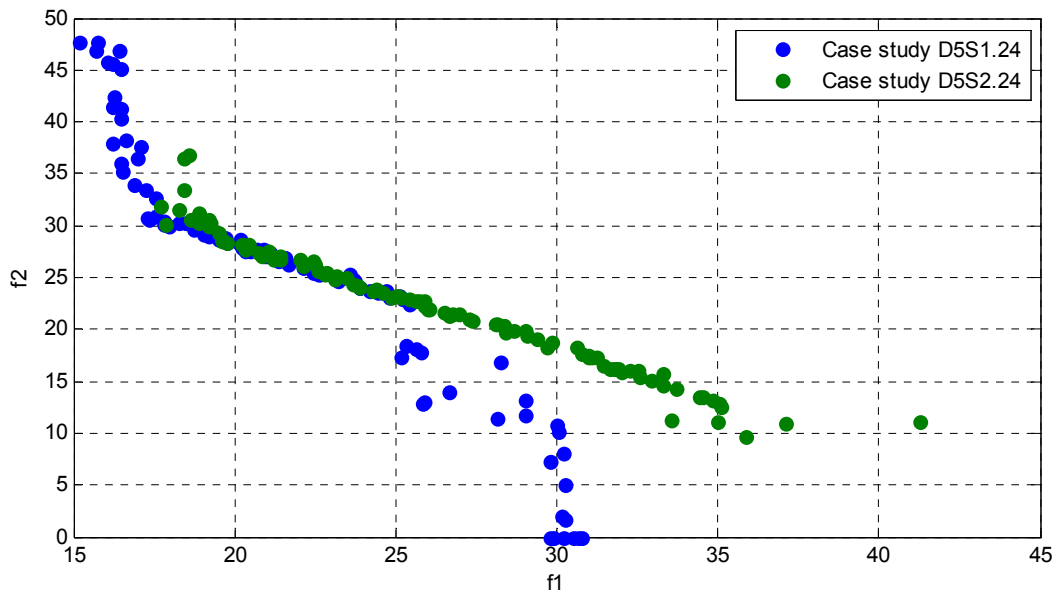
Σχήμα Β.14: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=300 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών



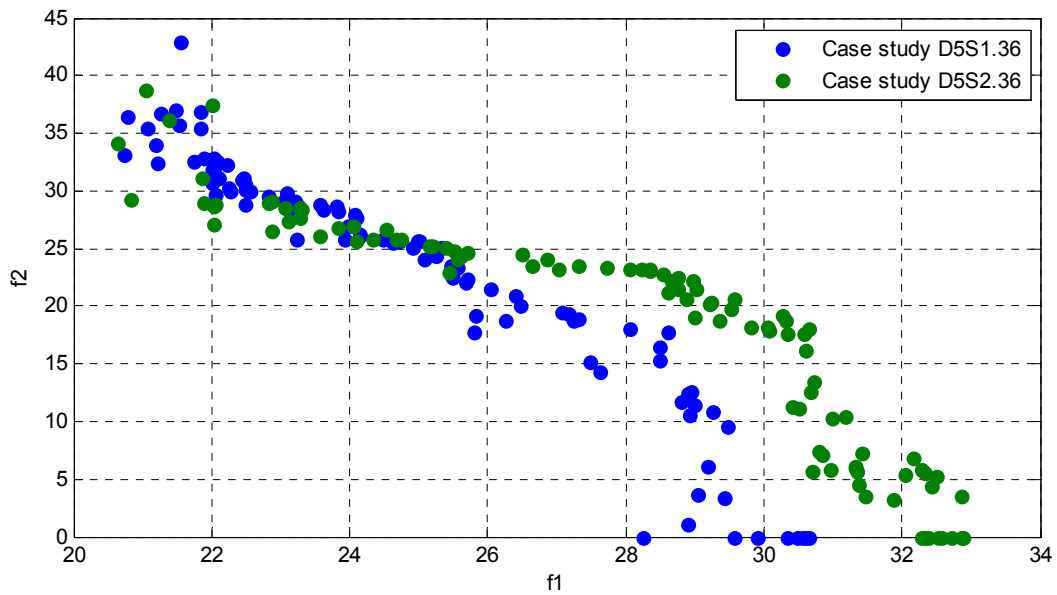
Σχήμα Β.15: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=350 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 6 μηνών



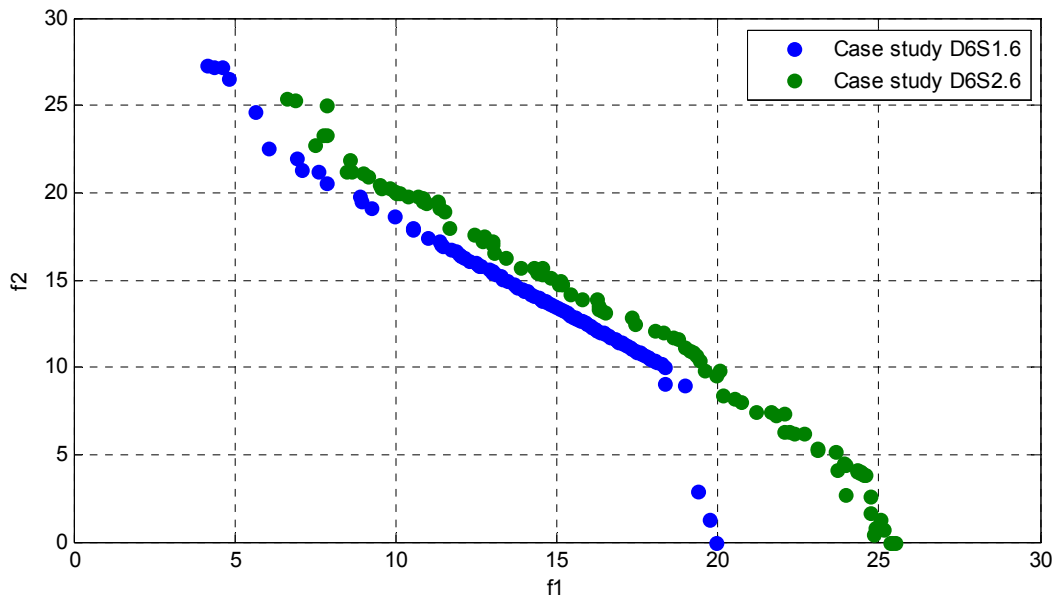
Σχήμα Β.16: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=350 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών



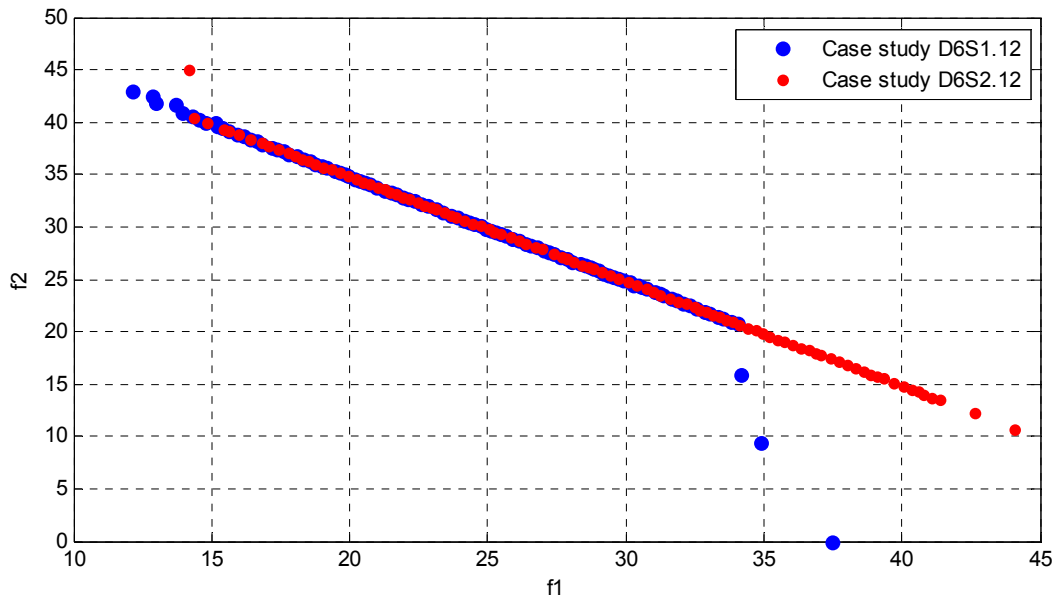
Σχήμα Β.17: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=350 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 24 μηνών



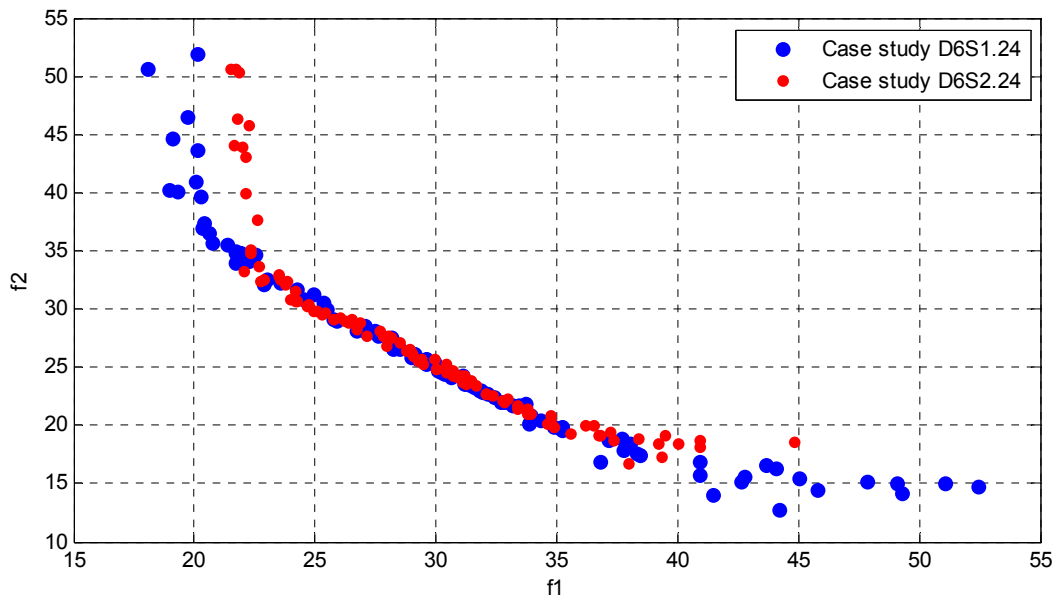
Σχήμα Β.18: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=350 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών



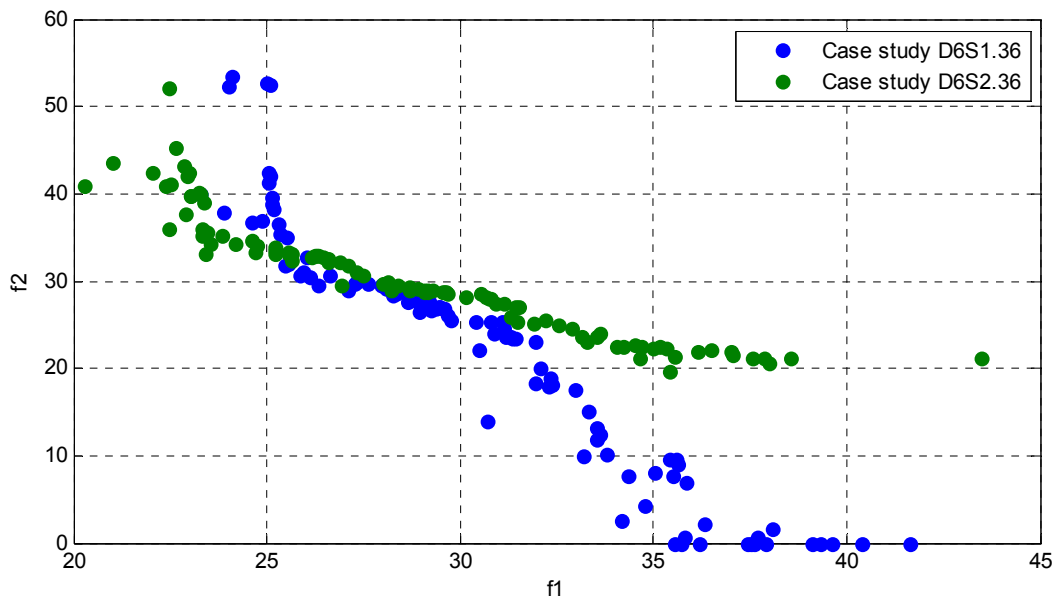
Σχήμα Β.19: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=400 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 6 μηνών



Σχήμα Β.20: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=400 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 12 μηνών



Σχήμα Β.21: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=400 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 24 μηνών



Σχήμα Β.22: Μέτωπα Pareto για τιμές ζήτησης $D=400 \times 10^6 \text{ m}^3$ και τιμές αρχικού αποθέματος το 5% και το 10% αντίστοιχα της ωφέλιμης χωρητικότητας, για χρονικό ορίζοντα 36 μηνών