

**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ &
ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ**

ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ
Δ/ΝΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ & ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ - ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ
& ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

**MINISTRY OF ENVIRONMENT, REGIONAL
PLANNING & PUBLIC WORKS**

GENERAL SECRETARIAT OF PUBLIC WORKS
SECRETARIAT OF WATER SUPPLY & SEWAGE

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DIVISION OF WATER RESOURCES - HYDRAULIC
& MARITIME ENGINEERING

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΟ
**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

ΦΑΣΗ Β

ΤΕΥΧΟΣ 15
**ΠΙΛΟΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΑΧΕΛΩΟΥ**

RESEARCH PROJECT
**EVALUATION AND MANAGEMENT OF THE
WATER RESOURCES OF STEREA HELLAS**

PHASE B

VOLUME 15
**A PILOT MODEL FOR THE
MANAGEMENT OF THE ACHELOOS
RESERVOIR SYSTEM**

ΣΥΝΤΑΞΗ: Α. ΓΕΩΡΓΑΚΑΚΟΣ, Η. ΥΑΟ, Υ. ΥΥ,
Κ. ΝΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: Θ. ΞΑΝΘΟΠΟΥΛΟΣ
ΚΥΡΙΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

BY: A. GEORGAKAKOS, H. YAO, Y. YU,
K. NOUTSOPOULOS
SCIENTIFIC DIRECTOR: TH. XANTHOPOULOS
PRINCIPAL INVESTIGATOR: D. KOUTSOYIANNIS

ΑΘΗΝΑ - ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1995

ATHENS - SEPTEMBER 1995

Πρόλογος του Συντονιστή του Ερευνητικού Έργου

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας* (φάση Β). Το εν λόγω ερευνητικό έργο ανατέθηκε και χρηματοδοτήθηκε από τη Διεύθυνση Ύδρευσης και Αποχέτευσης του ΥΠΕΧΩΔΕ (απόφαση Δ6/21512/8-9-1993) σε ερευνητική ομάδα του Τομέα Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων του ΕΜΠ με επιστημονικό υπεύθυνο τον καθηγητή Θ. Ξανθόπουλο και συντονιστή τον επίκουρο καθηγητή Δ. Κουτσογιάννη.

Σύμφωνα με το γενικό προγραμματισμό του ερευνητικού έργου, η ανάπτυξη διαχειριστικών μοντέλων είχε ενταχθεί στην τρίτη και τελευταία φάση του έργου. Ωστόσο, ήδη από την πρώτη φάση είχε επισημανθεί ότι λόγω της μεγάλης γεωγραφικής έκτασης της Στερεάς Ελλάδας, των πολλών λεκανών απορροής που υπάρχουν και των πολύπλοκων διασυνδέσεων ανάμεσα σε αυτές ή και λεκάνες άλλων υδατικών διαμερισμάτων (π.χ. με το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας λόγω της σχεδιαζόμενης εκτροπής του Αχελώου), η προσέγγιση στο θέμα της διαχείρισης των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας έχει πολύ μεγάλες δυσκολίες. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητο και προβλέφτηκε στην απόφαση ανάθεσης να ξεκινήσει η προσπάθεια ανάπτυξης διαχειριστικών μοντέλων από τη δεύτερη φάση. Επιπλέον, θεωρήθηκε σκόπιμη, ως προετοιμασία για την επόμενη τρίτη φάση του έργου, η συγκριτική επισκόπηση των μεθόδων βελτιστοποίησης σε προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων. Η αναγκαιότητα αυτής της εργασίας βασικής έρευνας προκύπτει από το γεγονός ότι διεθνώς έχει προταθεί πλήθος μεθοδολογιών και δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό ποιά μεθοδολογία θα είναι η κατάλληλη για τις συγκεκριμένες ανάγκες της Στερεάς Ελλάδας. Τα παραπάνω έχουν αποτυπωθεί στην παράγραφο 2.3.3 της απόφασης ανάθεσης, η οποία καλύπτει το τμήμα του ερευνητικού έργου που αναφέρεται στη βασική έρευνα και την ανάπτυξη νέου λογισμικού.

Σε γενικές γραμμές οι κύριοι υδατικοί πόροι της Στερεάς Ελλάδας, οι οποίοι έχουν μέχρι σήμερα αξιοποιηθεί με συστηματικό τρόπο, μπορούν να ενταχθούν σε δύο διακεκριμένα συστήματα. Το πρώτο περιλαμβάνει τους υδατικούς πόρους που έχουν συνδεθεί με την ύδρευση της Αθήνας και συγκεκριμένα τις υδρολογικές λεκάνες Ευήνου, Μόρνου, Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης. Το δεύτερο περιλαμβάνει την υδρολογική λεκάνη του Αχελώου. Βεβαίως, στη Στερεά Ελλάδα υπάρχουν και άλλοι υδατικοί πόροι αξιόλογοι, είτε από πλευράς υδατικού δυναμικού, είτε λόγω των σημαντικών περιβαλλοντικών διαστάσεών τους, όπως είναι ο ποταμός Σπερχειός, οι λίμνες Τριχωνίδα και Λυσιμαχία κ.α. Όμως, από την οπτική του συγκεκριμένου ερευνητικού έργου, τα παραπάνω δύο συστήματα παρουσιάζουν το μεγαλύτερο

ερευνητικό, αλλά και επιχειρησιακό, ενδιαφέρον και γι' αυτό έχει εστιαστεί σε αυτά η έρευνά μας.

Τα δύο αυτά συστήματα παρουσιάζουν σαφέστερες διαφορές μεταξύ τους και γι' αυτό η ενιαία αντιμετώπισή τους δεν θεωρείται ως η πλέον ενδεδειγμένη λύση. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται επιγραμματικά οι κύριες διαφορές τους.

Χαρακτηριστικά συστήματος	Σύστημα ταμιευτήρων υδροδότησης της Αθήνας	Σύστημα ταμιευτήρων Αχελώου
Διάταξη ταμιευτήρων	Παράλληλη (σε διαφορετικά ποτάμια)	Σε σειρά (στο ίδιο ποτάμι)
Κύρια μορφή αξιοποίησης	Καταναλωτική για ύδρευση Αθήνας	Ενεργειακή
Ενεργειακή εκμετάλλευση	Αρνητική (λόγω αντλήσεων)	Θετική, πολύ σημαντική
Κύρια καταναλωτική χρήση	Ύδρευση Αθήνας	Αρδευση Αιτωλοακαρνανίας
Άλλες καταναλωτικές χρήσεις	Αρδευση Κωπαΐδας	Ύδρευση Αιτωλοακαρνανίας
Χρήση περιβαλλοντικής διατήρησης	Μικρή	Μεγάλη
Υδατικό δυναμικό ανά μονάδα επιφάνειας	Μικρό στα ανατολικά, μέτριο έως μεγάλο στα δυτικά	Μεγάλο
Ενίσχυση από υπόγεια νερά	Σημαντική	Όχι σημαντική
Απαιτούμενο επίπεδο αξιοπιστίας	Πολύ μεγάλο (π.χ. 99%)	Μέτριο (π.χ. 90%)
Κύριο χαρακτηριστικό απολήψεων	Αυστηρά καθορισμένες από τη ζήτηση	Κυμαινόμενες με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας

Εκτός από τις διαφορές που φαίνονται στον πίνακα, τα δύο συστήματα έχουν και μερικές ακόμη ιδιαιτερότητες. Συγκεκριμένα, το σύστημα υδροδότησης της Αθήνας χαρακτηρίζεται από τη συμμετοχή της φυσικής λίμνης Υλίκης σε χαμηλό υψόμετρο, το οποίο συνεπάγεται σημαντική ενέργεια για άντληση προς την Αθήνα. Αυτό καθιστά κατ' αρχήν δευτερεύουσας προτεραιότητας το νερό της Υλίκης. Ωστόσο, ο μεγάλος ρυθμός υπόγειων διαφυγών από την Υλίκη επιβάλλει την άντληση του νερού απ' αυτή σε πρώτη προτεραιότητα, ώστε να μεγιστοποιηθεί το συνολικό αξιοποιήσιμο δυναμικό του συστήματος. Η αντίφαση αυτή, σε συνδυασμό με την παράλληλη διάταξη των ταμιευτήρων συνθέτει ένα αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης και ικανοποίησης φυσικών περιορισμών. Απ' την άλλη πλευρά,

στον Αχελώο δεν υπάρχουν σημαντικοί ανταγωνισμοί χρήσεων και προτεραιοτήτων, δεδομένου ότι οι απολήψεις για άρδευση πραγματοποιούνται κατάντη των ταμιευτήρων. Ωστόσο υπάρχει και εδώ πρόβλημα ελέγχου της λειτουργίας των ταμιευτήρων με στόχο τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας. Συγκεκριμένα, για μεγαλύτερη απόδοση στην παραγωγή ενέργειας θα πρέπει να εξασφαλίζεται υψηλή στάθμη στους ταμιευτήρες, πράγμα όμως που αυξάνει την πιθανότητα υπερχειλίσεων. Έτσι ο στόχος της βελτιστοποίησης σε αυτή την περίπτωση είναι η εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας των ταμιευτήρων και των συνεπαγόμενων απολήψεων στη διάρκεια του χρόνου. Πέραν όμως αυτού, η πιθανότητα εκτροπής νερού από τον Αχελώο προς τη Θεσσαλία για άρδευση και περιβαλλοντική διατήρηση, εισάγει πλέον ανταγωνισμό χρήσεων και καθιστά το πρόβλημα ελέγχου της λειτουργίας του συστήματος του Αχελώου ιδιαίτερα πολύπλοκο.

Με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα (βλ. Τεύχος 17), την εμπειρία των μελών της ερευνητικής ομάδας και τις συζητήσεις με συναδέλφους στην Ελλάδα και το εξωτερικό, καταλήξαμε να υιοθετήσουμε διαφορετική μεθοδολογία προσέγγισης για καθένα από τα δύο υδατικά συστήματα. Αυτό δεν σημαίνει ότι είναι θεωρητικά αδύνατη η ενιαία αντιμετώπισή τους. Ωστόσο, η ευελιξία της χρήσης διαφορετικών μεθοδολογιών-μοντέλων, προσανατολισμένων αλλά και δοκιμασμένων στις ιδιαιτερότητες του κάθε προβλήματος, έχει σημαντικά πλεονεκτήματα που δεν αντισταθμίζονται από το μειονέκτημα της μη ενιαίας αντιμετώπισης.

Πιο συγκεκριμένα, για το υδατικό σύστημα Ευήνου-Μόρνου-Βοιωτικού Κηφισού-Υλίκης χρησιμοποιήσαμε ένα μοντέλο βασισμένο στην προσομοίωση του συστήματος το οποίο είχαμε διατυπώσει παλιότερα για το ίδιο σύστημα. Στη νέα έκδοσή του όμως το μοντέλο αυτό έχει αναδομηθεί πλήρως και έχει εισαχθεί σ' αυτό η δυνατότητα βελτιστοποίησης μέσω μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης και συγκεκριμένα γενετικών αλγορίθμων. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται στο Τεύχος 15.

Για το σύστημα του Αχελώου επιλέξαμε, ως πιο κατάλληλη και άμεσα εφαρμόσιμη, την Επεκτεταμένη Γραμμική Δευτεροβάθμια Γκαουσιανή μέθοδο ελέγχου (Extended Linear Quadratic Gaussian – ELQG – control method). Η μέθοδος αυτή έχει εισαχθεί το 1987 από τους Α. Γεωργακάκο και Π. Μαρκς, και έκτοτε έχει αναπτυχθεί περαιτέρω από τον Α. Γεωργακάκο και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές σημαντικού επιχειρησιακού χαρακτήρα, όπως για παράδειγμα στον ποταμό Νείλο. Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι οι αναλυτικές εξισώσεις της, οι οποίες επιταχύνουν σημαντικά την εφαρμογή της. Πάντως, και αυτή η μέθοδος συνδυάζεται με προσομοίωση, ο στόχος της οποίας είναι να εξασφαλίσει την εφικτότητα των λύσεων.

Για την εφαρμογή της μεθόδου συνεργαστήκαμε άμεσα με τον καθηγητή Α. Γεωργακάκο και την ερευνητική ομάδα του στο Πανεπιστήμιο της Γεωργίας των

ΗΠΑ. Ο Α. Γεωργακάκος δέχτηκε με ενθουσιασμό την προοπτική της εφαρμογής της μεθόδου του στον Ελλαδικό χώρο και τη συνεργασία. Εξασφάλισε μάλιστα και πρόσθετη χρηματοδότηση από τις ΗΠΑ μέσω του Πανεπιστημίου της Γεωργίας για το σκοπό αυτό, δεδομένου ότι το διατιθέμενο από το ερευνητικό έργο σχετικό κονδύλιο ήταν πολύ μικρό για την κάλυψη των απαραίτητων εργασιών. Η ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ εκφράζει τις ιδιαίτερες ευχαριστίες της στον Α. Γεωργακάκο και στα μέλη της ερευνητικής ομάδας του, Η. Yao, Υ. Yu και Κ. Νουτσόπουλο, για την πρόθυμη συνεργασία τους και τη σημαντική συμβολή τους στο παρόν ερευνητικό έργο. Το κείμενο του τεύχους αυτού έχει γραφεί από την εν λόγω ομάδα αρχικώς στα αγγλικά και αποδόθηκε στα ελληνικά από τον Α. Καζάκο, τον οποίο και ευχαριστούμε. Ιδιαίτερα ευχαριστούμε τη Διεύθυνση Εκμετάλλευσης Παραγωγής της ΔΕΗ (Κλάδος Υδραυλικής Παραγωγής, κκ. Λέρης, Αργυράκης και Μαύρος), η οποία μας διέθεσε τα απαραίτητα δεδομένα για τα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων και της λειτουργίας τους.

Θεωρούμε ότι το προϊόν αυτής της ερευνητικής συνεργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντικό, δεδομένου ότι για πρώτη φορά στην Ελλάδα εφαρμόζονται μοντέλα τέτοιας εξελιγμένης τεχνολογίας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της εφαρμογής στον Αχελώο έχουν ένα χαρακτήρα επικαιρότητας, λόγω της σχεδιαζόμενης εκτροπής του Αχελώου. Έτσι, το τεύχος αυτό δίνει μια εικόνα των ενεργειακών επιπτώσεων της εκτροπής στο σύστημα Κρεμαστών-Καστρακίου-Στράτου, για μέγεθος εκτροπής 600 hm³ ετησίως, όπως πρόσφατα έχει ανακαθοριστεί.

Θα πρέπει ωστόσο να επισημάνουμε ότι η προσπάθεια αυτή και το αποτέλεσμά της, στην παρούσα δεύτερη φάση του έργου, έχει διερευνητικό και όχι άμεσα επιχειρησιακό χαρακτήρα. Αυτός ο χαρακτήρας συμβαδίζει με το γενικότερο προγραμματισμό του ερευνητικού έργου και άλλωστε έχει αποτυπωθεί, όπως προαναφέρθηκε, στην απόφαση ανάθεσής του. Στην επόμενη φάση προγραμματίζεται η ανάπτυξη του μοντέλου σε επιχειρησιακή μορφή, η οποία προδιαγράφεται συνοπτικά στο Κεφάλαιο 5 του τεύχους. Επισημαίνουμε ότι στην επόμενη φάση θα πρέπει να περιγραφεί με ακριβέστερο τρόπο το σύστημα ταμιευτήρων και υδροηλεκτρικών έργων και γι' αυτό κρίνεται απαραίτητη η αμεσότερη συνεργασία της ΔΕΗ. Επίσης, θεωρούμε απαραίτητο στο μοντέλο της επόμενης φάσης να συμπεριληφθεί το σύνολο των υδροηλεκτρικών έργων του άνω Αχελώου (συμπεριλαμβανομένου και του ταμιευτήρα Αυλακίου) και των συνδεδεμένων έργων στην πλευρά της Θεσσαλίας, και να εξεταστούν όλα τα δυνατά σενάρια συνδυασμών αναπτυξιακών έργων. Η διερεύνηση των σεναρίων αυτών θα πρέπει να έχει χαρακτήρα τόσο τεχνικό όσο και οικονομικό και περιβαλλοντικό. Αυτή η μελέτη θα έχει καθοριστική σημασία για την επιλογή του τελικού σχήματος πλήρους

ανάπτυξης του υδατικού δυναμικού του Αχελώου, αλλά και για τη διαχείριση του συστήματος στις παρούσες και μελλοντικές συνθήκες.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 1995

Δημήτρης Κουτσογιάννης
Συντονιστής του ερευνητικού έργου

Πρόλογος των συγγραφέων

Η εργασία αυτή έγινε με τη χορηγία του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (μέσω μιας σύμβασης με το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο) και του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Γεωργίας ΗΠΑ.

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον Δρ. Δημήτρη Κουτσογιάννη του ΕΜΠ για την πρόσκληση για αυτή την έρευνα και για την προμήθεια όλων των απαραίτητων πληροφοριών. Για τον κύριο συγγραφέα, η ευκαιρία να κάνει έρευνα που θα ωφελήσει την Ελλάδα είναι μία ευχάριστη προοπτική.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΤΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ	4
3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	12
3.1 Μορφοποίηση.....	12
3.2 Μέθοδος ελέγχου ELQG	16
4. ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	22
4.1 Δοκιμές ελέγχου	22
4.2 Δοκιμές ελέγχου-προσομοίωσης	30
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	65
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πληροφορίες ταμιευτήρων και χαρακτηριστικές καμπύλες	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αποτελέσματα πιθανότητας υπέρβασης	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

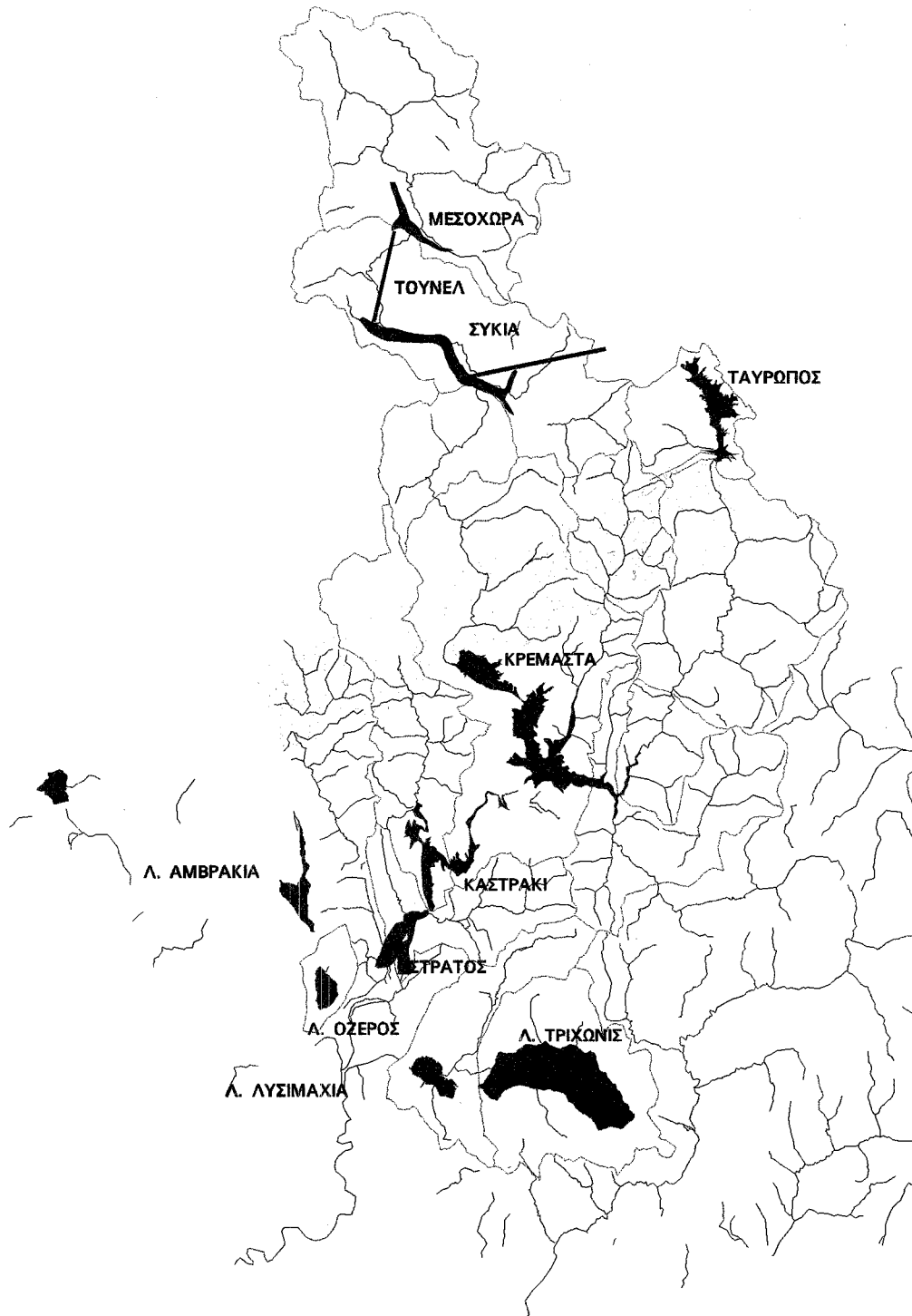
Ο Αχελώος (Σχ.11) βρίσκεται στη δυτική Ελλάδα και είναι από τους πιο σημαντικούς υδατικούς πόρους της χώρας. Η σημασία του είναι καθοριστική στην κάλυψη αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών, τον έλεγχο πλημμυρών, την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και τη διαχείριση του περιβάλλοντος και του οικοσυστήματος. Σε άμεση αντίθεση με τη λεκάνη του Αχελώου, η προσκείμενη περιοχή της Θεσσαλίας (στην κεντρική Ελλάδα) υποφέρει συχνά από ξηρασία, μείωση διαθεσιμότητας νερού, και περιβαλλοντική υποβάθμιση. Τελευταία έχουν εκφραστεί ανησυχίες για τη μακροπρόθεσμη βιώσιμη ανάπτυξη της Θεσσαλίας, η οποία αποτελεί μείζονα αγροτική περιοχή, σημαντική για την εθνική οικονομία. Έτσι έχει εξεταστεί η λύση της αύξησης των υδατικών της αποθεμάτων μέσω της εκτροπής από τη λεκάνη απορροής του άνω Αχελώου.

Προκαταρκτικές έρευνες έχουν δείξει ότι η εκτροπή θα βελτιώνει σημαντικά την κατάσταση στη Θεσσαλία. Ειδικότερα, η μεταφορά νερού θα σταθεροποιούσε το ελαττούμενο υπόγειο υδατικό δυναμικό, θα έδινε επαρκή αποθέματα νερού για υδρευτικές και γεωργικές ανάγκες, θα αντέστρεφε τις τάσεις του πληθυσμού για μετατόπιση, και θα αναβάθμιζε το οικοσύστημα του ποταμού, και θα έδινε τη δυνατότητα υδροηλεκτρικής εκμετάλλευσης της επιτρεπόμενης ποσότητας νερού προς την πλευρά της Θεσσαλίας. Από την άλλη πλευρά, η εκτροπή θα επηρέαζε την υδροηλεκτρική ενέργεια στην λεκάνη του Αχελώου και θα περιόριζε τα υδατικά αποθέματα για τη γεωργία και τη διαχείριση του οικοσυστήματος γι' αυτή τη λεκάνη. Σε εθνικό επίπεδο, τα οφέλη φαίνεται να υπερκαλύπτουν τις ζημιές, αλλά πρέπει να γίνουν λεπτομερείς μελέτες για την αποτελεσματική ποσοτικοποίηση των επιδράσεων της εκτροπής.

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να αναπτύξει ένα μαθηματικό μοντέλο διαχείρισης του συστήματος ταμιευτήρων του Αχελώου. Το μοντέλο περιλαμβάνει έλεγχο (δηλαδή βελτιστοποίηση) και έλεγχο με προσομοίωση. Σκοπός του μοντέλου ελέγχου είναι να αναπτύξει βέλτιστα σενάρια λειτουργίας ταμιευτήρων, ενώ σκοπός του μοντέλου ελέγχου-προσομοίωσης είναι να επαληθεύσει τη λειτουργία αυτών των σεναρίων στα ιστορικά δεδομένα των εισροών. Το σύνολο των μοντέλων επιτρέπει την αξιολόγηση των επιπτώσεων της εκτροπής στη λεκάνη απορροής του Αχελώου. Έτσι, το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να ποσοτικοποιήσει τη συνεπαγόμενη

μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και την αξιοπιστία των υδατικού δυναμικού για διάφορα σενάρια εκτροπής.

Αυτή η έκθεση περιλαμβάνει 5 κεφάλαια και ένα παράρτημα. Στο επόμενο κεφάλαιο, δίδεται μια σύντομη αναφορά του συστήματος των ταμιευτήρων του Αχελώου και σχολιασμός των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη. Στο Κεφάλαιο 3, εισάγεται η δομή του μοντέλου ελέγχου, σχόλια για τις παραδοχές του μοντέλου και περιγραφή της φιλοσοφίας της βελτιστοποίησης. Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται και περιγράφονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα του μοντέλου και στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα και δίδονται μερικές προτάσεις για μελλοντικές έρευνες. Τέλος, στο παράρτημα, περιέχονται διάφορες χαρακτηριστικές καμπύλες των ταμιευτήρων και οι αναλυτικές προσεγγίσεις τους.



Σχήμα 1.1: Η λεκάνη απορροής του Αχελώου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΤΟΥ ΑΧΕΛΩΟΥ

Η λεκάνη του ποταμού Αχελώου (Σχ.1.1) περιλαμβάνει τέσσερις ταμιευτήρες (Κρεμαστά, Καστράκι, Ταυρωπός και Στράτος), ένας (Μεσοχώρα) βρίσκεται υπό κατασκευή, ενώ ακόμη ένας (Συκιά) θα προχωρήσει άμεσα στο στάδιο της κατασκευής. Από τους υπάρχοντες ταμιευτήρες, ο μεγαλύτερος είναι των Κρεμαστών με συνολική χωρητικότητα περίπου $4\ 500 \times 10^6$ κυβικά μέτρα, ενώ το Καστράκι, ο Ταυρωπός και ο Στράτος είναι μικρότεροι με συνολική χωρητικότητα μικρότερη από $1\ 500 \times 10^6$ κυβικά μέτρα. Η προτεινόμενη εκτροπή νερού προς τη Θεσσαλία προβλέπεται να γίνει από τον άνω Αχελώο (Συκιά) και δε θα επηρεάσει τις εισροές στον Ταυρωπό. Γι' αυτό το λόγο, η μελέτη εστιάζεται στη σειρά ταμιευτήρων που αποτελείται από τα Κρεμαστά, το Καστράκι και το Στράτο. Τα αποθέματα των τριών αυτών ταμιευτήρων χρησιμοποιούνται για υδροδότηση, παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και περιβαλλοντική προστασία και η διακύμανσή τους συνοψίζεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Διακύμανση στάθμης και αποθέματος των ταμιευτήρων

Ταμιευτήρας	Ελάχιστες τιμές		Μέγιστες τιμές	
	Απόθεμα($10^9\ m^3$)	Στάθμη (m)	Απόθεμα($10^9\ m^3$)	Στάθμη (m)
Κρεμαστά	999	227	4 500	282
Καστράκι	750	142	800	144.2
Στράτος	60	67	70.2	68.6

Πέρα από το ενεργό απόθεμα, κάθε ταμιευτήρας περιλαμβάνει και αντιπλημμυρική χωρητικότητα. Το διαθέσιμο ύψος που αντιστοιχεί στον αντιπλημμυρικό όγκο αποθήκευσης είναι 2 μέτρα στα Κρεμαστά, 5.8 στο Καστράκι και 0.4 στο Στράτο. Οι μέσες υπόγειες διαφυγές εκτιμώνται στα $6\ m^3/sec$ στα Κρεμαστά και $4\ m^3/sec$ στο Στράτο, ενώ στο Καστράκι είναι αμελητέες. Άλλες πληροφορίες, συμπεριλαμβανομένων των καμπυλών στάθμης-όγκου, όγκου-επιφανείας και των αναλυτικών προσεγγίσεων βρίσκονται στο Παράρτημα Α. Και οι

τρεις ταμιευτήρες έχουν μονάδες ηλεκτρογεννητριών, ο αριθμός και η ικανότητα των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά υδροηλεκτρικών σταθμών

Ταμιευτήρας	(Αριθμός μονάδων) x (Εγκατεστημένη ισχύς - MW)
Κρεμαστά	4 x 109 = 436
Καστράκι	4 x 80 = 320
Στράτος	2 x 75 + 2 x 3 = 156

Μια προσεγγιστική σχέση μεταξύ παραγωγής ενέργειας, στάθμης ταμιευτήρα και παροχής τουρμπίνας παρέχεται από τις καμπύλες ειδικής κατανάλωσης παραγωγιμότητας του Παραρτήματος Α. Ελλείπει πιο λεπτομερών πληροφοριών, οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται εδώ για να ποσοτικοποιήσουν την παραγωγή ενέργειας σε μηνιαία χρονική κλίμακα.

Τα Σχ. 2.1, 2.2, και 2.3 συνοψίζουν τα μηνιαία στατιστικά χαρακτηριστικά των εισροών των ταμιευτήρων (τοπικές λεκάνες απορροής) των Κρεμαστών, Καστρακίου και Στράτου αντίστοιχα. (Οι εισροές του Στράτου υπολογίζονται βάσει αυτών στο Καστράκι). Τα προηγούμενα στατιστικά χαρακτηριστικά βασίζονται σε δείγματα 44 ετών από το 1951 έως το 1994. Επίσης, τα Σχήματα 2.4 και 2.5 αναφέρουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά για την διαφορά βροχής-εξάτμισης στα Κρεμαστά και στο Καστράκι βασισμένες σε δεδομένα 31 ετών (1961-1991). Τα στατιστικά χαρακτηριστικά για το Στράτο θεωρούνται ίδια με αυτά για το Καστράκι.

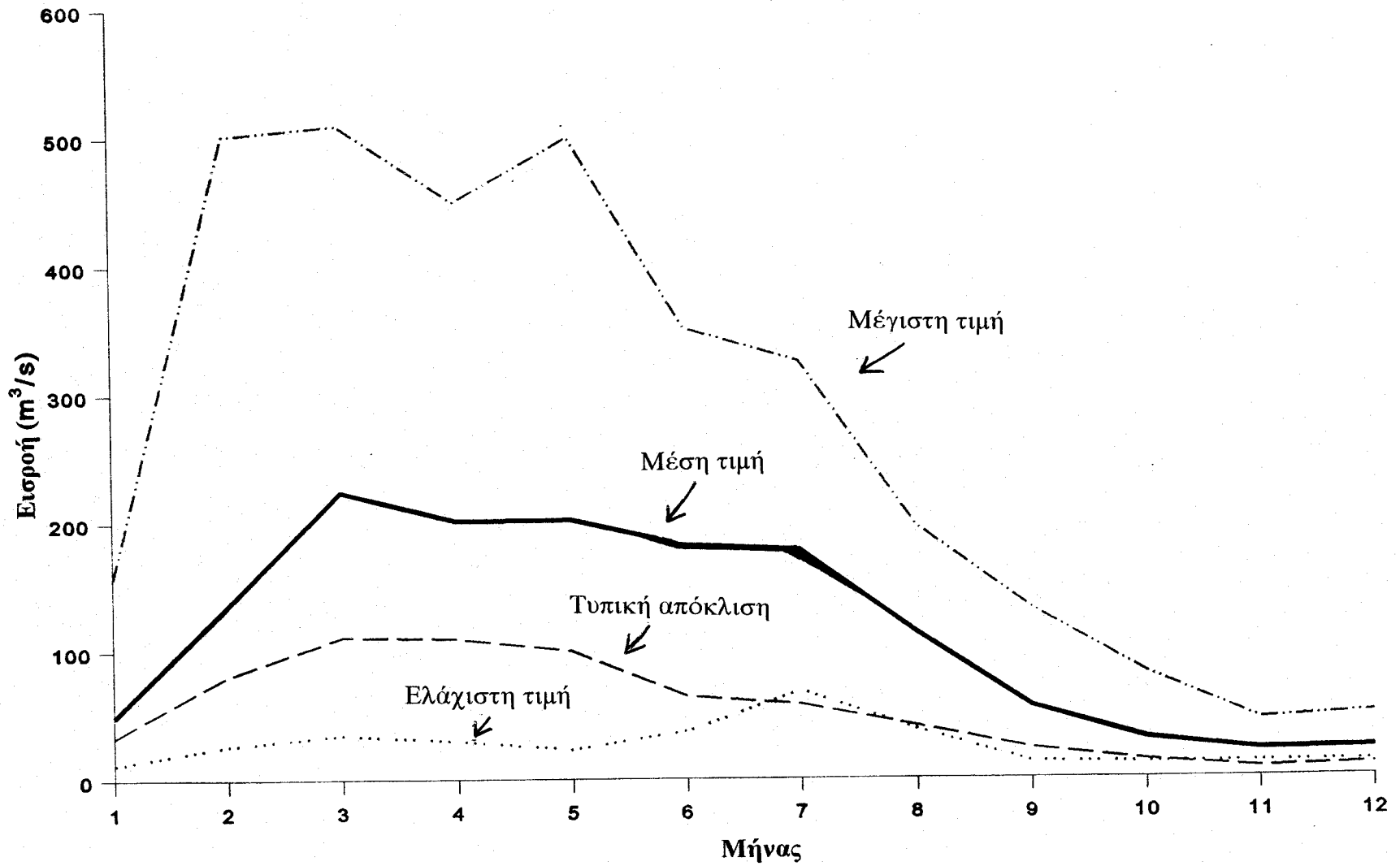
Εκτός από την παραγωγή ενέργειας και την αντιπλημμυρική προστασία, το σύστημα ταμιευτήρων του Αχελώου θα πρέπει να εξασφαλίζει νερό για άρδευση και επαρκή ροή στον ποταμό ώστε να διατηρήσει την ποιότητα του περιβάλλοντος. Οι αρδευτικές απολήψεις ανέρχονται σε 35 m³/sec από το Μάιο ως το Σεπτέμβριο, ενώ 21 m³/sec χρειάζονται όλο το χρόνο για περιβαλλοντική διατήρηση. Στη μελέτη αυτή θεωρήθηκε για απλοποίηση ότι οι ανάγκες αυτές αναφέρονται αμέσως κατόπιν του Στράτου ενώ στην πραγματικότητα η παροχή των 21 m³/sec αναφέρεται στις εκβολές του ποταμού. Έτσι, θεωρήθηκε ότι η ελάχιστη απόληψη από το Στράτο είναι 56 m³/sec από το Μάιο έως το Σεπτέμβριο και 21 m³/sec για το υπόλοιπο έτος.

Τέλος, η προτεινόμενη εκτροπή του Αχελώου προς τη γειτονική περιοχή της Θεσσαλίας προγραμματίζεται να γίνει ανάντη των Κρεμαστών. Το μέγεθος της

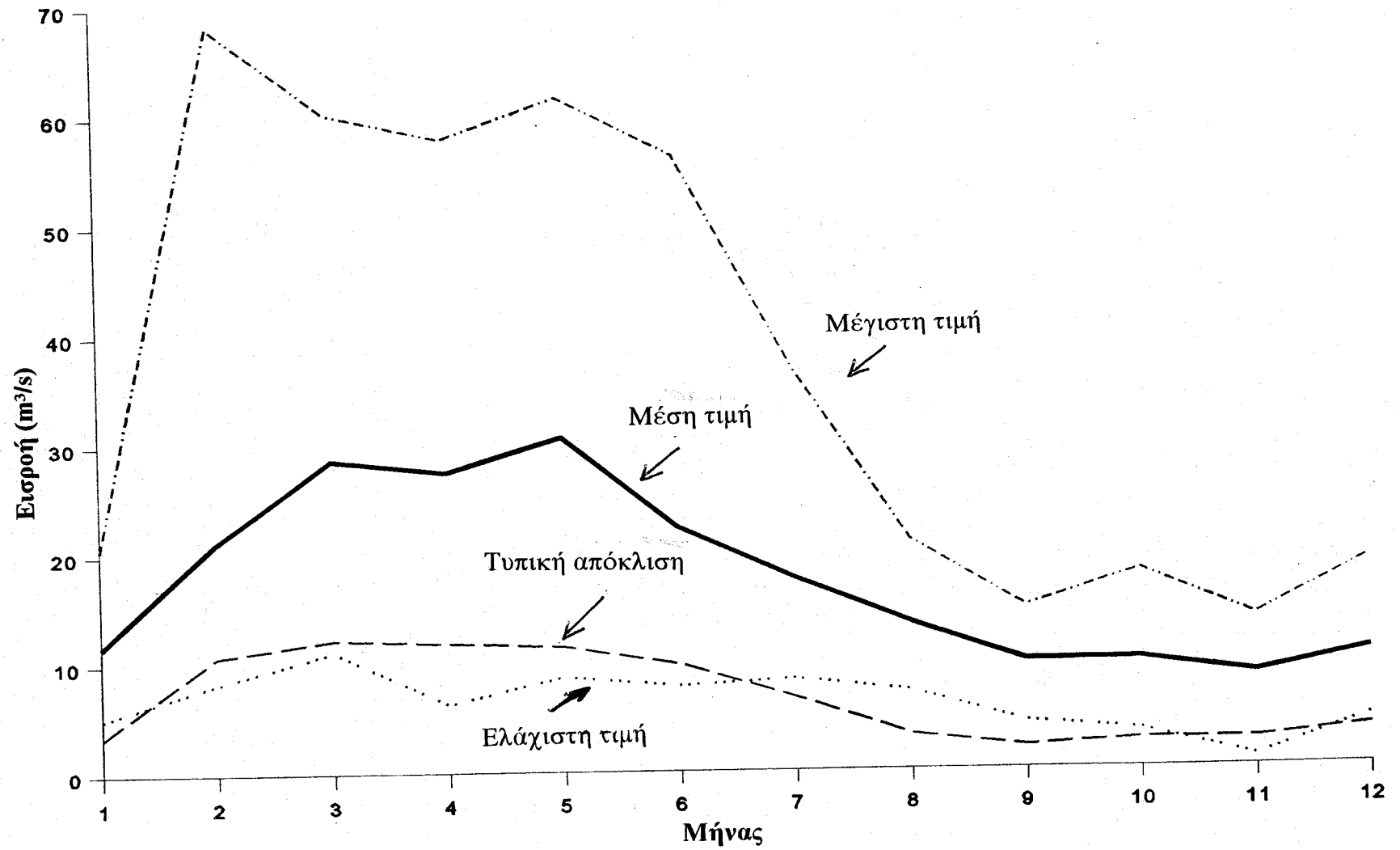
εκτροπής υπολογίζεται σε 600 εκατομμύρια κυβικά μέτρα το χρόνο, με την εποχιακή κατανομή που αναφέρεται στον Πίνακα 2.3..

Πίνακας 2.3: Εποχιακή διακύμανση της προτεινόμενης εκτροπής νερού προς Θεσσαλία

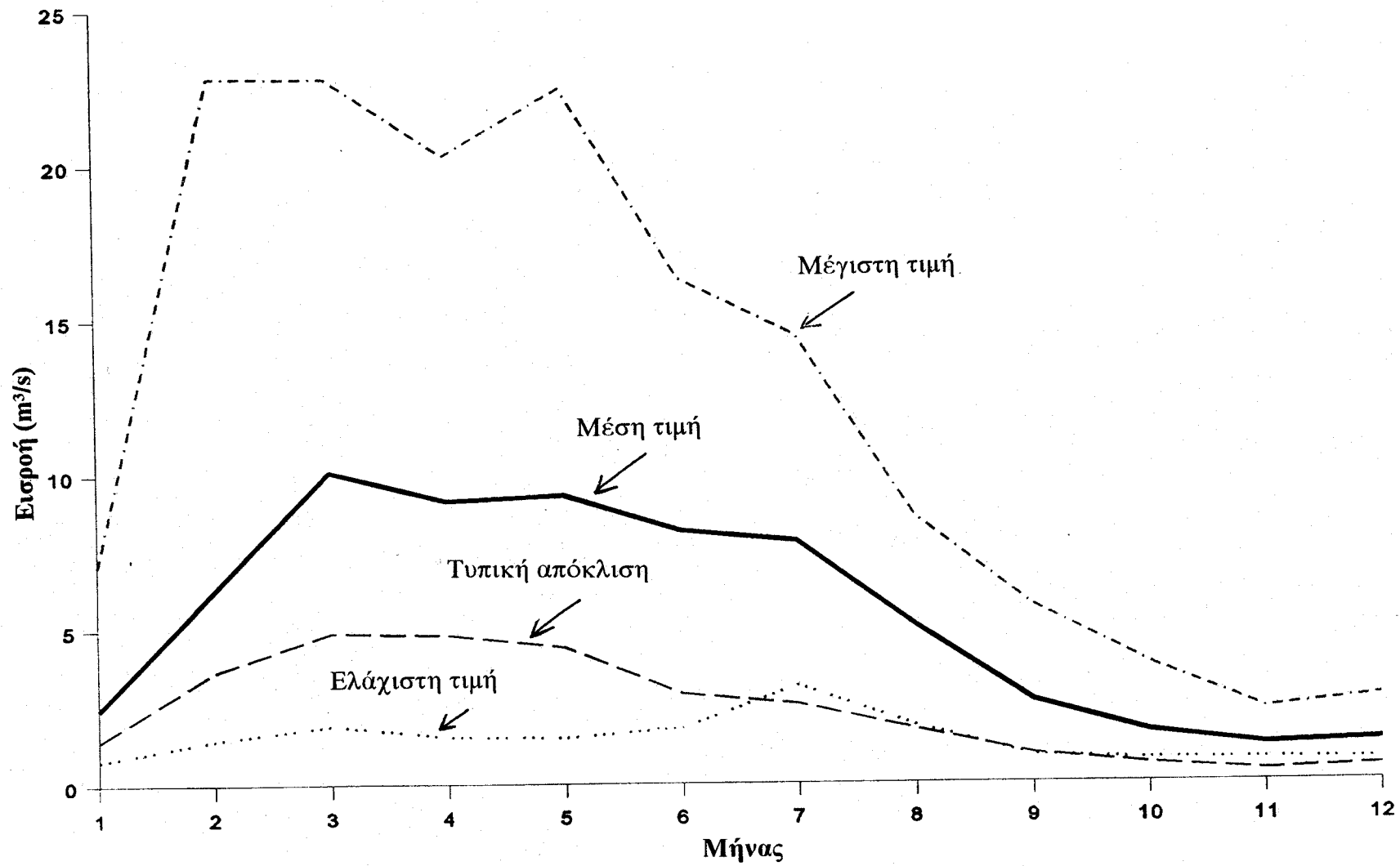
Μήνας	Ιαν.-Μαρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αυγ.	Σεπτ.	Οκτ.-Δεκ.
%	0	5	11	23.6	30.2	26.4	3.8	0



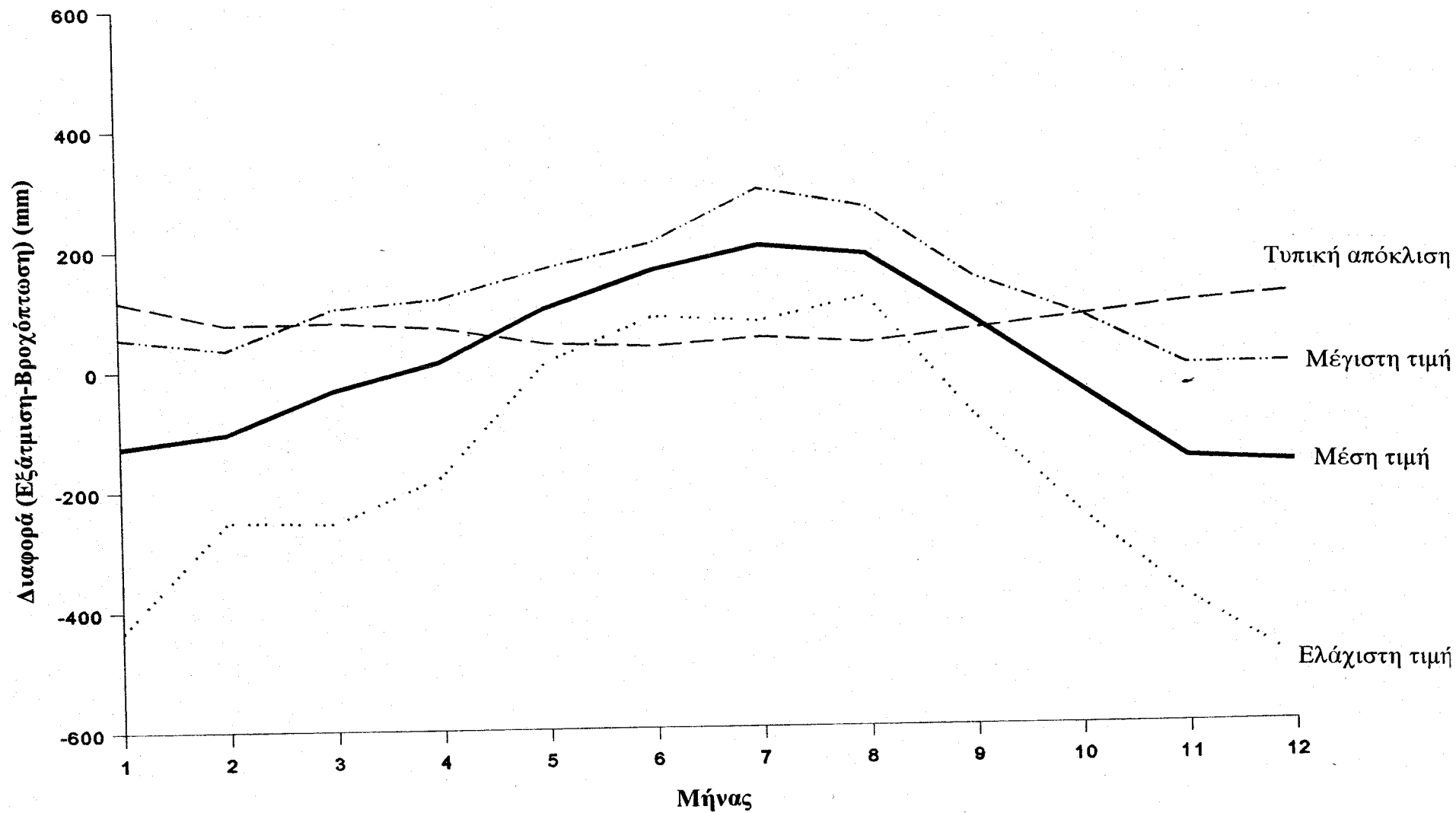
Σχήμα 2.1: Στατιστικά χαρακτηριστικά των εισροών στα Κρεμαστά



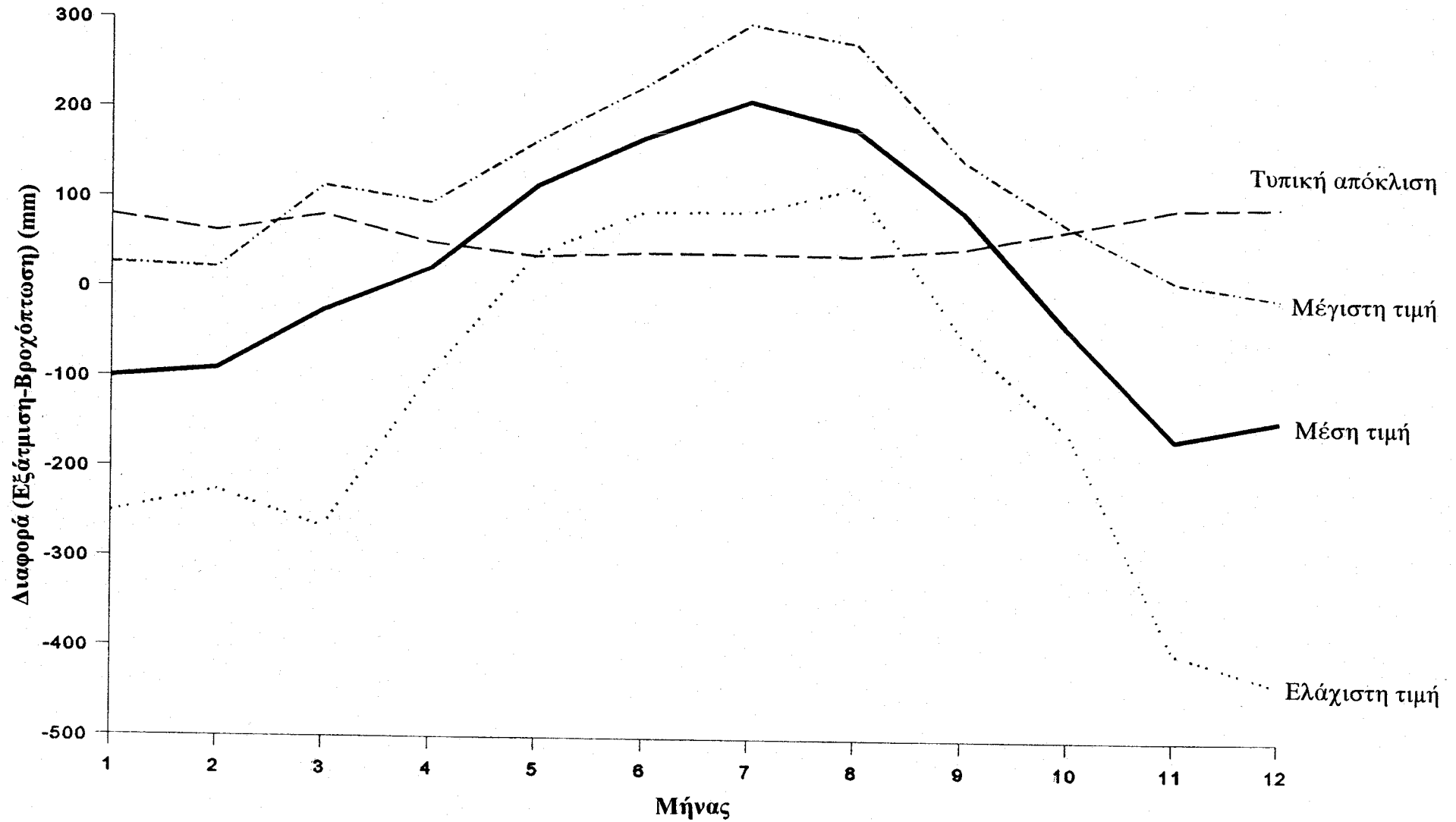
Σχήμα 2.2: Στατιστικά χαρακτηριστικά των εισροών στο Καστράκι (ενδιάμεση λεκάνη)



Σχήμα 2.3: Στατιστικά χαρακτηριστικά των εισροών στο Στράτο (ενδιάμεση λεκάνη)



Σχήμα 2.4: Στατιστικά χαρακτηριστικά της διαφοράς (Εξάτμιση-Βροχόπτωση) στα Κρεμαστά.



Σχήμα 2.5: Στατιστικά χαρακτηριστικά της διαφοράς (Εξάτμιση-Βροχόπτωση) στο Καστράκι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΕΓΧΟΥ

3.1 Μορφοποίηση

3.1.1 Δυναμική Συστήματος

Η σειρά ταμιευτήρων του Αχελώου μοντελοποιείται από τις παρακάτω εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου:

$$\begin{aligned}
 S_1(k+1) &= S_1(k) - e_1(k) A_1[S_1(k)] - u_1(k) + w_1(k) - L_1(k) - D(k), \\
 S_2(k+1) &= S_2(k) - e_2(k) A_2[S_2(k)] - u_2(k) + u_1(k) + w_2(k) - L_2(k), \\
 S_3(k+1) &= S_3(k) - e_3(k) A_3[S_3(k)] - u_3(k) + u_2(k) + w_3(k) - L_3(k),
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1,$$

όπου οι δείκτες $i = 1, 2, 3$ συμβολίζουν τις αντίστοιχες ποσότητες στα Κρεμαστά, το Καστράκι και το Στράτο, k είναι το χρονικό διάστημα διακριτοποίησης που αντιστοιχεί σε ένα μήνα, $S_i(k)$ είναι το απόθεμα του i ταμιευτήρα στην αρχή του μήνα, $e_i(k)$ είναι ο ρυθμός εξάτμισης, $A_i[S_i(k)]$ είναι η συνάρτηση της επιφάνειας προς το απόθεμα του ταμιευτήρα, $u_i(k)$ είναι η απόληψη, $w_i(k)$ είναι ο όγκος εισροής, $L_i(k)$ η υπόγεια διαφυγή, $D(k)$ η προτεινόμενη εκτροπή και N οι μήνες του ορίζοντα ελέγχου. Τα χαρακτηριστικά των όγκων εισροής, ρυθμών εξάτμισης, συναρτήσεων όγκου-επιφάνειας, διαφυγών και της προγραμματισμένης εκτροπής έχουν περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Οι μεταβλητές αποθέματος και απόληψης περιορίζονται μέσα στα όρια:

$$\begin{aligned}
 S_i^{\min}(k) &\leq S_i(k) \leq S_i^{\max}(k), \\
 u_i^{\min}(k) &\leq u_i(k) \leq u_i^{\max}(k),
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

$$k = 0, 1, \dots, N.$$

Τα άνω και κάτω όρια αποθέματος της (3.2) αντιστοιχούν στις ζώνες διατήρησης αποθέματος των ταμιευτήρων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (ο αντιπλημμυρικός όγκος δεν περιλαμβάνεται στο ελεγχόμενο εύρος αποθέματος επειδή στη μελέτη αυτή χρησιμοποιείται μηνιαίο χρονικό βήμα). Το

κατώτερο όριο απόληψης για τα Κρεμαστά και το Καστράκι είναι μηδέν, ενώ για το Στράτο είναι 147 εκατομμύρια κυβικά μέτρα το μήνα από το Μάιο ως το Σεπτέμβριο και 55 εκατομμύρια κυβικά μέτρα το μήνα για το υπόλοιπο έτος (όπως υπαγορεύεται από τις περιβαλλοντικές και υδρευτικές ανάγκες). Τα άνω όρια απόληψης βρίσκονται με βάση την ικανότητα του υδροηλεκτρικού σταθμού και την καμπύλη ειδικής κατανάλωσης (που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2 και το παράρτημα Α).

Λόγω της αβεβαιότητας εισροής, οι περιορισμοί του αποθέματος εκφράζονται καλύτερα με πιθανοτική μορφή:

$$\begin{aligned} Prob[S_i^{\min}(k) \leq S_i(k)] &\leq \pi_i^{\min}(k) \\ Prob[S_i(k) \leq S_i^{\max}(k)] &\geq \pi_i^{\max}(k) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$i = 1, 2, 3, \quad k = 0, 1, \dots, N,$$

όπου π^{\min} και π^{\max} είναι επίπεδα αξιοπιστίας. Αυτά τα επίπεδα καθώς και τα άνω και κάτω όρια του αποθέματος και τα κατώφλια των απολήψεων, ορίζονται σαν μεταβλητά στο χρόνο αλλά συνήθως είναι σταθερά.

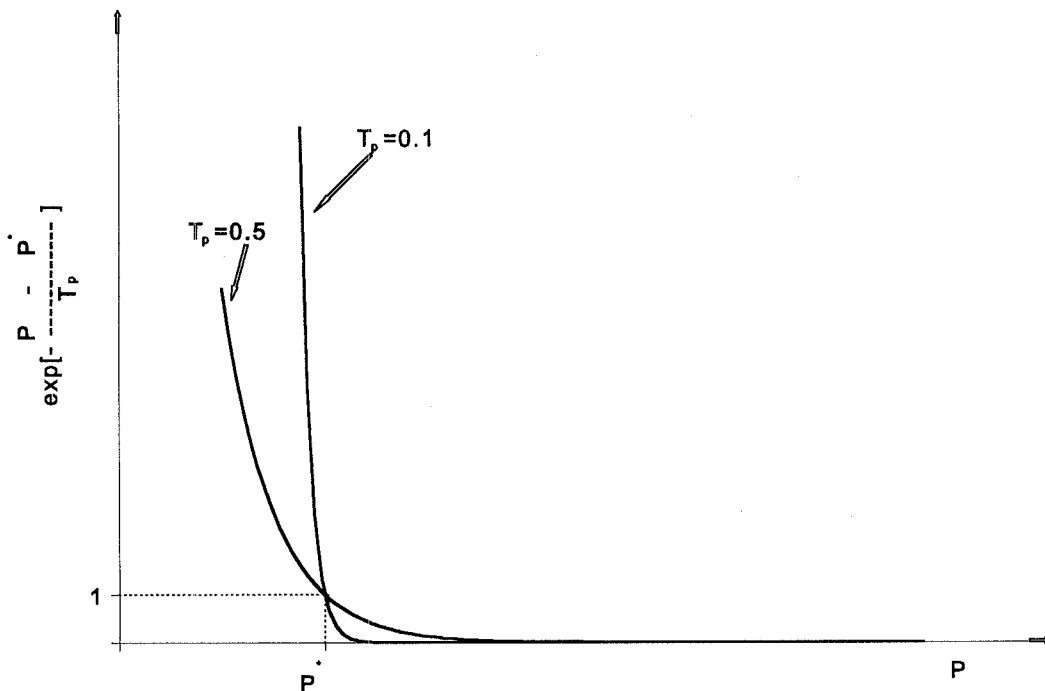
Οι εξισώσεις (3.1), (3.2), και (3.3) συνοψίζουν το μοντέλο του συστήματος ταμειυτήρων. Στην ορολογία των συστημάτων ελέγχου, τα αποθέματα των ταμειυτήρων είναι οι μεταβλητές κατάστασης και οι απολήψεις είναι οι μεταβλητές ελέγχου. Ο σκοπός της διαδικασίας ελέγχου είναι να υπολογίσει τις σειρές απολήψεων $\{u_i^*(k), i=1,2,3; k=0,1,\dots,N-1\}$ έτσι ώστε οι στόχοι του συστήματος και οι περιορισμοί να ικανοποιούνται. Το στοιχείο του μοντέλου που το καταφέρνει αυτό και επίσης μετρά την επιτυχία των διαφόρων επιχειρησιακών επιλογών, είναι η αντικειμενική συνάρτηση, την οποία θα συζητήσουμε αμέσως μετά.

3.1.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Ο σκοπός της διαδικασίας ελέγχου είναι να μεγιστοποιήσει το μηνιαίο ενεργειακό δυναμικό του συστήματος ταμειυτήρων του Αχελώου, ικανοποιώντας συγχρόνως τις περιβαλλοντικές και υδρευτικές ανάγκες. Για να επιτύχουμε αυτό το στόχο ελαχιστοποιούμε την εξής αντικειμενική συνάρτηση:

$$\begin{aligned}
 J = E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \left[\alpha \exp\left[-\frac{[P_1(k) + P_2(k) + P_3(k)] - P^*}{T_p}\right] \right. \right. \\
 \left. \left. + \beta \left[\sum_{i=1}^3 \exp\left[-\frac{H_i^{\max} - H_i(S_i(k))}{T_H}\right] + \exp\left[-\frac{H_i(S_i(k)) - H_i^{\min}}{T_H}\right] \right] \right] \right\} \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

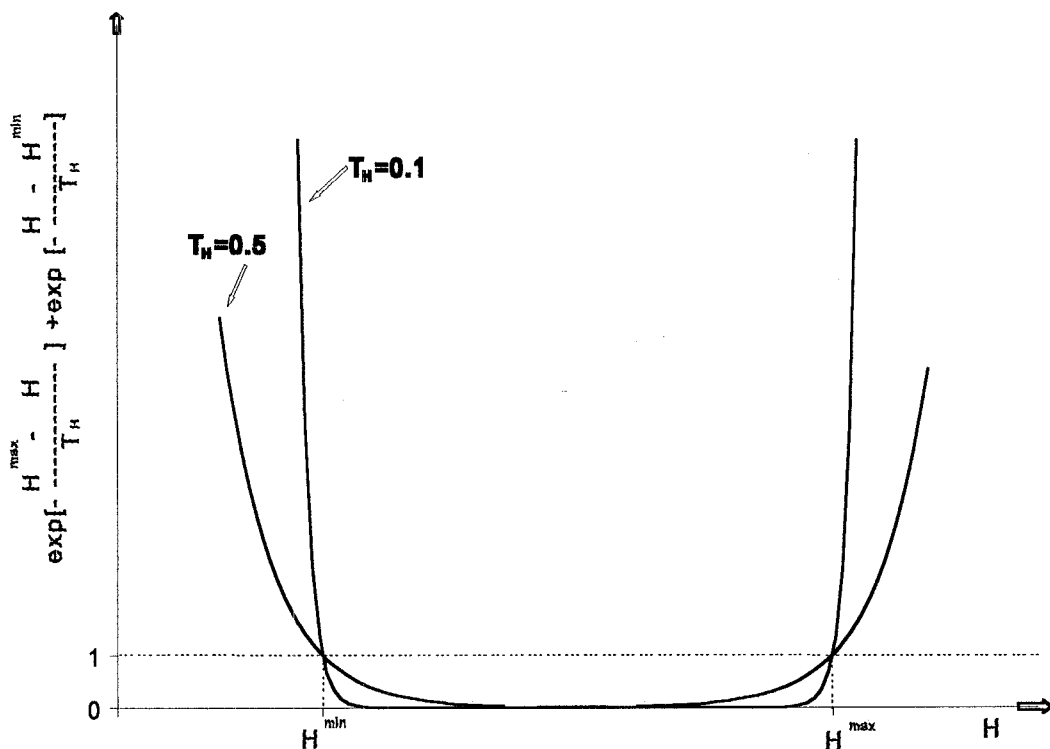
Στα παραπάνω, το $E\{ \}$ συμβολίζει αναμενόμενη τιμή. Αυτή η αναμενόμενη τιμή απλοποιείται αν οι εισροές των ταμιευτήρων θεωρηθούν στατιστικά ανεξάρτητες από μήνα σε μήνα. Αυτό και έγινε ως μια πρώτη προσέγγιση στα πλαίσια της μελέτης αυτής. Στον πρώτο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης, τα $P_1(k)$, $P_2(k)$, και $P_3(k)$ συμβολίζουν τα επίπεδα παραγωγής ενέργειας στα Κρεμαστά, στο Καστράκι και στο Στράτο ενώ P^* είναι ο εξαρτημένος στόχος παραγωγής ενέργειας. (Κάθε P_i είναι συνάρτηση απόληψης τουρμπινών και της στάθμης του ταμιευτήρα όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο). Αυτός ο όρος αποσκοπεί στην επιβολή “ποινής” σε περίπτωση αποτυχίας στην επίτευξη του στόχου ενέργειας P^* , σε κάθε στιγμή του ορίζοντα ελέγχου. Συγκεκριμένα, επιβάλλει σταδιακά μεγαλύτερη ποινή καθώς το $P(k) = P_1(k) + P_2(k) + P_3(k)$ δεν φτάνει το P^* , ενώ γίνεται αμελητέος όταν το $P(k)$ ξεπερνά το P^* . Η απεικόνιση αυτής της συνάρτησης δίνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Μορφή του όρου ποινής ενέργειας

Η παράμετρος T_p χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την καμπυλότητα της εκθετικής συνάρτησης. Μικρότερες τιμές T_p σχετίζονται με πιο απότομη καμπυλότητα, αλλά μπορεί να προκαλέσουν αριθμητική εμπλοκή στη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Έτσι, ο σωστός καθορισμός της τιμής αυτής της παραμέτρου μπορεί να χρειαστεί λίγο πειραματισμό. Μια αξιόπιστη διαδικασία, είναι να αρχίσουμε τη βελτιστοποίηση με μια μεγάλη τιμή (π.χ. $T_p = 1$), και σταδιακά να τη μειώσουμε στο επίπεδο που εφαρμόζει την ικανοποίηση αυτού του περιορισμού (π.χ., $T_p = 0.1$).

Ο δεύτερος όρος (Σχ. 3.2) έχει σκοπό να κρατήσει τις στάθμες των ταμιευτήρων μέσα στα αντίστοιχα όρια τους, $[H^{\min}, H^{\max}]$.



Σχήμα 3.2: Μορφή των όρων ποινής για τη στάθμη του ταμιευτήρα

Οι παράμετροι ποινής α και β , μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εισαγάγουν προτεραιότητες στους όρους του δείκτη απόδοσης. Η εξασφάλιση της ικανοποίησης των περιορισμών απαιτεί να δοθεί μεγαλύτερη προτεραιότητα στο δεύτερο όρο. Η λογική είναι να καθορίσουμε εφικτές σειρές απολήψεων (2ος όρος) οι οποίες παράλληλα να υπερβαίνουν κάποιο συγκεκριμένο ενεργειακό στόχο (1ος όρος). Παρατηρούμε ότι οι προαναφερθείσες συναρτήσεις ποινής έχουν το δομικό πλεονέκτημα του να είναι αναλυτικές και παρ' όλα αυτά περιορίζουν με ακρίβεια το εφικτό εύρος αποθέματος απόληψης ή ενέργειας.

Για να διευκολύνουμε την επαναληπτική διαδικασία ELQG, (βλ. Παρ. 3.2) η

αντικειμενική συνάρτηση επεκτείνεται για να περιλάβει τρεις πρόσθετους όρους :

$$\begin{aligned}
 J = E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \alpha \exp\left[-\frac{P(k)-P^*}{T_p}\right] \right. \right. \\
 + \beta \left[\sum_{i=1}^3 \exp\left[-\frac{H_i^{\max}-H_i(S_i(k))}{T_H}\right] + \exp\left[-\frac{H_i(S_i(k))-H_i^{\min}}{T_H}\right] \right] \\
 \left. \left. + \gamma \sum_{i=1}^3 [H_i(S_i(k)) - H_i^{\max}]^2 + \delta \sum_{i=1}^3 [P_i(k) - P_i^*]^2 \right\} + \varepsilon \sum_{i=1}^3 [H_i(S_i(N)) - H_i^{\max}]^2 \right\} \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

Ο τρίτος και ο πέμπτος όρος επιβάλλουν ποινή στις αποκλίσεις της στάθμης του ταμειυτήρα από τη μέγιστη στάθμη, ενώ ο τέταρτος όρος επιβάλλει ποινή στις αποκλίσεις ενέργειας από τους στόχους P_i^* . Η λογική για τον τρίτο και τέταρτο όρο είναι να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα των τουρμπινών με το να διατηρούνται οι στάθμες των ταμειυτήρων όσο ψηλότερα είναι δυνατόν (χωρίς να προκαλείται υπερχειλίση). Οι ενεργειακοί στόχοι P_i^* εδώ θέτονται ίσοι με μηδέν ώστε να αντικατοπτρίζεται ο σκοπός της συντήρησης νερού. Για την ακρίβεια, ο σκοπός είναι η μεγιστοποίηση του εξαρτημένου ενεργειακού δυναμικού του συστήματος με την πραγματοποίηση όσο το δυνατόν μικρότερων απολήψεων. Κατ' αυτό τον τρόπο, το αποτέλεσμα όλων αυτών των όρων είναι συνεργιστικό - όλοι συμβάλλουν στη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας της ενεργειακής παραγωγής. Επιπλέον, άλλος ένας λόγος να συμπεριλάβουμε αυτούς τους τελευταίους τρεις όρους είναι να προσθέσουμε κυρτότητα στο πρόβλημα και αυξήσουμε την ταχύτητα σύγκλισης. Έτσι, αν και οι νέοι όροι είναι μικρότεροι σε μέγεθος από τους αρχικούς δύο, δημιουργούν το μαθηματικό πλαίσιο (θετικός ορισμός και συνθήκες ελεγκσιμότητας) που είναι απαραίτητο για την επιτυχία της βελτιστοποίησης. Η επιλογή των παραμέτρων γ , δ και ε θα πρέπει να αντικατοπτρίζει αυτό. Οι τιμές τους δηλαδή, θα πρέπει να είναι τουλάχιστον μια ή δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες από αυτές του α και β .

3.2 Η Μέθοδος Ελέγχου ELQG

Το πρόβλημα ελέγχου που μορφοποιήθηκε στο προηγούμενο μέρος λύνεται χρησιμοποιώντας τη Επεκτεταμένη Γραμμική Δευτεροβάθμια Γκαουσιανή (Extended Linear Quadratic Gaussian (ELQG)) μέθοδο ελέγχου, η οποία εισήχθη αρχικά από τους Georgakakos and Marks, 1987, και αναπτύχθηκε περαιτέρω από τον Georgakakos 1989, 1991, 1993 και Georgakakos *et al.*, 1995 *a, b, c*. Η ELQG είναι μια επαναληπτική μέθοδος βελτιστοποίησης που ξεκινά από μια αρχική ακολουθία

ελέγχου $\{u_i(k); i=1,2,3; k=0,1,2,\dots,N-1\}$ και διαδοχικά παράγει όλο και καλύτερες ακολουθίες μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Η σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δεν μπορεί να μειωθεί άλλο. Η ELQG επιλέγεται επειδή είναι αξιόπιστη, υπολογιστικά αποδοτική και ειδικά φτιαγμένη για πιθανοτικά συστήματα πολλών ταμειωτήρων. Για μια συνολική περιγραφή αυτής της μεθόδου, ο αναγνώστης μπορεί να κοιτάξει τις πιο πάνω βιβλιογραφικές αναφορές. Σε ό,τι ακολουθεί, δίνουμε μια σύντομη αναφορά της διαδικασίας βελτιστοποίησης ELQG και των χαρακτηριστικών της.

Το μοντέλο του συστήματος που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα μέρη, περιλαμβάνει τρία στοιχεία που μπορούν να εκφραστούν στην εξής γενική μορφή:

i. Δυναμική συστήματος :

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(k+1) &= \mathbf{f}[\mathbf{S}(k)] + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{C}\mathbf{w}(k) + \mathbf{d}(k) \\ k &= 0, 1, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (3.6)$$

ii. Περιορισμοί :

$$\begin{aligned} \text{Prob}[S_i^{\min}(k) \leq S_i(k)] &\leq \pi_i^{\min}(k) \\ \text{Prob}[S_i(k) \leq S_i^{\max}(k)] &\geq \pi_i^{\max}(k) \\ u_i^{\min}(k) &\leq u_i(k) \leq u_i^{\max}(k), \\ i &= 1,2,3, k = 0,1, \dots, N, \end{aligned} \quad (3.7)$$

iii. Αντικειμενική Συνάρτηση:

$$\underset{\mathbf{u}(k), k=0,1,\dots,N-1}{\text{Minimize}} J = E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{g}_k[\mathbf{S}(k), \mathbf{u}(k)] + \mathbf{g}_N[\mathbf{S}(N)] \right\}, \quad (3.8)$$

όπου $\mathbf{S}(k)$ και $\mathbf{u}(k)$ είναι τα διανύσματα κατάστασης και ελέγχου. Η $\mathbf{f}[\mathbf{S}(k)]$, \mathbf{A} , \mathbf{B} και \mathbf{C} είναι διανυσματικές συναρτήσεις και μητρώα συντελεστών που ορίζονται παρακάτω. Η $\mathbf{g}_k[\cdot]$ είναι η συνάρτηση κόστους η οποία σχετίζεται με την περίοδο k . Η \mathbf{g}_N είναι η συνάρτηση κόστους που σχετίζεται με το τέλος του χρονικού ορίζοντα και N είναι ο ορίζοντας ελέγχου (έντονα γράμματα υποδηλώνουν διανύσματα και πίνακες).

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1(k) \\ S_2(k) \\ S_3(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ u_3(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d}(k) = \begin{bmatrix} -D(k) - L_1(k) \\ -L_2(k) \\ -L_3(k) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}[\mathbf{S}(k)] = \begin{bmatrix} S_1(k) - e_1(k)A[S_1(k)] & 0 & 0 \\ 0 & S_2(k) - e_2(k)A[S_2(k)] & 0 \\ 0 & 0 & S_3(k) - e_3(k)A[S_3(k)] \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Η αλγόριθμος επίλυσης ELQG αρχίζει με μια αρχική διαδοχή ελέγχου $\{u^0(k), k = 0, 1, \dots, N-1\}$ και την αντίστοιχη μέση ακολουθία $\{\bar{S}^0(k), k = 0, 1, \dots, N\}$:

$$\bar{S}^0(k+1) = f[\bar{S}^0(k)] + \mathbf{B}u^0(k) + \mathbf{C}\bar{w}(k) + \mathbf{d}(k),$$

$$\bar{S}^0(0) = \mathbf{S}(0) = \text{γνωστό} \quad (3.10)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1,$$

όπου $\bar{w}(k)$ αντιπροσωπεύει τη μέση εισροή. Το επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε ένα μοντέλο διαταραχής που να ισχύει γύρω από αυτές τις ονομαστικές ακολουθίες κατάστασης και ελέγχου. Αυτό το μοντέλο περιγράφει τη δυναμική σχέση των διανυσμάτων διαταραχής της κατάστασης, του ελέγχου και της εισροής.

$$\Delta \mathbf{S}(k) = \mathbf{S}(k) - \bar{S}^0(k), \quad k = 0, 1, \dots, N,$$

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}^0(k), \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3.11)$$

$$\Delta \mathbf{w}(k) = \mathbf{w}(k) - \bar{w}^0(k), \quad k = 0, 1, \dots, N-1,$$

και έχει την εξής μορφή:

$$\Delta \mathbf{S}(k+1) = \mathbf{A}(k)\Delta \mathbf{S}(k) + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u}(k) + \mathbf{C}\Delta \mathbf{w}(k),$$

$$\Delta \mathbf{S}(0) = \mathbf{0}, \quad (3.12)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

όπου $\mathbf{A}(k)$ είναι μητρώο συντελεστών μεταβλητό με το χρόνο που προέρχεται από τη γραμμικοποίηση της συνάρτησης $f[\mathbf{S}(k)]$ γύρω από τις αρχικές ακολουθίες κατάστασης. Ειδικότερα, αυτό το μητρώο ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} 1 - e_1(k) \frac{\partial A_1[\bar{S}_1^0(k)]}{\partial S_1(k)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - e_2(k) \frac{\partial A_2[\bar{S}_2^0(k)]}{\partial S_2(k)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - e_3(k) \frac{\partial A_3[\bar{S}_3^0(k)]}{\partial S_3(k)} \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

όπου οι όροι παραγώγων αντιπροσωπεύουν τις παραγώγους των συναρτήσεων επιφάνειας-όγκου υπολογισμένων στις ονομαστικές ακολουθίες όγκου.

$$\begin{aligned} J = E \{ & \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{1}{2} \Delta \mathbf{S}^T(k) \mathbf{Q}_{ss}(k) \Delta \mathbf{S}(k) + \mathbf{q}_s^T(k) \Delta \mathbf{S}(k) \right. \\ & + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{u}^T(k) \mathbf{R}_{uu}(k) \Delta \mathbf{u}(k) + \mathbf{r}_u^T(k) \Delta \mathbf{u}^T(k) \mathbf{Q}_{us}(k) \Delta \mathbf{S}(k) \Big] \\ & \left. + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{S}^T(N) \mathbf{Q}_{ss}(N) \Delta \mathbf{S}(N) + \mathbf{q}_s^T(N) \Delta \mathbf{S}(N) \right\}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί επίσης να εκφραστεί σε όρους μεταβλητών διαταραχής ως εξής:

όπου $\mathbf{Q}_{ss}(k)$, $\mathbf{q}_s(k)$, $\mathbf{R}_{uu}(k)$, $\mathbf{r}_u(k)$, $\mathbf{Q}_{us}(k)$ είναι μητρώα συντελεστών που ορίζουν μια δευτέρου βαθμού προσέγγιση της αρχικής αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτά τα μητρώα περιλαμβάνουν τις πρώτες και δεύτερες μερικές παραγώγους των συναρτήσεων $g_k[\]$ και $g_N[\]$ σε σχέση με τις μεταβλητές κατάστασης και ελέγχου υπολογισμένες στις ονομαστικές σειρές.

Το πρόβλημα ελέγχου διαταραχής που ορίστηκε παραπάνω, λύνεται κατόπιν για να παράγει μια βέλτιστη ακολουθία ελέγχου $\{\Delta u^*(k), k=0, 1, \dots, N-1\}$. Αυτό αποτελεί την κατεύθυνση βελτιστοποίησης που ορίζει την καινούργια ονομαστική διαδοχή ελέγχου σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{u}^{\text{new}}(k) = \mathbf{u}^0(k) + a\Delta \mathbf{u}^*(k), \quad (3.15)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1,$$

όπου a το μέγεθος βήματος βελτιστοποίησης. Μερικά σημαντικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας επίλυσης ELQG δίνονται περιληπτικά παρακάτω:

- Οι επαναλήψεις ELQG είναι (1) αναλυτικές (οι κατευθύνσεις βελτιστοποίησης δίνονται από εξισώσεις τύπου Riccati), (2) αξιόπιστες (η διαδικασία επανάληψης είναι εγγυημένο ότι θα συγκλίνει αν το πρόβλημα έχει υπαρκτή λύση) και (3) υπολογιστικά αποτελεσματικές (η σύγκλιση είναι γρήγορη). Πράγματι, στη γειτονιά του βέλτιστου, μπορεί ναδειχτεί θεωρητικά ότι η μέθοδος συγκλίνει με τετραγωνική ταχύτητα.
- Οι περιορισμοί ελέγχου δεν περιλαμβάνονται στην αντικειμενική συνάρτηση σαν όροι ποινής, αλλά ο χειρισμός τους γίνεται μέσω μιας ειδικής διαδικασίας Projected-Newton. Αυτό έχει σημαντική επιρροή στην αποτελεσματικότητα των υπολογισμών καθώς επιτρέπει σε πολλούς περιορισμούς να εισέρχονται ή να εξέρχονται των ενεργών περιορισμών στην ίδια επανάληψη.
- Ο χειρισμός περιορισμών κατάστασης γίνεται μέσω των συναρτήσεων ποινής που συζητήθηκαν στο προηγούμενο μέρος. Αυτή η αντιμετώπιση έχει αποδειχτεί αξιόπιστη και υπολογιστικά αποτελεσματική πολύ περισσότερο από τις μεθόδους (τετραγωνικής ποινής ή πολλαπλασιαστών). Ο χειρισμός των περιορισμών κατάστασης χρειάζεται το χαρακτηρισμό της πυκνότητας πιθανότητας κατάστασης. Αυτή η πυκνότητα ορίζεται εδώ από τη μέση τιμή και το διάλυμα συνδιασπορών που λαμβάνονται αντίστοιχα από τις εξισώσεις (3.10) και (3.16):

$$\mathbf{P}_s(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{P}_s(k)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{C}\mathbf{P}_w(k)\mathbf{C}^T,$$

$$\mathbf{F}(k) = \mathbf{A}(k) - \mathbf{B}\mathbf{D}(k)\mathbf{L}(k), \quad (3.16)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1,$$

όπου $\mathbf{P}_s(k)$ και $\mathbf{P}_w(k)$ τα μητρώα συνδιασπορών κατάστασης και εισροής και $\{\mathbf{D}(k), \mathbf{L}(k), k=0, 1, \dots, N-1\}$ είναι κέρδη ελέγχου που παράγονται από τη διαδικασία επίλυσης ELQG. Αυτά τα κέρδη αντιπροσωπεύουν μία γραμμική

προσέγγιση των αληθινών νόμων ανατροφοδότησης και χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό συνδιασποράς για να δείξουν ότι μελλοντικές αποφάσεις θα λάβουν υπόψη μετρήσεις αποθέματος (ανατροφοδότηση ταμειυτήρα). Η μέση τιμή και συνδιασπορά κατάσταση χρησιμοποιούνται κατόπιν για να δημιουργήσουν μια κανονική προσέγγιση της πυκνότητας πιθανότητας κατάσταση και να μετατρέψουν τους περιορισμούς (3.3) σε προσδιοριστικά αντίστοιχα στο μέσο απόθεμα:

$$\xi_i^{\min}(k) \leq \bar{S}_i(k) \leq \xi_i^{\max}(k), \quad (3.17)$$

$$i = 1, 2, 3, \quad k = 0, 1, \dots, N-1,$$

όπου $\{\xi_i^{\min}, \xi_i^{\max}\}$ είναι τα μέσα επίπεδα αποθέματος έτσι ώστε

$$Prob[S_i^{\min}(k) \leq S_i(k)] = \pi_i^{\min}(k)$$

$$Prob[S_i(k) \leq S_i^{\max}(k)] = \pi_i^{\max}(k) \quad (3.18)$$

$$i = 1, 2, 3, \quad k = 0, 1, \dots, N$$

Οι επαναλήψεις ELQG συνεχίζονται έως ότου η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (3.5) δεν μπορεί να μειωθεί άλλο. Σε αυτό το σημείο η διαδικασία τερματίζεται και η παρούσα σειρά ελέγχου γίνεται η λύση του προβλήματος. Κάτω από συνθήκες κυρτότητας (που ισχύουν σε αυτή την μορφοποίηση), η λύση είναι καθολικά βέλτιστη. (Η κυρτότητα μπορεί να ελεγχθεί αρχίζοντας τη διαδικασία βελτιστοποίησης από διαφορετικές αρχικές σειρές ελέγχου και ελέγχοντας αν η σύγκλιση επιτυγχάνεται στην ίδια βέλτιστη σειρά). Περισσότερες λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά της ELQG μπορούν να βρεθούν στις προαναφερθείσες βιβλιογραφικές αναφορές. Στο επόμενο μέρος, θα συζητήσουμε διάφορες πιλοτικές εφαρμογές με το σύστημα ταμειυτήρων του Αχελώου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

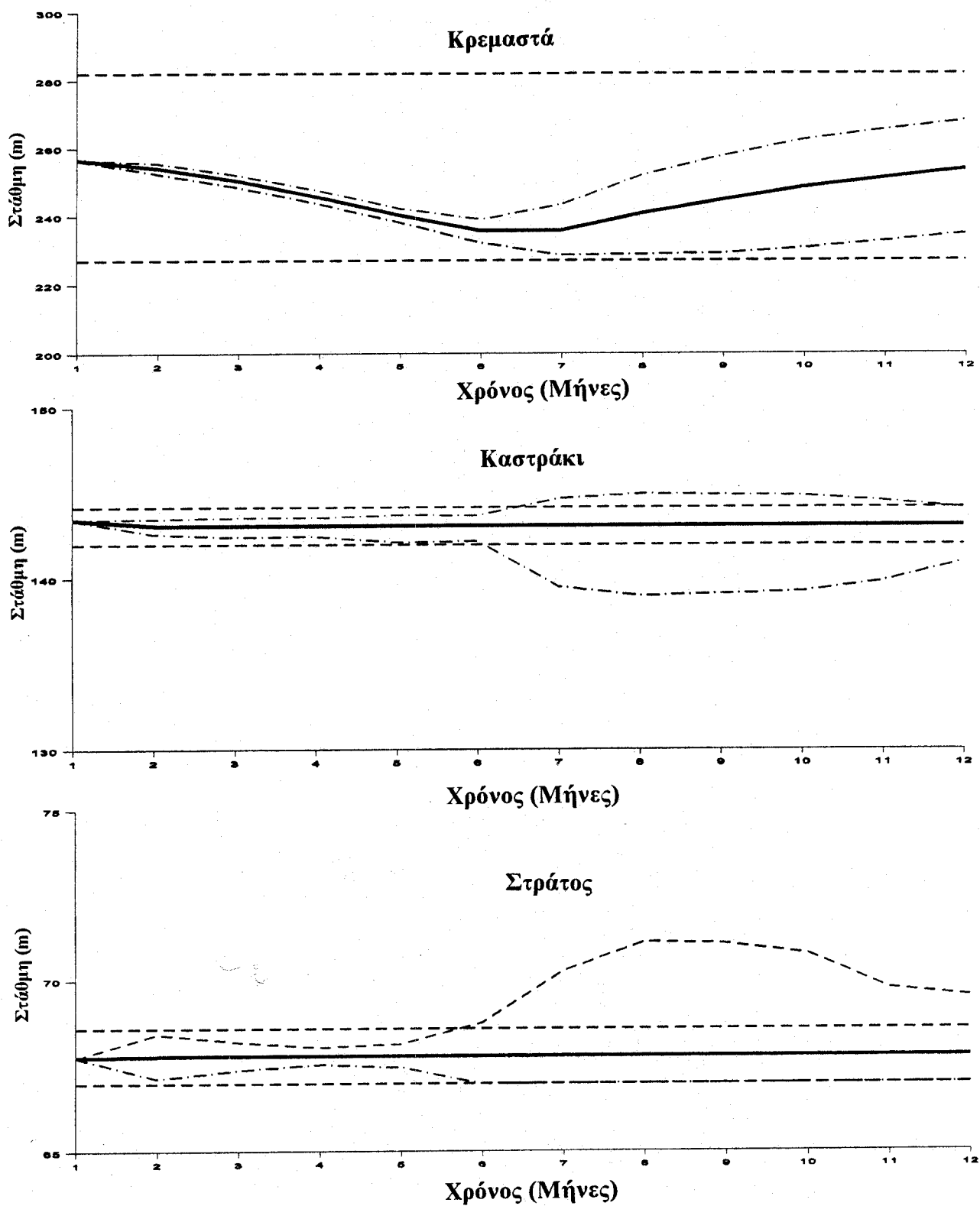
4.1 Δοκιμές Ελέγχου

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα δύο μοντέλων ελέγχου. Το πρώτο έχει εφαρμογή στην περίπτωση μηδενικής εκτροπής, ενώ το άλλο στην περίπτωση ετήσιας εκτροπής $600 \times 10^6 \text{ m}^3$ κατανεμημένων μηνιαία σύμφωνα με τα ποσοστά που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Το μήκος του ορίζοντα ελέγχου είναι 12 μήνες αρχίζοντας από την 1 Ιουνίου. Ο στόχος που τέθηκε είναι η εξασφάλιση συνολικής ενεργειακής ποσότητας τουλάχιστον 170 GWH το μήνα και από τα τρία έργα, χωρίς να παραβιάσουμε τα όρια στάθμης και απόληψης πάνω από 5%. Η ελάχιστη απόληψη από το Στράτο είναι 147 εκατομμύρια κυβικά μέτρα το μήνα από Μάιο έως Σεπτέμβριο και 55.2 εκατομμύρια κυβικά μέτρα το μήνα για το υπόλοιπο έτος. Στην αρχή του Ιουνίου, η στάθμη του νερού θεωρήθηκε 256.6 μέτρα στα Κρεμαστά, 143.5 μέτρα στο Καστράκι, και 67.78 μέτρα στο Στράτο. Οι προβλέψεις των εισροών σχηματίζονται με βάση τα μηνιαία στατιστικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.

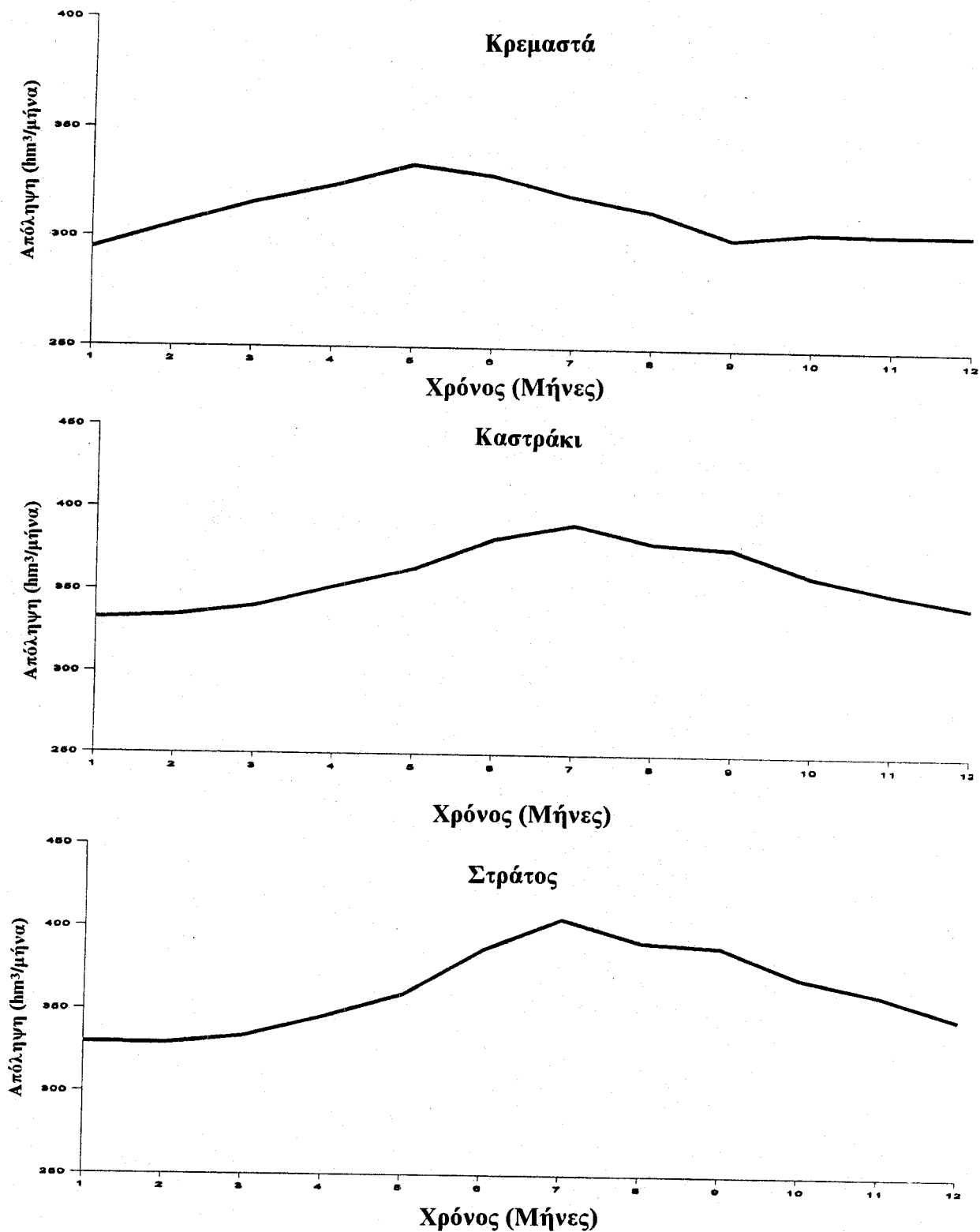
Τα Σχήματα 4.1, 4.2, και 4.3 δείχνουν τα αποτελέσματα για το βασικό σενάριο μηδενικής εκτροπής. Τα σχήματα δείχνουν αντίστοιχα τις σειρές στάθμης ταμιευτήρα (η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στις μέσες τιμές, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές υποδηλώνουν τη ζώνη πιθανότητας 90%), τις βέλτιστες απολήψεις και τις σχετιζόμενες ποσότητες ενεργειακής παραγωγής. Για τους έξι πρώτους μήνες, και οι τρεις ζώνες πιθανότητας στάθμης είναι μέσα στις εφικτές περιοχές τους. Παρ' όλα αυτά, πέρα από αυτό το σημείο, η αβεβαιότητα εισροής στο Καστράκι και το Στράτο είναι τέτοια που οι ζώνες υπερβαίνουν τα όρια στάθμης και δεν μπορούν να ελεγχθούν αποτελεσματικά. Σε αυτό το μέρος του ορίζοντα ελέγχου, ο σκοπός του μοντέλου ελέγχου είναι να διατηρήσει τις μέσες στάθμες ταμιευτήρων μέσα στην εφικτή ζώνη. Αυτή η κατάσταση δεν είναι περιορισμός του μοντέλου ελέγχου: απλώς υποδεικνύει ότι οι επιχειρησιακές περιοχές στο Καστράκι και το Στράτο είναι πολύ μικρές για να ελέγχουν πλήρως τις εισροές. Από την άλλη μεριά, ο ταμιευτήρας στα Κρεμαστά είναι αρκετά μεγάλος ώστε να συγκρατεί πάντα τη ζώνη πιθανότητας 90%. Οι ενεργειακές σειρές (Σχήμα 4.3) δείχνουν ότι η συνολική παραγωγή ενέργειας ισούται με 170 GWH, αν και οι παραγωγές σε κάθε ταμιευτήρα διαφέρουν.

Τα Σχήματα 4.4, 4.5, και 4.6 δείχνουν τα αποτελέσματα για το σενάριο εκτροπής των $600 \times 10^6 \text{ m}^3$. Τα γραφήματα των σειρών των σταθμών ταμιευτήρων είναι παρόμοια με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης, αλλά οι απολήψεις και παραγωγές ενέργειας είναι αρκετά διαφορετικές. Η κύρια διαφορά είναι ότι οι μέσες εισροές στη διάρκεια του πρώτου μέρους του ορίζοντα ελέγχου (Ιούνιο με Σεπτέμβριο) μειώνονται σύμφωνα με το σχέδιο εκτροπής, με αποτέλεσμα το σύστημα να μην μπορεί πλέον να ικανοποιήσει τον μηνιαίο παραγωγικό στόχο των 170 GWH (διατηρώντας εφικτές στάθμες στα Κρεμαστά). Έτσι, οι απολήψεις των ταμιευτήρων καθώς και οι ποσότητες ενεργειακής παραγωγής μειώνονται σε σχέση με το σενάριο μηδενικής εκτροπής. Συγκεκριμένα, στη διάρκεια του πρώτου μισού του ορίζοντα ελέγχου (όταν η εκτροπή είναι μεγάλη), η συνολική παραγωγή ενέργειας μόλις φτάνει τις 130 GWH/μήνα. Αργότερα, καθώς η εκτροπή σταματάει, το σύστημα είναι πάλι ικανό να ικανοποιήσει τον ενεργειακό στόχο των 170 GWH/μήνα.

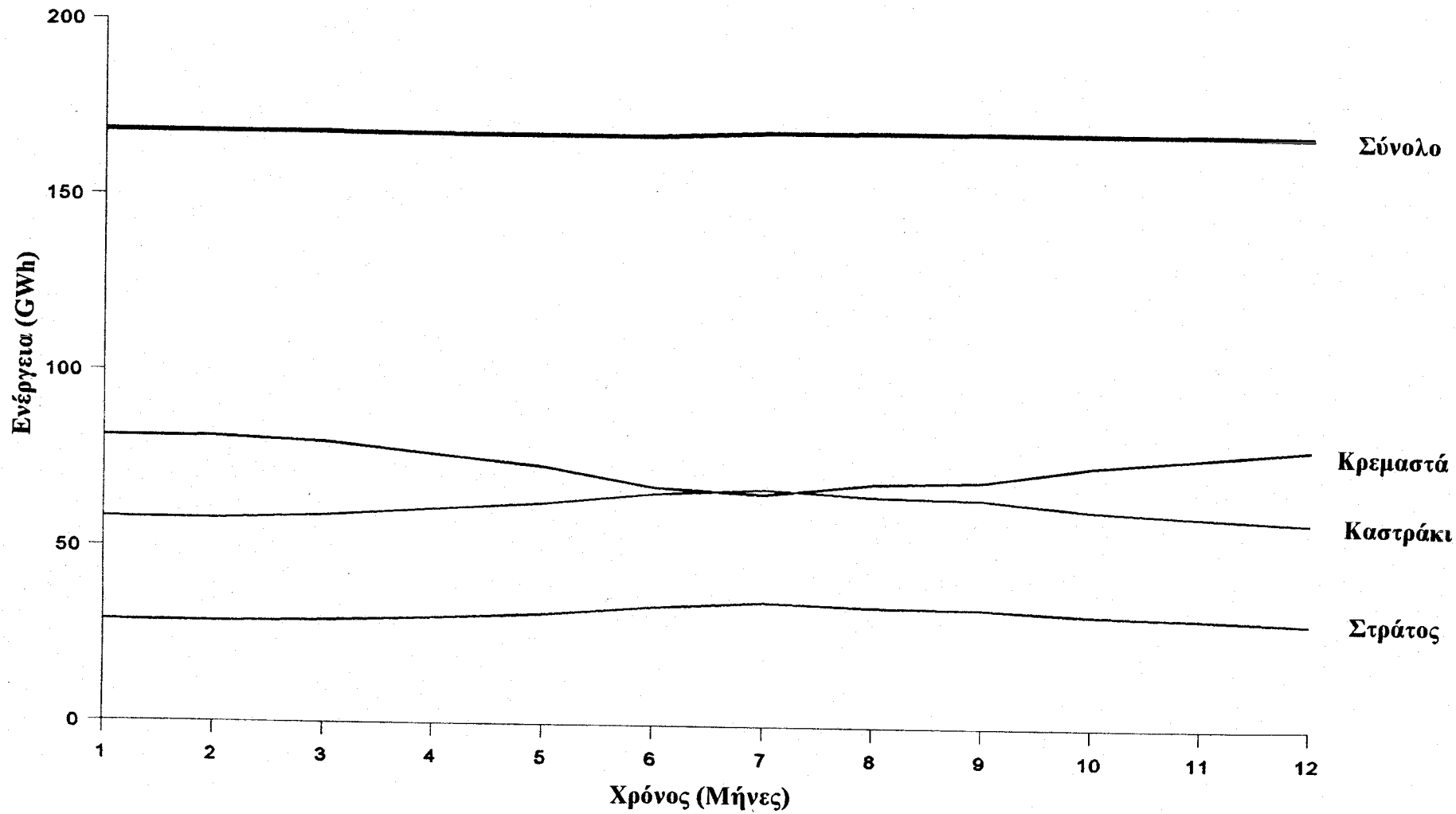
Οι προηγούμενες πιλοτικές εφαρμογές αποσκοπούν στην περιγραφή μερικών από τα χαρακτηριστικά των καθορισμένων από το μοντέλο ελέγχου βέλτιστων σειρών. Επίσης, υποδεικνύουν ότι η εκτροπή θα μπορούσε να περιορίσει τη δυνατότητα του συστήματος ταμιευτήρων να μεγιστοποιήσει την ενεργειακή του παραγωγή. Αυτές, πάντως, είναι υποθετικές εφαρμογές και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οριστικά συμπεράσματα για τα αποτελέσματα της εκτροπής. Για να αντιμετωπίσουμε αυτή την ερώτηση χρειάζεται να προσομοιώσουμε την αντίδραση του συστήματος με και χωρίς εκτροπή. Αυτό καλύπτεται στο επόμενο μέρος.



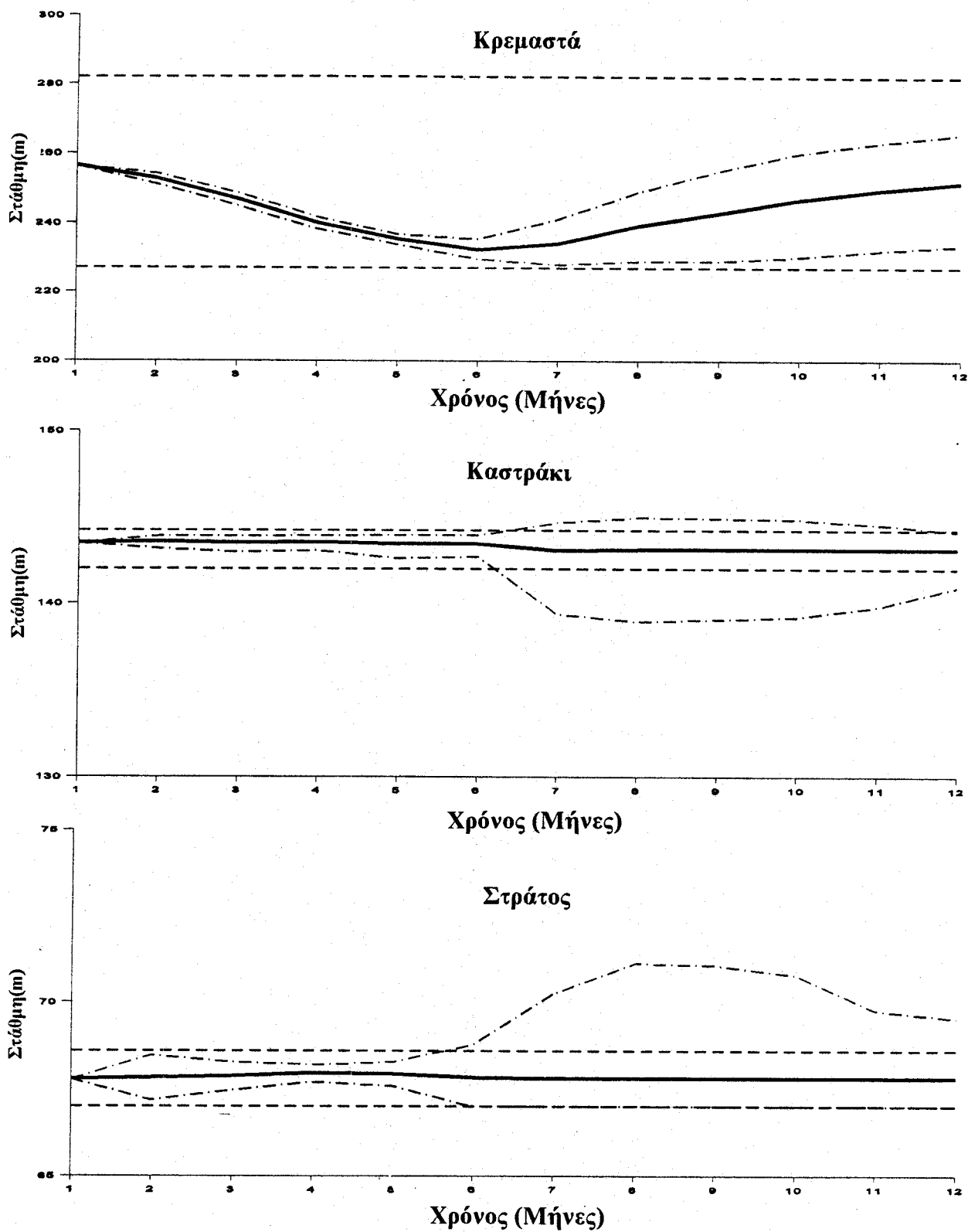
Σχήμα 4.1: Αποτελέσματα μοντέλου ελέγχου στην περίπτωση μη εκτροπής : Στάθμες ταμιευτήρων.



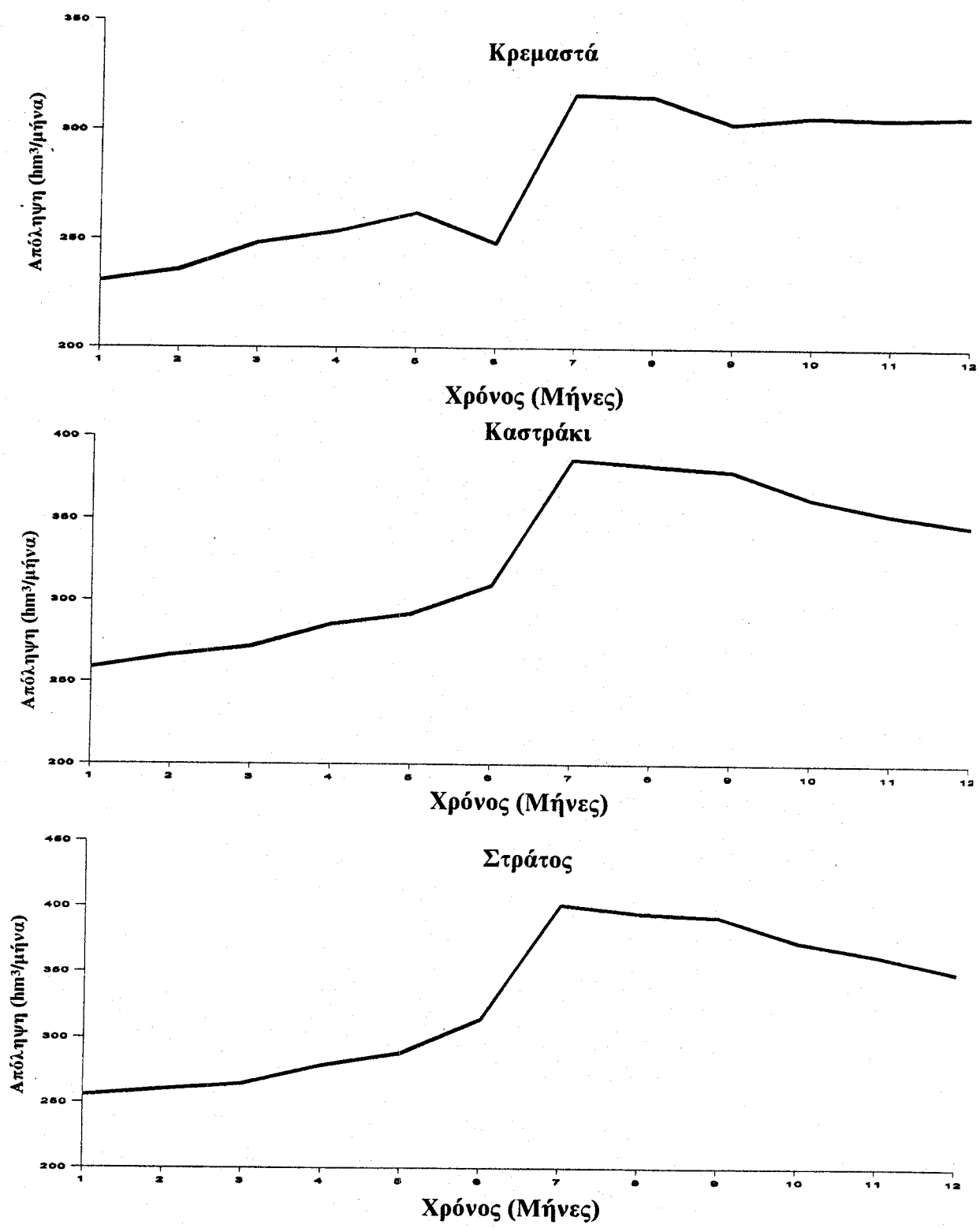
Σχήμα 4.2: Αποτελέσματα μοντέλου ελέγχου στην περίπτωση μη εκτροπής : Απολήψεις.



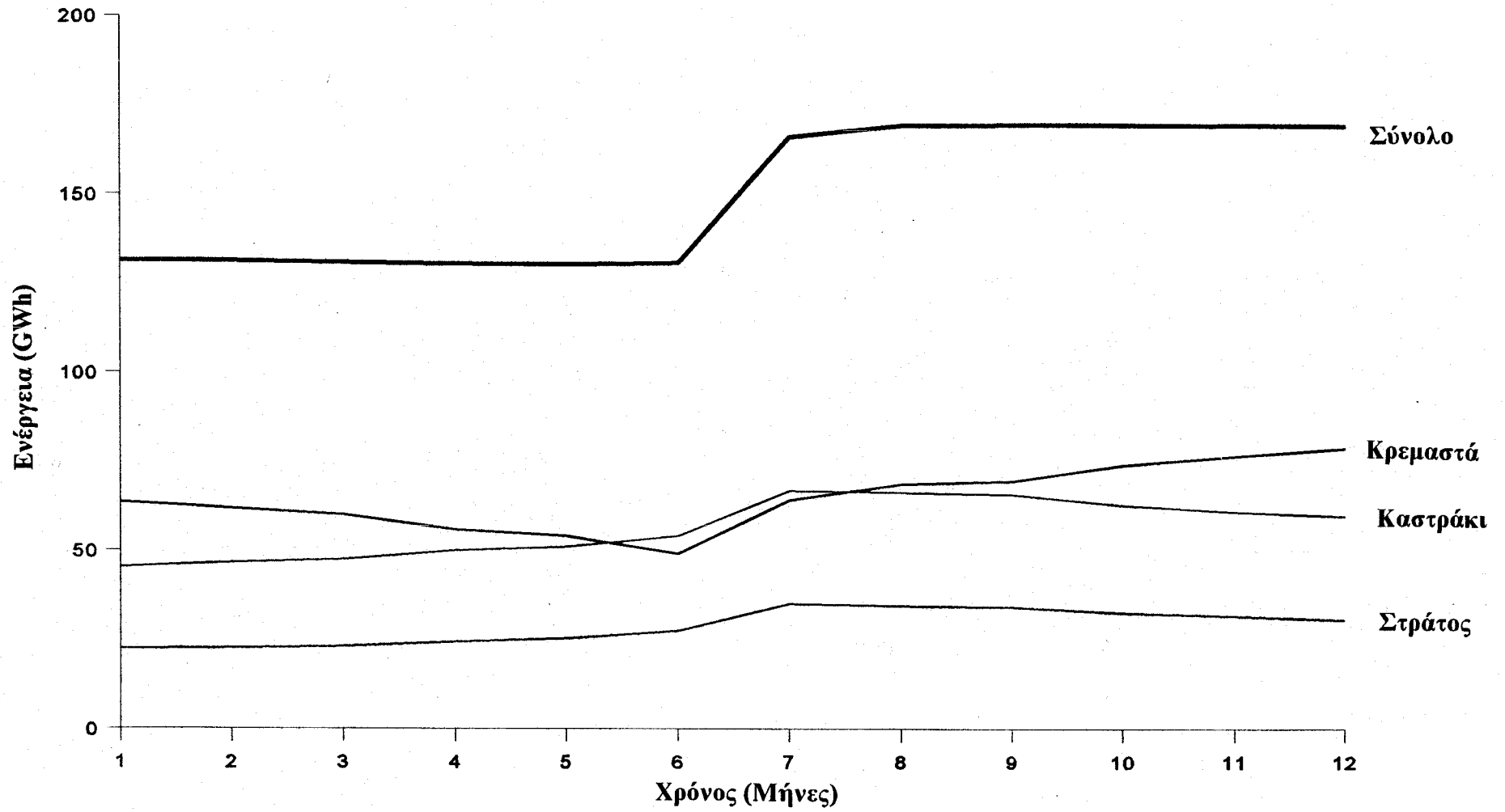
Σχήμα 4.3: Αποτελέσματα μοντέλου ελέγχου στην περίπτωση μη εκτροπής: Παραγωγή ενέργειας.



Σχήμα 4.4: Αποτελέσματα μοντέλου ελέγχου για το σενάριο εκτροπής 600hm³: Στάθμη ταμιευτήρων.



Σχήμα 4.5: Αποτελέσματα μοντέλου ελέγχου για το σενάριο εκτροπής 600 hm³: Απολήψεις.



Σχήμα 4.6: Αποτελέσματα μοντέλου ελέγχου για το σενάριο εκτροπής 600 hm³: Παραγωγή ενέργειας.

4.2 Δοκιμές Ελέγχου-Προσομοίωσης

Ο σκοπός των δοκιμών ελέγχου-προσομοίωσης είναι η ποσοτικοποίηση της απόδοσης του συστήματος κάτω από διαφορετικά σενάρια εκτροπής και με τη λειτουργία του συστήματος οδηγούμενη από το μοντέλο ελέγχου. Η βάση αυτών των πειραμάτων είναι το ιστορικό αρχείο μηνιαίων εισροών 44 ετών (1951-1994), και η διαδικασία ελέγχου-προσομοίωσης έχει ως εξής: Για κάθε μήνα του ιστορικού αρχείου, το μοντέλο ελέγχου ενεργοποιείται αρχικά για να παράγει τις βέλτιστες σειρές απολήψεων ταμιευτήρων όπως και στο προηγούμενο μέρος. Οι παράμετροι ελέγχου του μοντέλου είναι οι ίδιες όπως πριν (95% αξιοπιστία για παραβίαση περιορισμών, ορίζοντας ελέγχου 12 μηνών, και ιστορικά μεγέθη εισροών χρησιμοποιημένα ως προβλέψεις), με μόνη διαφορά τις αρχικές στάθμες ταμιευτήρων, οι οποίες υπολογίζονται με βάση τα αποτελέσματα του προηγούμενου βήματος. Από τις σειρές βέλτιστης απόληψης 12 μηνών, μόνο οι βέλτιστες απολήψεις του πρώτου μήνα πραγματικά εφαρμόζονται στην προσομοίωση και η ανταπόκριση του συστήματος προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας τις ιστορικά παρατηρημένες εισροές. Αν οι βέλτιστες απολήψεις έχουν ως αποτέλεσμα εφικτές στάθμες ταμιευτήρων στο τέλος του μήνα, το πρόγραμμα ολοκληρώνει αυτό το βήμα ελέγχου-προσομοίωσης, καταγράφει αυτές τις στάθμες μαζί με τις απολήψεις και τις ποσότητες ενεργειακής παραγωγής και επαναλαμβάνει αυτή τη διαδικασία στον επόμενο μήνα. Αλλιώς, γίνονται κατάλληλες διορθώσεις των απολήψεων ώστε όλοι οι ταμιευτήρες να μένουν μέσα στα εφικτά τους εύρη. Αυτή η διαδικασία ελέγχου-προσομοίωσης επαναλαμβάνεται για 528 (= 44 x 12) μήνες και έχει ως αποτέλεσμα μακρές σειρές προσομοιωμένης στάθμης ταμιευτήρων, απολήψεων και ποσοτήτων ενεργειακής παραγωγής. Αυτή η σειρά μπορεί κατόπιν να αναλυθεί για να παράγει στατιστικά χαρακτηριστικά της απόδοσης του συστήματος και να χρησιμοποιηθεί για συγκρίσεις.

Το πρώτο πείραμα ελέγχου-προσομοίωσης αντιστοιχεί στη βασική περίπτωση σεναρίου μηδενικής εκτροπής (Σχήματα 4.7, 4.8, και 4.9). Η πτωτική τάση στο απόθεμα των Κρεμαστών (Σχήμα 4.7) και στις σειρές απόληψης (Σχήμα 4.8), οφείλεται στη γνωστή ξηρασία των τελευταίων ετών. Όπως είναι αναμενόμενο, το Καστράκι και ο Στράτος είναι πολύ μικροί για να παρέχουν ασφάλεια από την ξηρασία όταν τα Κρεμαστά εξαντληθούν και απλώς απελευθερώνουν οποιεσδήποτε παροχές έρχονται ανάντη. Η σειρά ενεργειακής παραγωγής (Σχήμα 4.9) ακολουθεί το πρότυπο της σειράς απολήψεων. Η συνολική παραγωγή ενέργειας κυμαίνεται γύρω στις 190 GWH το μήνα, εκτός από τη διάρκεια πλημμυρών όταν είναι αναγκαίες

μεγαλύτερες απελευθερώσεις αποθεμάτων, ή από τη διάρκεια ξηρασιών όταν το σύστημα είναι σοβαρά εξαντλημένο. Η μέση ενεργειακή παραγωγή του συστήματος είναι 2 096 GWH, από τις οποίες οι 1 021 GWH παράγονται από τα Κρεμαστά, 713 GWH από το Καστράκι και 362 GWH από το Στράτο.

Τα Σχήματα 4.10, 4.11, και 4.12 δίνουν περιληπτικά τα αποτελέσματα του σεναρίου εκτροπής $600 \times 10^6 \text{ m}^3$. Οι σειρές στάθμης ταμιευτήρων (Σχήμα 4.10) παρουσιάζουν το ίδιο πρότυπο εποχιακής διακύμανσης και τις ίδιες εμφανίσεις πλημμυρών και ξηρασιών όπως στην περίπτωση μηδενικής εκτροπής. Παρ' όλα αυτά, στα μεγέθη απολήψεων και ενέργειας (Σχ. 4.11 και 4.12) υπάρχει μια πιο σημαντική αλλαγή. Η συνολική μηνιαία ενεργειακή παραγωγή κυμαίνεται γύρω στις 140 GWH. Κατά μέσο όρο, η ετήσια ενεργειακή παραγωγή έχει πέσει στις 1 789 GWH εκ των οποίων οι 874 GWH παράγονται στα Κρεμαστά, οι 606 GWH στο Καστράκι, και οι 309 GWH στο Στράτο. Έτσι, σε ετήσια βάση, το σενάριο εκτροπής έχει ως αποτέλεσμα πτώση 15%.

Για καλύτερη αντίληψη του εποχιακού αποτελέσματος της εκτροπής στην υδροδότηση και την παραγωγή ενέργειας, δημιουργήσαμε μηνιαίες καμπύλες συχνότητας. Οι καμπύλες αυτές φαίνονται για τις παροχές στο Στράτο στα Σχήματα 4.13 έως 4.24, και για την παραγωγή ενέργειας του συστήματος στα Σχήματα 4.25 έως 4.36. (οι αριθμητικές τιμές για κάθε καμπύλη βρίσκονται στο Παράρτημα Β). Τα σχήματα δείχνουν τη συχνότητα υπέρβασης που αντιστοιχεί στα σενάρια μηδενικής εκτροπής και εκτροπής $600 \times 10^6 \text{ m}^3$, υπολογισμένα χρησιμοποιώντας 44 τιμές για κάθε μήνα. (Η συχνότητα υπέρβασης είναι η πιθανότητα, για κάθε μήνα, να υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή η παροχή ή η παραγωγή ενέργειας). Για σύγκριση, οι καμπύλες συχνότητας παροχών δείχνουν επίσης το αναγκαίο ελάχιστο επίπεδο παροχής κατάντη.

Το κύριο χαρακτηριστικό όλων των καμπυλών συχνότητας είναι ότι, για μια συγκεκριμένη τιμή παροχής ή παραγωγής ενέργειας, η συχνότητα υπέρβασης για το σενάριο εκτροπής είναι μικρότερη από αυτή για τη βασική περίπτωση. Αυτή η μείωση ποικίλλει με το μήνα και το εύρος της παροχής ή της παραγωγής ενέργειας. Για παράδειγμα, τον Ιούλιο, το Σχήμα 4.19 δείχνει ότι η πιθανότητα της παροχής στο Στράτο να υπερβεί τα 350 εκατομμύρια κυβικά μέτρα είναι περίπου 70% στη βασική περίπτωση, ενώ είναι πρακτικά μηδέν στο σενάριο εκτροπής. Από την άλλη μεριά, η πιθανότητα η παροχή να ικανοποιήσει τις κατάντη ανάγκες (147 εκατομμύρια κυβικά μέτρα) τον ίδιο μήνα είναι 96% για τη βασική περίπτωση και 94% με την εκτροπή. Για τις παρούσες συνθήκες ζήτησης κατάντη, η τελευταία σύγκριση είναι πιο

σημαντική και δείχνει ότι τον Ιούλιο το αποτέλεσμα της εκτροπής δεν είναι πολύ σημαντικό. Η ίδια σύγκριση για όλους τους μήνες του έτους φαίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 4.1: Αξιοπιστία κάλυψης της κατάντη ζήτησης

Μήνας	Ζήτηση για άρδευση και κάλυψη περιβαλλοντικών αναγκών (10^6 m^3)	Αξιοπιστία για μηδενική εκτροπή (%)	Αξιοπιστία για εκτροπή $600 \times 10^6 \text{ m}^3$ (%)
Ιανουάριος	55.2	100	100
Φεβρουάριος	55.2	100	100
Μάρτιος	55.2	100	100
Απρίλιος	55.2	100	100
Μάιος	147	95	97
Ιούνιος	147	96	96
Ιούλιος	147	96	94
Αύγουστος	147	97	92
Σεπτέμβριος	147	93	91
Οκτώβριος	55.2	98	93
Νοέμβριος	55.2	100	94
Δεκέμβριος	55.2	100	100

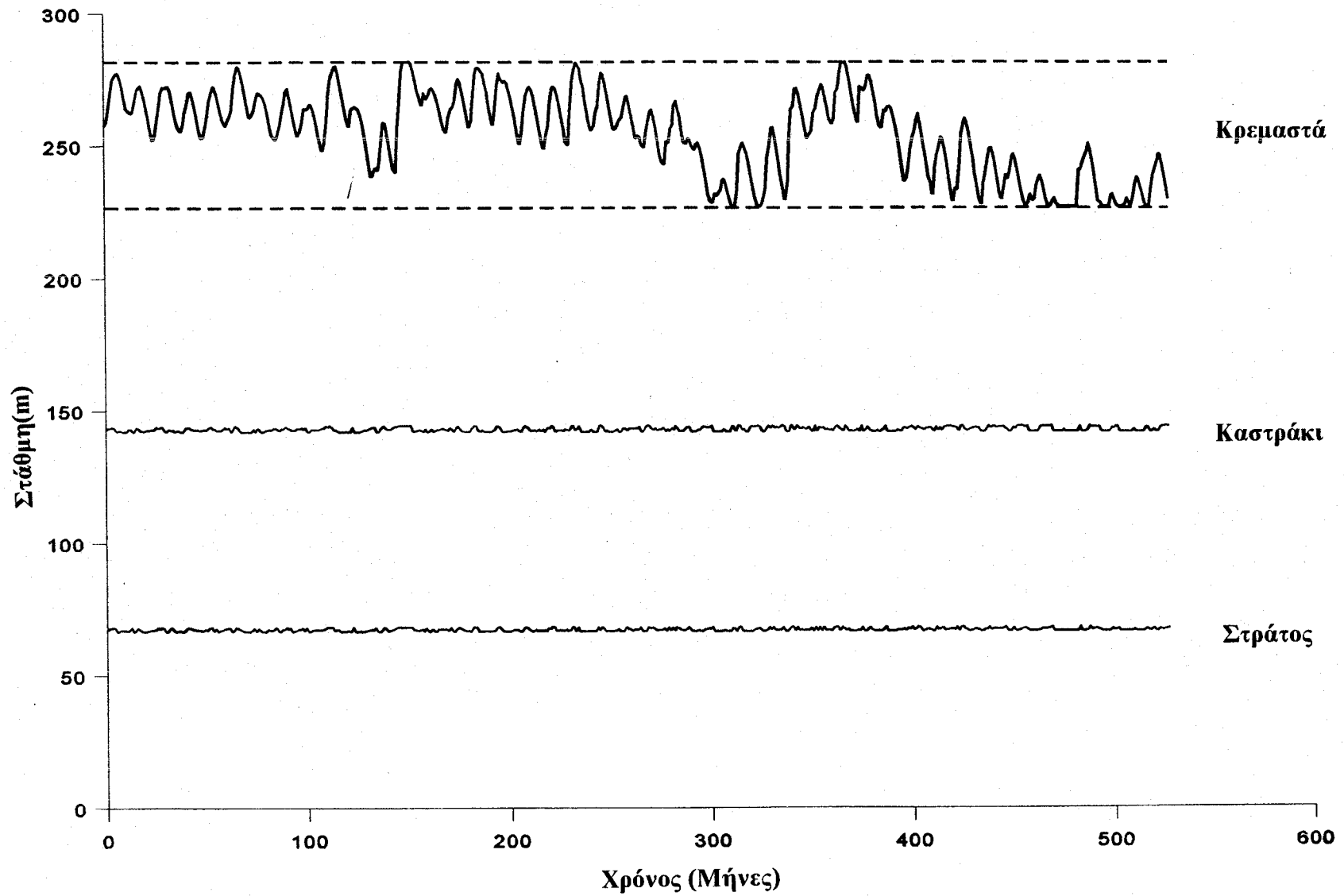
Η σύγκριση δείχνει ότι η μείωση αξιοπιστίας είναι σχετικά μικρή και κυμαίνεται από 0 έως 6%. Παρ' όλα αυτά, σημειώνουμε με έμφαση ότι αυτά τα αποτελέσματα ισχύουν για τις συγκεκριμένες παραδοχές και παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για το τρέξιμο του μοντέλου. Αν αλλάξουν οι παραδοχές (π.χ. διαφοροποίηση των απαιτήσεων κατάντη) ή οι παράμετροι (π.χ. μεγαλύτερο βάρος στην τήρηση των περιορισμών σε σχέση με αυτό της υδροηλεκτρικής παραγωγής), τότε θα μεταβληθούν και τα αποτελέσματα ως προς την αξιοπιστία της κάλυψης της κατάντη ζήτησης.

Τα Σχήματα 4.25 ως 4.36 δείχνουν την επίπτωση της εκτροπής στην παραγωγή ενέργειας. Αν και οι μέσες ετήσιες μειώσεις παραγωγής ενέργειας υπολογίστηκαν να είναι γύρω στο 15%, οι καμπύλες συχνότητας δείχνουν ότι οι μηνιαίες μειώσεις ενεργειακής παραγωγής μπορεί να είναι μεγαλύτερες. Για παράδειγμα, τον Ιούνιο οι ποσότητες ενέργειας που υπερβαίνουν στο 50% των περιπτώσεων (διάμεση τιμή) είναι 190 GWH στη βασική περίπτωση και 153 GWH στην εκτροπή, γεγονός που δείχνει μείωση 20% στην πιο πιθανή ποσότητα παραγωγής γι' αυτό το μήνα. Στα επίπεδα συχνότητας υπέρβασης 75% και 25% η μείωση παραγωγής λόγω της εκτροπής είναι αντίστοιχα 11% και 15%. Αυτή η σύγκριση για όλους τους μήνες του έτους δίνεται συνοπτικά στον Πίνακα 4.2.

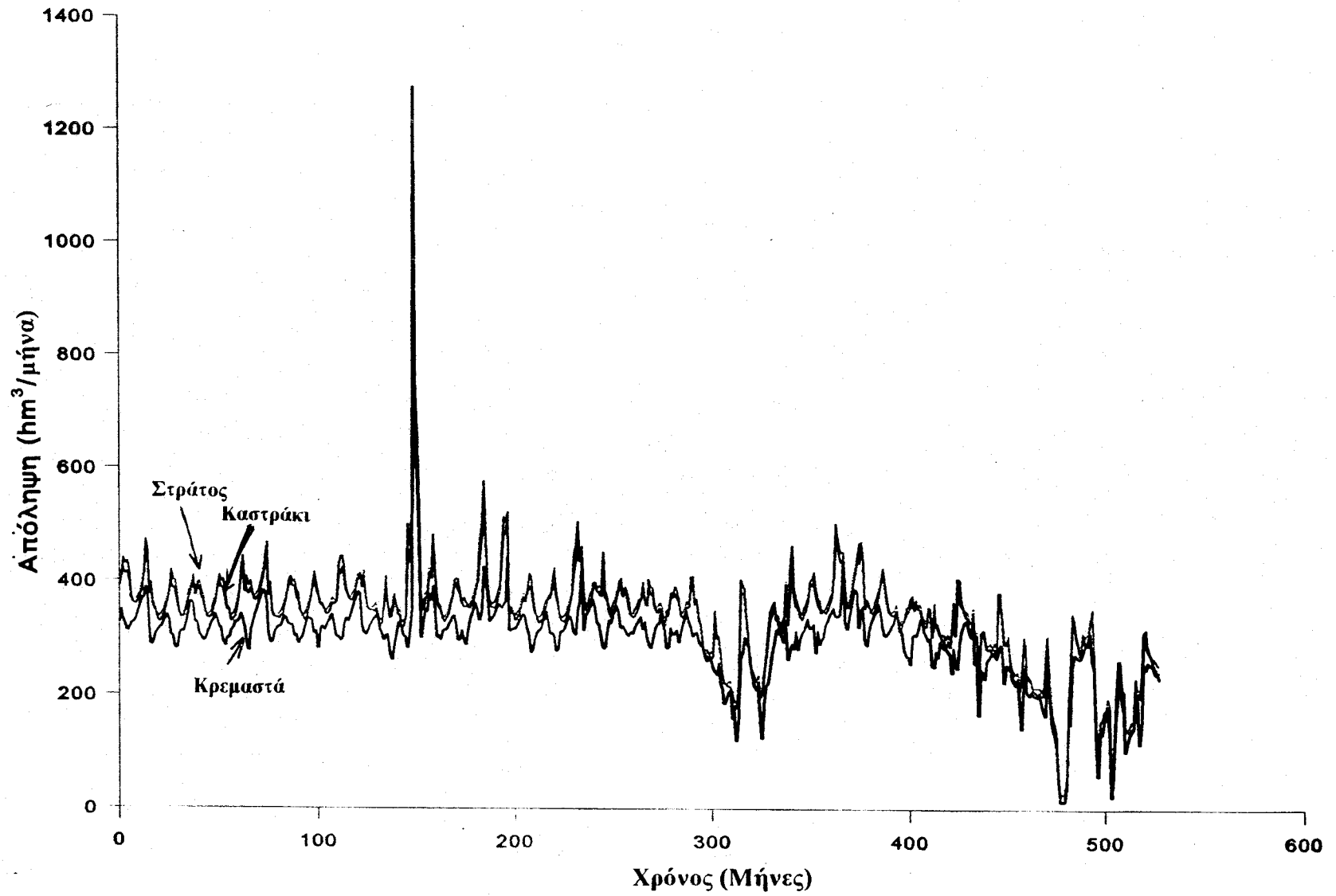
Πίνακας 4.2: Σύγκριση Αξιοπιστίας Μηνιαίας Παραγωγής Ενέργειας - Μονάδες σε GWH/Μήνα

Μήνας	Επίπεδο Αξιοπιστίας 25%		Επίπεδο Αξιοπιστίας 50%		Επίπεδο Αξιοπιστίας 75%	
	Βασική Περίπτωση	Εκτροπή	Βασική Περίπτωση	Εκτροπή	Βασική Περίπτωση	Εκτροπή
Ιανουάριος	195	177	189	141	150	123
Φεβρουάριος	193	162	189	141	149	126
Μάρτιος	191	158	189	141	151	136
Απρίλιος	193	166	190	147	155	135
Μάιος	194	166	190	155	154	140
Ιούνιος	196	167	190	153	156	140
Ιούλιος	201	170	190	153	152	139
Αύγουστος	202	175	190	158	146	121
Σεπτέμβριος	201	176	190	158	145	121
Οκτώβριος	201	178	190	158	154	126
Νοέμβριος	203	178	187	162	145	112
Δεκέμβριος	195	177	188	141	151	123

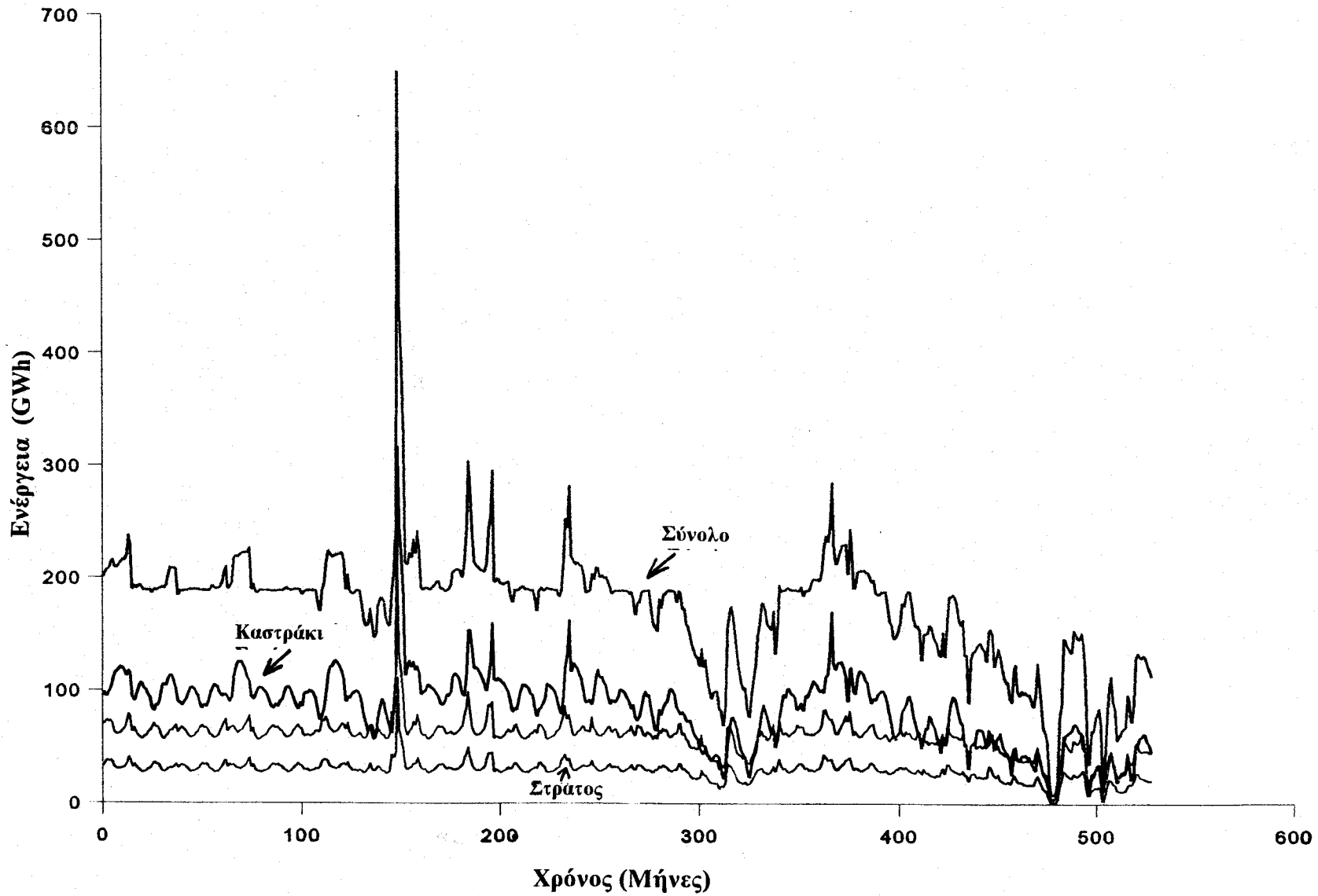
Ο πίνακας δείχνει ότι η πιο πιθανή μείωση ενεργειακής παραγωγής (στο επίπεδο υπέρβασης 50%) είναι περίπου 40 με 50 GWH το μήνα, που αντιπροσωπεύει μείωση 22 με 26% από τη βασική περίπτωση. Αυτή είναι μια σημαντική συνέπεια, με συνεπαγόμενη οικονομική ζημιά ως προς το σύστημα των ταμιευτήρων Κρεμαστών-Καστρακίου-Στράτου. Μολαταύτα, η οικονομική αξία της ενεργειακής απώλειας δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί από τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν εδώ. Για να γίνει αυτό, θα χρειαστεί η ανάπτυξη ημερήσιων και ωριαίων μοντέλων ελέγχου και η διερεύνηση της διαθεσιμότητας υδροηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με το κόστος παραγωγής ενέργειας ενός θερμικού συστήματος. Αυτή και άλλες δυνατές προεκτάσεις αυτής της έρευνας συζητούνται σύντομα στο επόμενο κεφάλαιο.



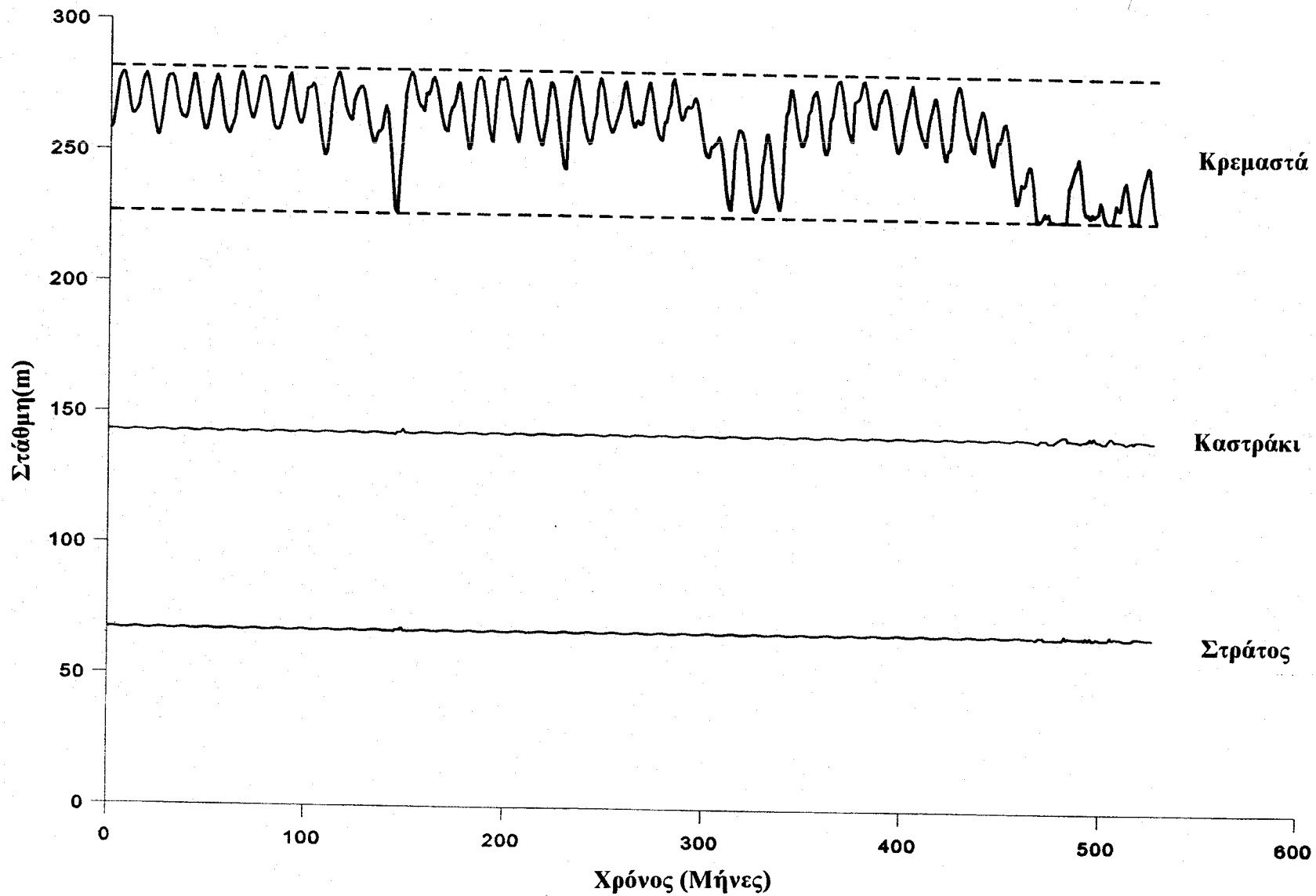
Σχήμα 4.7: Διακύμανση στάθμης για την περίπτωση ^{μν}εκτροπής (επίπεδο αξιοπιστίας 95%).



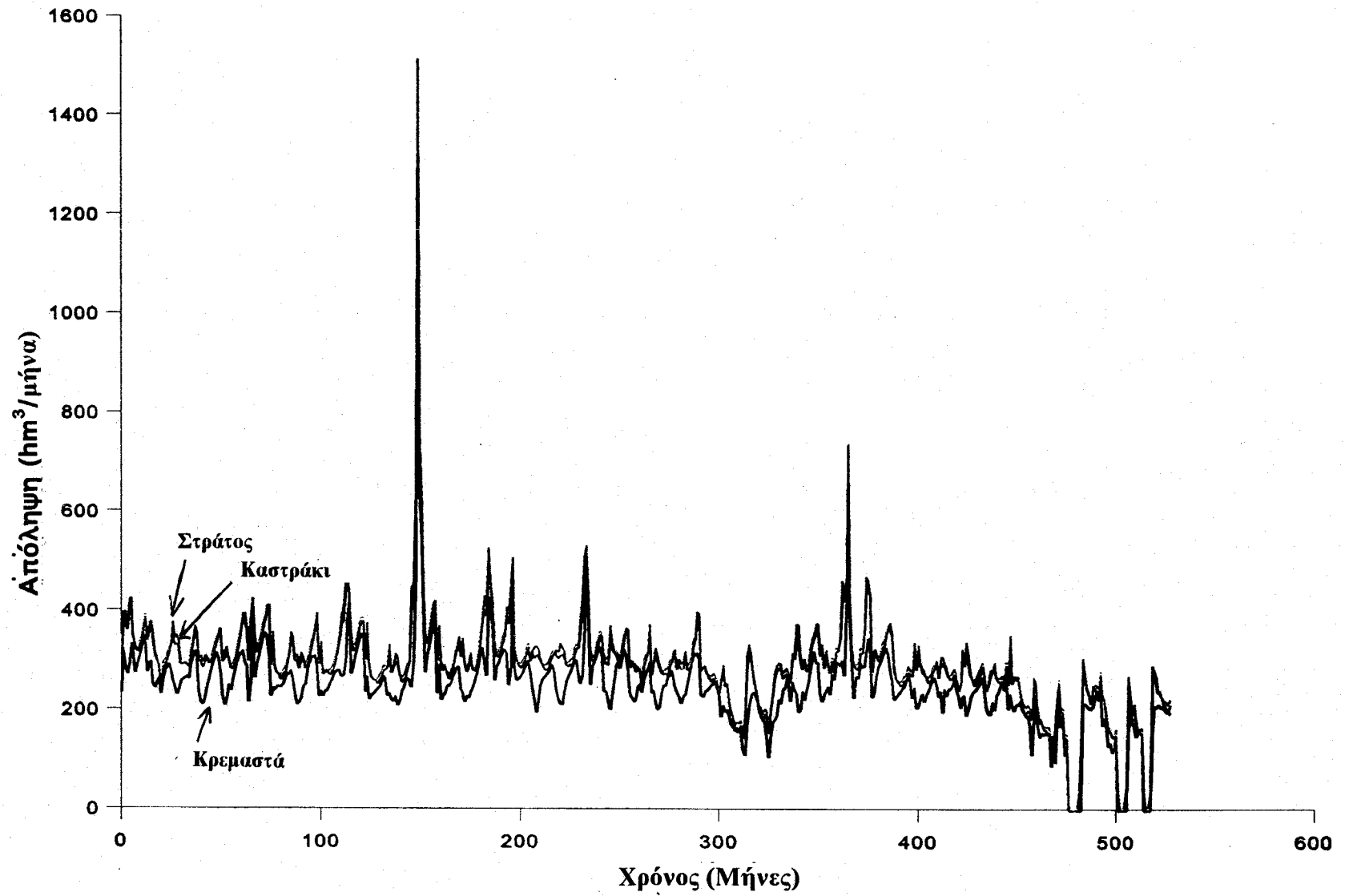
Σχήμα 4.8: Διακύμανση απολήψεων για την περίπτωση μη εκτροπής



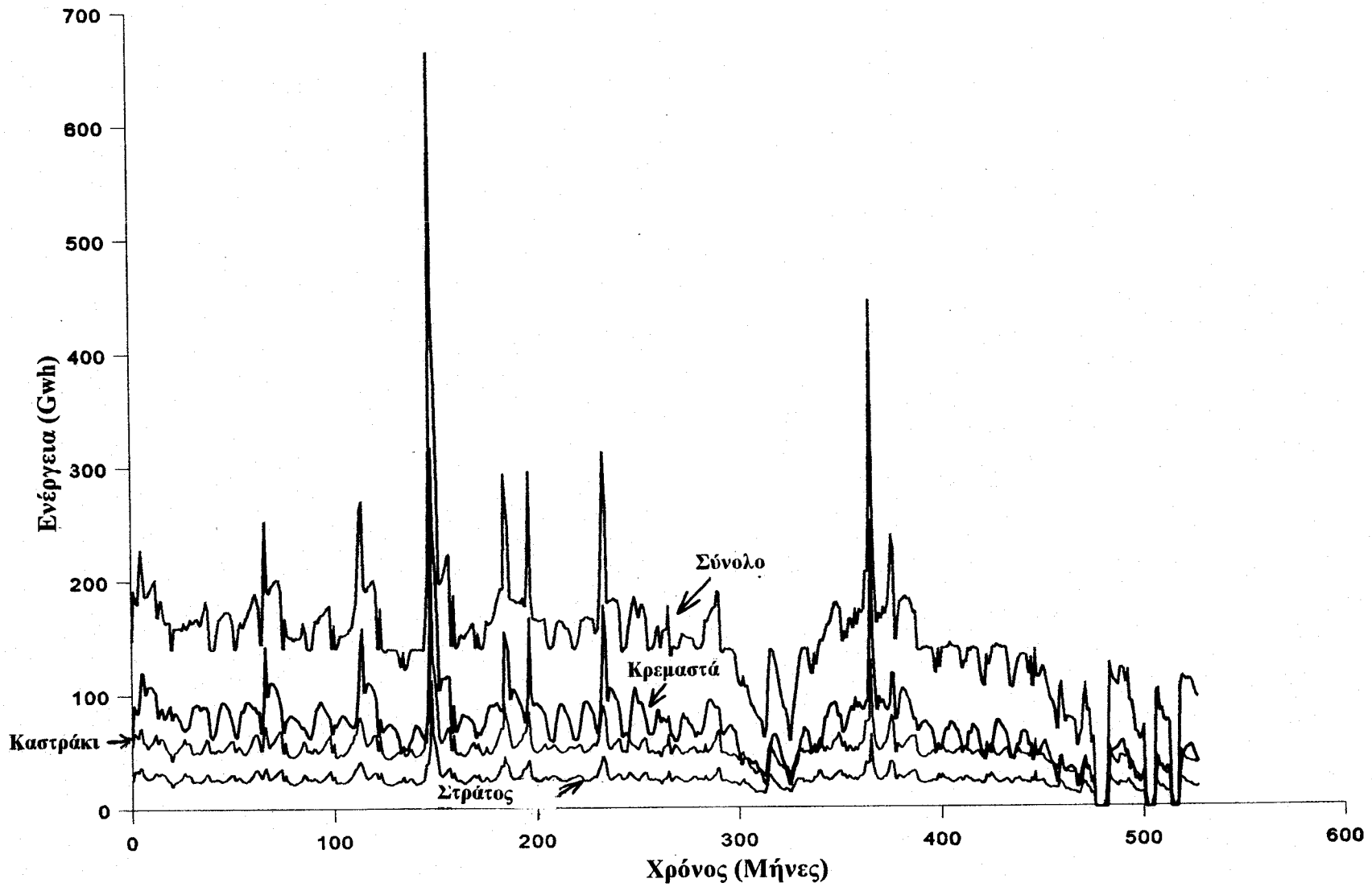
Σχήμα 4.9: Διακύμανση παραγωγής ενέργειας για την περίπτωση μη εκτροπής.



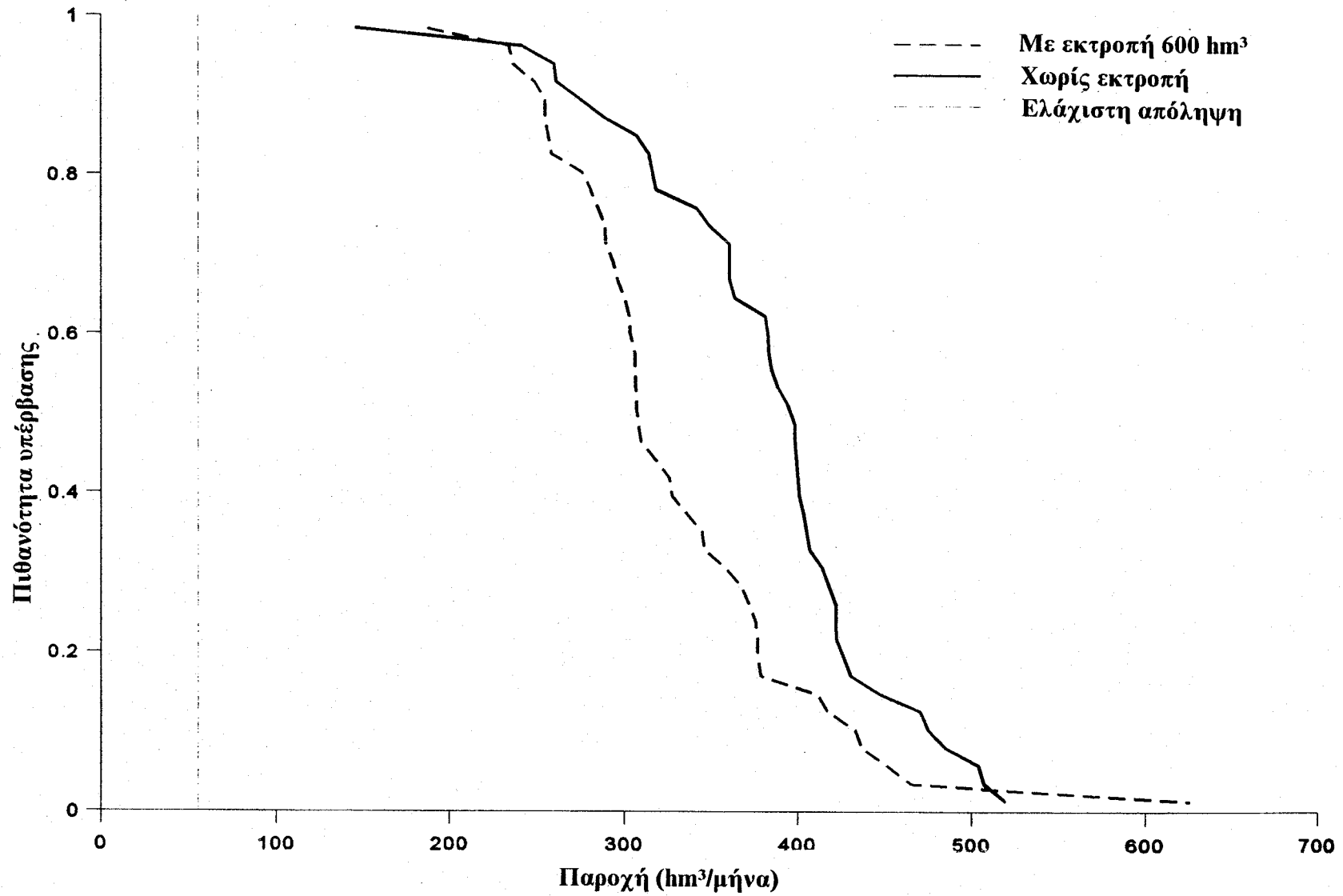
Σχήμα 4.10: Διακύμανση στάθμης για το σενάριο εκτροπής (επίπεδο αξιοπιστίας 95 %).



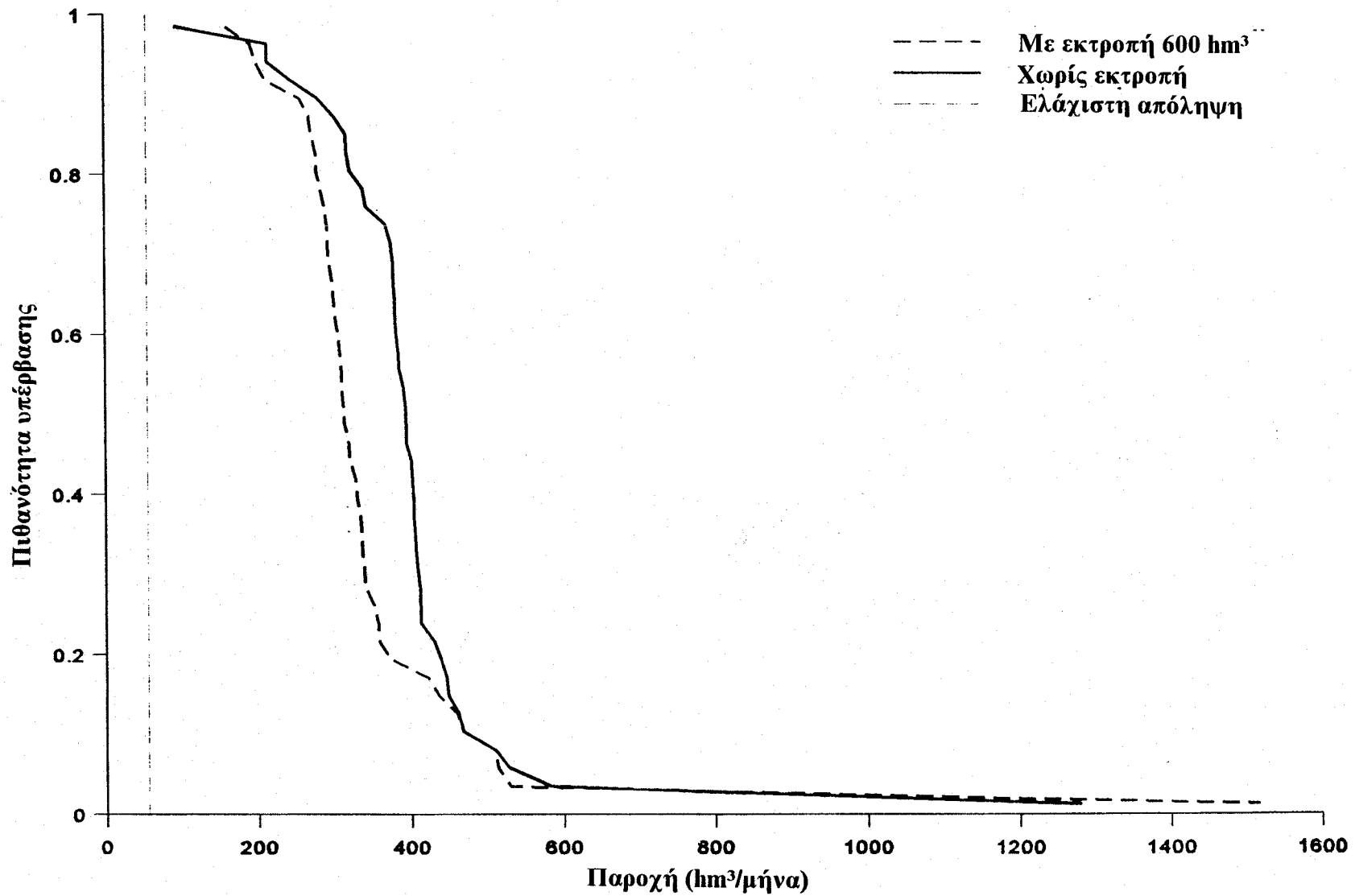
Σχήμα 4.11: Διακύμανση στάθμης για το σενάριο εκτροπής (επίπεδο αξιοπιστίας 95%).



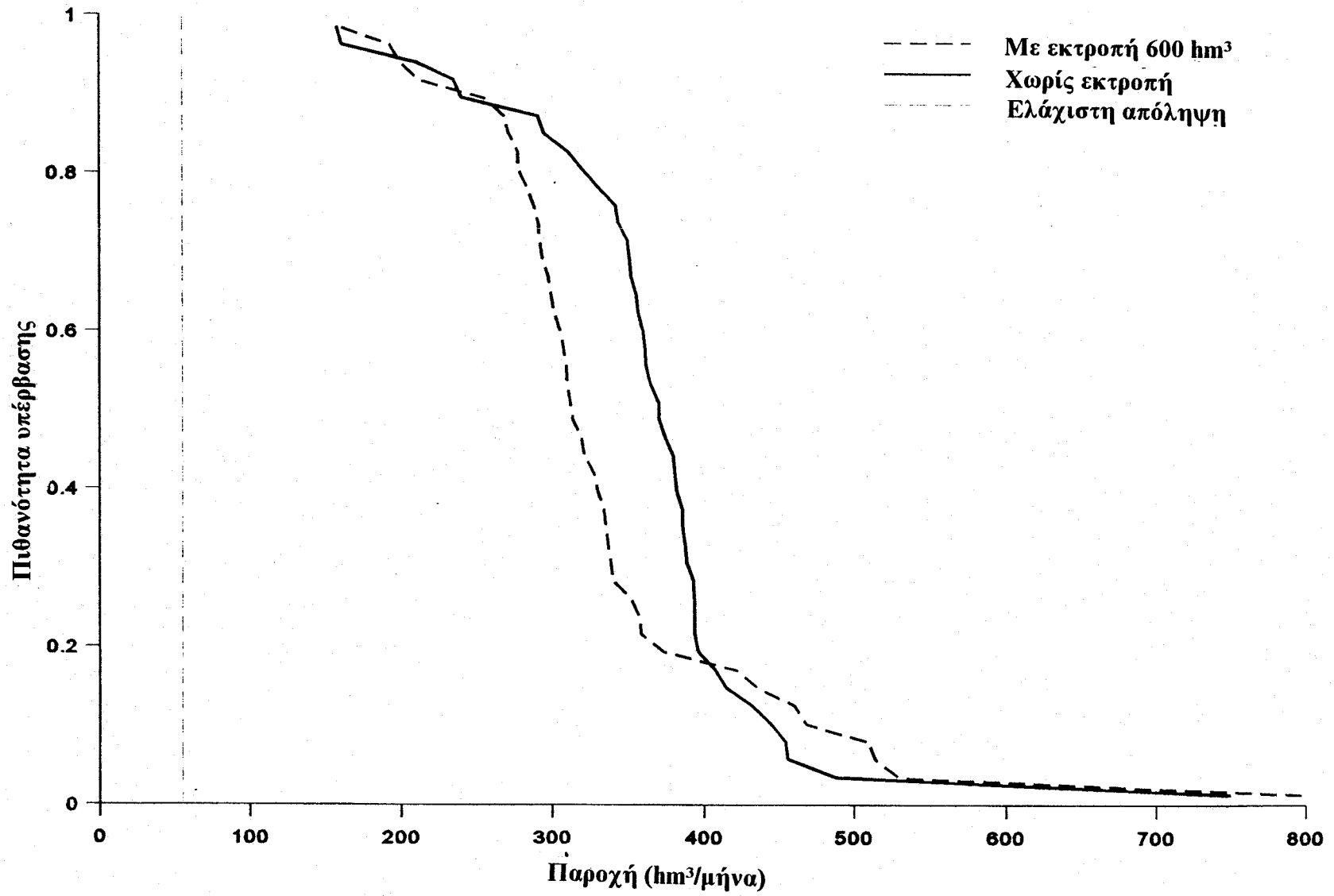
Σχήμα 4.12: Διακύμανση στάθμης για το σενάριο εκτροπής (επίπεδο αξιοπιστίας 95%).



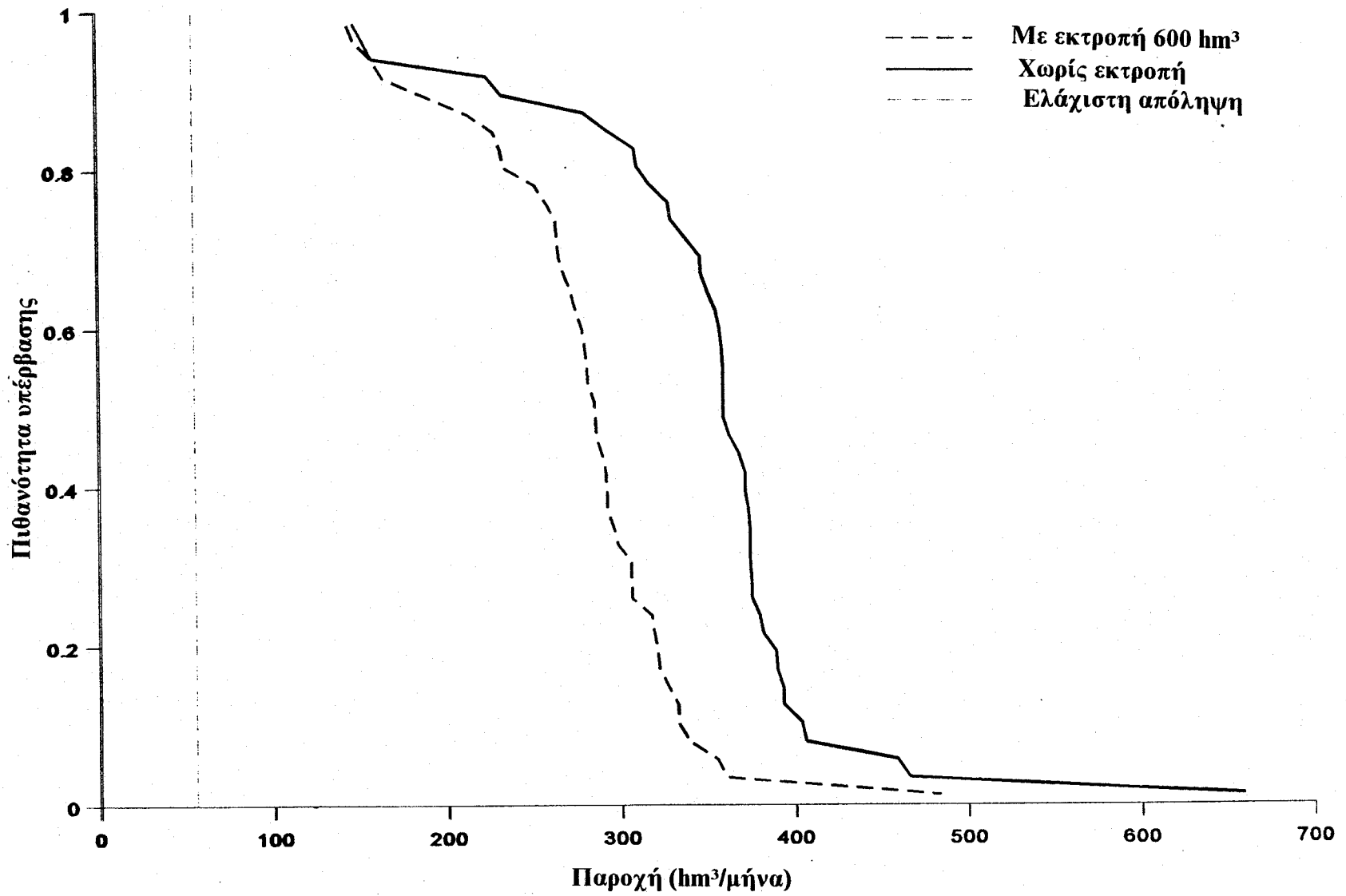
Σχήμα 4.13: Καμπύλη συχνότητας της απώλησης του Ιανουαρίου.



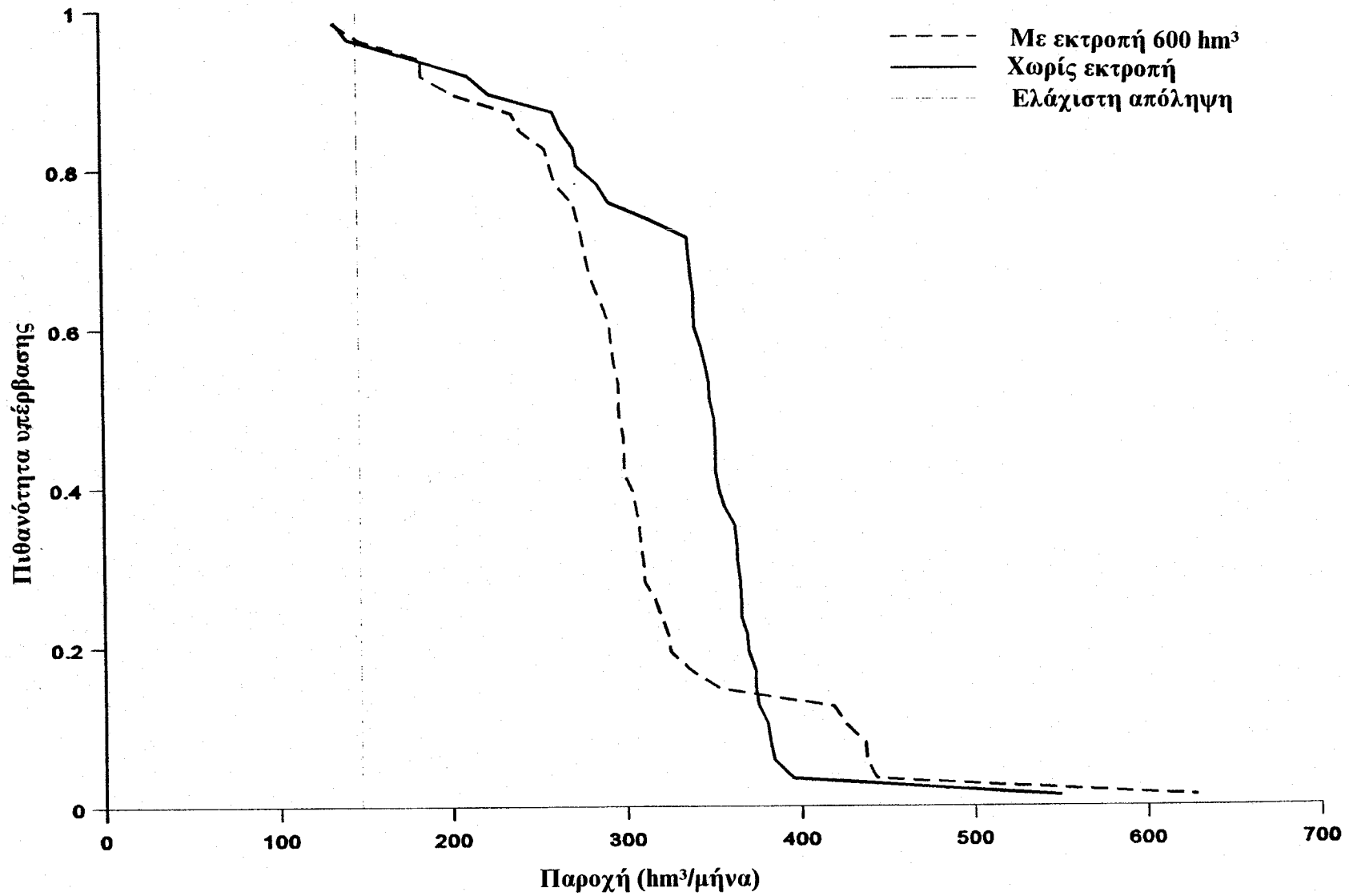
Σχήμα 4.14: Καμπύλη συχνότητας της απόληψης του Φεβρουαρίου.



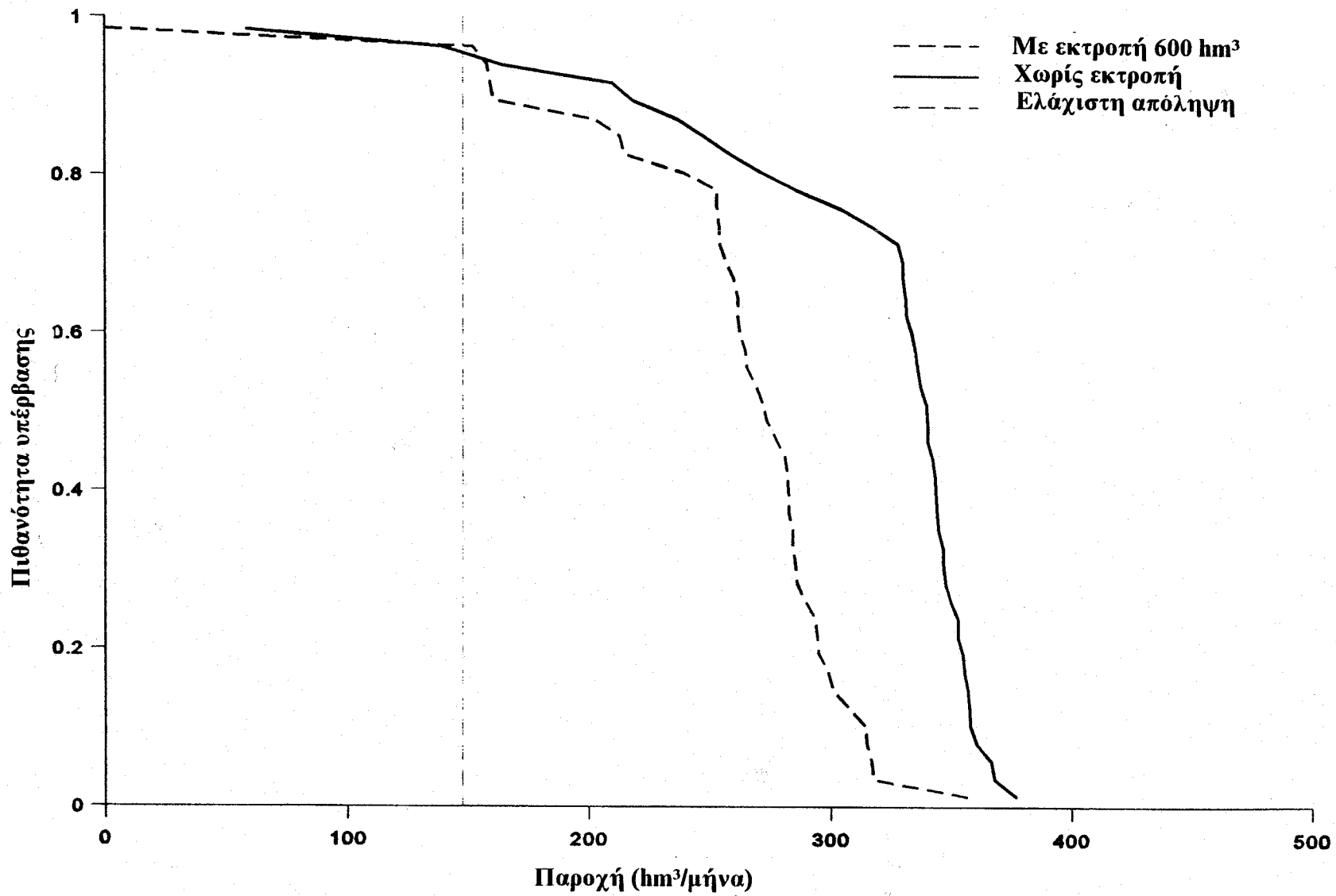
Σχήμα 4.15: Καμπύλη συχνότητας της απόληψης του Μαρτίου.



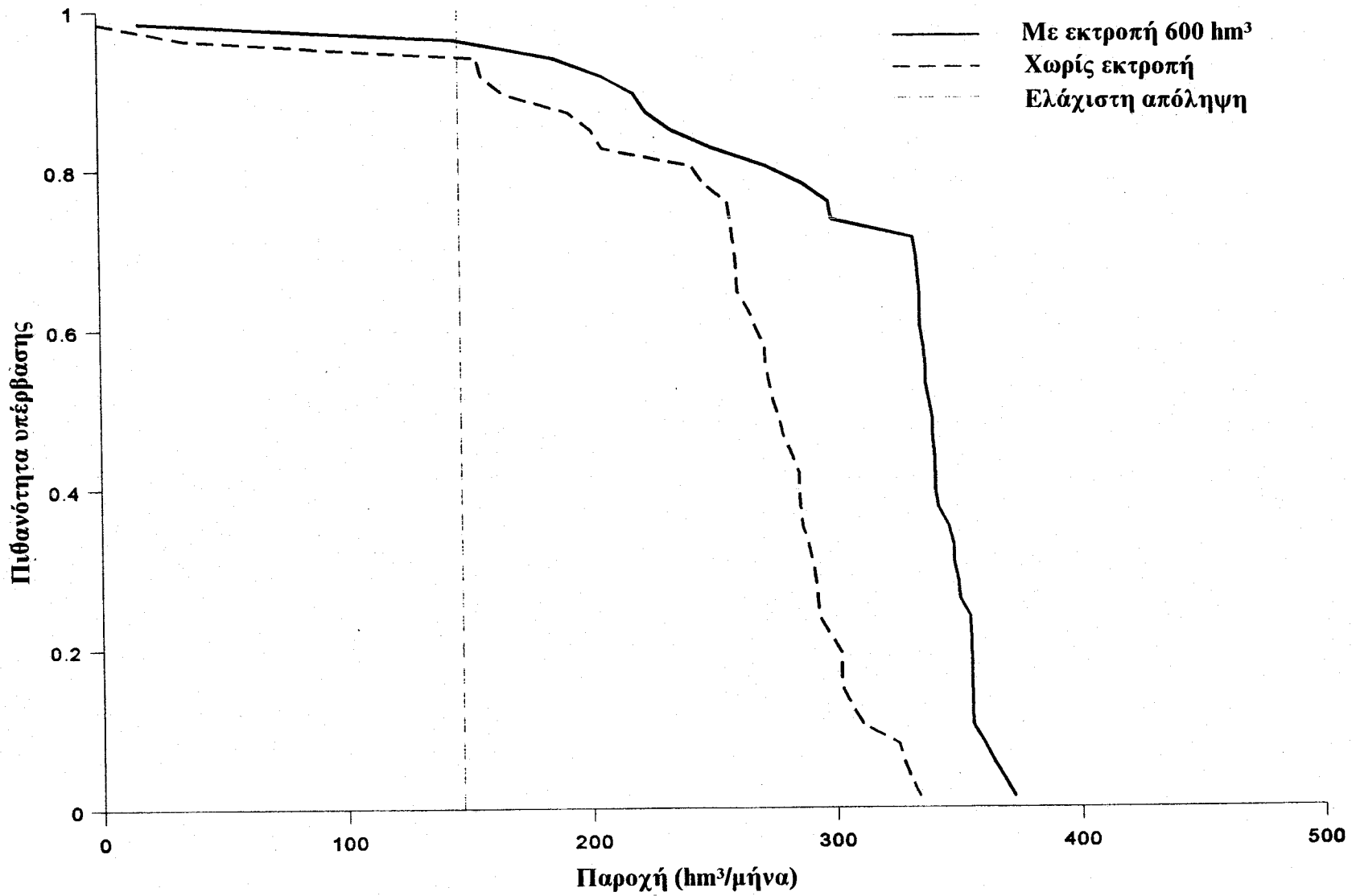
Σχήμα 4.16: Καμπύλη συχνότητας της απόληψης του Απριλίου.



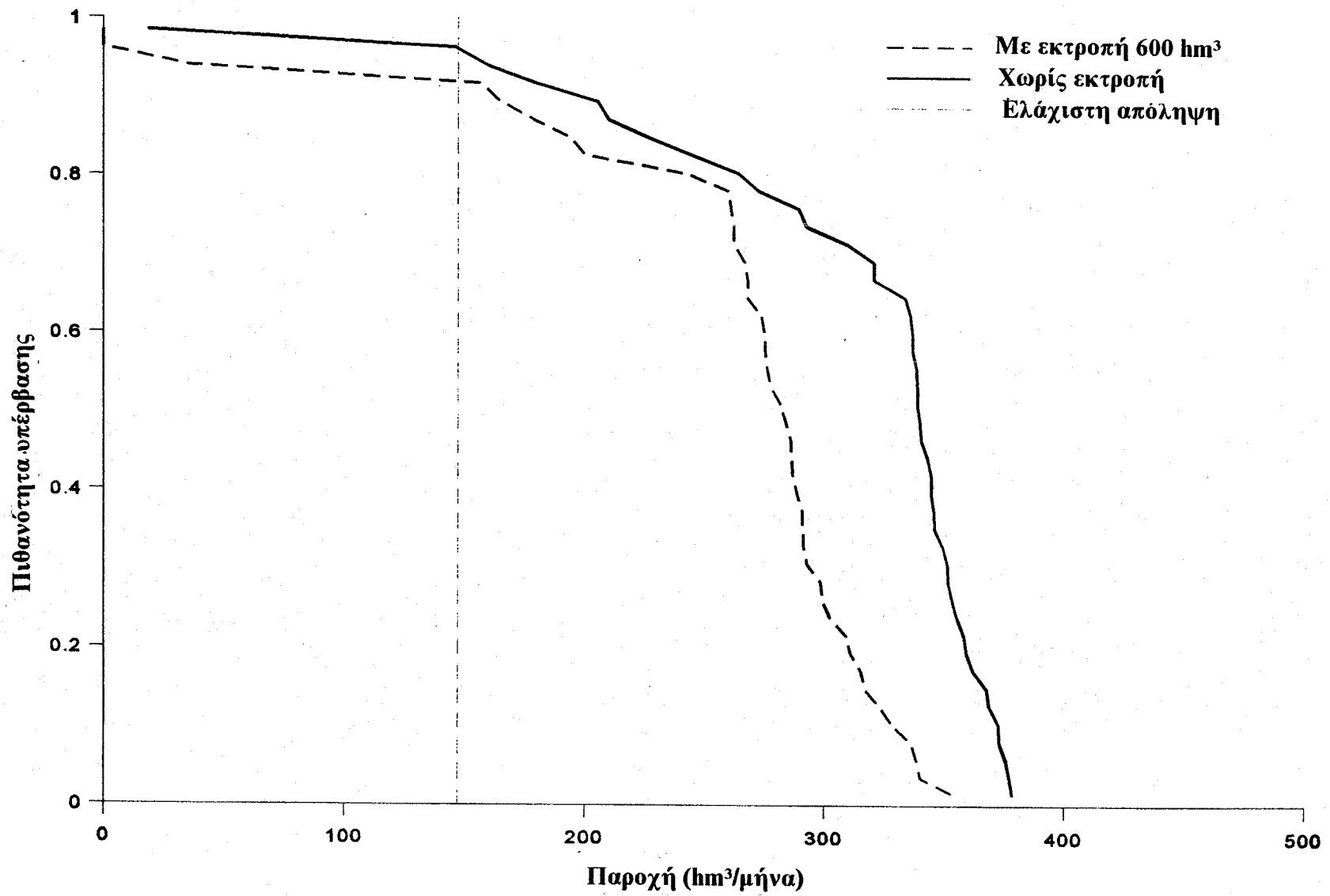
Σχήμα 4.17: Καμπύλη συχνότητας της απώλησης του Μαΐου.



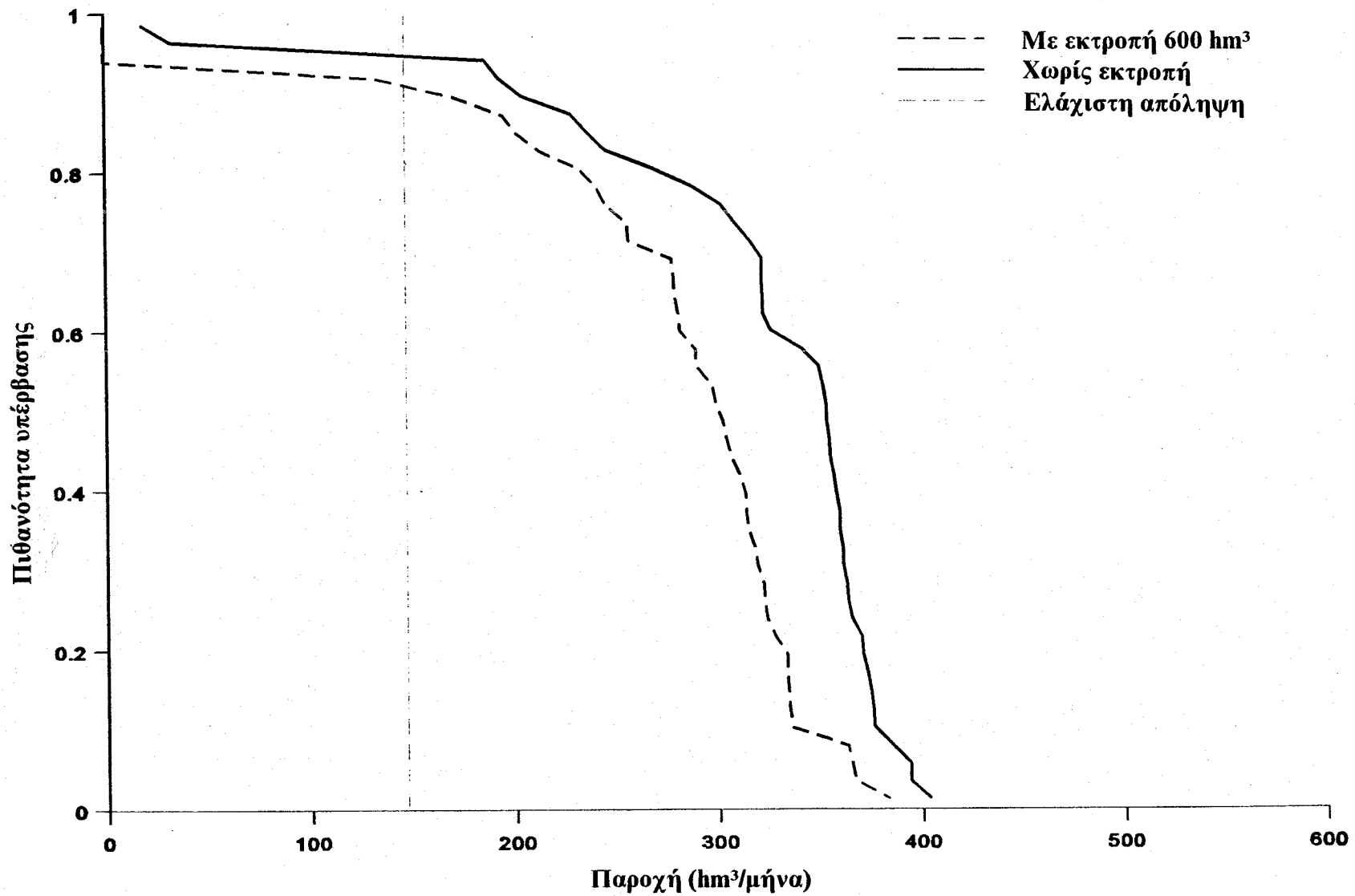
Σχήμα 4.18: Καμπύλη συχνότητας της απόληψης του Ιουνίου.



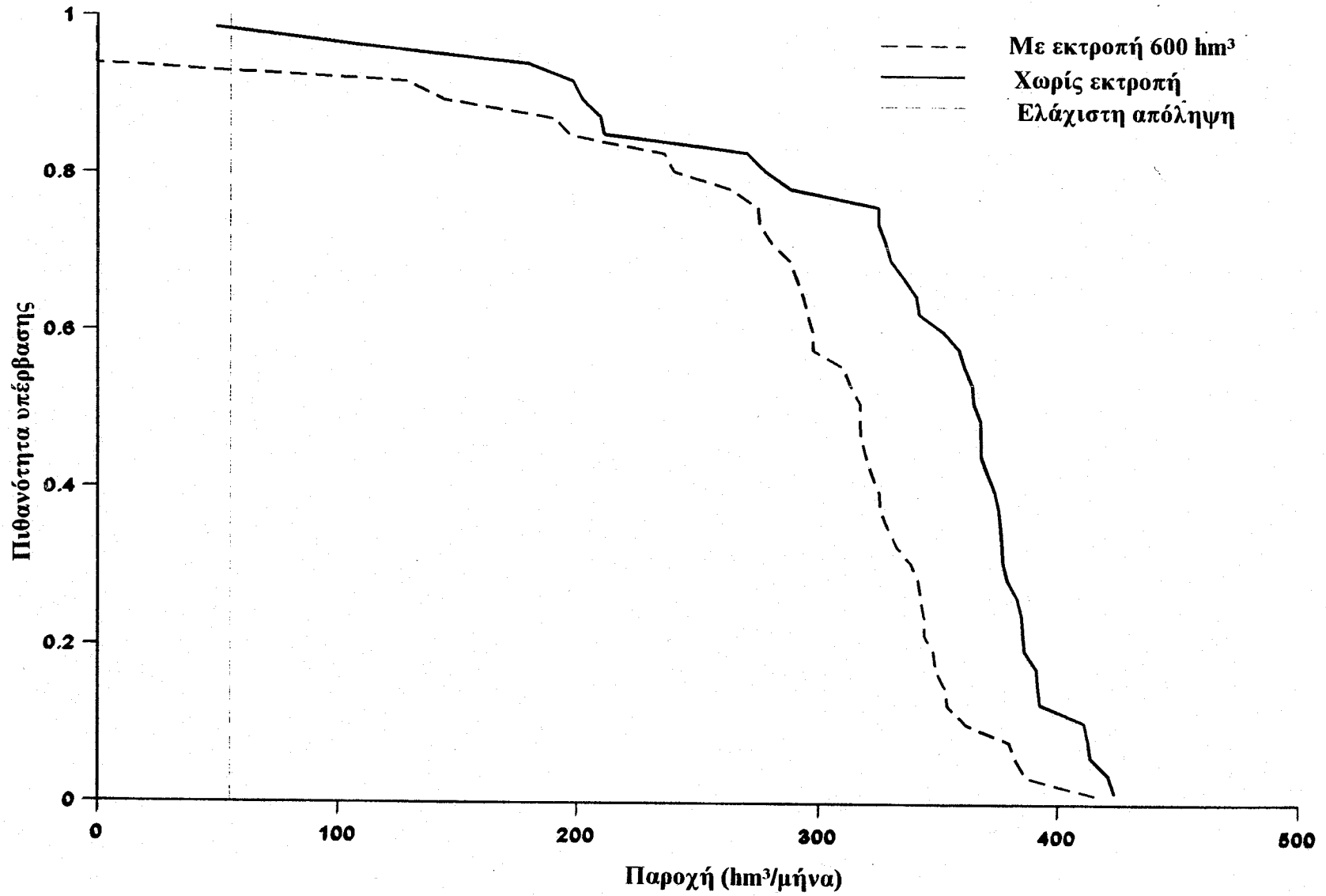
Σχήμα 4.19: Καμπύλη συχνότητας της απώλησης του Ιουλίου.



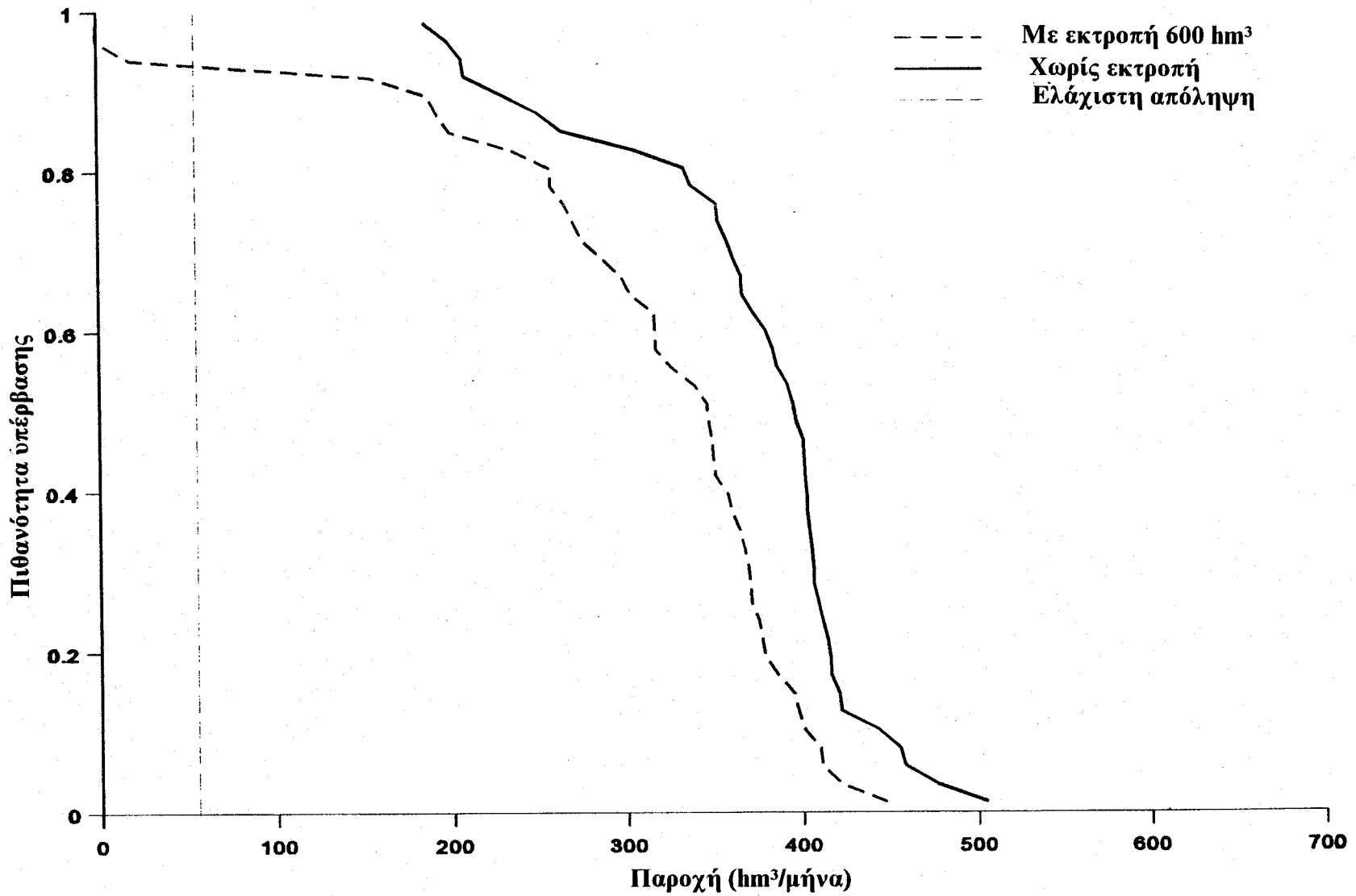
Σχήμα 4.20: Καμπύλη συχνότητας της απόληψης του Αυγούστου.



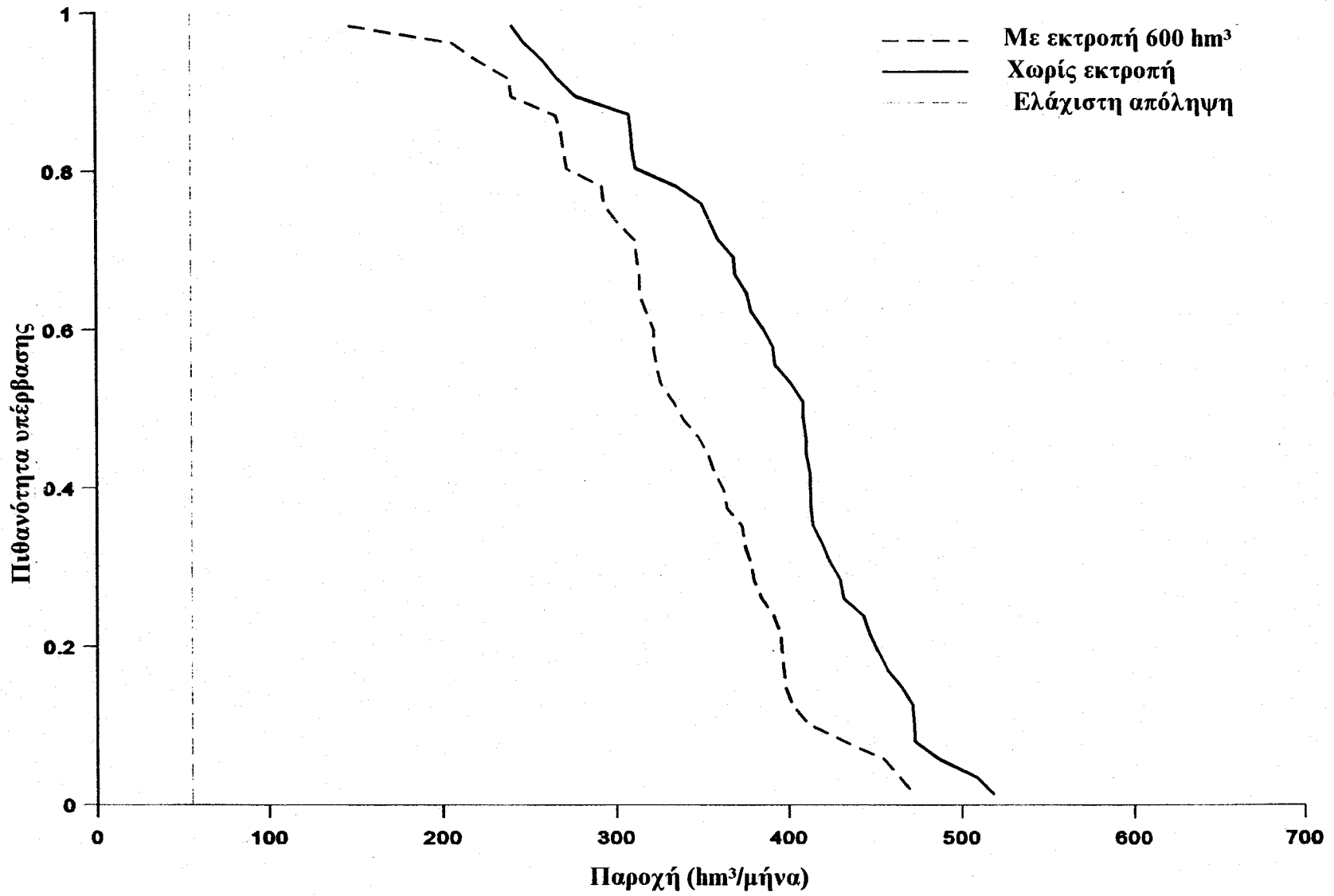
Σχήμα 4.21: Καμπύλη συχνότητας της απόληψης του Σεπτεμβρίου.



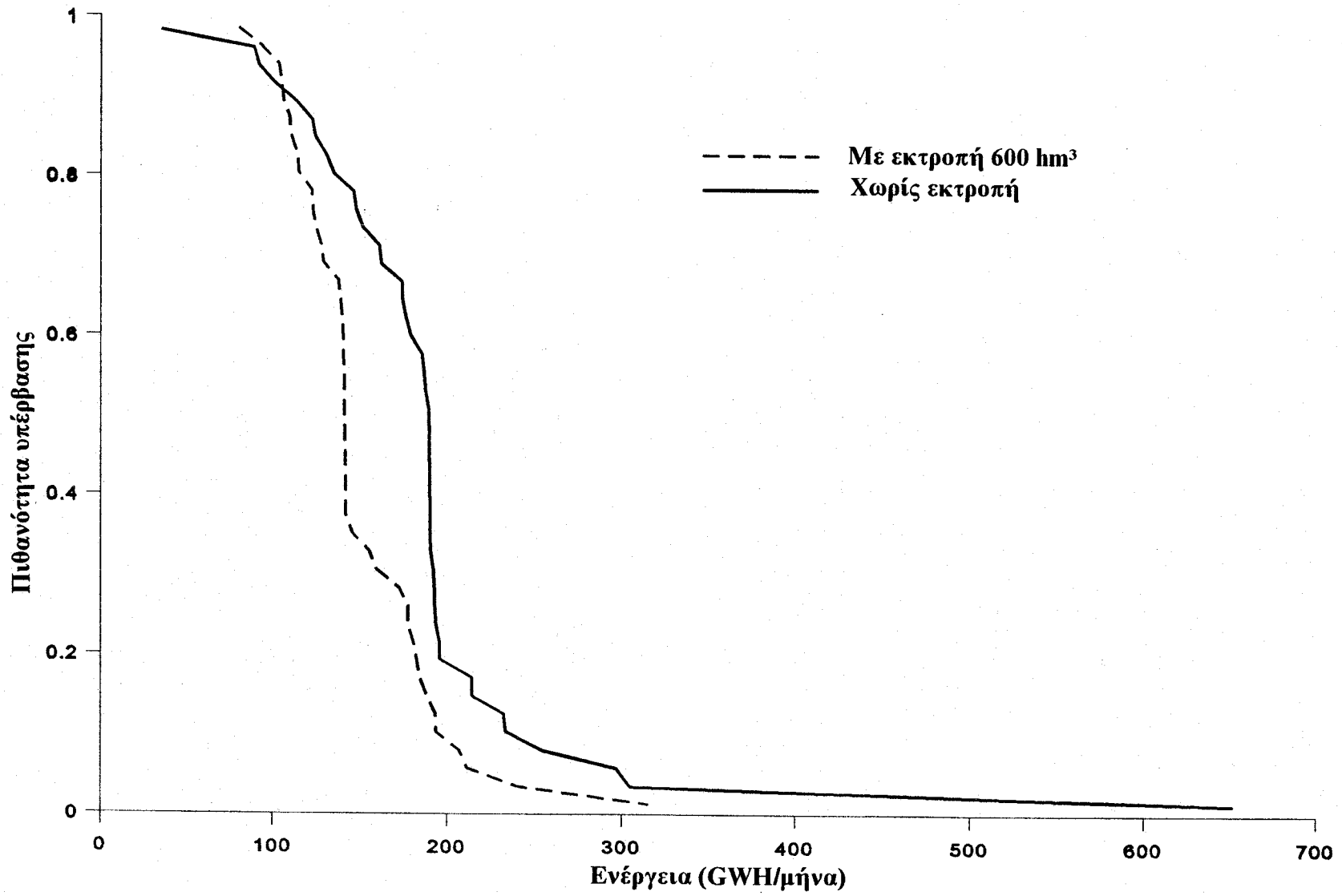
Σχήμα 4.22: Καμπύλη συχνότητας της απόληψης του Οκτωβρίου.



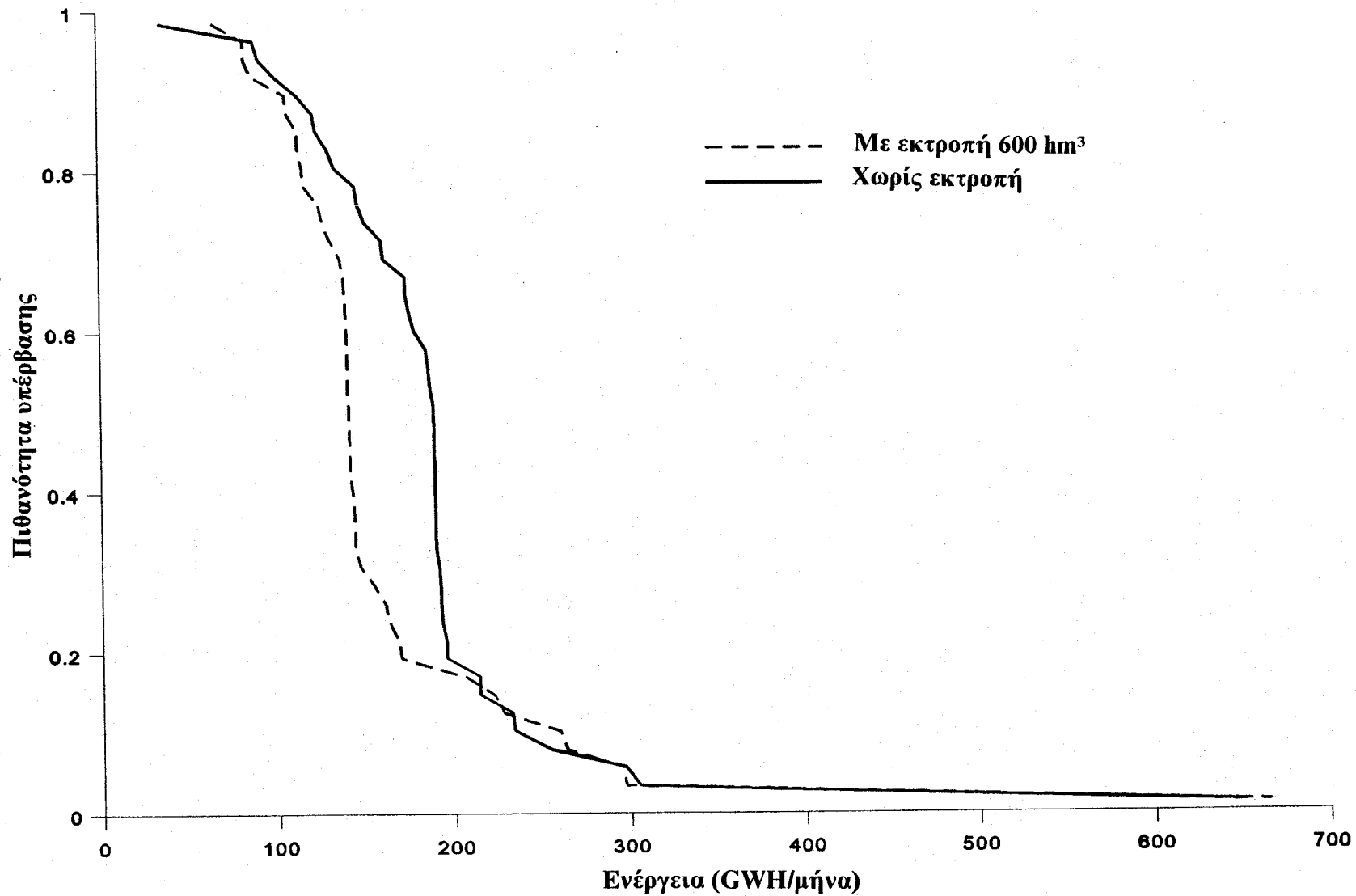
Σχήμα 4.23: Καμπύλη συχνότητας της απόληψης του Νοεμβρίου.



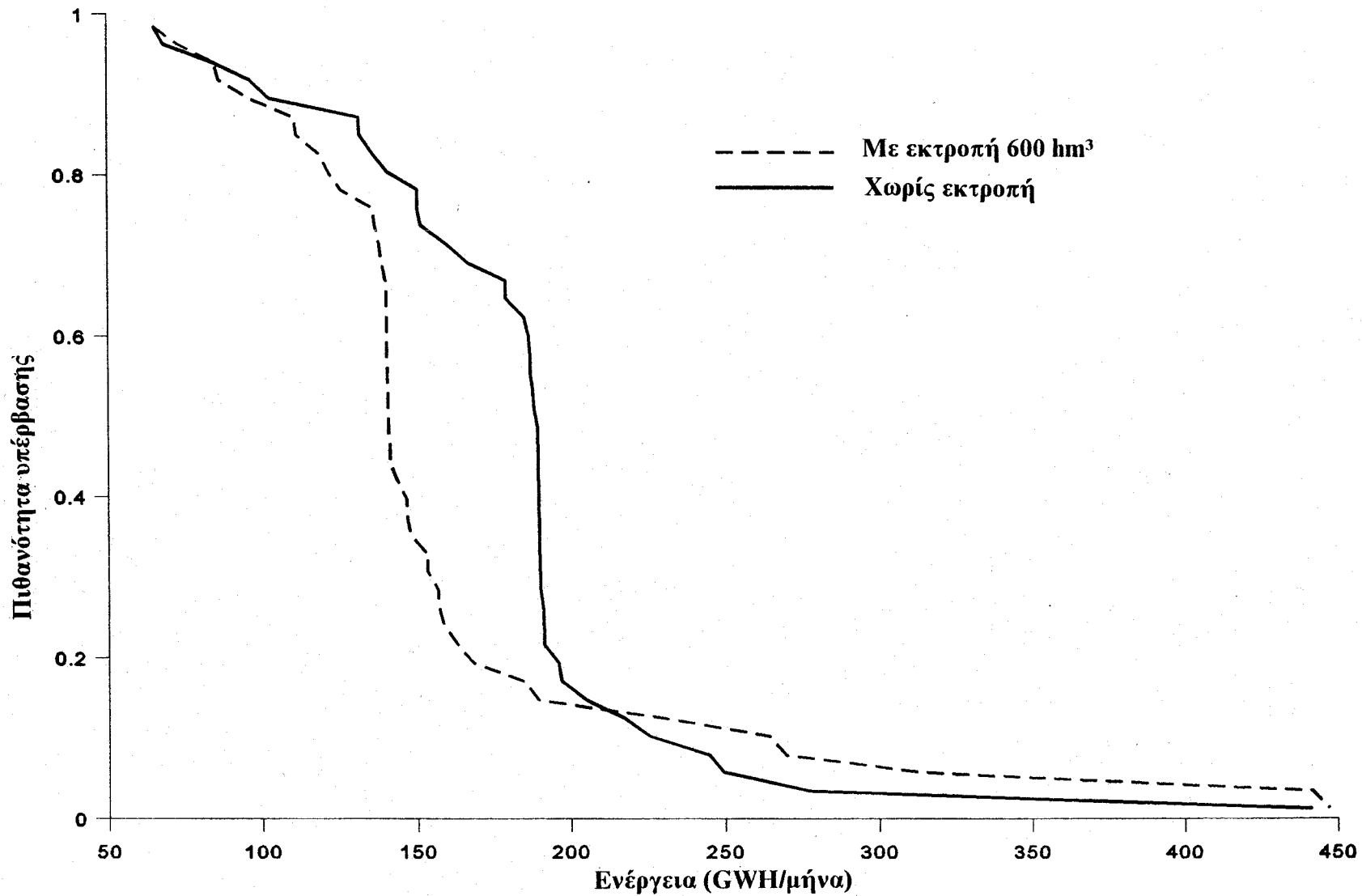
Σχήμα 4.24: Καμπύλη συχνότητας της απόληψης του Δεκεμβρίου.



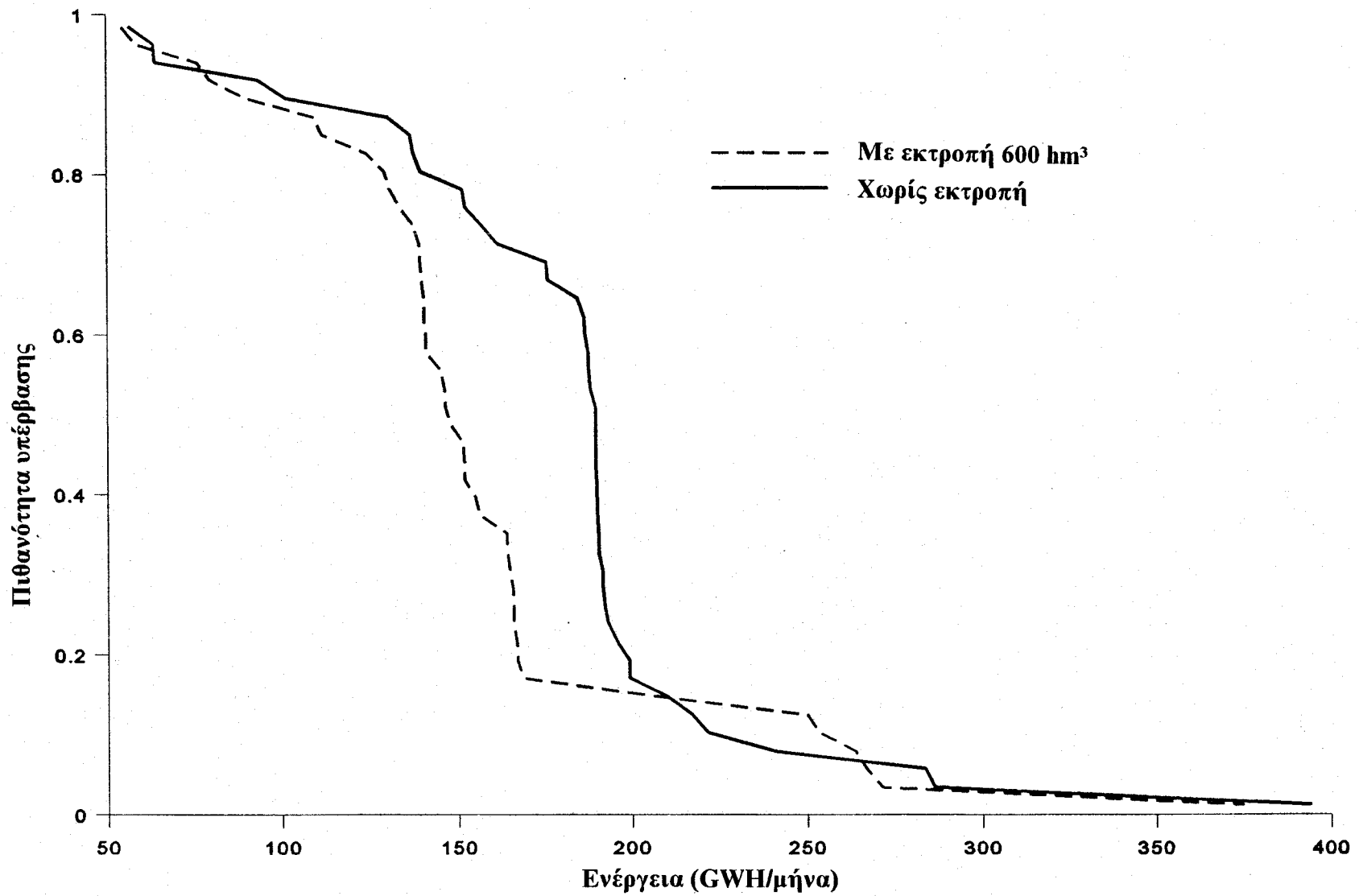
Σχήμα 4.25: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Ιανουαρίου.



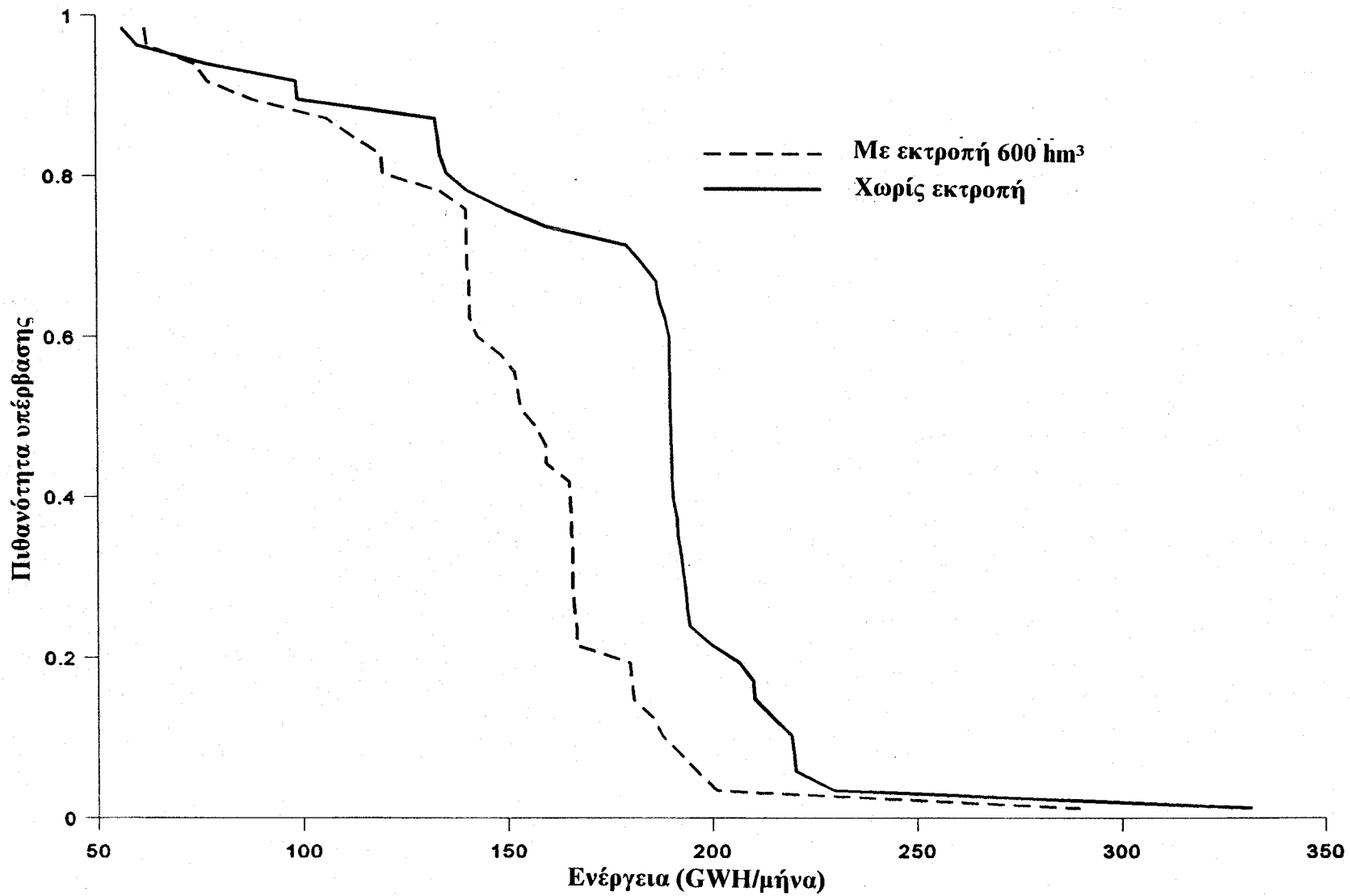
Σχήμα 4.26: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Φεβρουαρίου.



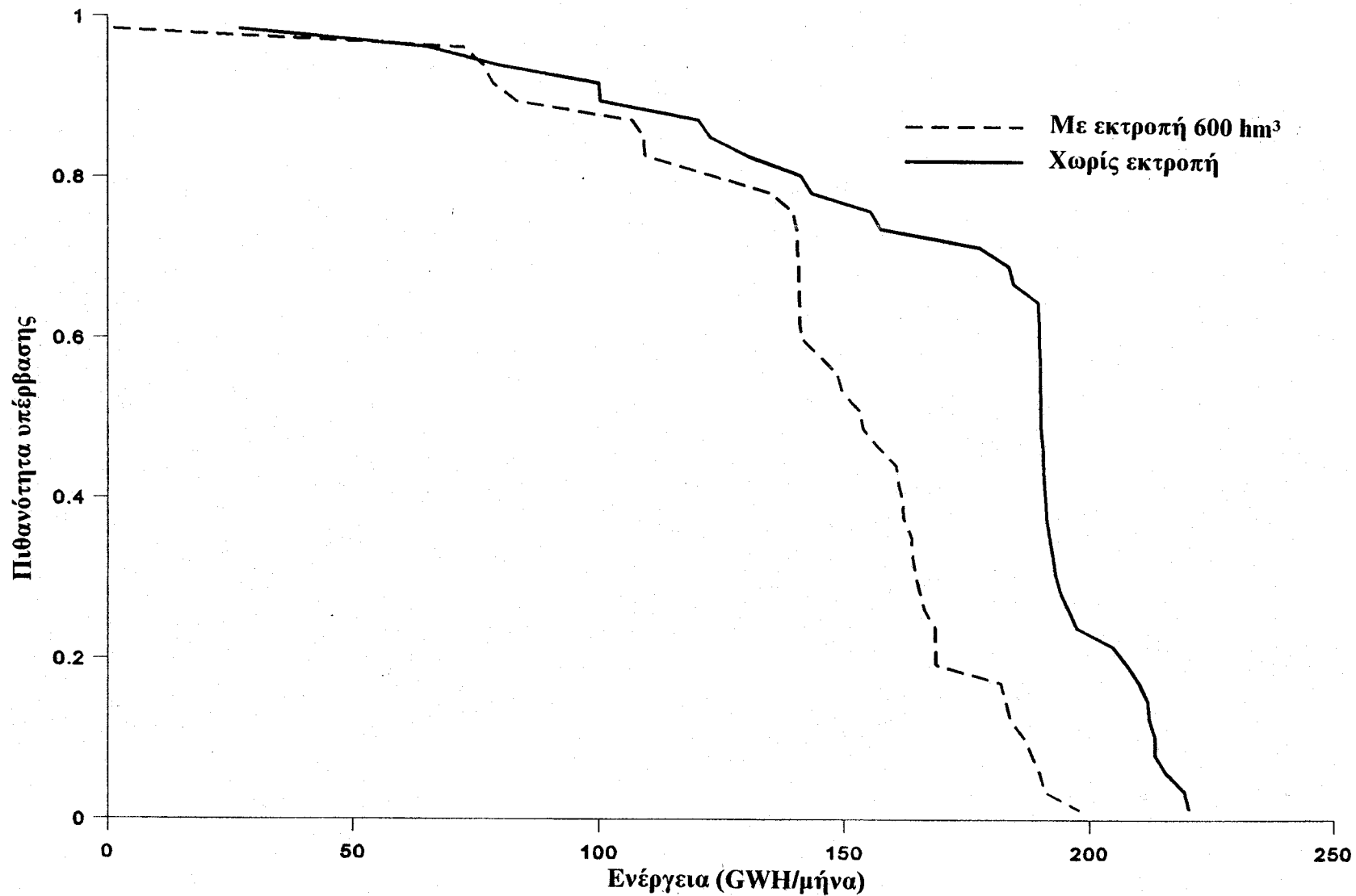
Σχήμα 4.27: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Μαρτίου.



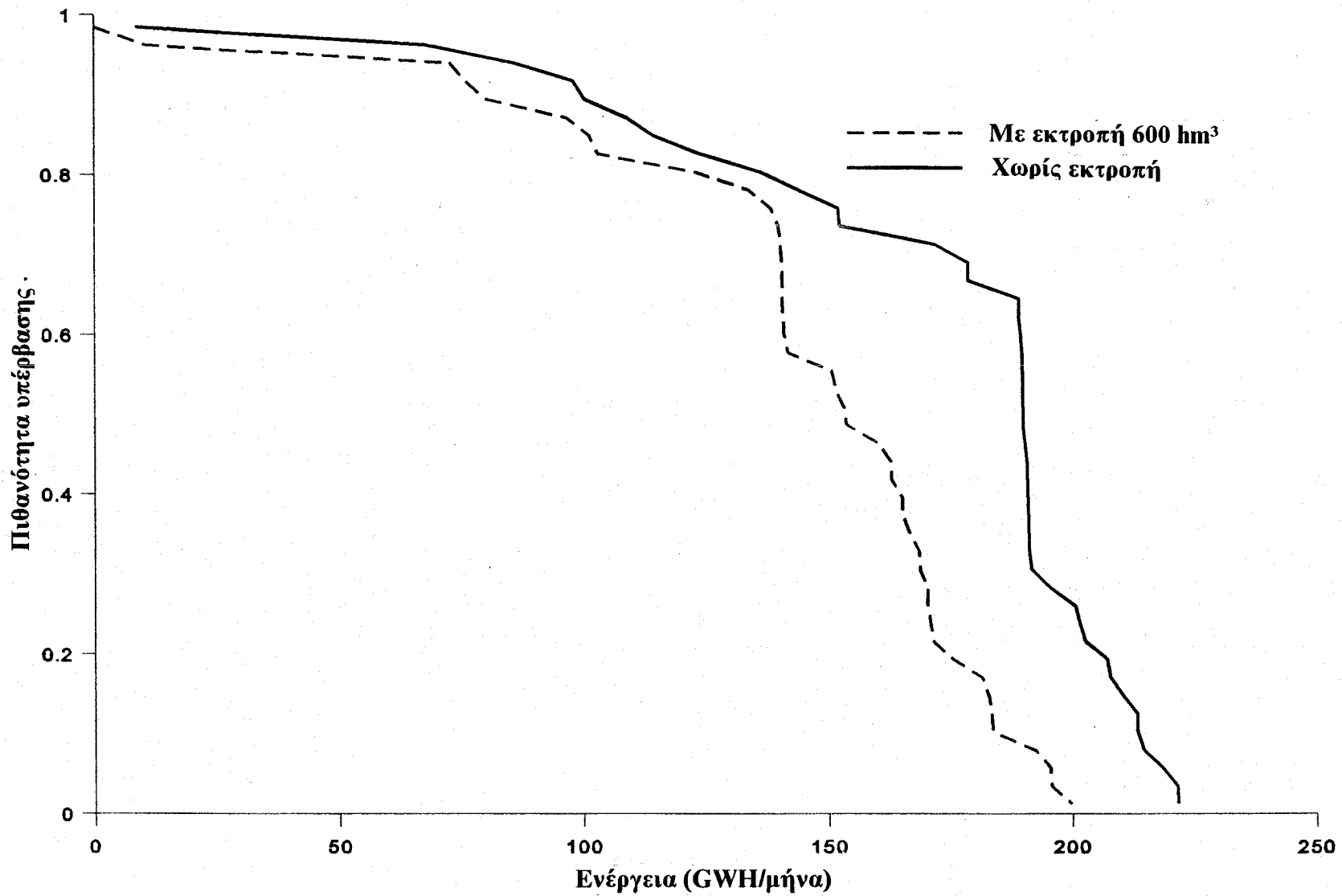
Σχήμα 4.28: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Απριλίου.



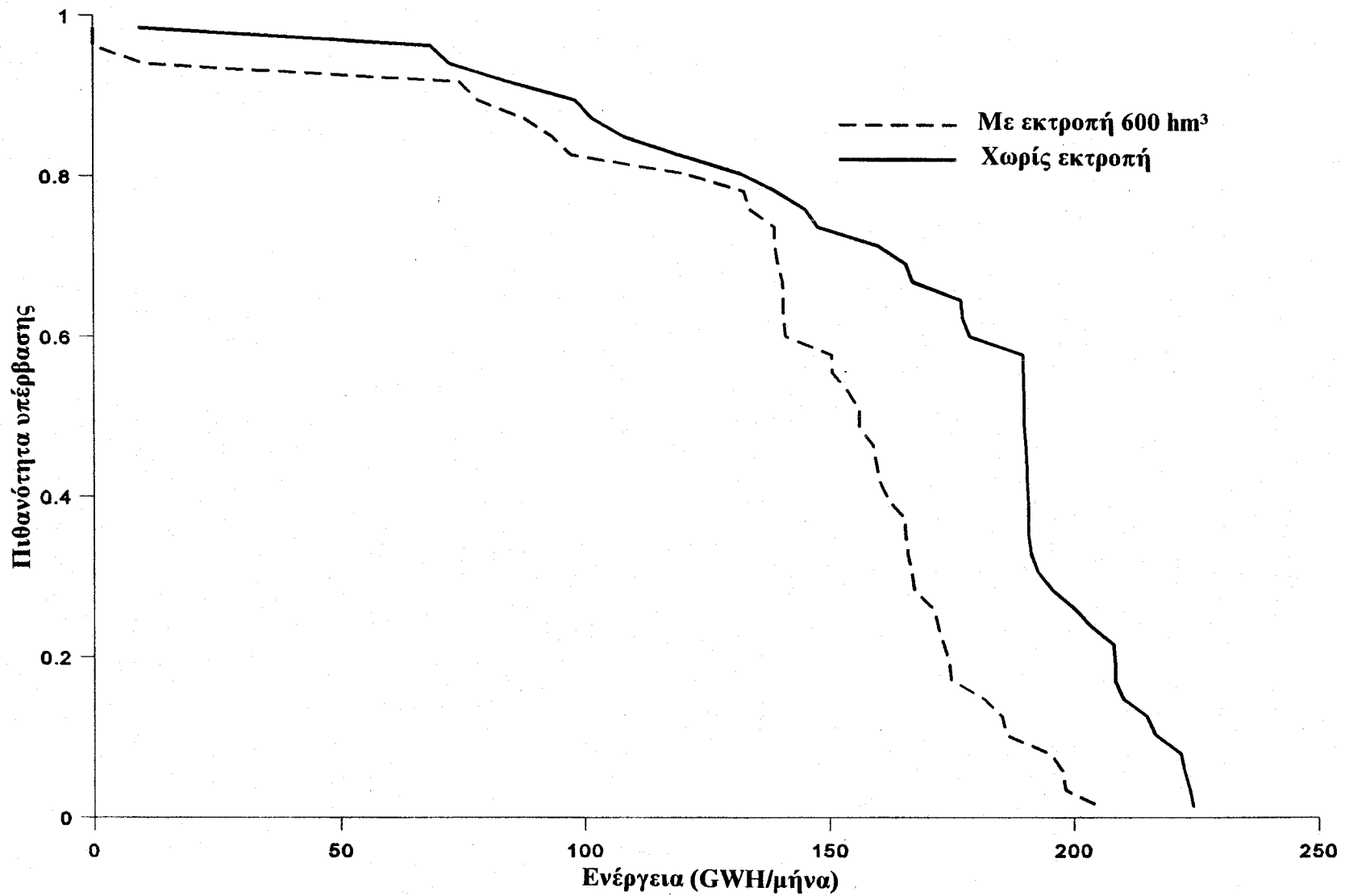
Σχήμα 4.29: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Μαΐου.



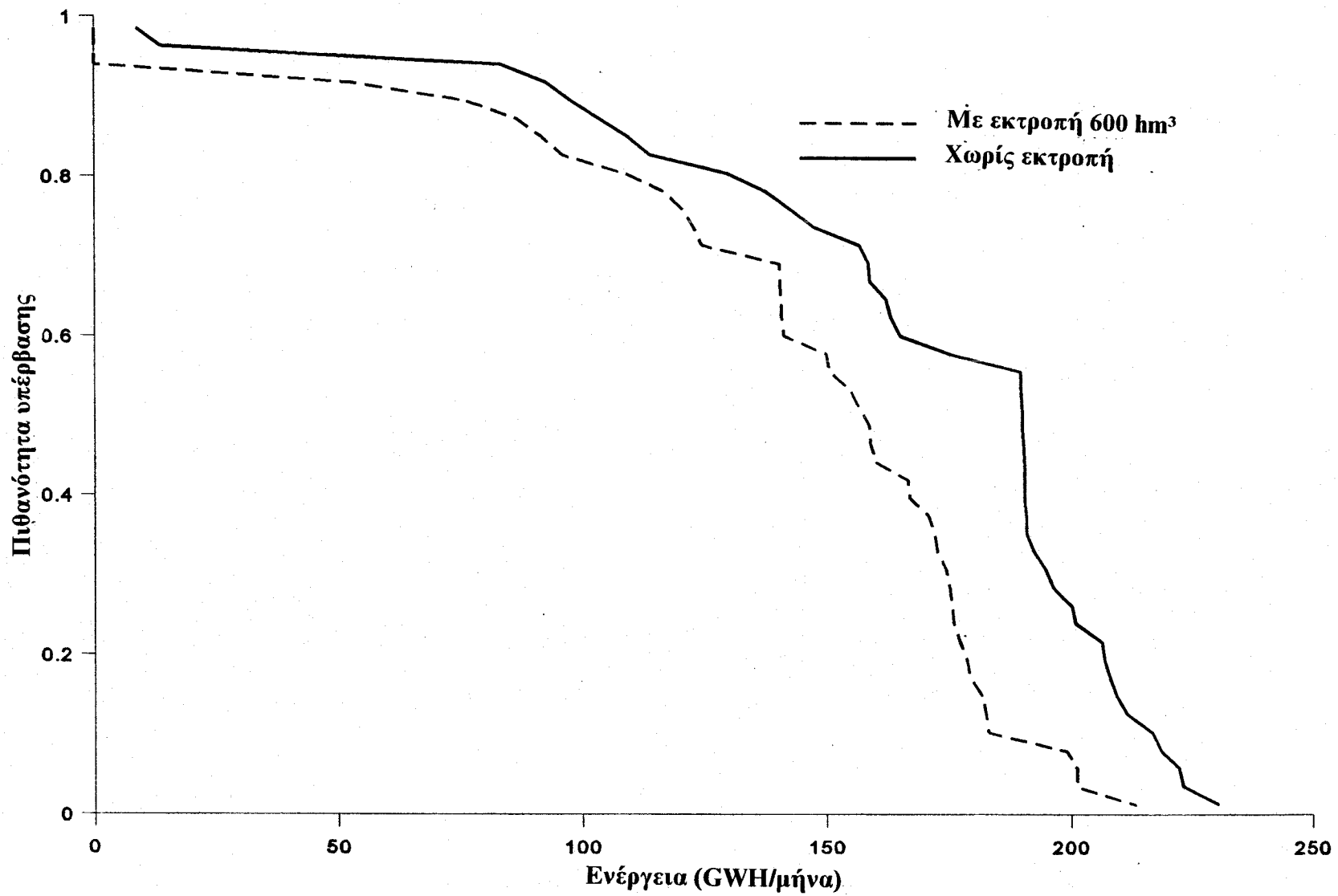
Σχήμα 4.30: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Ιουνίου.



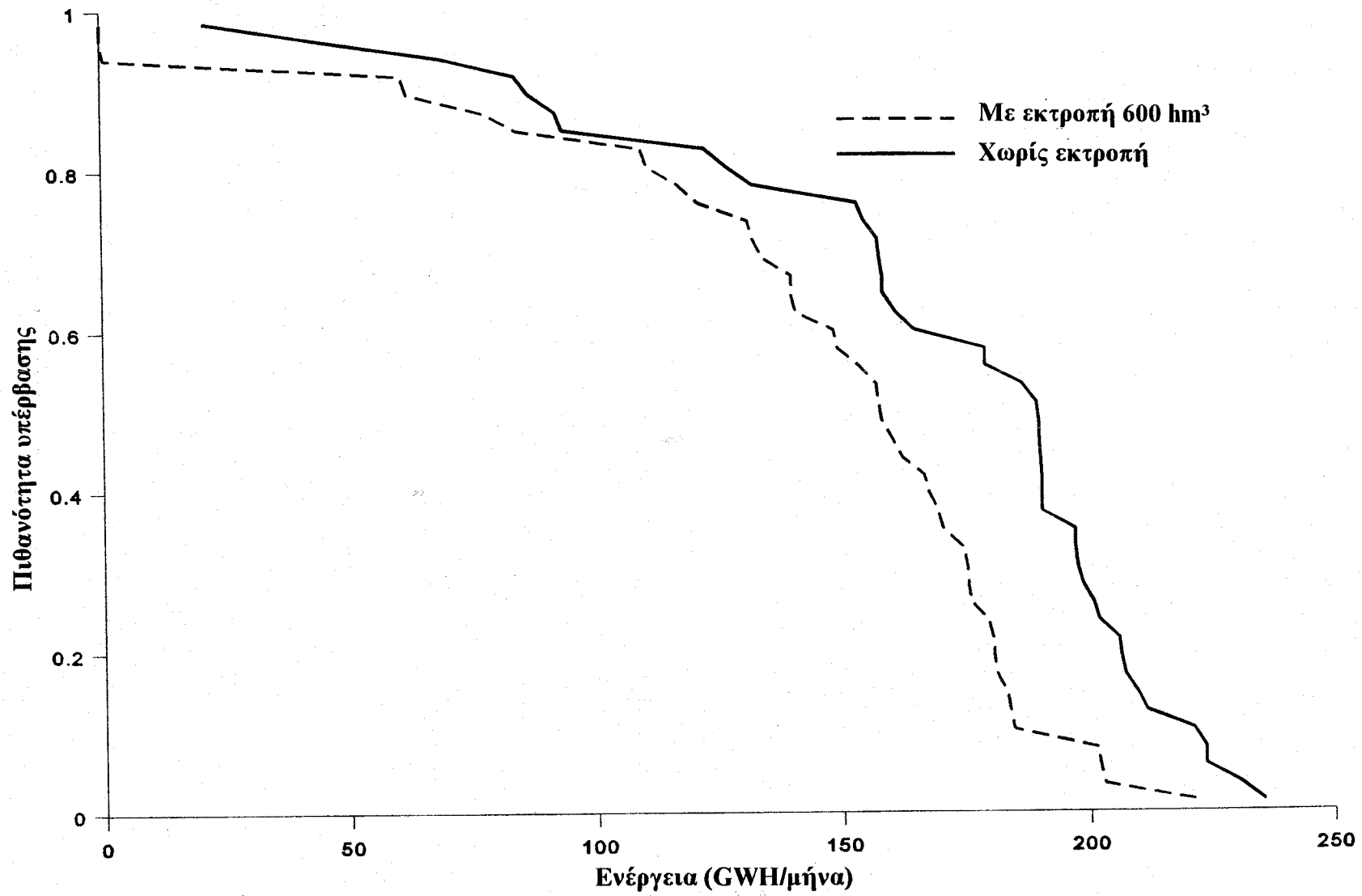
Σχήμα 4.31: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Ιουλίου.



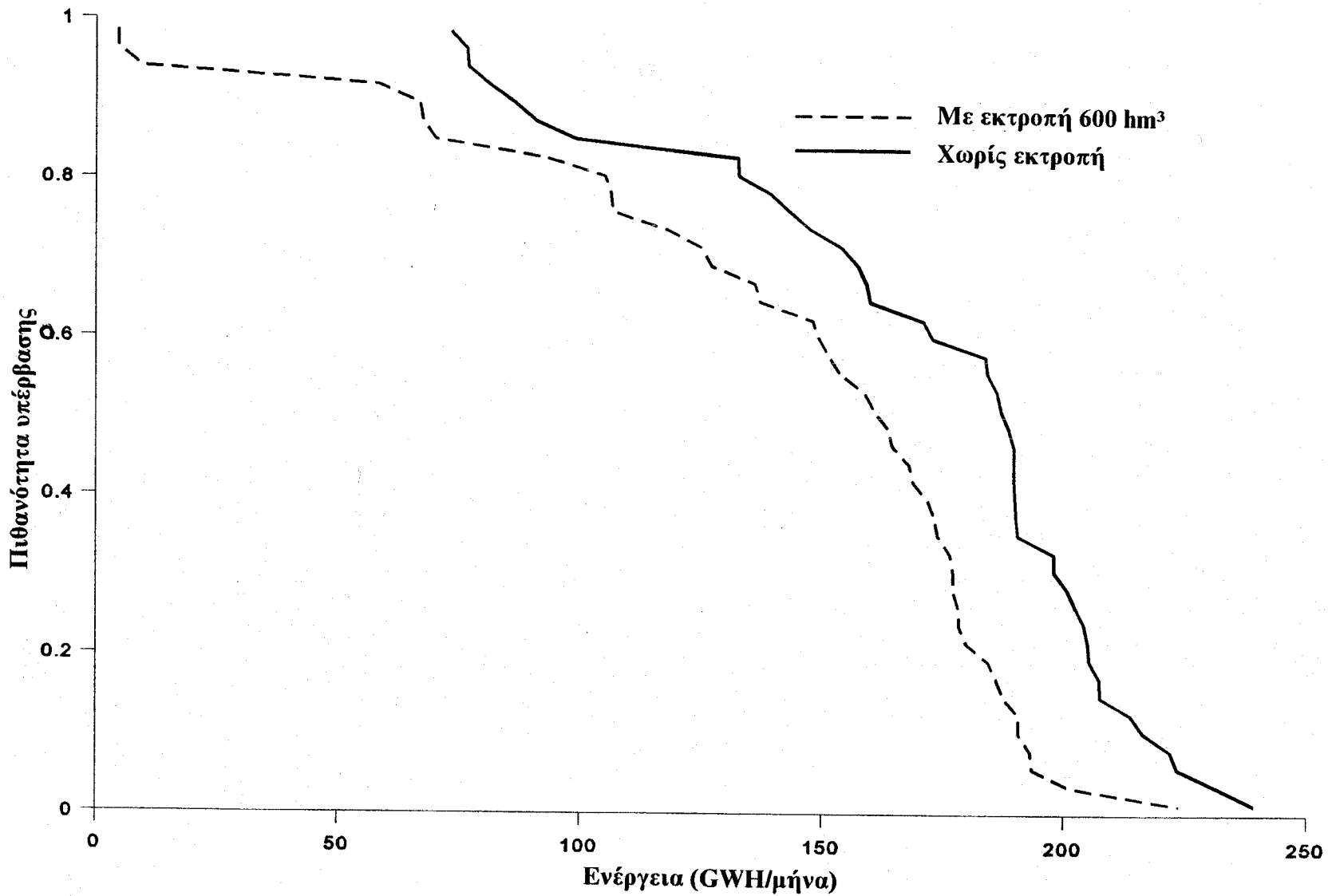
Σχήμα 4.32: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Αυγούστου.



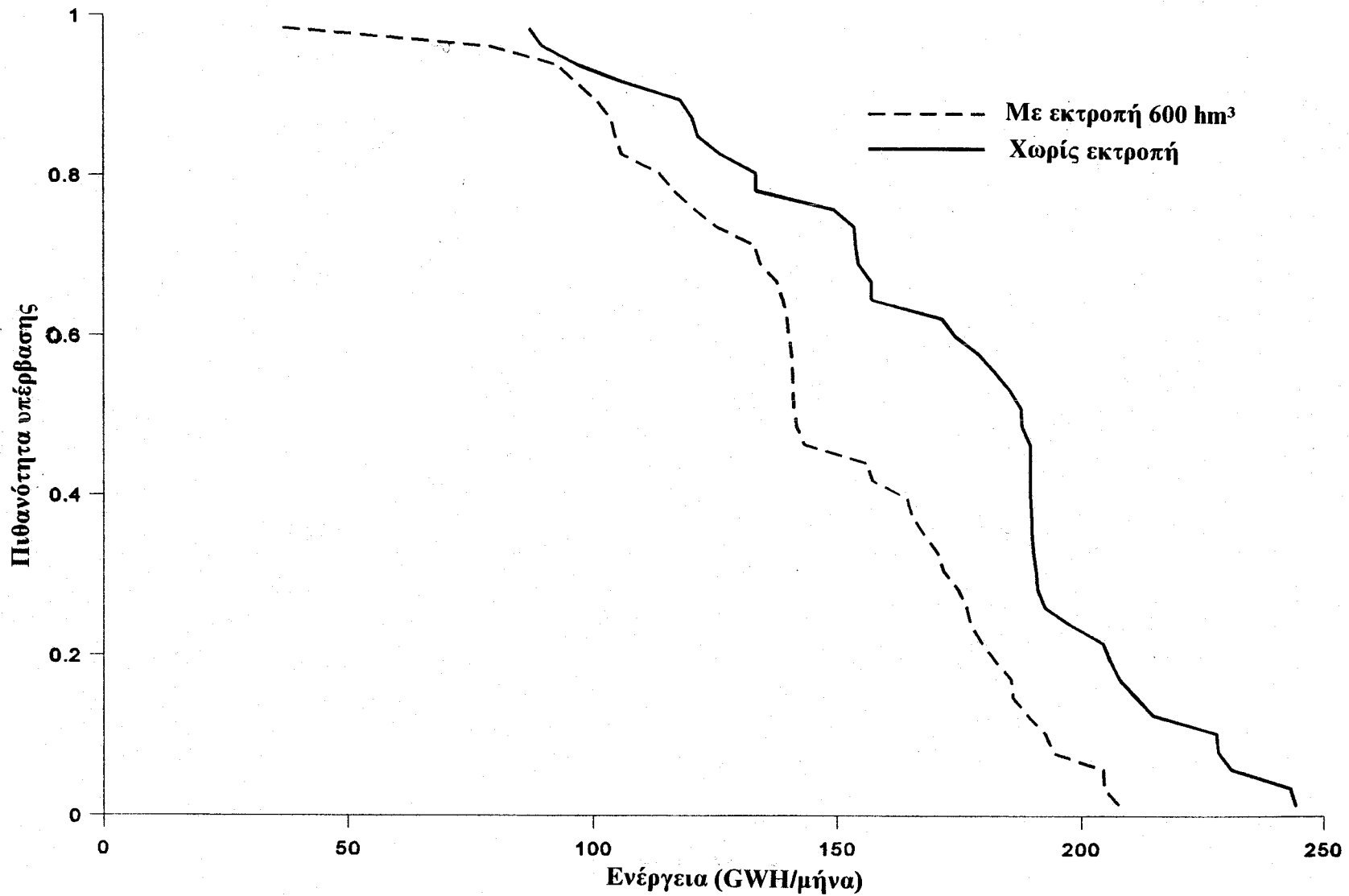
Σχήμα 4.33: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Σεπτεμβρίου.



Σχήμα 4.34: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Οκτωβρίου.



Σχήμα 4.35: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Νοεμβρίου.



Σχήμα 4.36: Καμπύλη συχνότητας της παραγωγής ενέργειας του Δεκεμβρίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι τα συμπεράσματα που ακολουθούν, ισχύουν με την προϋπόθεση ότι το σύστημα λειτουργεί με το μοντέλο ελέγχου ELQG. Τα αποτελέσματα αναμένονται πιο δυσμενή όταν το σύστημα λειτουργεί με πρακτικούς κανόνες.

Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι υπό τις παρούσες συνθήκες ζήτησης κατάντη και με τις παρούσες παραμέτρους του μοντέλου, η προτεινόμενη εκτροπή δε θα επηρεάσει σημαντικά την ικανότητα του συστήματος του Αχελώου να καλύψει τις παρούσες υδροδοτικές του ανάγκες. Σχετικά με την παραγωγή ενέργειας, οι συνέπειες είναι πιο σοβαρές. Η ετήσια ενεργειακή παραγωγή των ταμιευτήρων Κρεμαστών-Καστρακίου-Στράτου αναμένεται να μειωθεί κατά 15%, ενώ για μερικούς μήνες η παραγωγή κατά πάσα πιθανότητα θα μειωθεί κατά 25%. Σε αυτή τη μελέτη δόθηκε έμφαση στην αξιοπιστία της ικανότητας παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Ένας πιο σημαντικός δείκτης του αντίκτυπου είναι η αξία της ενέργειας. Οι ωφέλειες της υδροηλεκτρικής παραγωγής προκύπτουν από την υδροηλεκτρική ικανότητα καθώς και την ενέργεια. Σε υδροηλεκτρικά συστήματα αιχμής, η ετήσια οικονομική αξία της υδροηλεκτρικής ικανότητας είναι περίπου τέσσερις φορές η αξία της παραχθείσας ενέργειας. Η αξία της ικανότητας αυτής θεωρείται ως το κόστος κατασκευής θερμικών εργοστασίων παραγωγής προς αντικατάσταση αυτής της ικανότητας του υδροηλεκτρικού συστήματος. Η αξία της ενέργειας είναι το κόστος καυσίμων για να αντικαταστήσουν την υδροηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας θερμικά εργοστάσια. Μια μελέτη που θα ποσοτικοποιούσε την καθαρή αύξηση ή μείωση της αξίας της υδροηλεκτρικής ενέργειας θα ήταν πολύ χρήσιμη.

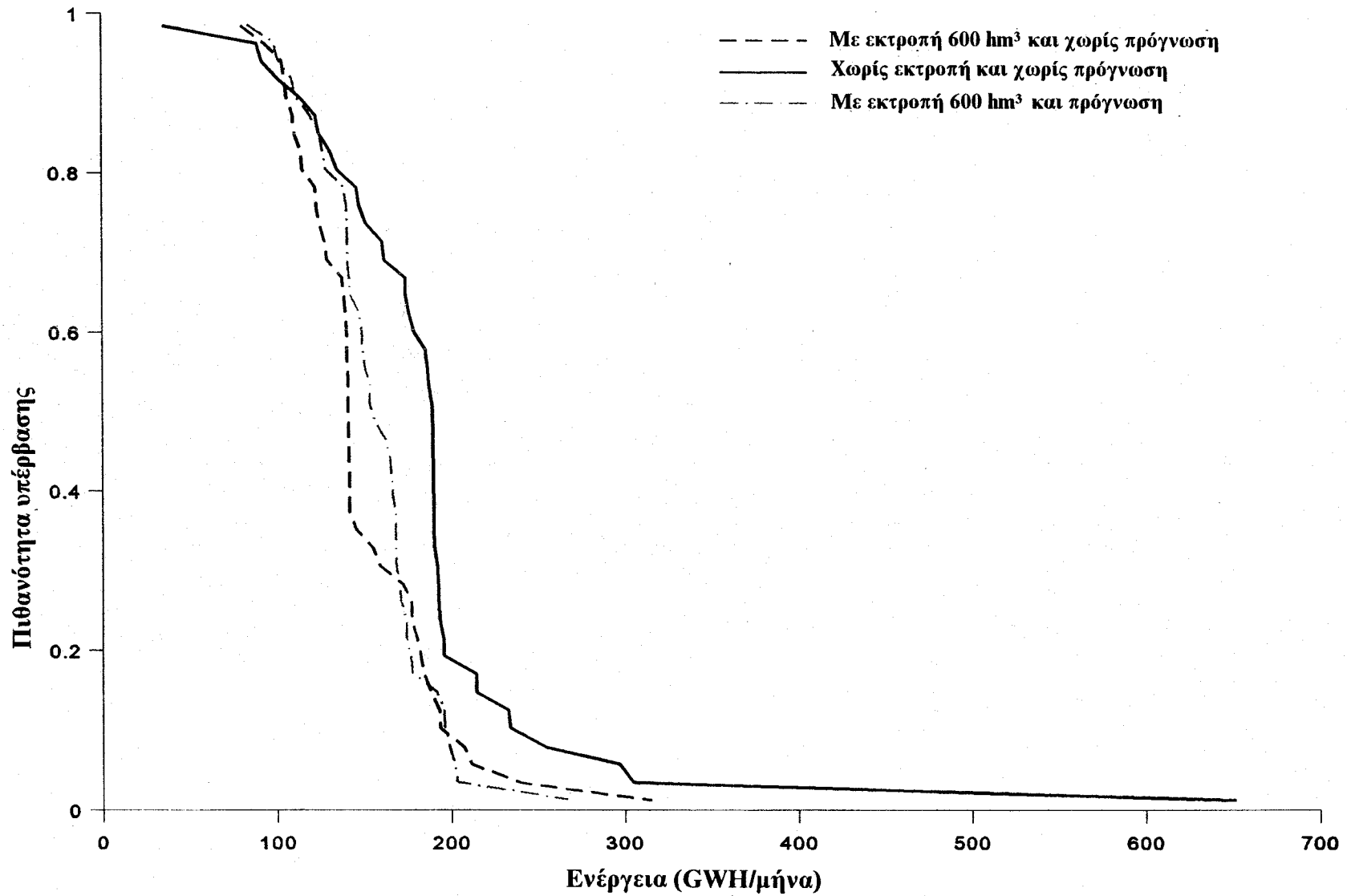
Σχετικά με τις συνέπειες της εκτροπής, θα ήταν ενδιαφέρον να κάνουμε μια παρόμοια μελέτη για την περιοχή της Θεσσαλίας για να υπολογίσουμε τα αναμενόμενα οφέλη. Αυτό θα χρειαζόταν την ανάπτυξη μοντέλων ελέγχου και ελέγχου-προσομοίωσης για όλα τα προβλεπόμενα σενάρια έργων της Θεσσαλίας που συνδέονται με τη μεταφορά νερού. Δεδομένου ότι όλες οι μονάδες παραγωγής ενέργειας στην Ελλάδα αποτελούν ενοποιημένο σύστημα που ανήκει στη ΔΕΗ η οποία και το διαχειρίζεται, τουλάχιστον από άποψη ενέργειας, οι καθαρές συνέπειες της εκτροπής θα μπορούσαν να υπολογιστούν αθροίζοντας τα οφέλη και τα κόστη.

Επιπλέον θα ήταν χρήσιμο να διερευνήσουμε αν η αποθήκευση στη Θεσσαλία θα μπορούσε να υποστηρίξει μια εποχιακή ανακατανομή των ποσοτήτων εκτροπής. Ειδικότερα, αν ήταν δυνατό να εκτραπεί νερό νωρίτερα στη διάρκεια του χρόνου και να αποθηκευτεί σε ορισμένους ταμιευτήρες στη Θεσσαλία για ένα, δύο μήνες, θα μετριάζονταν σημαντικά οι συνέπειες της εκτροπής. Αυτό το σενάριο θα συγχρόνιζε καλύτερα την εκτροπή με τις υψηλές ροές του Αχελώου (Κεφάλαιο 2) και θα αύξανε την αξιοπιστία και αντοχή του συστήματος.

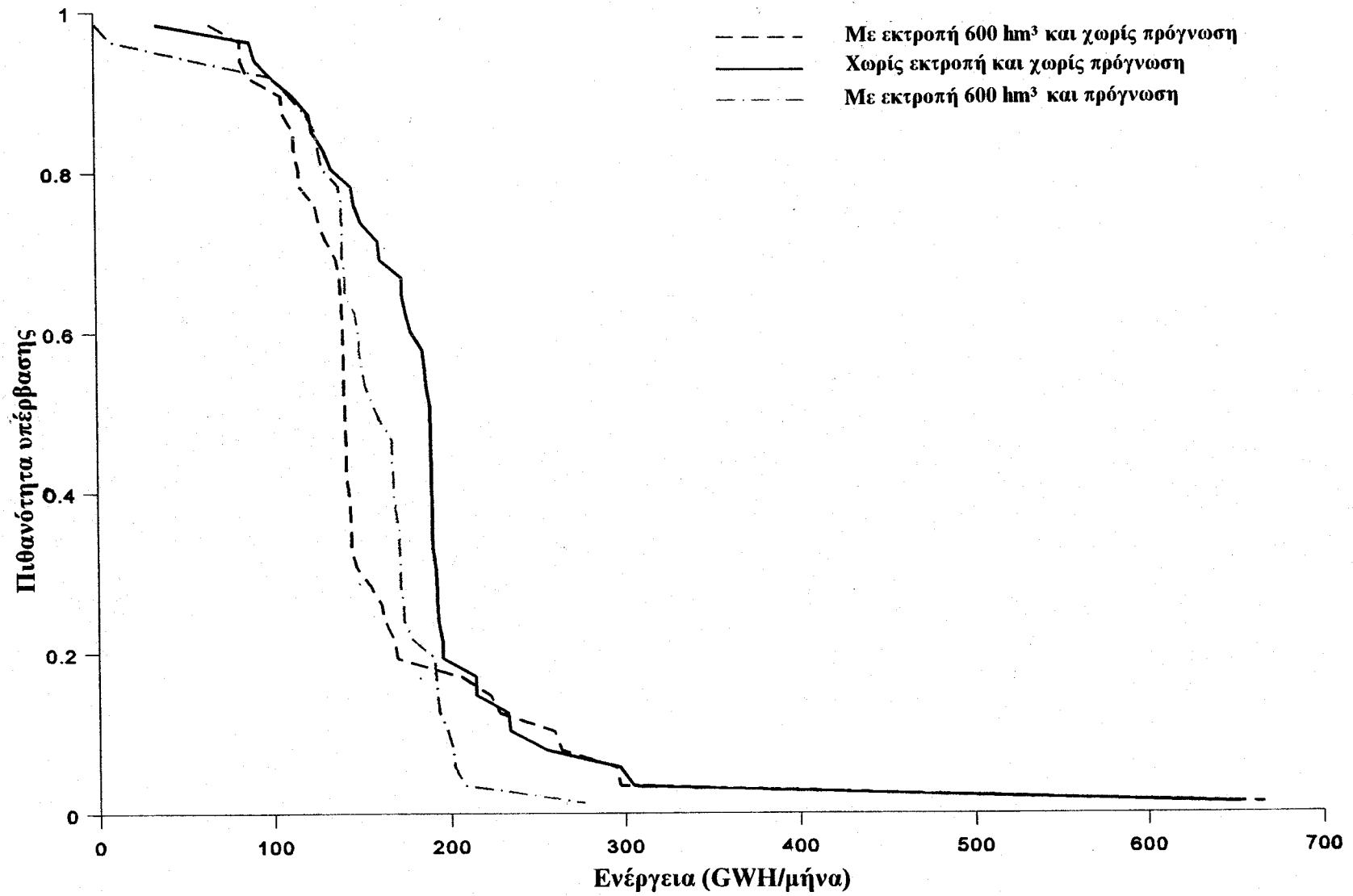
Αν και το μοντέλο ελέγχου αυτής της μελέτης αναπτύχθηκε ως μια πρώτη προσέγγιση διερεύνησης του συστήματος ταμιευτήρων Αχελώου σε σχέση με τις συνέπειες της προγραμματιζόμενης εκτροπής θα μπορούσε να επεκταθεί σε ένα σύστημα υποστήριξης για καθοδήγηση των λειτουργιών πραγματικού χρόνου του Αχελώου. Για αυτό το σκοπό, πρέπει να συμπεριλάβει μεσοπρόθεσμα και βραχυπρόθεσμα μοντέλα ελέγχου σχεδιασμένα να λειτουργούν σε ημερήσια και ωριαία διαστήματα και να συνοδεύεται με φυσικά μοντέλα πρόγνωσης που θα χρησιμοποιούν επιτόπιες και ίσως απομακρυσμένες (από ραντάρ και δορυφόρο) πληροφορίες. Αυτό το σύστημα αποφάσεων θα έδινε τη δυνατότητα στις αρχές υδάτων και ενέργειας να εξερευνήσουν τις συνέπειες διαφόρων πολιτικών λειτουργίας και να επιλέξουν αυτή που ικανοποιεί καλύτερα τις ανάγκες των χρηστών του συστήματος. Ένα παράδειγμα παρομοίου συστήματος αποφάσεων που αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε από την ερευνητική ομάδα του Georgia Tech για τη λεκάνη του ποταμού Νείλου περιγράφεται από τον *Georgakakos et al., 1995 d,e,f,g,h*.

Σύμφωνα με αυτή την ερευνητική κατεύθυνση, για να εξετάσουμε τα οφέλη καλύτερης πρόβλεψης εισροών, διεξαγάγαμε ένα επιπλέον πείραμα ελέγχου-προσομοίωσης (κάτω από το σενάριο εκτροπής) προϋποθέτοντας ότι το μοντέλο ελέγχου έχει πρόσβαση σε τέλειες προβλέψεις 12 μηνών των αναμενόμενων εισροών. Διευκρινίζεατ βέβαια ότι ένα μοντέλο τέλειας πρόγνωσης με τόσο μεγάλο χρονικό ορίζοντα είναι ανέφικτο και η υπόθεση αυτή γίνεται για διερευνητικούς σκοπούς, προκειμένου να εκτιμηθεί η κατά μέγιστο αναμενόμενη βελτίωση από τη χρήση του μοντέλου πρόγνωσης. Οι μηνιαίες καμπύλες συχνότητας της ενεργειακής παραγωγής γι' αυτή την περίπτωση είναι τυπωμένες μαζί με τις καμπύλες που έχουν ήδη συζητηθεί στα Σχήματα 5.1 ως 5.12 και δείχνουν ότι η πρόβλεψη βελτιώνει τη λειτουργία του συστήματος. Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτών των καμπυλών, η πρόβλεψη αυξάνει την αξιοπιστία της ενεργειακής παραγωγής κάνοντας μια ορισμένη ενεργειακή ποσότητα διαθέσιμη για μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου. (Σε μερικές περιπτώσεις, η αξιοπιστία των τέλειων καμπυλών συχνότητας πλησιάζει

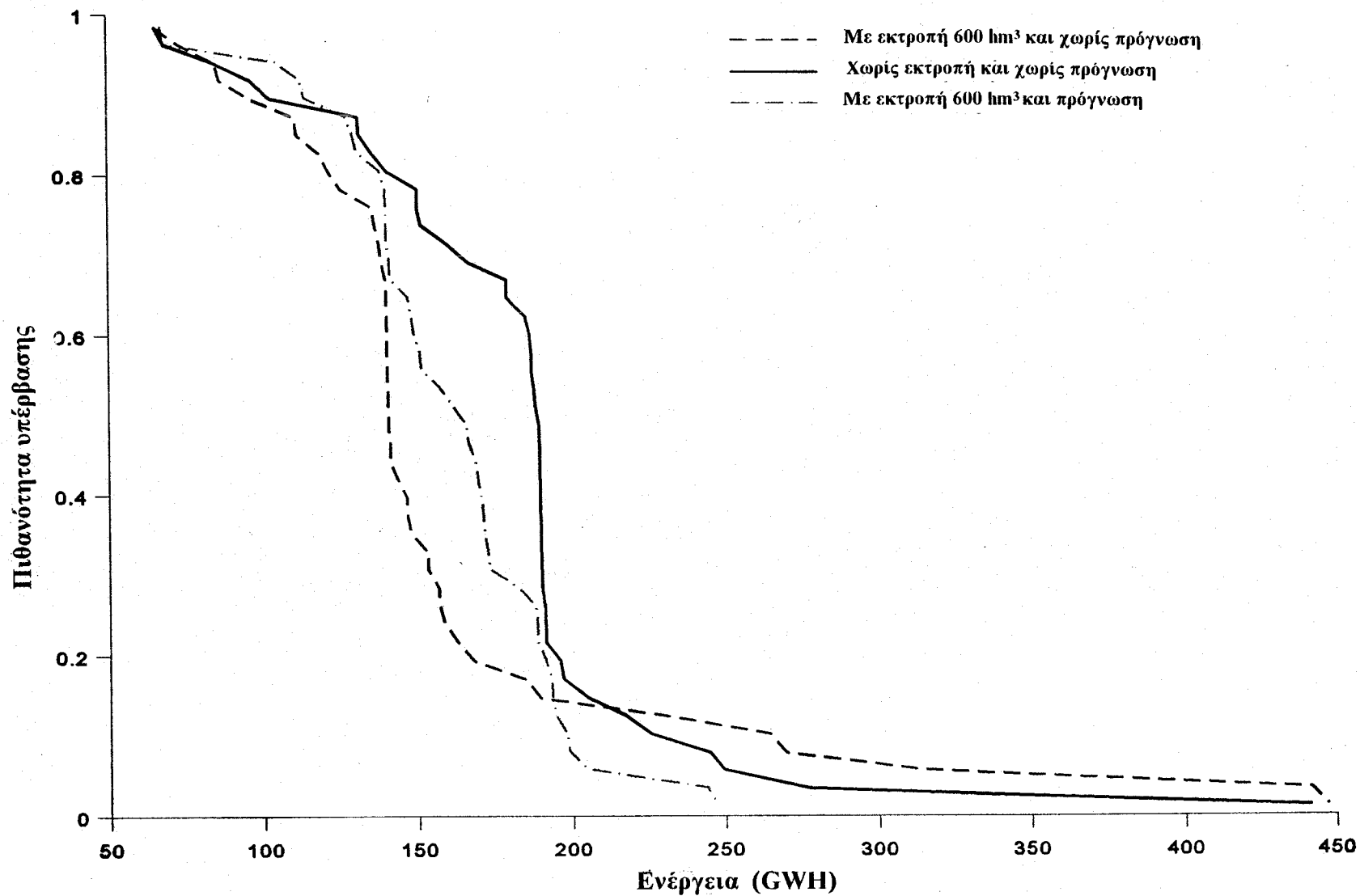
αυτή που αντιστοιχεί στο σενάριο μηδενικής εκτροπής). Μάλιστα, η βελτίωση αυτή θα ήταν πολύ εντονότερη αν το πρόγραμμα λειτουργίας των τουρμπινών ήταν πιο περιοριστικό. Παρ' όλα αυτά, για μηνιαίες χρονικές κλίμακες η υπόθεση ότι οι τουρμπίνες μπορούν να δουλεύουν για 24 ώρες την ημέρα για όλη τη διάρκεια του μήνα, ελαττώνει τη δυνατότητα υπερχείλισης. Από την άλλη πλευρά, για βραχύτερες χρονικές κλίμακες η δυνατότητα πρόβλεψης μεγάλων πλημμυρών είναι κρίσιμη για την αποφυγή υπερχείλισης και απώλειας ενέργειας.



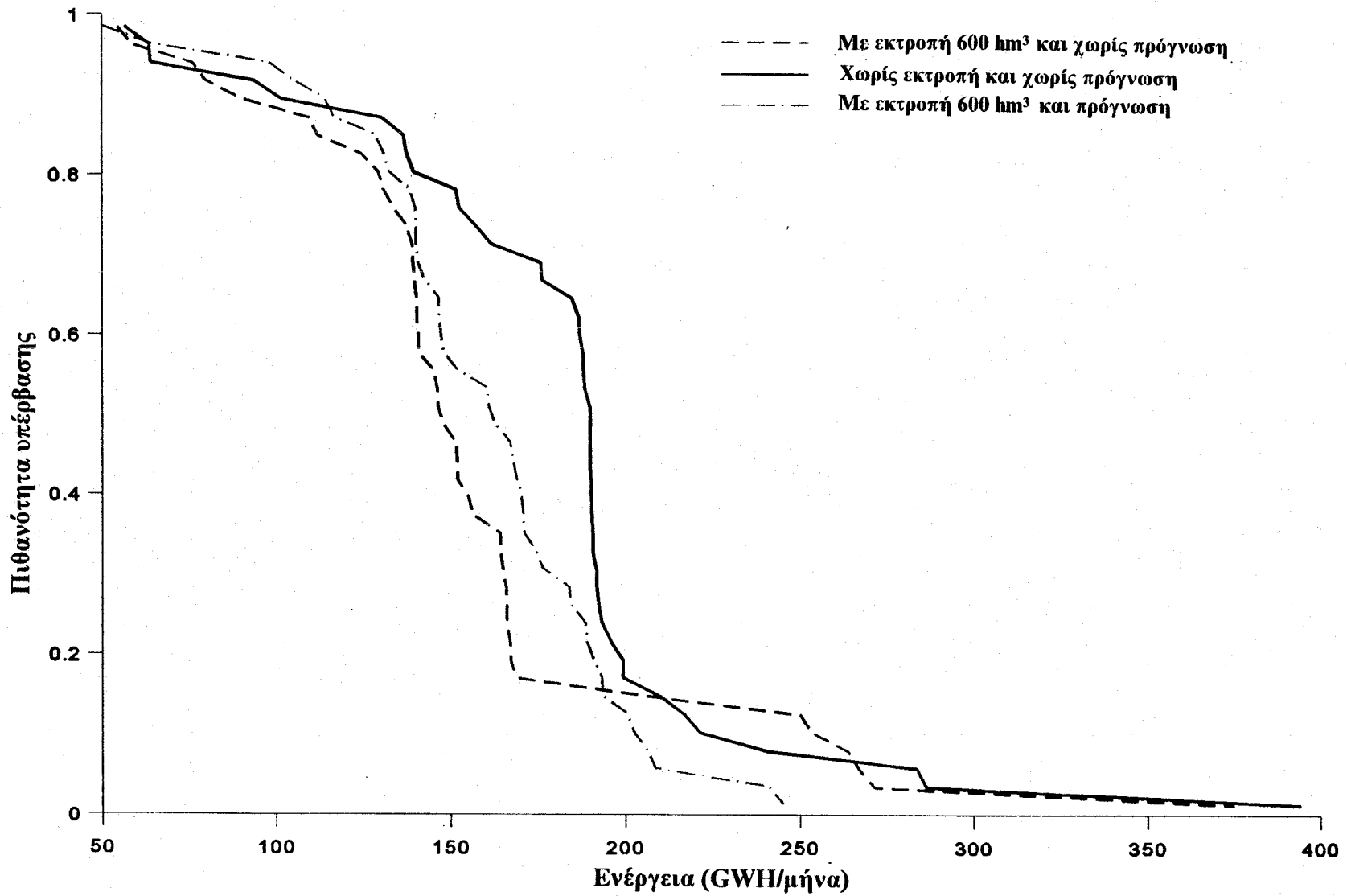
Σχήμα 5.1: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Ιανουαρίου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλειας πρόγνωσης)



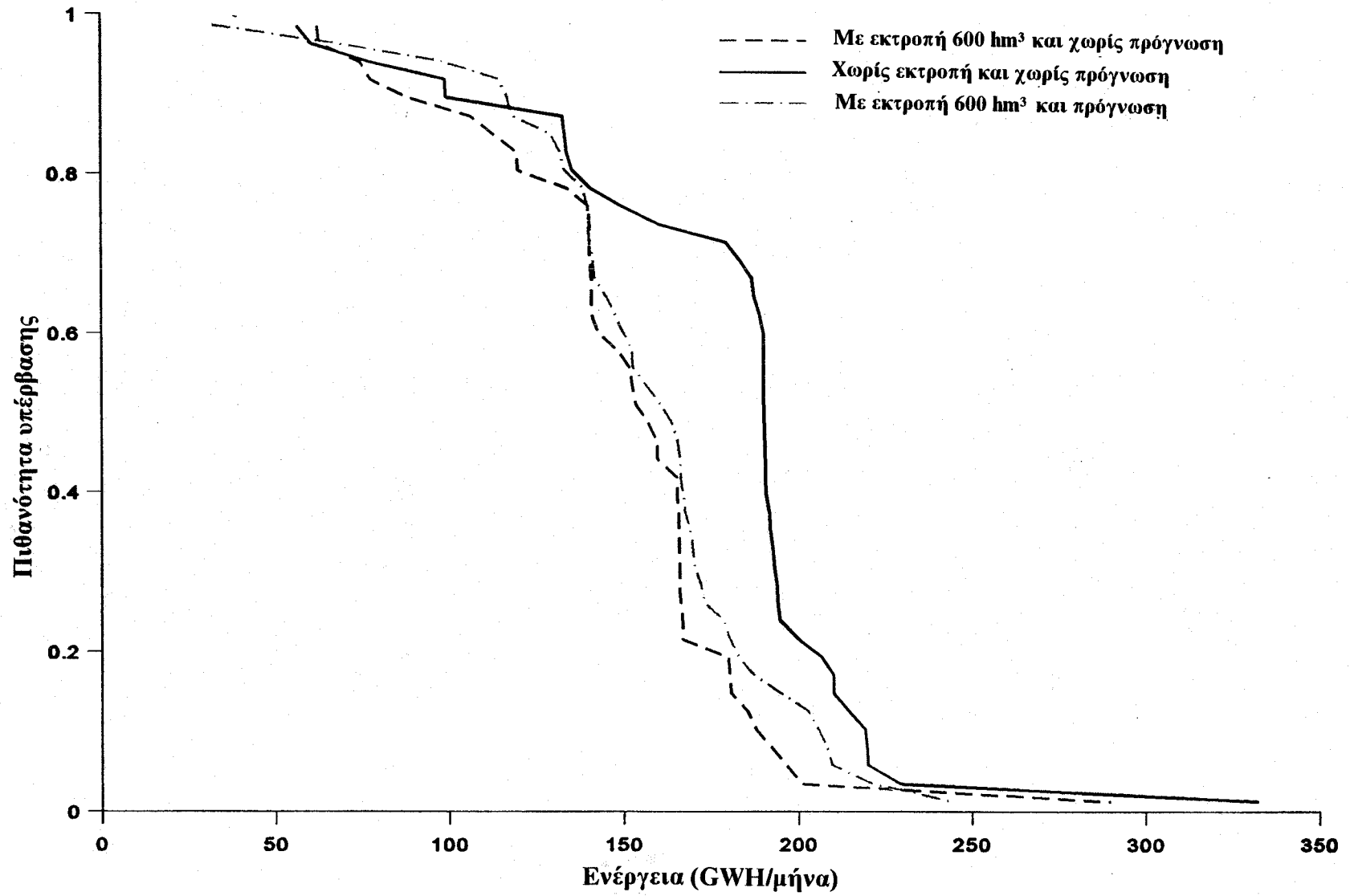
Σχήμα 5.2: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Φεβρουαρίου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλει πρόγνωσης)



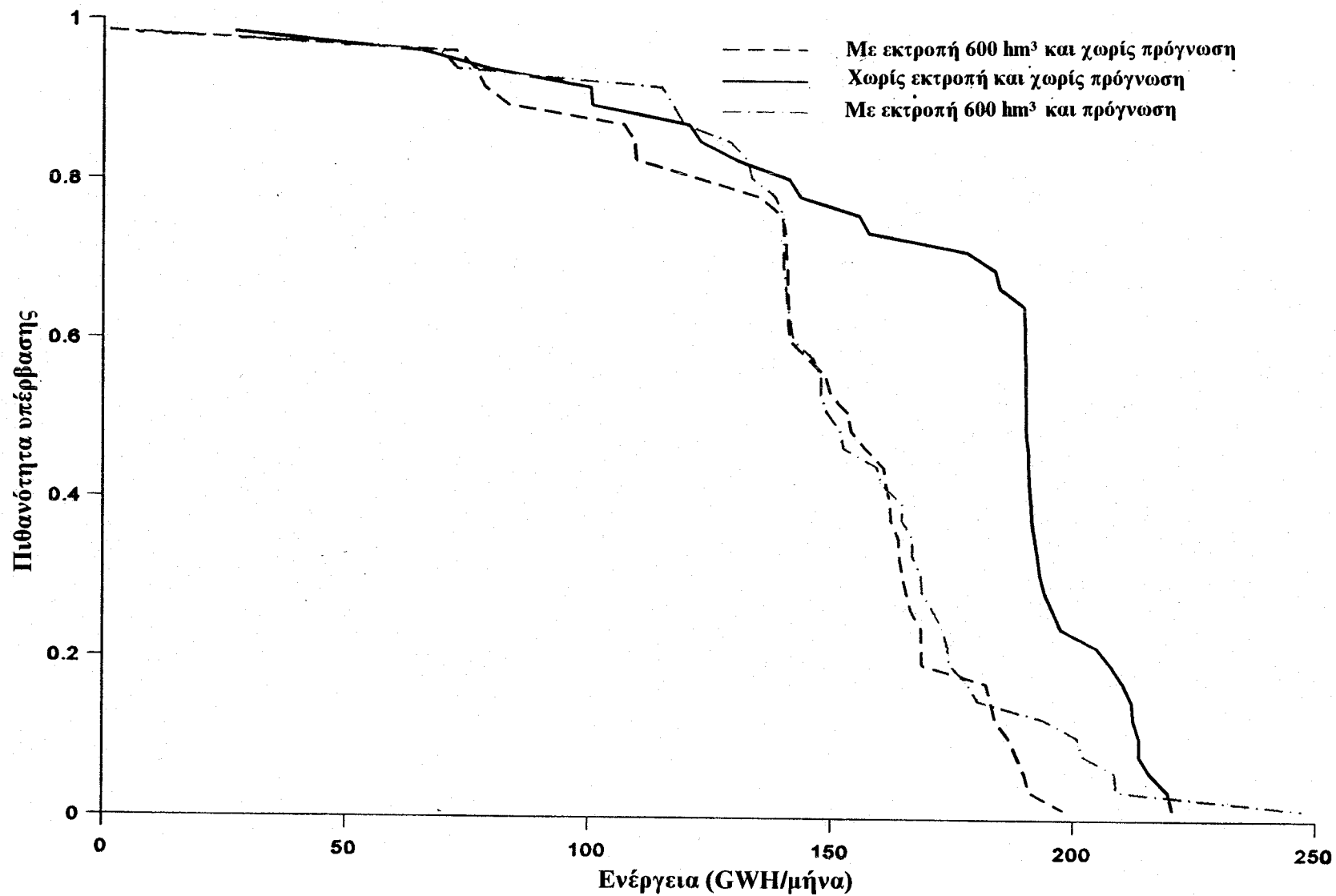
Σχήμα 5.3: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Μαρτίου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλει πρόγνωσης)



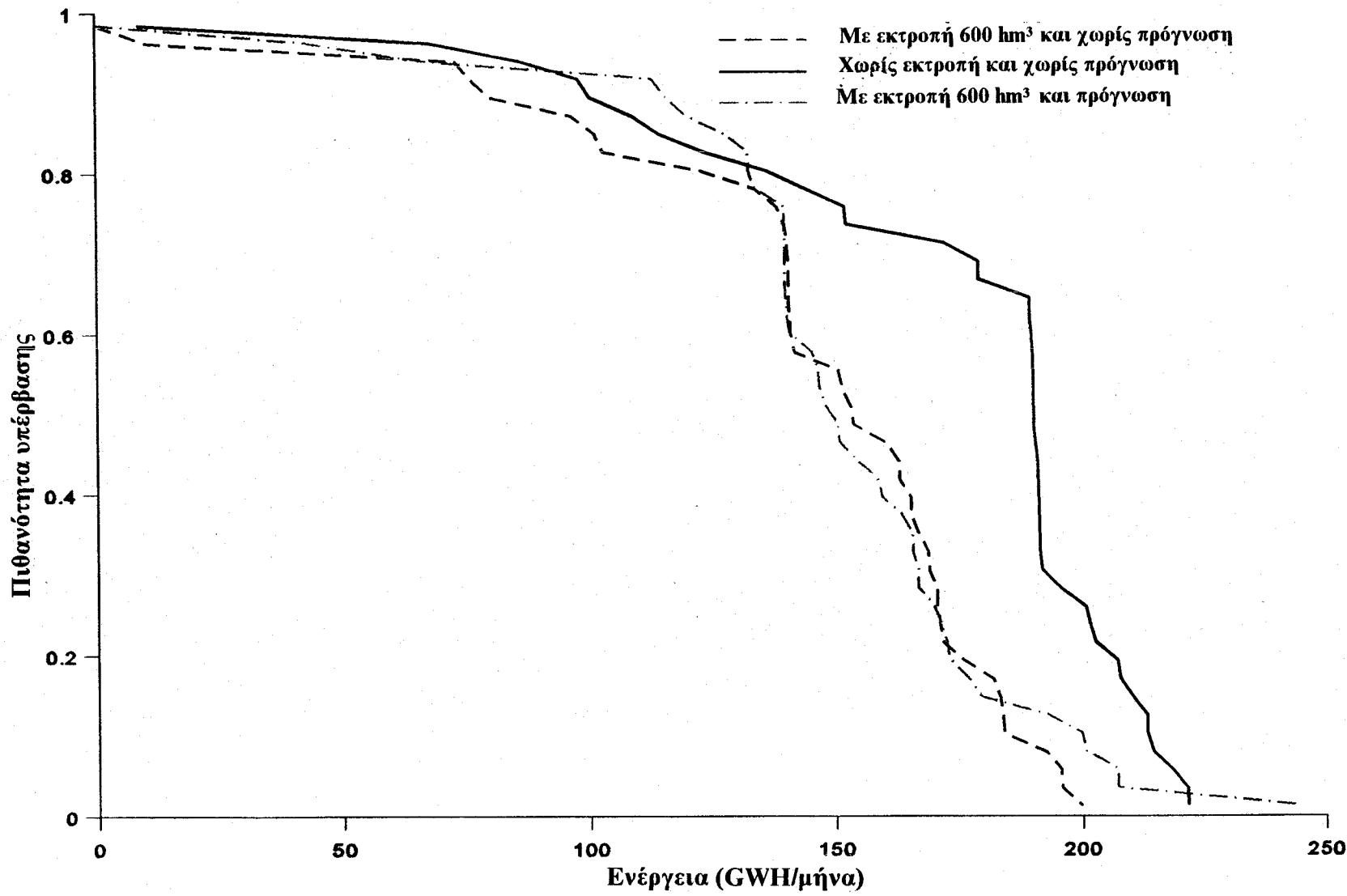
Σχήμα 5.4: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Απριλίου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλειας πρόγνωσης)



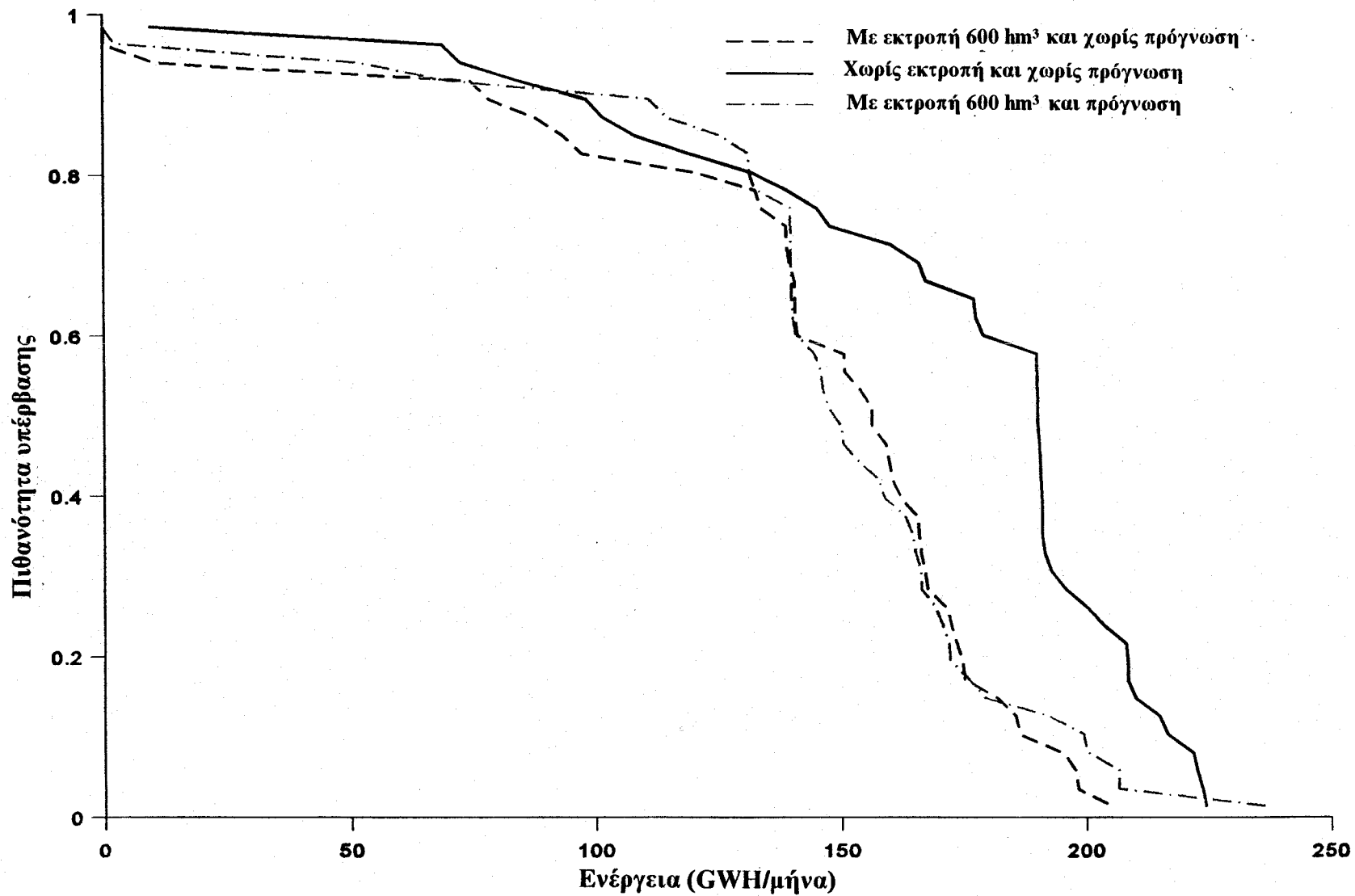
Σχήμα 5.5: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Μαΐου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλει πρόγνωσης)



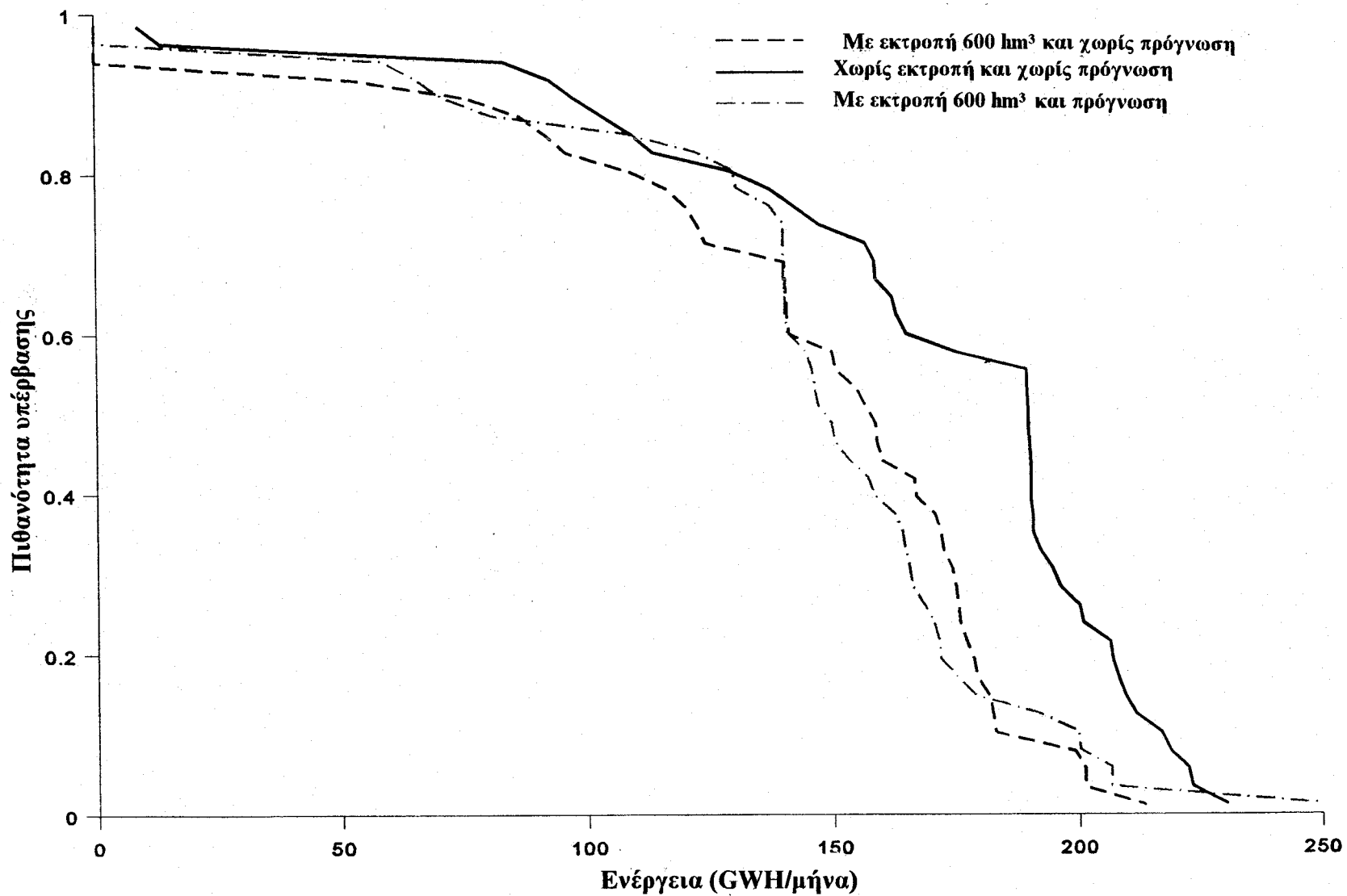
Σχήμα 5.6: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Ιουνίου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλειας πρόγνωσης)



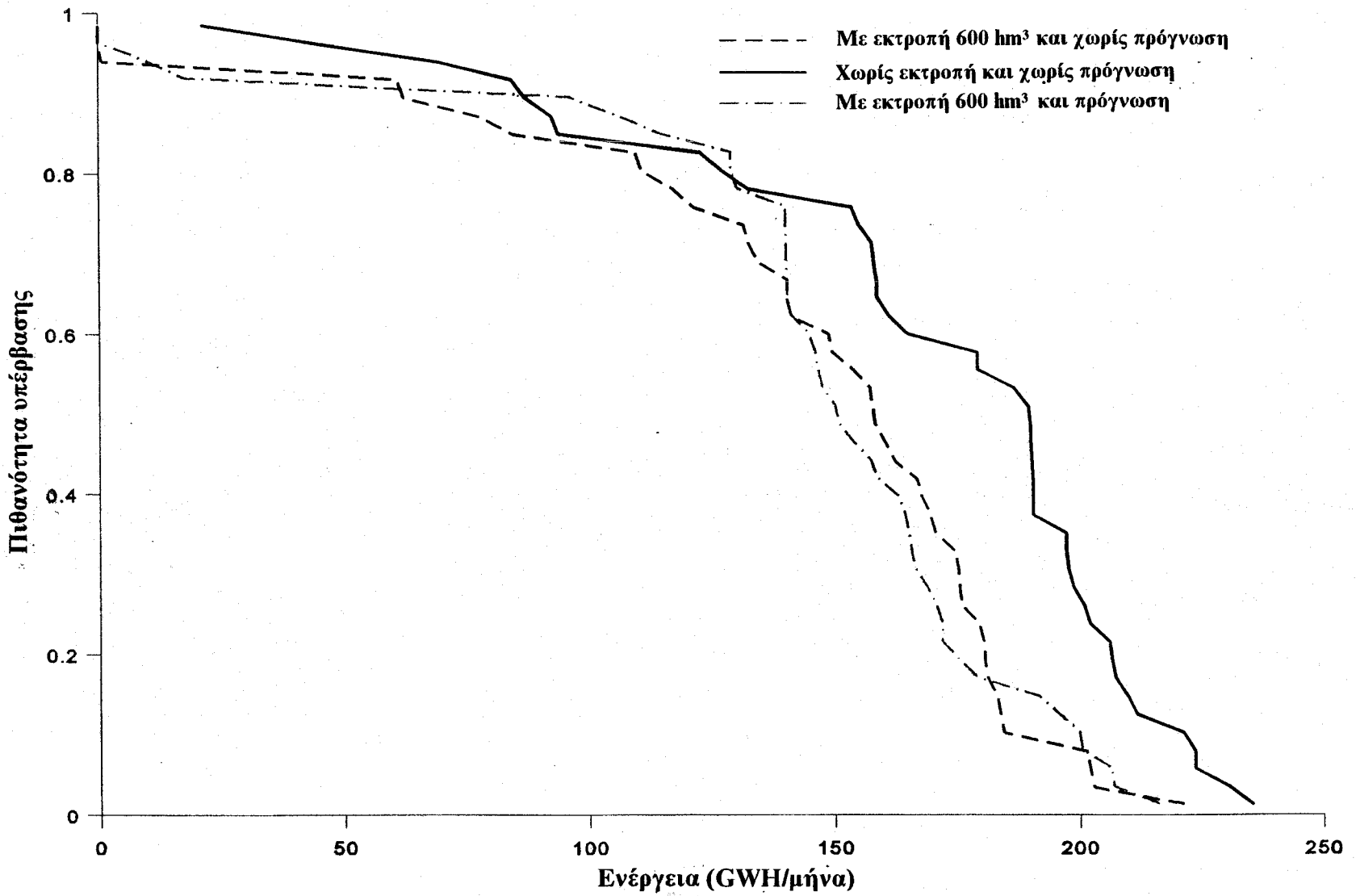
Σχήμα 5.7: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Ιουλίου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλειας πρόγνωσης)



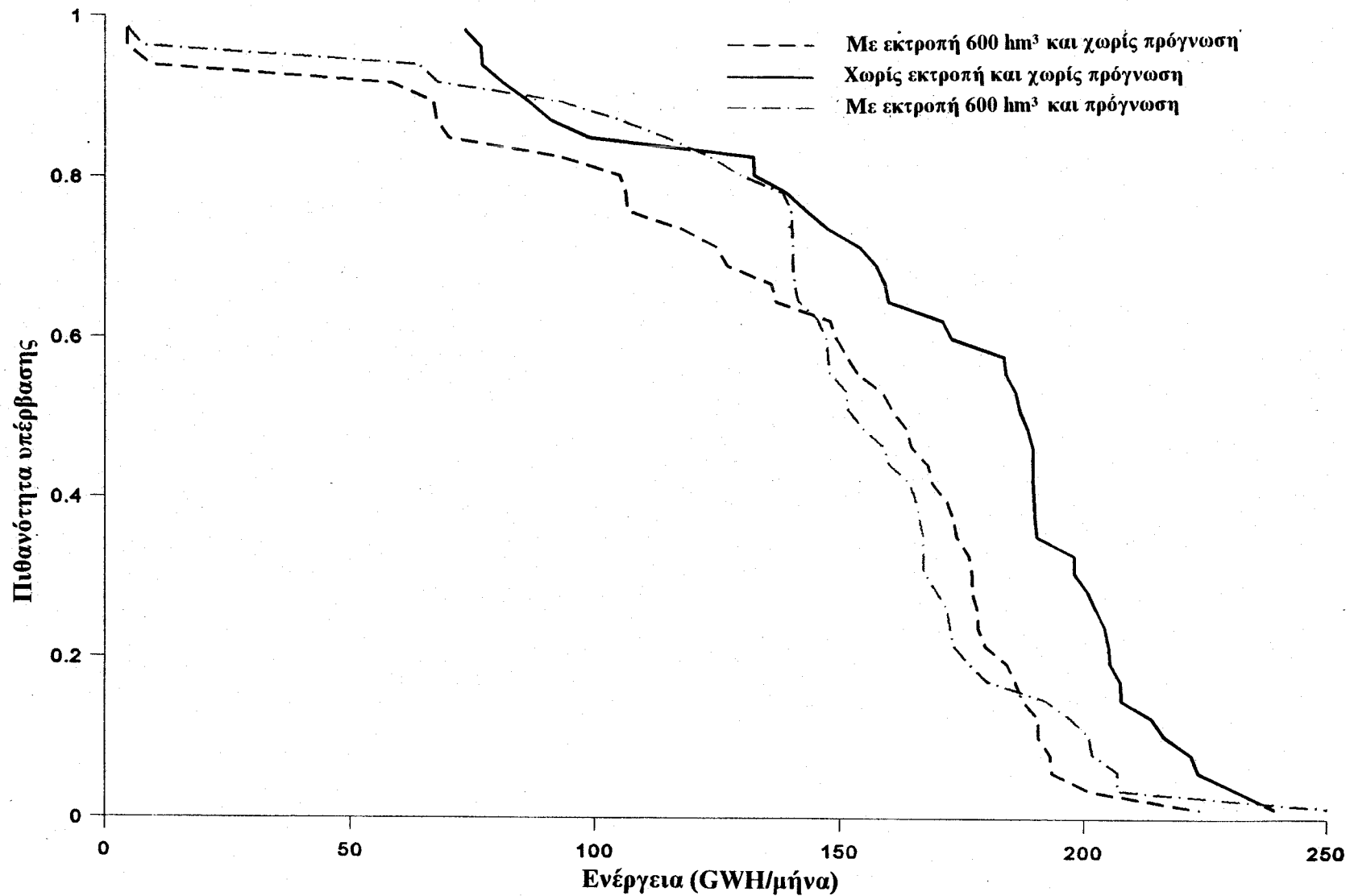
Σχήμα 5.8: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Αυγούστου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλει πρόγνωσης)



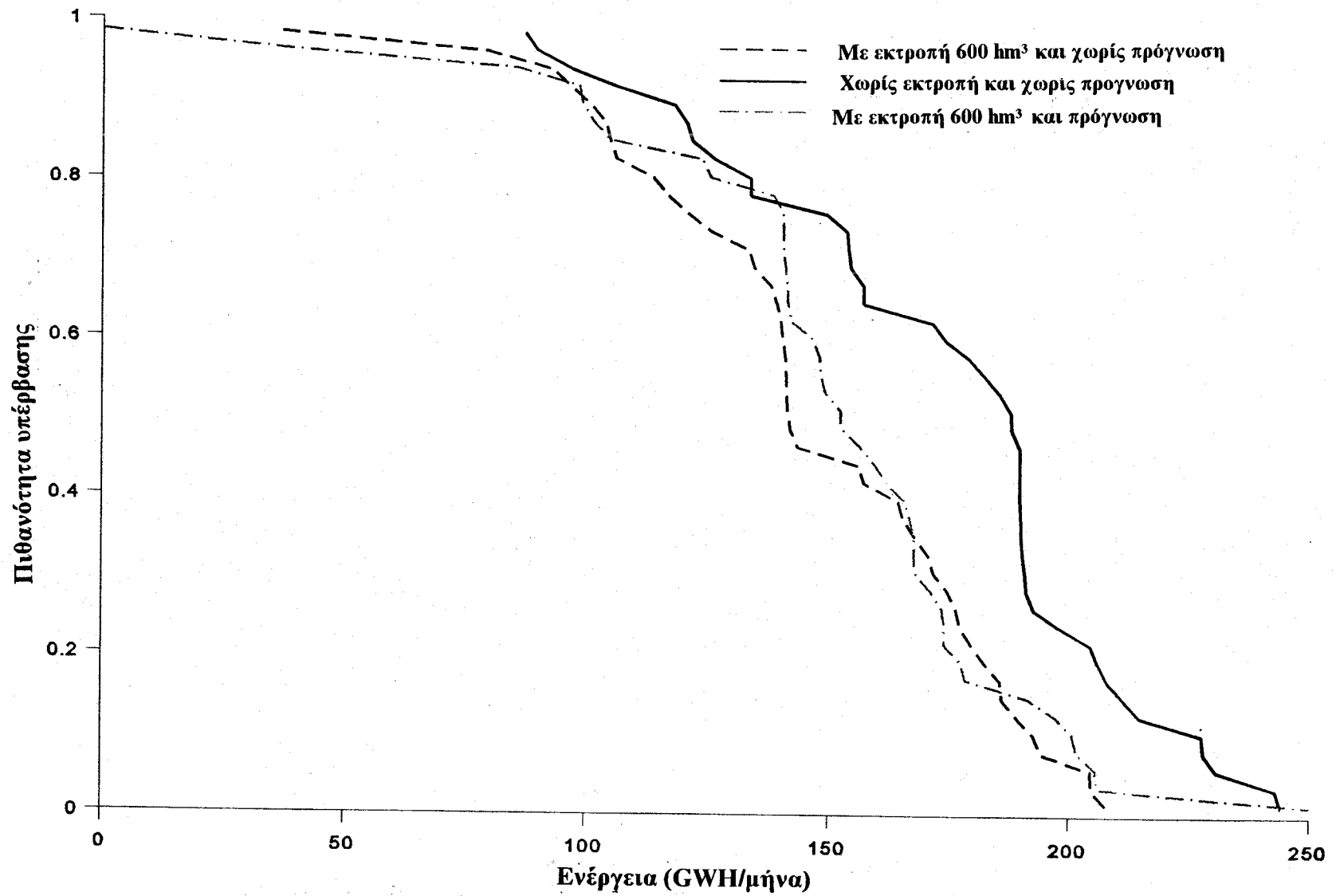
Σχήμα 5.9: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Σεπτεμβρίου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλειας πρόγνωσης)



Σχήμα 5.10: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Οκτωβρίου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλει πρόγνωσης)



Σχήμα 5.11: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Νοεμβρίου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλειας πρόγνωσης)



Σχήμα 5.12: Επίδραση της πρόγνωσης στην καμπύλη συχνότητας της παραγωγής του Δεκεμβρίου. (Για την ιδεατή περίπτωση τέλει πρόγνωσης)

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Georgakakos, A.P., " Extended Linear Quadratic Gaussian (ELQG) control: Further extensions," *Water Resources Research*, 25(2), 191-201, 1989.

Georgakakos, A.P., "Computer-Aided Management of the Southeastern U.S. Reservoir System," in " *Decision Support Systems*," D.P. Loucks, ed., NATO ASI Series, Vol. G 26, pg. 407-428, 1991.

Georgakakos, A. P., "Operational tradeoffs in reservoir control," *Water Resources Research*, 3801-3819, Vol. 29, Nov. 1993.

Georgakakos, A.P. and D. Marks, A New Method for the Real-Time Operation of Reservoir System, *Water Resources Research*, 23(7), 1376-1390, 1987.

Georgakakos, A.P., Yao, H., and Y. Yu, "A Control Model for Dependable Hydropower Capacity Optimization," forthcoming, *Water Resources Research*, 1995a.

Georgakakos, A.P., H. Yao, and Y. Yu, "A Control Model for Hydroelectric Energy Optimization," forthcoming, *Water Resources Research*, 1995b.

Georgakakos, A.P., H. Yao, and Y. Yu, "A Control Model for Hydroelectric Energy Value Optimization," forthcoming, *ASCE J. for Wat. Res. Plan. and Mgt.*, 1995c.

Georgakakos, A.P., and H. Yao, "A Decision Support System for the Equatorial Lakes," Technical Report No. GIT/CEE-HYDRO-95-1, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Tech, Atlanta, July 1995d, 185p.

Georgakakos, A.P., H. Yao, and Y. Yu, "A Decision Support System for the High Aswan Dam," Technical Report No. GIT/CEE-HYDRO-95-2, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Tech, Atlanta, July 1995e, 307p.

Georgakakos, A.P., Y. Yu, and H. Yao, "Inflow Forecasting Models for the High Aswan Dam," Technical Report No. GIT/CEE-HYDRO-95-3, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Tech, Atlanta, July 1995f, 208p.

Georgakakos, A.P., and H. Yao, "Nile Basin Management 1.0, High Aswan Dam Models, User Manual," Technical Report No. GIT/CEE-HYDRO-95-4, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Tech, Atlanta, July 1995g, 111p.

Georgakakos, A.P., and H. Yao, "Nile Basin Management 1.0, Equatorial Lake Models, User Manual," Technical Report No. GIT/CEE-HYDRO-95-5, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Tech, Atlanta, July 1995h, 47p.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ

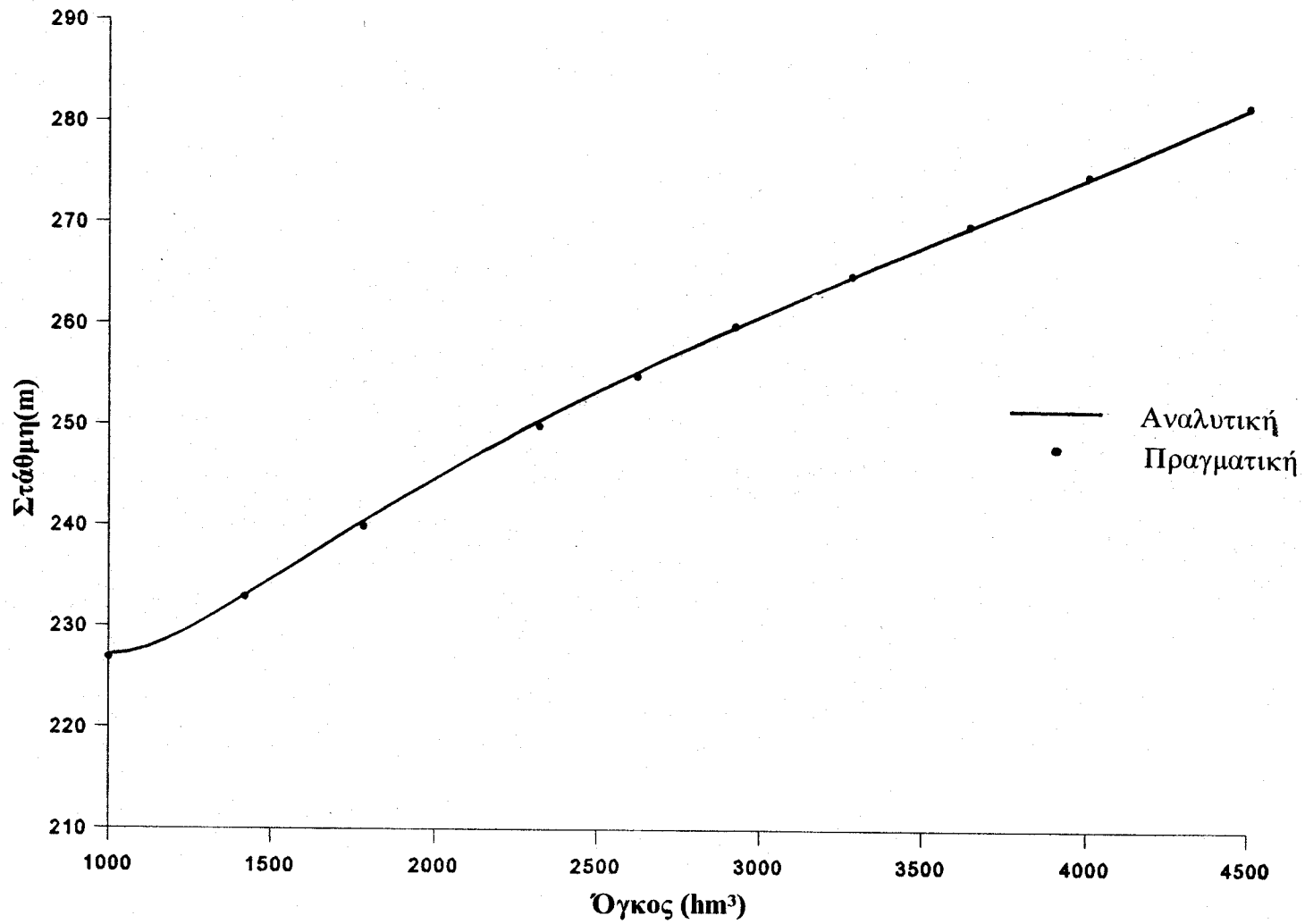
Α.1 Σχέσεις στάθμης-όγκου ταμιευτήρων

Table A.1.1: Δεδομένα στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα Κρεμαστών

Όγκος (hm ³)	Στάθμη (m)
999	227
1420	233
1750	240
2300	250
2600	255
2900	260
3300	265
3650	270
4000	275
4500	282

Table A.1.2: Αναλυτική σχέση στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα Κρεμαστών

Κρεμαστά	
Καμπύλη	$H = a + b S + c \ln S + d / S + e S^2$
Μονάδες	H: m S: hm ³
Συντελεστές	a = -287.049 b = -0.03171 c = +78.06547 d = -45393.4 e = +3.09E-06 f = +4.9x10 ⁹
Πεδίο Ισχύος	H: 227-282 m S: 999-4500 hm ³
Τυπικό σφάλμα	0.2 m



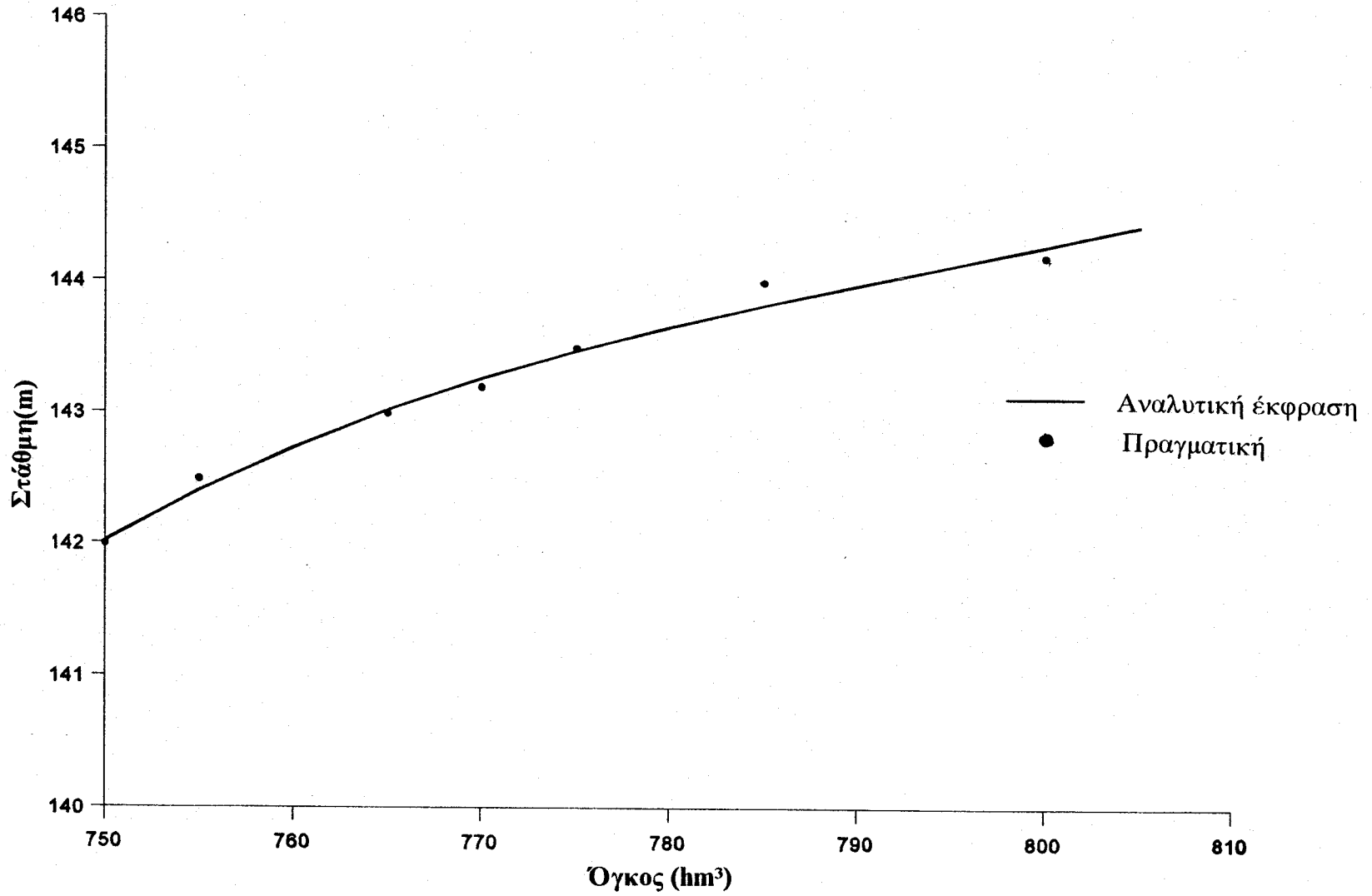
Σχήμα Α.1.1: Καμπύλη στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα Κρεμαστών.

Table A.1.3: Δεδομένα στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα Καστρακίου

Όγκος (hm ³)	Στάθμη (m)
750	142
755	142.5
765	143
770	143.2
775	143.5
785	144
800	144.2

Table A.1.4: Αναλυτική σχέση στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα Καστρακίου

Καστράκι	
Καμπύλη	$H = a + b S + c \ln S + d / S + e S^2$
Μονάδες	H: m S: hm ³
Συντελεστές	a = - 81281.43 b = - 0.0249 c = +9857.63 d = +16533673.75 e = +0.000243 f = -3373701022.
Πεδίο ισχύος	H: 142-144.2 m S: 750-800 hm ³
Τυπικό σφάλμα	0.1 m



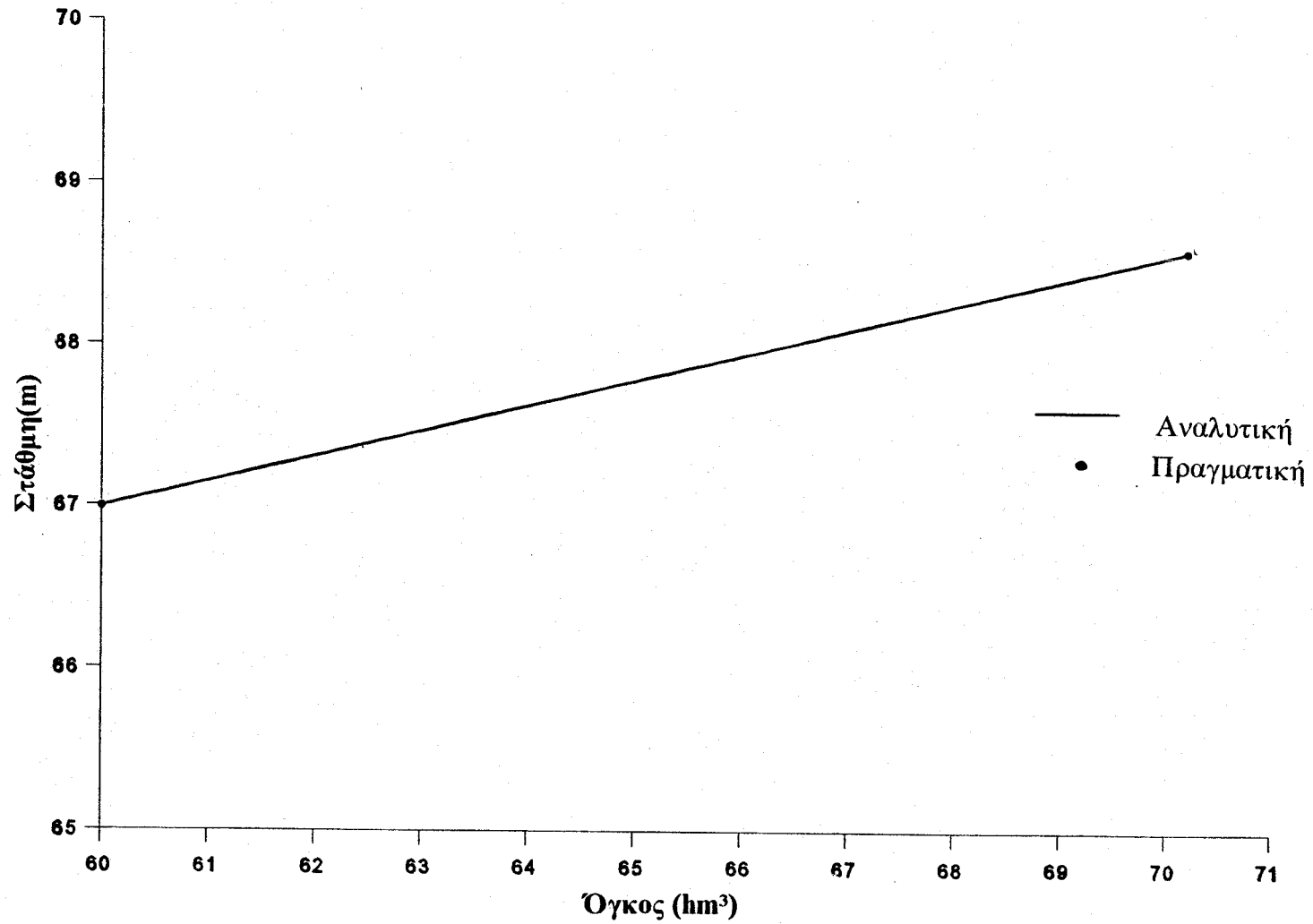
Σχήμα Α.1.2: Καμπύλη στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα Καστρακίου.

Table A.1.5: Δεδομένα στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα Στράτου

Όγκος (hm ³)	Στάθμη (m)
43.16	64
55.79	66
64.21	68
84.21	70

Table A.1.6: Αναλυτική σχέση στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα Στράτου

Στράτος	
Καμπύλη	$H = a + b S$
Μονάδες	H: m S: hm ³
Συντελεστές	a = +57.588 b = +0.1568627
Πεδίο ισχύος	H: 67-68.6 m S: 60-70.2 hm ³
Τυπικό σφάλμα	0.0 m (linear segment between two points)



Σχήμα Α.1.3: Καμπύλη στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα Στράτου.

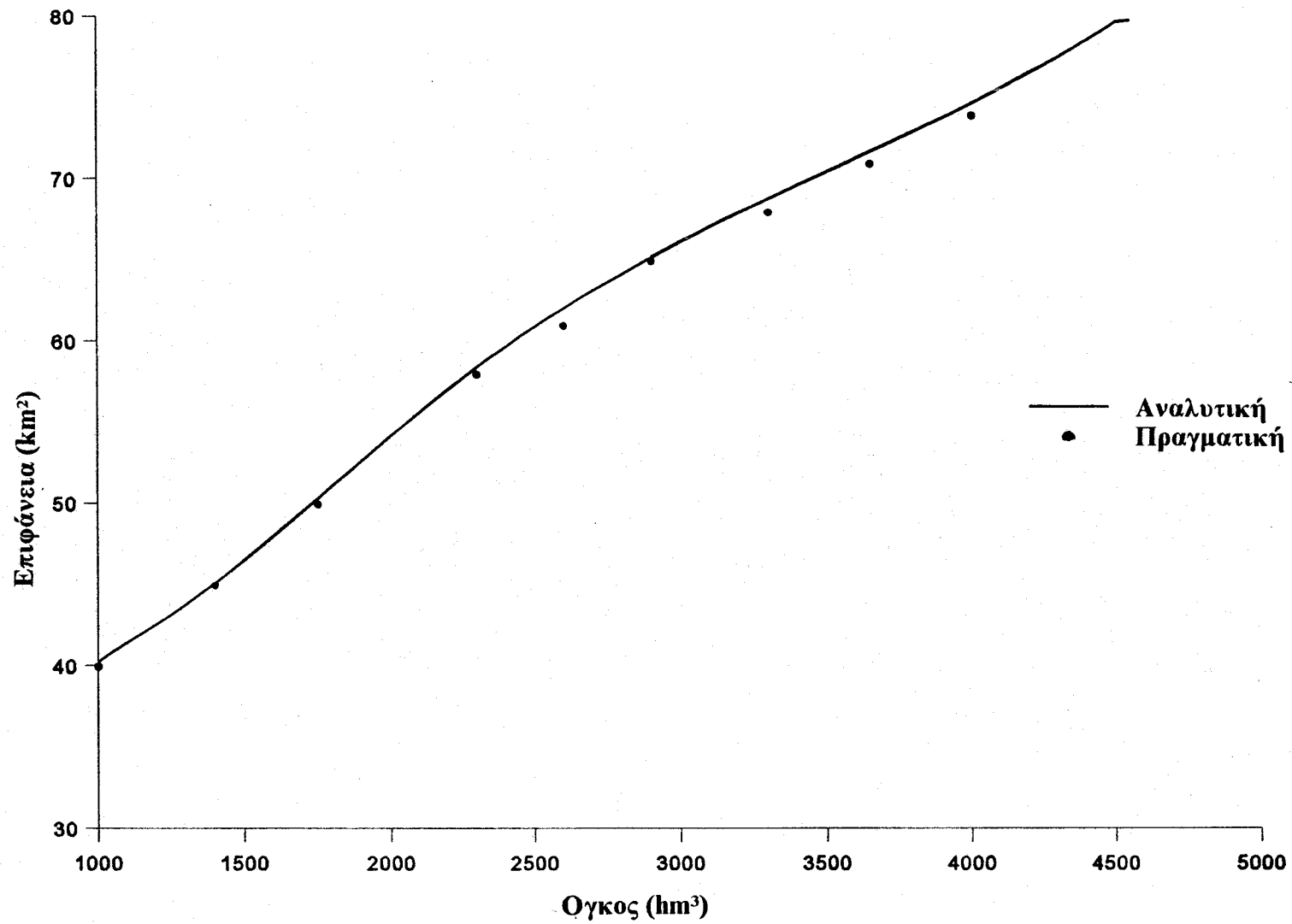
A.2 Σχέσεις επιφάνειας-όγκου ταμιευτήρων

Table A.2.1: Δεδομένα επιφάνειας-όγκου του ταμιευτήρα Κρεμαστών

Όγκος (hm ³)	Επιφάνεια (km ²)
999	40
1420	45
1750	50
2300	58
2600	61
2900	65
3300	68
3650	71
4000	74
4500	79

Table A.2.2: Αναλυτική σχέση επιφάνειας-όγκου του ταμιευτήρα Κρεμαστών

Κρεμαστά	
Καμπύλη	$\text{Area} = a + b S + c \ln S + d / S + e S^2$
Μονάδες	Area: km ² S: hm ³
Συντελεστές	a = - 5526.22 b = - 0.226 c = +734.2 d = +896060.9 e = +1.27E-05 f = - 187927230.2
Πεδίο ισχύος	Area: 40-79 km ² S: 999-4500 hm ³
Τυπικό σφάλμα	0.21 km ²



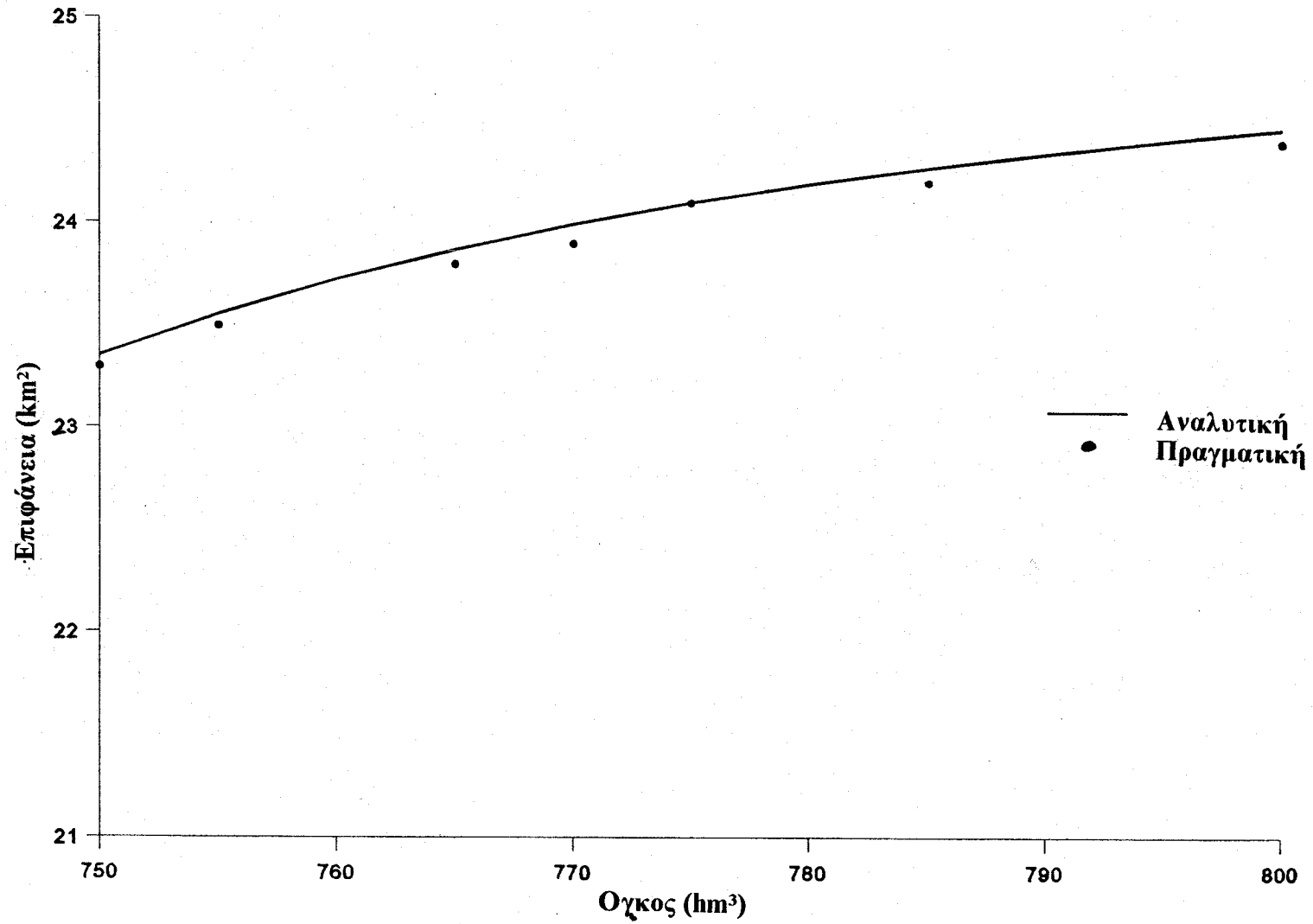
Σχήμα Α.2.1: Καμπύλη επιφάνειας-όγκου του ταμιευτήρα Κρεμαστών.

Table A.2.3: Δεδομένα επιφάνειας-όγκου του ταμιευτήρα Καστρακίου

Όγκος (hm ³)	Επιφάνεια (km ²)
750	23.3
755	23.5
765	23.8
770	23.9
775	24.1
785	24.2
800	24.4

Table A.2.4: Αναλυτική σχέση επιφάνειας-όγκου του ταμιευτήρα Καστρακίου

Καστράκι	
Καμπύλη	$\text{Area} = a + b S + c \ln S + d / S + e S^2$
Μονάδες	Area: km ² S: hm ³
Συντελεστές	a = - 32148.8 b = - 0.0133 c = +3881.744 d = +6656728.7 e = +0.000113 f = -1380655872.
Πεδίο ισχύος	Area: 23.3-24.4 km ² S: 750-800 hm ³
Τυπικό σφάλμα	0.02 km ²



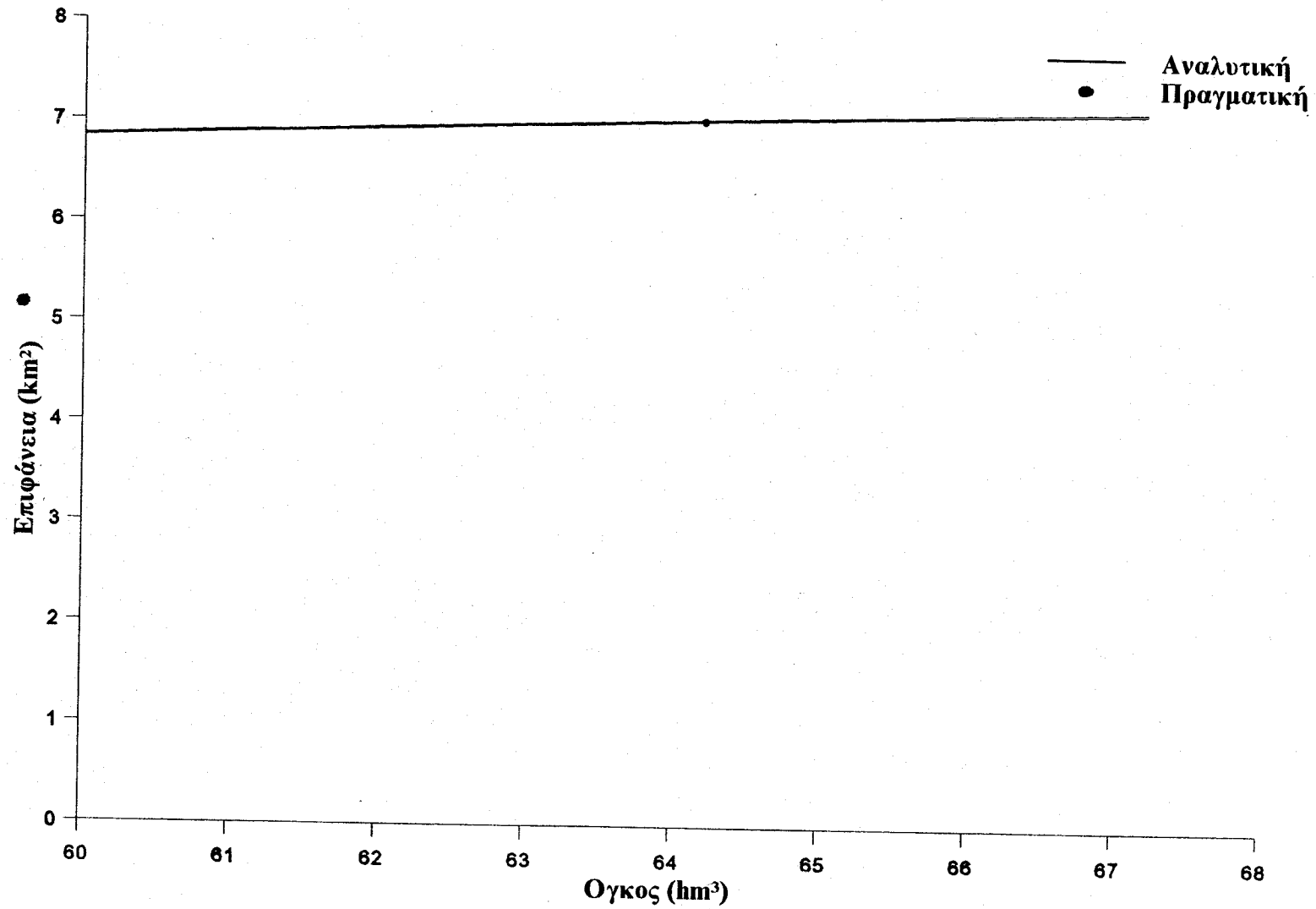
Σχήμα Α.2.2: Καμπύλη επιφάνειας-όγκου του ταμιευτήρα Καστρακίου.

Table A.2.5: Δεδομένα επιφάνειας-όγκου του ταμιευτήρα Στράτου

Όγκος (hm ³)	Επιφάνεια (km ²)
43.16	6.11
55.79	6.63
64.21	7.05
84.21	7.58

Table A.2.6: Αναλυτική σχέση επιφάνειας-όγκου του ταμιευτήρα Στράτου

Στράτος	
Καμπύλη	Area = a + b S + c ln S + d / S
Μονάδες	Area: km ² S: hm ³
Συντελεστές	a = - 188.116 b = - 0.3724 c = + 47.639 d = +1335.51
Πεδίο ισχύος	Area: 6.11-7.58 km ² S: 60-70.2 hm ³
Τυπικό σφάλμα	0.001 km ²



Σχήμα Α.2.3: Καμπύλη επιφάνειας-όγκου του ταμιευτήρα Στράτου.

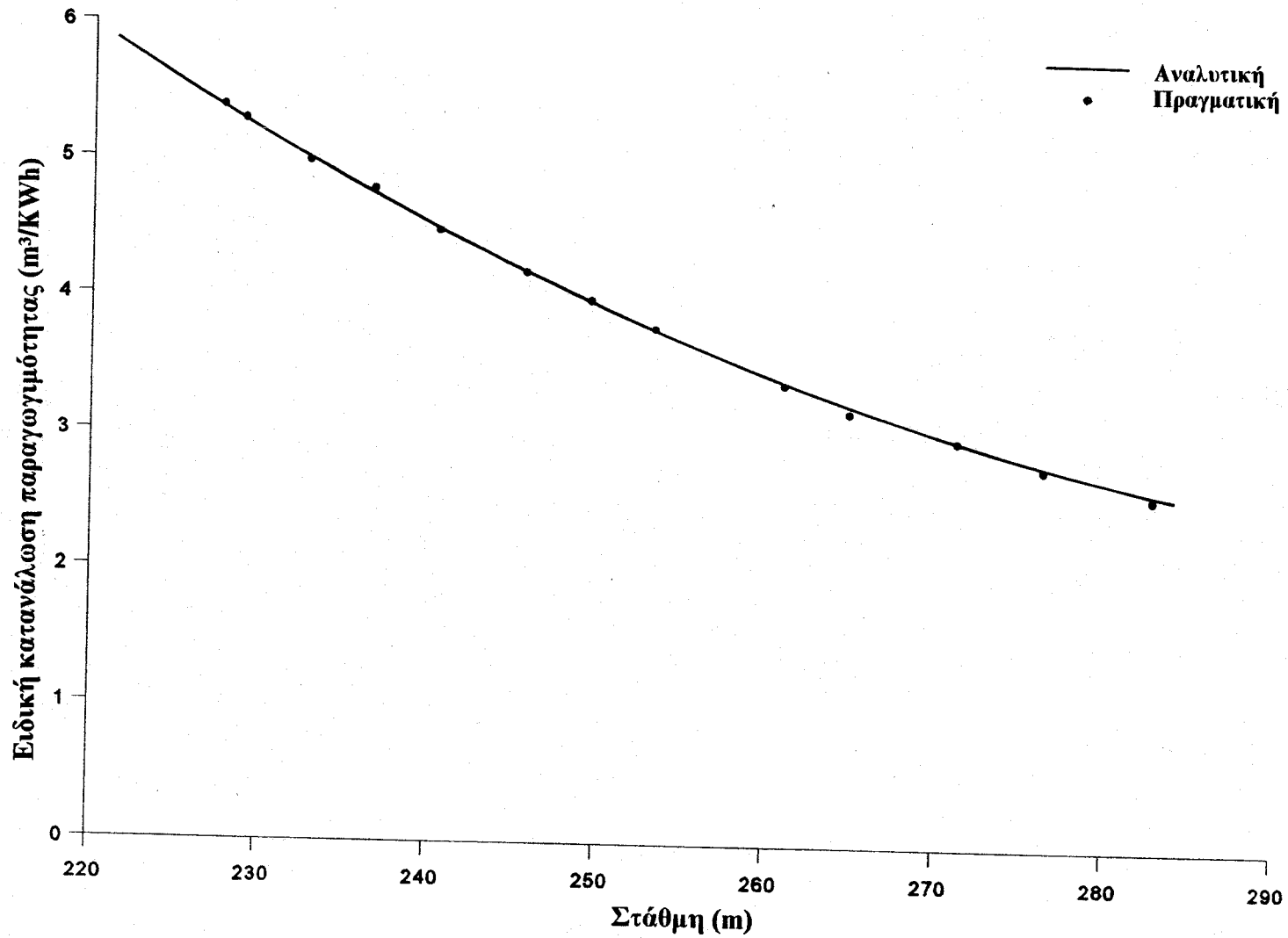
A.3 Ειδική κατανάλωση παραγωγιμότητας συναρτήσει της στάθμης

Table A.3.1: Δεδομένα ειδικής κατανάλωσης παραγωγιμότητας για τον ταμιευτήρα Κρεμαστών

H (m)	227	229	233	237	241	245	249	253	261	265	271	277	283
E (m ³ /kWh)	5.5	5.3	5	4.7	4.4	4.2	4	3.8	3.6	3.2	3	2.8	2.6

Table A.3.2: Αναλυτική σχέση ειδικής κατανάλωσης παραγωγιμότητας συναρτήσει της στάθμης για τον ταμιευτήρα Κρεμαστών

Κρεμαστά	
Καμπύλη	$F = a + b H + c H^2$
Μονάδες	H: m F: m ³ /kWh
Συντελεστές	a = 44.082296 b = -0.2666675 c = 4.2471138x10 ⁻⁴
Πεδίο ισχύος	H: 227-282 m
Τυπικό σφάλμα	0.01 m ³ /kWh



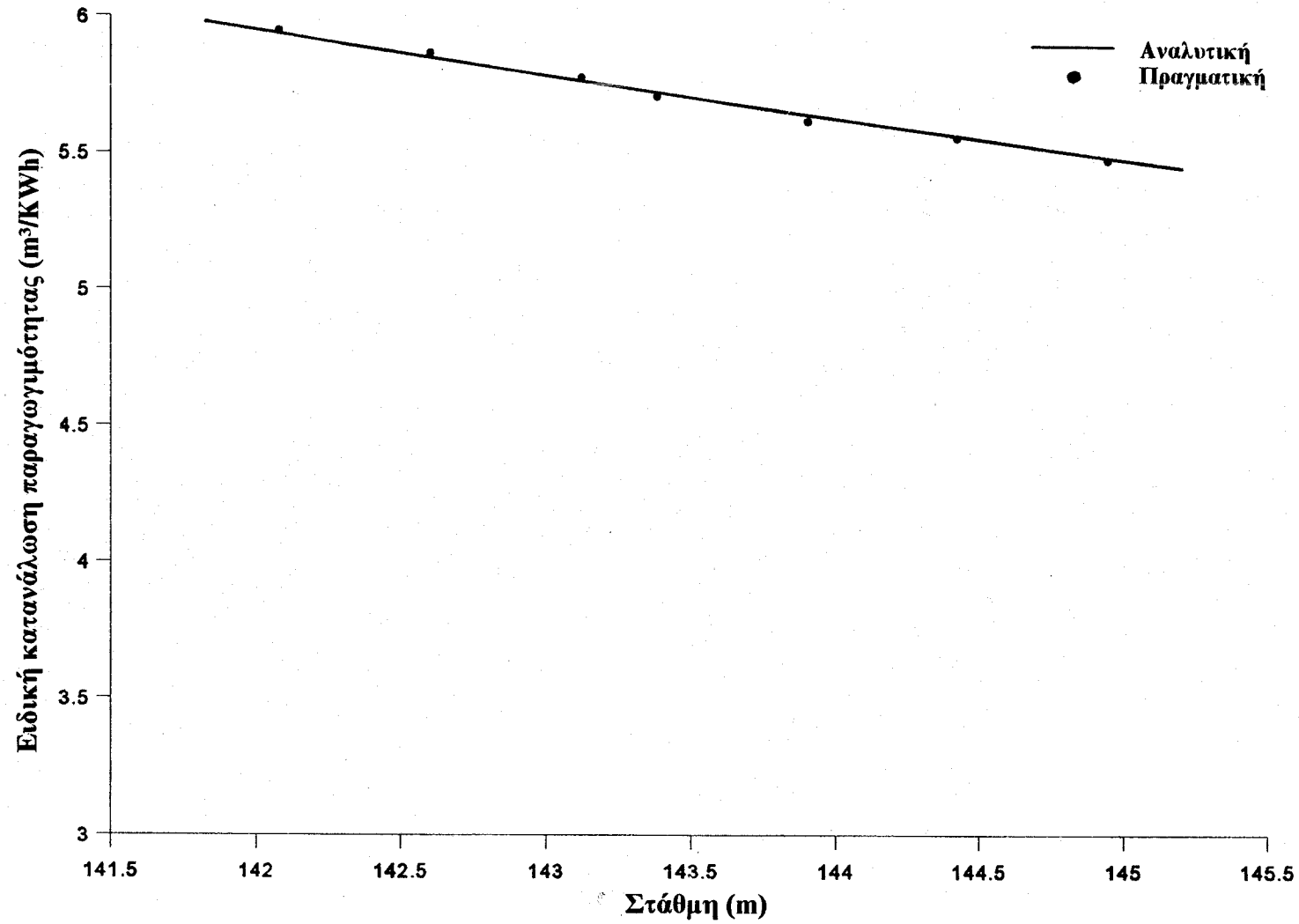
Σχήμα Α.3.1: Ειδική κατανάλωση παραγωγιότητας συναρτήσει της στάθμης στον ταμιευτήρα Κρεμαστών.

Table A.3.3: Δεδομένα ειδικής κατανάλωσης παραγωγιμότητας για τον ταμιευτήρα Καστρακίου

H (m)	142	142.5	143	143.5	144	144.5	145.0
E (m ³ /kWh)	5.95	5.87	5.78	5.71	5.62	5.56	5.48

Table A.3.4: Αναλυτική σχέση ειδικής κατανάλωσης παραγωγιμότητας συναρτήσει της στάθμης για τον ταμιευτήρα Καστρακίου

Καστράκι	
Καμπύλη	$F = a + b H + c H^2$
Μονάδες	H: m F: m ³ /kWh
Συντελεστές	a = +136.0164310 b = -1.65976 c = +5.2380953 x10 ⁻³
Πεδίο ισχύος	H: 142-144.2 m
Τυπικό σφάλμα	0.01 m ³ /kWh



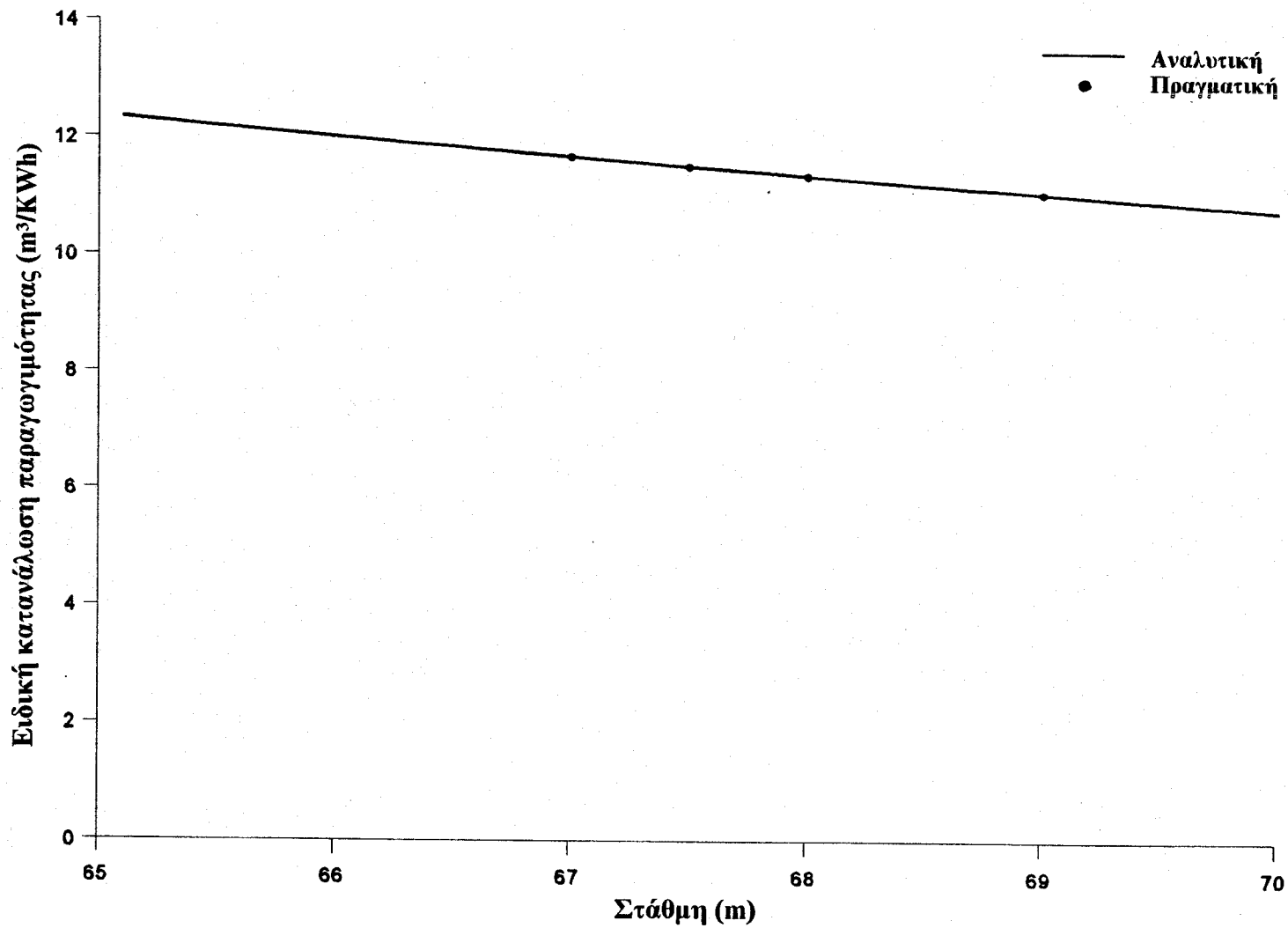
Σχήμα Α.3.2: Ειδική κατανάλωση παραγωγιμότητας συναρτήσει της στάθμης στον ταμιευτήρα Καστρακίου.

Table A.3.5: Δεδομένα ειδικής κατανάλωσης παραγωγιμότητας για τον ταμιευτήρα Στράτου

H (m)	67	67.5	68	68.5	69
E (m ³ /kWh)	11.7	11.54	11.39	11.24	11.10

Table A.3.6: Αναλυτική σχέση ειδικής κατανάλωσης παραγωγιμότητας συναρτήσει της στάθμης για τον ταμιευτήρα Στράτου

Στράτος	
Καμπύλη	$F = a + b H + c H^2$
Μονάδες	H: m F: m ³ /kWh
Συντελεστές	a = +84.632 b = -1.8542 c = +1.14285 x 10 ⁻²
Πεδίο ισχύος	H: 142-144.2 m
Τυπικό σφάλμα	0.01 m ³ /kWh



Σχήμα Α.3.3: Ειδική κατανάλωση παραγωγιμότητας συναρτήσει της στάθμης στον ταμιευτήρα Στράτου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ

Σημείωση: Χρησιμοποιείται η εξίσωση

$$p = \frac{i-0.4}{n+0.2},$$

όπου p η πιθανότητα υπέρβασης, n ο συνολικός αριθμός δεδομένων και i ο αύξων αριθμός μιας δεδομένης τιμής. (Helsel and Hirsch, "Statistical Methods In Water Resources," Elsevier, 1992).

Ιανουάριος

Πιθανότητα
υπέρβασης

Εκτροπή = 0
Παροχή (hm³/μήνα)

Εκτροπή = 600 (hm³/έτος)
Παροχή (hm³/μήνα)

.986	145.720	186.900
.964	240.800	234.030
.941	259.610	236.330
.919	261.010	248.610
.896	275.130	254.620
.873	289.050	254.650
.851	307.040	256.480
.828	314.060	258.230
.805	316.170	275.500
.783	318.120	280.590
.760	341.740	284.850
.738	348.970	288.840
.715	360.400	289.310
.692	360.460	293.590
.670	360.630	295.950
.647	363.530	300.160
.624	381.230	302.660
.602	382.800	303.180
.579	383.390	305.720
.557	384.630	305.740
.534	388.740	306.480
.511	394.610	306.820
.489	398.090	307.920
.466	398.230	309.770
.443	399.190	318.260
.421	400.110	325.920
.398	400.810	327.610
.376	403.200	335.640
.353	405.100	344.940
.330	406.720	346.430
.308	413.730	358.480
.285	417.990	367.330
.262	421.820	372.270
.240	421.890	376.000
.217	422.310	376.750
.195	426.370	377.110
.172	430.560	379.030
.149	447.040	411.230
.127	470.630	417.310
.104	475.100	433.270
.081	485.290	436.930
.059	504.410	451.770
.036	507.270	465.180
.014	519.840	625.490

Φεβρουάριος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Παροχή (hm ³ /μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Παροχή (hm ³ /μήνα)
.986	91.960	160.880
.964	213.800	192.500
.941	213.960	200.040
.919	243.000	212.260
.896	277.940	256.030
.873	299.800	268.650
.851	315.160	271.660
.828	316.490	277.250
.805	320.610	277.590
.783	337.750	283.320
.760	341.530	288.080
.738	367.410	291.270
.715	373.840	291.710
.692	376.700	293.970
.670	377.630	297.580
.647	378.800	299.660
.624	379.710	301.470
.602	380.520	305.230
.579	383.120	307.520
.557	385.150	309.330
.534	390.390	309.900
.511	392.670	312.080
.489	393.680	313.470
.466	393.710	319.220
.443	400.670	321.320
.421	401.420	327.490
.398	403.020	329.950
.376	403.110	333.950
.353	405.330	335.530
.330	406.570	336.630
.308	408.340	338.340
.285	411.240	339.760
.262	411.590	351.660
.240	411.630	356.860
.217	429.060	358.270
.195	438.220	372.880
.172	445.360	421.950
.149	447.980	436.300
.127	461.600	460.700
.104	467.640	468.640
.081	509.440	509.930
.059	527.200	514.170
.036	582.130	529.760
.014	1279.020	1516.280

Μάρτιος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Παροχή (hm ³ /μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Παροχή (hm ³ /μήνα)
.986	157.410	157.410
.964	160.680	181.170
.941	209.920	196.890
.919	234.310	215.730
.896	239.650	216.110
.873	290.500	241.690
.851	294.460	249.520
.828	309.890	266.190
.805	319.940	266.880
.783	330.060	268.200
.760	341.140	273.410
.738	342.710	281.100
.715	348.700	281.350
.692	350.200	281.680
.670	351.070	281.700
.647	354.420	284.500
.624	355.640	289.570
.602	358.780	291.290
.579	360.100	291.670
.557	360.690	292.400
.534	363.740	293.590
.511	369.200	294.640
.489	369.570	295.810
.466	373.470	297.070
.443	378.990	297.090
.421	379.990	298.480
.398	381.170	313.520
.376	385.090	315.490
.353	385.330	315.610
.330	386.960	316.250
.308	387.780	320.850
.285	392.320	323.170
.262	392.980	327.450
.240	393.140	327.460
.217	393.310	328.320
.195	395.760	338.110
.172	406.920	371.990
.149	414.580	383.450
.127	431.850	426.080
.104	444.580	457.490
.081	454.720	481.260
.059	456.170	534.630
.036	487.830	739.640
.014	749.150	749.150

Απρίλιος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Παροχή (hm ³ /μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Παροχή (hm ³ /μήνα)
.986	147.550	133.450
.964	152.740	149.320
.941	158.250	185.000
.919	223.850	185.110
.896	232.580	203.800
.873	279.780	236.660
.851	292.960	241.150
.828	308.650	255.400
.805	310.340	258.390
.783	317.190	261.230
.760	328.250	271.200
.738	329.470	273.870
.715	338.060	276.240
.692	346.350	278.180
.670	346.860	280.410
.647	350.720	284.460
.624	355.020	288.960
.602	357.260	291.790
.579	358.270	292.750
.557	358.960	294.090
.534	358.970	296.350
.511	359.030	296.460
.489	359.330	297.020
.466	362.500	299.070
.443	367.930	299.270
.421	371.150	299.340
.398	371.220	304.030
.376	372.940	306.050
.353	373.960	307.870
.330	374.040	308.850
.308	374.100	310.160
.285	374.840	310.640
.262	375.140	316.750
.240	379.440	320.120
.217	381.610	324.120
.195	388.710	325.400
.172	389.520	337.330
.149	392.760	353.760
.127	392.950	418.520
.104	403.130	425.980
.081	405.590	436.910
.059	458.040	437.660
.036	465.640	443.000
.014	658.620	628.620

Μάιος	Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Παροχή (hm ³ /μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Παροχή (hm ³ /μήνα)
	.986	133.860	145.150
	.964	141.690	149.210
	.941	177.700	159.390
	.919	211.110	165.480
	.896	223.310	189.180
	.873	259.330	213.600
	.851	263.550	228.430
	.828	271.020	232.550
	.805	272.910	235.010
	.783	284.240	252.250
	.760	290.780	258.880
	.738	313.950	263.870
	.715	336.050	264.740
	.692	336.860	265.930
	.670	337.760	268.880
	.647	339.160	273.040
	.624	339.370	275.260
	.602	339.790	278.840
	.579	343.290	280.420
	.557	345.770	281.610
	.534	347.850	282.000
	.511	348.430	285.740
	.489	350.810	286.210
	.466	351.300	286.720
	.443	351.340	290.030
	.421	351.660	292.180
	.398	353.340	292.490
	.376	356.620	292.540
	.353	362.300	296.140
	.330	363.470	298.900
	.308	363.630	306.170
	.285	365.050	306.510
	.262	365.680	306.650
	.240	365.830	317.860
	.217	368.880	319.200
	.195	369.730	320.930
	.172	373.590	322.270
	.149	373.900	327.470
	.127	375.330	332.660
	.104	380.330	333.060
	.081	382.230	339.450
	.059	384.200	355.200
	.036	394.830	360.440
	.014	549.370	483.370

Ιούνιος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Παροχή (hm ³ /μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Παροχή (hm ³ /μήνα)
.986	57.810	.000
.964	138.060	151.040
.941	163.210	156.880
.919	209.040	158.240
.896	217.850	159.710
.873	235.880	201.010
.851	246.960	212.090
.828	257.860	213.870
.805	270.380	237.950
.783	284.830	251.990
.760	303.090	252.190
.738	315.720	252.950
.715	327.170	253.130
.692	328.930	255.820
.670	329.170	259.040
.647	330.240	260.630
.624	330.560	260.650
.602	332.880	261.570
.579	334.380	263.810
.557	335.190	264.560
.534	336.540	268.380
.511	339.090	271.250
.489	339.490	272.940
.466	339.510	276.590
.443	341.520	280.450
.421	342.590	281.530
.398	342.980	281.910
.376	343.490	281.920
.353	344.070	283.630
.330	346.000	283.820
.308	346.130	284.780
.285	347.060	285.530
.262	349.190	288.910
.240	352.150	292.780
.217	352.290	293.950
.195	354.320	294.490
.172	355.180	298.540
.149	356.620	300.550
.127	357.200	307.060
.104	357.570	313.830
.081	360.460	314.570
.059	366.440	316.430
.036	367.910	317.410
.014	377.260	357.650

Ιούλιος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Παροχή (hm ³ /μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Παροχή (hm ³ /μήνα)
.986	16.670	.000
.964	144.910	34.790
.941	185.980	154.650
.919	204.790	156.560
.896	218.560	165.370
.873	223.590	191.900
.851	233.960	201.020
.828	250.740	205.540
.805	272.230	242.450
.783	287.180	247.140
.760	297.980	257.010
.738	299.190	258.080
.715	331.830	258.970
.692	333.030	259.870
.670	333.870	260.390
.647	334.350	260.850
.624	334.460	265.110
.602	334.630	268.160
.579	335.910	271.510
.557	336.440	271.900
.534	336.490	273.460
.511	337.900	274.770
.489	339.210	277.120
.466	339.340	279.000
.443	340.010	282.330
.421	340.360	285.080
.398	340.470	285.400
.376	341.510	285.700
.353	345.760	286.520
.330	347.570	288.810
.308	347.870	290.500
.285	349.420	291.820
.262	350.120	292.470
.240	353.990	293.180
.217	354.470	297.410
.195	354.730	301.810
.172	354.770	301.940
.149	354.900	302.540
.127	355.030	306.220
.104	355.430	310.810
.081	359.840	324.920
.059	363.620	327.010
.036	368.130	329.690
.014	372.390	333.340

Αύγουστος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Παροχή (hm ³ /μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Παροχή (hm ³ /μήνα)
.986	18.300	.000
.964	145.640	.000
.941	159.530	35.880
.919	179.260	156.550
.896	204.770	164.440
.873	209.410	178.240
.851	225.890	193.590
.828	244.420	199.670
.805	263.490	241.720
.783	271.900	259.320
.760	288.930	260.510
.738	291.990	261.650
.715	309.190	261.820
.692	319.830	266.090
.670	319.850	267.440
.647	333.120	267.580
.624	335.120	273.470
.602	336.020	274.710
.579	336.320	275.140
.557	337.700	275.950
.534	338.120	277.310
.511	338.160	281.520
.489	339.150	283.750
.466	339.960	285.680
.443	342.550	286.070
.421	344.010	286.670
.398	344.100	288.500
.376	345.070	290.600
.353	345.600	290.670
.330	348.830	291.170
.308	350.840	292.770
.285	351.170	298.280
.262	352.820	299.230
.240	354.850	302.230
.217	357.940	308.890
.195	358.950	310.700
.172	361.830	315.070
.149	367.460	316.660
.127	368.520	322.970
.104	372.560	327.970
.081	372.890	336.100
.059	375.740	338.150
.036	377.080	339.950
.014	378.490	354.510

Σεπτέμβριος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Παροχή (hm ³ /μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Παροχή (hm ³ /μήνα)
.986	17.590	.000
.964	31.800	.000
.941	185.680	.000
.919	192.250	132.980
.896	203.740	170.800
.873	227.580	194.840
.851	235.450	201.370
.828	244.690	212.900
.805	267.840	232.200
.783	286.660	240.510
.760	301.220	245.060
.738	307.450	255.470
.715	314.970	256.450
.692	320.710	277.620
.670	320.790	278.390
.647	321.180	278.990
.624	321.350	280.490
.602	325.080	281.360
.579	340.280	288.960
.557	348.640	289.400
.534	350.850	297.120
.511	352.110	298.880
.489	352.360	302.090
.466	353.710	304.050
.443	354.120	306.440
.421	356.090	310.470
.398	357.250	313.220
.376	358.660	313.380
.353	358.810	314.370
.330	360.190	317.550
.308	360.570	318.720
.285	362.400	321.810
.262	362.940	322.200
.240	364.890	323.450
.217	369.540	327.520
.195	370.410	333.120
.172	372.490	333.270
.149	374.040	333.820
.127	375.160	334.240
.104	375.540	335.690
.081	384.830	363.040
.059	393.550	365.130
.036	393.740	367.000
.014	403.600	383.470

Οκτώβριος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Παροχή (hm ³ /μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Παροχή (hm ³ /μήνα)
.986	48.450	.000
.964	106.090	.000
.941	178.590	.000
.919	197.180	128.460
.896	201.010	144.020
.873	208.720	190.000
.851	210.280	196.790
.828	269.180	235.440
.805	276.890	239.300
.783	287.280	262.840
.760	323.670	274.420
.738	323.990	275.110
.715	326.920	280.190
.692	329.130	287.720
.670	334.620	290.470
.647	339.780	293.020
.624	341.090	294.990
.602	351.220	297.090
.579	357.820	297.250
.557	360.200	309.670
.534	363.670	312.830
.511	364.260	316.720
.489	367.050	316.760
.466	367.360	317.470
.443	367.610	319.530
.421	370.370	321.730
.398	373.210	324.970
.376	374.940	325.400
.353	375.830	328.490
.330	376.460	332.080
.308	376.810	338.280
.285	378.680	341.600
.262	382.640	342.510
.240	384.510	344.010
.217	385.200	344.080
.195	385.680	348.000
.172	390.730	349.060
.149	391.470	352.830
.127	392.370	353.900
.104	410.510	361.550
.081	412.230	380.200
.059	413.320	382.770
.036	420.600	387.320
.014	423.160	415.380

Νοέμβριος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Παροχή (hm ³ /μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Παροχή (hm ³ /μήνα)
.986	185.180	.000
.964	198.070	.000
.941	206.410	18.660
.919	207.590	154.940
.896	229.800	186.840
.873	249.890	192.730
.851	263.360	199.880
.828	304.250	235.350
.805	333.210	257.220
.783	337.290	257.320
.760	351.650	265.390
.738	352.580	270.230
.715	357.180	275.290
.692	361.070	287.020
.670	365.370	297.650
.647	365.910	303.140
.624	372.260	316.340
.602	379.130	316.870
.579	383.230	317.300
.557	385.760	325.800
.534	391.580	339.200
.511	394.690	346.230
.489	396.590	347.310
.466	400.320	348.980
.443	400.820	349.890
.421	401.570	351.180
.398	402.340	357.950
.376	402.690	360.380
.353	404.030	364.890
.330	405.090	367.480
.308	405.820	369.440
.285	406.100	370.800
.262	408.940	371.370
.240	411.270	375.320
.217	413.860	377.270
.195	415.220	378.920
.172	415.760	386.230
.149	420.170	395.230
.127	421.570	397.790
.104	442.320	401.290
.081	455.090	410.080
.059	457.700	411.290
.036	475.840	422.000
.014	504.570	447.600

Δεκέμβριος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Παροχή (hm ³ /μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Παροχή (hm ³ /μήνα)
.986	239.640	147.080
.964	247.030	206.190
.941	257.830	221.190
.919	265.920	239.120
.896	277.020	240.660
.873	307.700	265.940
.851	308.640	269.000
.828	309.550	270.560
.805	311.410	272.300
.783	334.550	292.330
.760	349.840	293.880
.738	354.410	301.530
.715	359.360	311.360
.692	367.960	312.470
.670	368.770	313.890
.647	375.580	314.100
.624	378.100	318.110
.602	385.160	322.180
.579	390.800	322.320
.557	391.790	324.010
.534	400.930	326.290
.511	407.980	333.410
.489	408.330	339.120
.466	409.630	347.990
.443	409.980	353.950
.421	412.070	357.480
.398	412.490	362.750
.376	412.740	364.410
.353	413.950	373.490
.330	419.300	374.640
.308	423.460	378.140
.285	429.490	380.220
.262	431.510	384.600
.240	443.020	391.490
.217	446.370	395.530
.195	451.170	396.270
.172	456.450	397.310
.149	464.910	398.600
.127	471.090	402.380
.104	472.000	411.240
.081	472.650	432.810
.059	486.340	455.230
.036	508.170	464.030
.014	518.420	472.500

Ιανουάριος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	61.419	80.020
.964	90.008	92.959
.941	108.853	103.208
.919	110.725	104.674
.896	114.162	105.808
.873	124.810	109.456
.851	127.797	110.089
.828	129.075	113.701
.805	130.421	114.537
.783	130.818	121.860
.760	148.166	122.376
.738	150.773	124.268
.715	153.932	127.376
.692	161.468	128.622
.670	161.565	137.245
.647	167.676	138.477
.624	170.623	139.191
.602	172.785	139.745
.579	182.646	139.827
.557	187.061	140.531
.534	189.121	140.536
.511	189.133	140.599
.489	189.342	140.657
.466	189.351	140.910
.443	189.362	140.978
.421	189.841	141.259
.398	189.965	141.311
.376	189.977	141.407
.353	190.012	145.408
.330	190.234	155.103
.308	190.858	158.969
.285	191.357	172.083
.262	194.128	177.123
.240	196.468	177.132
.217	200.046	180.354
.195	203.764	182.516
.172	208.312	184.059
.149	213.317	188.259
.127	226.128	193.074
.104	239.253	193.513
.081	242.741	207.146
.059	243.214	211.593
.036	245.271	240.065
.014	256.312	315.222

Φεβρουάριος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	35.171	65.478
.964	88.784	83.172
.941	91.623	83.389
.919	100.712	87.938
.896	113.136	106.405
.873	122.200	107.573
.851	124.121	113.480
.828	130.298	113.815
.805	134.621	115.938
.783	145.858	116.855
.760	147.057	125.155
.738	151.142	127.196
.715	160.436	131.474
.692	161.447	136.927
.670	173.689	138.755
.647	173.911	139.346
.624	175.902	139.976
.602	178.585	140.215
.579	185.100	140.285
.557	186.140	140.388
.534	187.233	140.472
.511	188.988	141.077
.489	189.092	141.130
.466	189.244	141.494
.443	189.348	141.708
.421	189.406	141.965
.398	189.656	143.312
.376	189.702	143.915
.353	189.770	144.237
.330	190.371	144.501
.308	191.765	147.354
.285	192.435	155.104
.262	192.671	161.377
.240	193.398	162.951
.217	195.263	168.310
.195	195.556	169.979
.172	214.147	205.825
.149	214.354	222.481
.127	232.637	227.466
.104	233.727	259.381
.081	254.106	263.467
.059	296.785	294.836
.036	304.777	297.092
.014	651.495	665.400

Μάρτιος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	65.345	65.345
.964	68.515	73.364
.941	84.586	85.049
.919	96.581	86.576
.896	102.697	96.411
.873	131.278	110.705
.851	131.552	111.377
.828	135.533	118.569
.805	140.561	121.735
.783	150.232	125.604
.760	150.260	135.678
.738	151.298	136.497
.715	159.569	137.738
.692	166.730	138.571
.670	179.094	139.872
.647	179.223	139.906
.624	185.189	140.094
.602	186.419	140.199
.579	187.011	140.212
.557	187.012	140.309
.534	187.787	140.525
.511	188.324	140.668
.489	189.277	140.699
.466	189.485	141.238
.443	189.557	141.386
.421	189.613	143.602
.398	189.687	146.469
.376	189.720	146.753
.353	189.770	147.953
.330	189.874	153.301
.308	190.128	153.404
.285	190.230	156.783
.262	191.181	157.203
.240	191.318	158.733
.217	191.459	163.305
.195	195.976	168.351
.172	197.049	184.944
.149	204.819	189.457
.127	217.229	229.534
.104	225.310	264.349
.081	244.849	269.587
.059	249.429	313.865
.036	277.270	441.416
.014	441.416	447.174

Απρίλιος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	56.530	54.470
.964	63.572	58.431
.941	64.043	75.994
.919	93.547	79.673
.896	101.242	89.954
.873	130.052	109.382
.851	136.352	111.661
.828	137.299	124.037
.805	139.232	129.202
.783	151.281	130.613
.760	152.263	133.352
.738	156.861	137.243
.715	161.378	138.881
.692	175.605	139.200
.670	175.957	139.538
.647	184.482	140.178
.624	186.387	140.218
.602	186.739	140.575
.579	187.520	140.706
.557	187.771	144.909
.534	188.160	146.036
.511	189.584	146.338
.489	189.611	147.817
.466	189.649	151.492
.443	189.652	151.719
.421	189.883	151.810
.398	190.032	155.060
.376	190.258	156.159
.353	190.501	163.998
.330	190.518	164.119
.308	191.613	164.866
.285	191.765	165.740
.262	192.263	165.823
.240	193.213	166.015
.217	195.746	166.881
.195	199.155	167.003
.172	199.197	168.679
.149	209.990	208.400
.127	216.847	249.896
.104	221.401	253.400
.081	240.762	263.655
.059	283.395	266.673
.036	286.298	271.245
.014	394.119	374.813

Μάιος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	56.193	61.928
.964	60.128	62.526
.941	76.762	74.258
.919	98.660	77.264
.896	98.992	88.175
.873	132.273	105.966
.851	132.923	112.139
.828	133.486	119.083
.805	135.105	119.605
.783	140.070	133.424
.760	149.131	139.745
.738	159.389	139.949
.715	178.868	139.975
.692	182.914	140.063
.670	186.294	140.514
.647	186.928	140.566
.624	188.488	140.745
.602	189.474	142.450
.579	189.486	148.211
.557	189.586	151.546
.534	189.613	152.305
.511	189.740	153.267
.489	189.797	156.706
.466	189.993	159.170
.443	190.142	159.396
.421	190.187	164.898
.398	190.495	165.106
.376	191.292	165.481
.353	191.643	165.562
.330	192.369	165.663
.308	192.788	165.701
.285	193.508	165.764
.262	193.858	166.205
.240	194.484	166.632
.217	199.725	166.701
.195	206.489	179.778
.172	209.886	180.157
.149	210.152	180.606
.127	214.499	185.315
.104	219.154	187.587
.081	219.841	192.187
.059	220.131	196.249
.036	229.336	200.964
.014	331.925	289.451

Ιούνιος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	26.756	1.235
.964	64.941	72.144
.941	79.262	76.301
.919	99.840	78.134
.896	100.193	83.071
.873	119.735	106.478
.851	122.328	108.816
.828	129.836	109.033
.805	140.715	122.156
.783	143.039	134.501
.760	155.149	139.217
.738	157.088	139.972
.715	177.240	140.145
.692	183.213	140.415
.670	184.130	140.508
.647	189.201	140.605
.624	189.349	140.619
.602	189.416	141.079
.579	189.583	144.843
.557	189.620	148.429
.534	189.692	149.524
.511	189.723	153.108
.489	189.825	153.725
.466	190.247	156.814
.443	190.385	160.471
.421	190.528	160.953
.398	190.852	161.859
.376	191.049	162.076
.353	191.658	163.558
.330	192.320	163.799
.308	192.816	164.398
.285	193.909	165.270
.262	195.659	166.348
.240	197.250	168.273
.217	204.756	168.449
.195	207.502	168.571
.172	210.009	181.706
.149	211.847	182.846
.127	212.155	183.612
.104	213.281	186.427
.081	213.429	188.270
.059	215.581	189.823
.036	219.381	190.926
.014	220.316	197.882

Ιούλιος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	8.480	.000
.964	67.456	10.179
.941	86.030	72.738
.919	97.759	75.832
.896	100.092	79.820
.873	108.794	96.435
.851	114.141	101.098
.828	123.345	102.753
.805	136.036	122.676
.783	143.683	133.530
.760	151.741	138.025
.738	152.021	139.573
.715	171.523	139.960
.692	178.628	140.331
.670	178.629	140.361
.647	188.889	140.367
.624	188.922	140.478
.602	189.240	140.766
.579	189.519	141.540
.557	189.595	150.344
.534	189.664	151.210
.511	189.672	152.925
.489	189.728	153.462
.466	190.111	159.915
.443	190.534	162.544
.421	190.657	162.641
.398	190.719	164.963
.376	190.909	165.030
.353	190.947	166.564
.330	191.100	168.407
.308	191.507	168.656
.285	195.273	170.215
.262	200.534	170.255
.240	201.311	170.882
.217	202.492	171.522
.195	207.015	175.637
.172	207.614	181.514
.149	210.234	182.896
.127	213.052	183.371
.104	213.190	183.712
.081	214.451	192.373
.059	218.228	195.388
.036	221.409	195.638
.014	221.626	199.757

Αύγουστος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	9.232	.000
.964	68.515	.000
.941	72.494	.000
.919	84.347	52.169
.896	98.086	75.566
.873	101.525	86.415
.851	107.862	91.434
.828	118.897	95.791
.805	131.467	108.616
.783	138.872	116.251
.760	144.910	120.163
.738	147.470	122.374
.715	159.649	124.064
.692	165.343	140.045
.670	166.803	140.147
.647	176.651	140.323
.624	177.004	140.478
.602	178.512	140.930
.579	189.351	149.709
.557	189.545	150.360
.534	189.594	154.629
.511	189.629	156.527
.489	189.677	158.616
.466	190.005	158.886
.443	190.214	159.940
.421	190.295	166.436
.398	190.494	166.884
.376	190.585	170.611
.353	190.637	171.782
.330	191.148	172.375
.308	192.501	174.153
.285	195.445	174.879
.262	200.048	175.463
.240	203.376	175.748
.217	207.936	177.085
.195	208.255	178.513
.172	208.273	179.182
.149	209.915	181.683
.127	214.793	182.339
.104	216.473	182.849
.081	221.683	198.917
.059	222.465	201.083
.036	223.530	201.147
.014	224.328	213.559

Σεπτέμβριος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	8.789	.000
.964	13.707	.000
.941	82.950	.000
.919	92.292	52.169
.896	97.424	75.566
.873	103.390	86.415
.851	109.117	91.434
.828	113.475	95.791
.805	129.211	108.616
.783	137.105	116.251
.760	142.253	120.163
.738	147.099	122.374
.715	156.427	124.064
.692	158.396	140.045
.670	158.698	140.147
.647	162.071	140.323
.624	162.990	140.478
.602	164.742	140.930
.579	174.903	149.709
.557	189.305	150.360
.534	189.360	154.629
.511	189.558	156.527
.489	189.606	158.616
.466	189.963	158.886
.443	190.117	159.940
.421	190.138	166.436
.398	190.138	166.884
.376	190.538	170.611
.353	190.623	171.782
.330	192.267	172.375
.308	194.671	174.153
.285	196.189	174.879
.262	200.073	175.463
.240	200.796	175.748
.217	206.392	177.085
.195	206.919	178.513
.172	208.007	179.182
.149	209.543	181.683
.127	211.609	182.339
.104	216.771	182.849
.081	218.621	198.917
.059	222.455	201.083
.036	223.268	201.147
.014	230.387	213.559

Οκτώβριος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	21.166	.000
.964	43.796	.000
.941	69.136	.797
.919	84.098	60.895
.896	86.851	62.156
.873	92.319	77.515
.851	93.629	84.236
.828	122.498	109.505
.805	127.081	110.737
.783	132.226	117.060
.760	153.372	121.209
.738	154.775	131.364
.715	157.574	132.236
.692	157.977	134.169
.670	158.412	140.089
.647	158.585	140.115
.624	161.124	140.919
.602	164.840	148.595
.579	178.981	149.383
.557	179.125	153.621
.534	186.471	157.100
.511	189.389	157.662
.489	189.874	158.130
.466	189.888	160.205
.443	190.088	162.223
.421	190.318	166.694
.398	190.376	167.633
.376	190.395	169.430
.353	197.076	170.481
.330	197.171	174.566
.308	197.611	175.229
.285	198.561	175.428
.262	200.802	176.122
.240	201.926	179.425
.217	205.972	180.409
.195	206.396	180.595
.172	207.126	181.102
.149	209.626	183.150
.127	211.463	183.768
.104	220.917	184.515
.081	223.454	201.387
.059	223.503	201.966
.036	230.719	202.768
.014	235.646	222.528

Νοέμβριος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	72.974	4.543
.964	76.327	4.662
.941	76.685	9.360
.919	80.968	58.202
.896	86.219	66.763
.873	90.791	67.361
.851	98.767	69.910
.828	132.079	92.321
.805	132.273	104.785
.783	138.943	106.052
.760	143.053	106.458
.738	147.324	117.262
.715	153.869	124.442
.692	157.234	126.685
.670	158.887	135.731
.647	159.598	136.755
.624	170.644	147.749
.602	172.478	148.998
.579	183.398	151.175
.557	183.830	153.472
.534	185.868	158.321
.511	186.698	160.487
.489	188.217	163.281
.466	189.277	164.397
.443	189.306	167.820
.421	189.363	168.597
.398	189.653	171.623
.376	189.828	173.037
.353	190.274	173.769
.330	197.786	176.296
.308	197.899	176.932
.285	200.634	176.976
.262	202.367	178.016
.240	204.125	178.135
.217	204.932	179.723
.195	205.233	184.202
.172	207.309	185.952
.149	207.510	187.440
.127	213.845	190.540
.104	216.461	190.568
.081	221.992	193.043
.059	223.313	193.366
.036	231.600	201.501
.014	239.199	223.638

Δεκέμβριος Πιθανότητα υπέρβασης	Εκτροπή = 0 Ενέργεια (GWh/μήνα)	Εκτροπή = 600 (hm ³ /έτος) Ενέργεια (GWh/μήνα)
.986	86.819	36.604
.964	89.316	78.546
.941	96.413	92.412
.919	105.872	96.275
.896	117.638	100.522
.873	120.291	103.666
.851	121.368	104.408
.828	126.091	105.707
.805	133.238	113.387
.783	133.274	116.429
.760	149.072	120.574
.738	153.272	125.240
.715	153.671	132.964
.692	154.162	134.170
.670	156.834	137.473
.647	156.906	138.784
.624	171.222	139.616
.602	173.928	139.990
.579	178.848	140.478
.557	182.047	140.800
.534	185.215	140.878
.511	187.501	141.107
.489	187.738	141.585
.466	189.346	143.111
.443	189.402	155.945
.421	189.410	157.069
.398	189.501	164.217
.376	189.727	165.293
.353	189.831	167.642
.330	190.151	170.529
.308	190.684	171.669
.285	190.922	174.593
.262	192.548	176.357
.240	197.715	177.188
.217	204.396	179.684
.195	205.887	182.380
.172	207.699	185.600
.149	211.320	186.031
.127	214.689	189.106
.104	227.651	192.609
.081	228.110	194.186
.059	230.690	204.507
.036	243.116	204.722
.014	244.269	207.964