

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ-Δ/ΝΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ-ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ, ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

MINISTRY OF ENVIRONMENT, PLANNING AND PUBLIC WORKS
GENERAL SECR. OF PUBLIC WORKS - DEPART. OF WATER SUPPLY & SEWAGE
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DIVISION OF WATER RESOURCES, HYDRAULIC AND MARITIME ENGINEERING

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΟ:

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΣΦΕΡΟΜΕΝΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ

ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΜΕΙΖΟΝΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΘΗΝΩΝ

RESEARCH PROJECT:

APPRAISAL OF EXISTING POTENTIAL

FOR IMPROVING THE WATER SUPPLY OF GREATER ATHENS

ΤΕΥΧΟΣ 8:

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ

ΤΟΥ ΣΗΜΕΡΙΝΟΥ ΥΔΡΟΔΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΟΡΝΟΥ-ΥΛΙΚΗΣ

VOLUME 8:

CAPACITY ASSESSMENT

OF THE PRESENT MORNOS-YLIKI WATER SUPPLY SYSTEM

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: ΘΕΜ. ΞΑΝΘΟΠΟΥΛΟΣ

SCIENTIFIC DIRECTOR: THEM. XANTHOPoulos

ΣΥΝΤΑΞΗ: ΔΗΜ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ - ΙΩΑΝ. ΝΑΛΜΠΑΝΤΗΣ

AUTHOR: DEM. KOUTSOYIANNIS - IOAN. NALMBANTIS

ΑΘΗΝΑ ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 1989 - ATHENS OCTOBER 1989

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ

Επιστημονικός υπεύθυνος και συντονιστής του Ερευνητικού Έργου είναι ο καθηγητής Θ. Σανθόπουλος. Το τεύχος αυτό έχει γραφεί κυρίως από το Δ. Κουτσογιάννη, που είχε και τη διεύθυνση της ομάδας εργασίας και ακόμη ανέπτυξε το μοντέλο προσομοίωσης των υδρολογικών μεταβλητών. Το Κεφάλαιο 4 έχει γραφεί από τον Ι. Ναλμπάντη, που ανέπτυξε και έτρεξε και το μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος ταμιευτήρων.

Ακόμη στις ερευνητικές εργασίες συμμετείχαν:

- Η Χ. Ανυφαντή στη συλλογή και αρχειοθέτηση των υδρομετεωρολογικών δεδομένων
- Ο Μ. Αφτιάς στα θέματα που αφορούν στην κατανάλωση της Αθήνας και σε γενικότερα τεχνολογικά ζητήματα
- Ο Ν. Μάμασης στη σύνταξη των διαγραμμάτων της μελέτης και στη στατιστική ανάλυση των υδρομετεωρολογικών δεδομένων και επεξεργασία των υδρομετερικών δεδομένων
- Η Σ. Ρώτη στην επεξεργασία των βροχομετερικών και μετεωρολογικών δεδομένων
- Ο Ι. Τζεράνης στην κριτική επεξεργασία παλιότερων μελετών σχετικών με το υδατικό δυναμικό της Υλίκης
- Ο Κ. Τσολακίδης στην ανάλυση των υπόγειων διαφυγών της Υλίκης
- Οι τελειόφοιτοι σπουδαστές Κ. Κουριδάκης και Δ. Μπώκου
- Οι Θ. Στρατάκου και Ν. Γαρίνη στη γραμματειακή κάλυψη του ερευνητικού έργου, και
- Η Ζ. Σωτηρίου στις σχεδιαστικές εργασίες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ερευνητική ομάδα,

Εκφράζει τις θερμές της ευχαριστίες, στη Διεύθυνση Εργων Υδρευσης και Αποχέτευσης του ΥΠΕΧΩΔΕ και ειδικότερα στον τ. διευθυντή κ. Τσαρμακλή, στο διευθυντή κ. Λεονταρίτη και στον τμηματάρχη κ. Ζαχαρία για την εμπιστοσύνη με την οποία μας περιέβαλαν, αναθέτοντάς μας το ερευνητικό αυτό έργο.

Ιδιαίτερα ευχαριστεί τον Πρόεδρο της ΕΥΔΑΠ καθηγητή κ. Χριστούλα, ο οποίος και προκάλεσε την εκπόνηση αυτού του τεύχους, για την πολύτιμη συνεργασία που είχαμε μαζί του, και ακόμα τα στελέχη της ΕΥΔΑΠ κ.κ. Κυριαζή, Παντελίδη, Ξανθάκη και Δαμιανόγλου για τη συνεργασία τους και τις πληροφορίες που μας έδωσαν.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	<u>Σελίδα</u>
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Ιστορικό	1
1.2. Αντικείμενο της έκθεσης	2
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΛΕΚΑΝΗΣ ΥΛΙΚΗΣ	3
2.1. Γενικά	3
2.2. Απορροές Βοιωτικού Κηφισού	3
2.3. Βροχοπτώσεις λεκάνης Υλίκης	4
2.4. Απορροές λεκάνης Υλίκης	5
2.5. Εξατμίσεις Υλίκης	6
2.6. Υπόγειες διαφυγές Υλίκης	7
2.7. Διερεύνηση χρονοσειρών ετήσιων βροχοπτώσεων και απορροών Βοιωτικού Κηφισού	9
3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	14
3.1. Τοποθέτηση του προβλήματος	14
3.2. Κύρια χαρακτηριστικά στοχαστικής δομής εισροής	17
3.3. Γενικές αρχές μοντελοποίησης υδρολογικών μεταβλητών συστήματος ταμιευτήρων ύδρευσης Αθηνών	20
3.3.1. Βασικές παρατηρήσεις και Παραδοχές	20
3.3.2. Γενικό σχήμα προσομοίωσης της απορροής-βροχής	22
3.4. Το μαρκοβιανό μοντέλο παραγωγής χρονοσειρών	25
3.5. Γενική περιγραφή του μοντέλου επιμερισμού	28
4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΔΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	29
4.1. Εισαγωγή	29
4.2. Περιγραφή του μοντέλου - Εξισώσεις τισοζυγίου για κάθε ταμιευτήρα	30
4.2.1. Ταμιευτήρας Ευήνου	30
4.2.2. Ταμιευτήρας Μόρνου	32
4.2.3. Λίμνη Υλίκη	34
4.2.4. Ταμιευτήρας αναρρύθμισης	36

4.3. Κανόνες λειτουργίας	37
4.3.1. Σημερινό υδροδοτικό σύστημα	37
4.3.1.α. Μεμονωμένος ταμιευτήρας Μόρνου	37
4.3.1.β. Μεμονωμένη εκμετάλλευση Λίμνης Υλίκης	38
4.3.1.γ. Συνδυασμένοι ταμιευτήρες Μόρνου-Υλίκης	39
4.3.2. Μελλοντικό υδροδοτικό σύστημα	40
4.3.2.α. Συνδυασμένοι ταμιευτήρες Μόρνου-Ευήνου	40
4.3.2.β. Συνδυασμένοι ταμιευτήρες Μόρνου-Ευήνου- Ταμιευτήρα αναρρύθμισης (Σχ. 14)	41
4.3.2.γ. Συνδυασμένοι ταμιευτήρες Μόρνου-Ευήνου-Υλίκης	41
4.3.2.δ. Συνδυασμένοι ταμιευτήρες Μόρνου-Ευήνου- Ταμιευτήρα αναρρύθμισης (Σχ. 15)	42
5. ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ ΣΗΜΕΡΙΝΟΥ ΥΔΡΟΔΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	44
5.1. Επίπεδο αξιοπιστίας	44
5.2. Ασφάλεια έναντι ατυχημάτων	45
5.3. Παράλληλες χρήσεις νερού	47
5.4. Χαρακτηριστικές στάθμες ταμιευτήρων	48
5.5. Σημερινά αποθέματα νερού	50
5.6. Παροχετευτικότητες αγωγών	50
5.7. Εισροές	50
5.8. Κατανάλωση νερού	51
5.9. Κανόνες λειτουργίας	53
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	56
6.1. Απόληψη από τον ταμιευτήρα Μόρνου	56
6.2. Απόληψη από τη λίμνη Υλίκη	56
6.3. Απόληψη από το σύστημα Υλίκης-Μόρνου	56
6.4. Κίνδυνοι μη επάρκειας του συστήματος για το άμεσο μέλλον	58
6.5. Τελικά συμπεράσματα	59

ΠΙΝΑΚΕΣ**ΣΧΗΜΑΤΑ**

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ιστορικό

Το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Εργών με την από 25 Φεβρ. 1988 απόφασή του, ανέθεσε στον Τομέα Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Εργών του Εθν. Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με επιστημονικό υπεύθυνο τον καθηγητή Θεμ. Ξανθόπουλο, το ερευνητικό έργο με τίτλο "Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών".

Το ερευνητικό αυτό έργο περιλαμβάνει δύο μέρη. Το πρώτο μέρος που εκπονήθηκε στο Β' εξάμηνο του 1988 και παραδόθηκε στις αρχές του 1989, αφορούσε κυρίως στη συγκέντρωση και αξιολόγηση των προγενέστερων υδρολογικών μελετών των λεκανών Μόρνου και Ευήνου, και στη συλλογή, συστηματοποίηση, αξιολόγηση και αρχειοθέτηση των υδρομετεωρολογικών δεδομένων των λεκανών αυτών. Το Β' μέρος αποσκοπούσε κατ' αρχήν στις τελικές εκτιμήσεις του υδατικού δυναμικού των δύο λεκανών και των εναλλακτικών δυνατοτήτων αξιοποίησης του για την ύδρευση της Αθήνας. Μετά από πρόταση της ερευνητικής ομάδας, το αντικείμενο αυτό διευρύνθηκε με την προσθήκη και της διερεύνησης του υδατικού δυναμικού της Υλίκης. Η ανάθεση του διευρυμένου αντικειμένου του Β' μέρους έγινε με την από 31 Μαΐου 1988 απόφαση του υπουργού ΠΕΧΩΔΕ.

Η παρούσα προκαταρκτική έκθεση, δεν προβλέπονταν στις συμβατικές υποχρεώσεις της ερευνητικής ομάδας, αλλά εκπονήθηκε μετά από σχετικό αίτημα της ΕΥΔΑΠ, και τη σύμφωνη γνώμη του ΥΠΕΧΩΔΕ, προκειμένου να διευκολύνει την ΕΥΔΑΠ στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον άμεσο προγραμματισμό νέων έργων στο υδραγωγείο Υλίκης, αλλά και τον προγραμματισμό της λειτουργίας των υδραγωγείων Μόρνου και Υλίκης για τα επόμενα έτη.

Λόγω του επείγοντος χαρακτήρα της η έκθεση αυτή εκπονήθηκε με εντατικό ρυθμό σε διάστημα λίγο μικρότερο από δύο μήνες (Σεπτέμβριος - Οκτώβριος 1989).

1.2. Αντικείμενο της έκθεσης

Τα ερωτήματα στα οποία προσπαθεί να απαντήσει η έκθεση αυτή είναι τα ακόλουθα.

1. Ποιά είναι η σημερινή ετήσια δυνατότητα απόληψης από τον ταμιευτήρα Μόρνου και τη λίμνη Υλίκη, μεμονωμένα και σε συνδυασμό;
2. Ποιά είναι η αναμενόμενη αύξηση στη δυνατότητα του συστήματος, αν αυξηθεί η παροχετευτικότητα του υδραγωγείου Υλίκης από $7.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ που είναι σήμερα, σε $11.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ ή $15.0 \text{ m}^3/\text{sec}$;
3. Ποιοι είναι στο άμεσο μέλλον (περίπου σε μια δεκαετία από σήμερα) οι κίνδυνοι ανεπάρκειας του υδροδοτικού συστήματος, με βάση τα σημερινά αποθέματα νερού στο Μόρνο και στην Υλίκη, και πώς αυτοί μπορούν να ποσοτικοποιηθούν;

Διευκρινίζεται ότι η αύξηση της παροχετευτικότητας του υδραγωγείου Υλίκης προγραμματίζεται από την ΕΥΔΑΠ να πραγματοποιηθεί με νέο αντλιοστάσιο και ανεξάρτητο αγωγό που θα καταλήγει στον υδαταγωγό Μόρνου, ανάντη της σήραγγας Κιθαιρώνα. Μια τέτοια αύξηση είχε προταθεί και από την ερευνητική ομάδα ως δυνατότητα για την ενίσχυση της υδροδότησης της Αθήνας, αλλά παράλληλα (και κυρίως) ως εξασφάλιση ενός ανεξάρτητου δρόμου εναλλακτικού προς το κύριο υδραγωγείο Μόρνου, για την περίπτωση διακοπής της λειτουργίας του λόγω βλάβης. Επί πλέον ο αγωγός αυτός όπως προγραμματίζεται από την ΕΥΔΑΠ, με ανεξάρτητη χάραξη, θα αποτελεί και εναλλακτικό δρόμο προς το υφιστάμενο υδραγωγείο Υλίκης.

Οι απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα, όπως δίνονται στην παρούσα έκθεση, θεωρούμε ότι αποτελούν μια πρώτη, πολύ καλή, προσέγγιση, αλλά δε θα πρέπει να θεωρηθούν ως τελικές. Πράγματι, μέχρι το χρόνο εκπόνησης των εργασιών της έκθεσης αυτής δεν είχε ολοκληρωθεί η επεξεργασία των δεδομένων της λεκάνης Υλίκης, ούτε είχε ολοκληρωθεί η ανάπτυξη των μοντέλων προσομοίωσης του συστήματος. Κατά συνέπεια είναι πιθανό ότι με την τελική έκθεση του ερευνητικού προγράμματος θα υπάρξουν μικρές βελτιώσεις στις εκτιμήσεις της παρούσας έκθεσης.

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΛΕΚΑΝΗΣ ΥΛΙΚΗΣ

2.1. Γενικά

Η κύρια συνιστώσα της εισροής στην Υλίκη προέρχεται από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, έκτασης 2010 km^2 (σύμφωνα με την οριστική μελέτη αντιπλημμυρικών έργων Β. Κηφισού (Κωνσταντινίδης, 1984)). Μετά την κατασκευή των έργων αποξήρανσης της πρώην λίμνης Κωπαΐδας, η απορροή του Β. Κηφισού οδηγείται μέσω της σήραγγας Καρδίτσας στην Υλίκη. Η απορροή της καθαυτό λεκάνης Υλίκης, έκτασης 421.9 km^2 (στην οποία περιλαμβάνονται και $82,9 \text{ km}^2$ της κλειστής υπολεκάνης Βάγιας) δε μετριέται αλλά εκτιμάται ότι είναι πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής εισροής στην Υλίκη.

2.2. Απορροές Βοιωτικού Κηφισού

Οι απορροές του Β. Κηφισού σήμερα μετριούνται (από την ΕΥΔΑΠ και το ΥΠΕΧΩΔΕ) στη νέα διώρυγα Καρδίτσας, ανάντη της εισόδου της σήραγγας. Η νέα διώρυγα και σήραγγα Καρδίτσας, σύμφωνα με τα αρχεία των υδρολογικών παρατηρήσεων, άρχισε να λειτουργεί το 1977, ενώ προηγούμενα λειτουργούσε η παλιότερη σήραγγα, μικρότερης διατομής, η οποία σήμερα παραμένει ως επικουρική διέξοδος του νερού σε περίπτωση μεγάλης πλημμύρας (βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο).

Τα υδρομετρικά δεδομένα ξεκινούν από το 1895, οπότε άρχισε η λειτουργία της παλιάς σήραγγας, αλλά συστηματικές μετρήσεις υπάρχουν από το 1907. Υπάρχουν ορισμένα κενά στις μετρήσεις κατά τα έτη 1964-65 έως 1968-69 και 1976-77.

Η μέση απορροή όλης της περιόδου 1907-1988 είναι $414.8 * 10^6 \text{ m}^3$ αντιστοιχεί σε 206.4 mm . Η χρονοσειρά των απορροών εμφανίζει σαφείς διακυμάνσεις με μία ευδιάκριτη πτωτική τάση μετά το έτος 1920 περίπου (βλ. σχ. 1, 2 και 3). Ετσι η μέση απορροή της τελευταίας 20ετίας, με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα είναι $345.6 * 10^6 \text{ m}^3$ αντιστοιχεί σε 171.9 mm . Το θέμα αυτό θα διερευνηθεί πιο αναλυτικά στη συνέχεια.

Σχετικά με την αξιοπιστία των δεδομένων των παροχών της σήραγγας Καρδίτσας έχουμε να παρατηρήσουμε τα ακόλουθα:

1. Για τα προ του 1977 δεδομένα δε μπορούμε να έχουμε τεκμηριωμένη άποψη, δεδομένου ότι ο σχετικός υδρομετρικός σταθμός δεν υφίσταται πλέον.
2. Τα δεδομένα του σημερινού υδρομετρικού σταθμού της ΕΥΔΑΠ εμφανίζουν μια λογική εικόνα, δε συμβαίνει όμως το ίδιο και με τα δεδομένα του σταθμού του ΥΠΕΧΩΔΕ. Τα δεδομένα των δύο σταθμών δε συμφωνούν μεταξύ τους.
3. Η καμπύλη στάθμης-παροχής της ΕΥΔΑΠ έχει προκύψει από υδραυλικούς υπολογισμούς, και δεν έχει ουσιαστικά ελεγχθεί με υδρομετρήσεις (υπάρχει μόνο 1 υδρομέτρηση στις 29-3-1978). Κατά συνέπεια η καμπύλη είναι μειωμένου βαθμού αξιοπιστίας. Η καμπύλη αυτή ελέγχθηκε στο υπολογιστικό της μέρος και βρέθηκε σύμφωνη με τις αρχές της Υδραυλικής.
4. Και τα δύο σταθμήμετρα (της ΕΥΔΑΠ και του ΥΠΕΧΩΔΕ) κρίνονται ως αναξιόπιστα, αφού έχουν υποδιαιρέσεις ανά 25 cm.
5. Απαράδεκτη κατάσταση για τις μετρήσεις δημιουργούν τα χωμάτινα εμπόδια - φράγματα που κατασκευάζουν οι αγρότες της Κωπαΐδας το καλοκαίρι μέσα στη διώρυγα Καρδίτσας, για να ταμιεύσουν τις θερινές απορροές. Η κατάσταση αυτή θα πρέπει να αντιμετωπιστεί άμεσα (π.χ. με κατασκευή θυροφραγμάτων).

Το θέμα της αξιοπιστίας των μετρήσεων θα εξεταστεί περαιτέρω στην πορεία της εκπόνησης του ερευνητικού προγράμματος.

2.3. Βροχοπτώσεις λεκάνης Υλίκης

Στη λεκάνη Υλίκης υπάρχουν οι βροχομετρικοί σταθμοί ΑΛΙΑΡΤΟΣ, ΚΑΛΛΙΘΕΑ, ΜΟΥΡΙΚΙ, ΤΑΝΑΓΡΑ, ενώ πολύ κοντά βρίσκεται και το σταθμός της ΑΛΙΑΡΤΟΥ με δεδομένα από το 1907 (ΕΜΥ από 1960, Ε.Α.Κ. από 1907 μέχρι 1942 και ΥΠΓΕ από 1937 μέχρι 1966).

Από τα δεδομένα των σταθμών αυτών, μετά τους σχετικούς ελέγχους αξιοπιστίας, αναγωγές, συμπληρώσεις κλπ, προέκυψαν δείγματα επιφανειακών βροχοπτώσεων για τη λεκάνη και τη λίμνη Υλίκη. Η μέση βροχόπτωση της λεκάνης και της λίμνης είναι 509.6 mm και 427.5 mm αντίστοιχα (περίοδος 1954-55 έως 1987-88).

2.4. Απορροές λεκάνης Υλίκης

Οπως προαναφέρθηκε, δεν υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων για τις απορροές της λεκάνης Υλίκης. Μια χονδροειδής εκτίμηση της απορροής της λεκάνης σε μέση ετήσια βάση προέκυψε σύμφωνα με τα ακόλουθα.

1. Σύγκριση με τη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού

Η μέση βροχόπτωση της λεκάνης Β. Κηφισού, σύμφωνα με την πρόσφατη οριστική μελέτη αντιπλημμυρικών έργων λεκάνης Β. Κηφισού (Δ. Κωνσταντινίδης) είναι 748.5 mm. Θεωρώντας τη μέση απορροή της τελευταίας 20ετίας (171.9 mm) ο συντελεστής απορροής της λεκάνης Β. Κηφισού προκύπτει ίσος με 0.23.

Στη λεκάνη Υλίκης η ετήσια βροχόπτωση είναι αρκετά μικρότερη: 509.6 mm (για την περίοδο 1954-55 έως 1987-88). Κατά συνέπεια αναμένεται ένας αρκετά μικρότερος συντελεστής απορροής, της τάξης του 0.10 ως 0.15. Σε αυτό συνηγορούν και οι εμφανίσεις καρστικών σχηματισμών και της κλειστής υπολεκάνης Βάγιας έκτασης 82.9 km² μέσα στη λεκάνη. Κατά συνέπεια η μέση ετήσια απορροή της λεκάνης Υλίκης εκτιμάται σε 51 mm ως 76.5 mm ή $21.5 * 10^6$ m³ ως $32 * 10^6$ m³.

2. Μέθοδος Turk

Για μέση βροχόπτωση λεκάνης 509.6 mm και μέση θερμοκρασία αέρα 16.5° C προκύπτει

$$L = 300 + 25 * 16.5 + 0.05 * 16.5^3 = 937.1 \quad \text{και}$$

$$ET = \frac{509.6}{[0.9 + (509.6/937.1)^2]^{1/2}} = 466.0 \quad \text{mm},$$

Κατά συνέπεια η απορροή εκτιμάται σε $509.6 - 466.0 = 43.6$ mm, ήτοι ποσοστό 8.6% της βροχόπτωσης, δηλαδή και πάλι η

εκτίμηση είναι παρόμοια με την παραπάνω.

Τελικά υιοθετήθηκε η τιμή των $21.5 * 10^6 \text{ m}^3$, η οποία αντιστοιχεί στο 6% της εισροής στη σήραγγα Καρδίτσας. Κατά συνέπεια για να συνυπολογιστούν οι απορροές της λεκάνης Υλίκης, οι εισροές της σήραγγας Καρδίτσας αυξήθηκαν κατά 6%. Η αύξηση αυτή είναι πιο συντηρητική από αντίστοιχες παραδοχές παλιότερων μελετών.

Συγκεκριμένα οι Αλτηγός & Μαχαίρας το 1964, ο Μαχαίρας το 1967, η Continental Drilling το 1967 και οι Γκόφας - Σταθόπουλος εκτιμούν την απορροή της λεκάνης Υλίκης στο 10% περίπου της εισροής της σήραγγας Καρδίτσας, ή σε $42 - 50 * 10^6 \text{ m}^3$ περίπου. Η εκτίμηση αυτή κατά την άποψή μας είναι υπερβολική, δεδομένου ότι οδηγεί σε συντελεστή απορροής ίσο περίπου με αυτό του Βοιωτικού Κηφισού, πράγμα που δεν πρέπει να ισχύει, επειδή στη λεκάνη Υλίκης εμφανίζονται σαφώς μικρότερες βροχοπτώσεις, ενώ γενικά υπάρχει μια σχέση ομόρροπης μεταβολής του συντελεστή απορροής με το ύψος βροχής. Πιο πολύ πλησιάζει η εκτίμησή μας με αυτή του ΙΓΜΕ (1986), κατά την οποία οι απορροές της Υλίκης είναι $30 * 10^6 \text{ m}^3$ ή ποσοστό 8% των εισροών της σήραγγας Καρδίτσας που το ΙΓΜΕ τις θεωρεί $375 * 10^6 \text{ m}^3$.

2.5. Εξατμίσεις Υλίκης

Παλιότερα οι εξατμίσεις της Υλίκης υπολογίζονταν με βάση τα δεδομένα του εξατμισιμέτρου της λίμνης Μαραθώνα. Η ενασχόλησή μας με το θέμα και η επί τόπου διεξοδική έρευνα, μας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα δεδομένα αυτά δεν είναι επαρκώς αξιόπιστα, και θεωρήσαμε ακριβέστερη την εκτίμηση με τη μέθοδο Πένμαν, με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα του σταθμού Αλιάρτου της ΕΜΥ, ο οποίος κρίνεται ότι παρουσιάζει αυξημένη αξιοπιστία. Η μέση ετήσια εξάτμιση της λίμνης για την περίοδο 1957-58 έως 1986-87 προέκυψε ίση με 1435.5 mm. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο 73% των δεδομένων του εξατμισιμέτρου Αλιάρτου, ποσοστό που κρίνεται ως εύλογο.

2.6. Υπόγειες διαφυγές Υλίκης

Από το ισοζύγιο της λίμνης Υλίκης, με δεδομένη:

- την εισροή (απορροή από Βοιωτικό Κηφισό και λεκάνη Υλίκης, και βροχόπτωση στη λίμνη),
- την εξάτμιση,
- την απόληψη από το υδραγώγειο Μουρικίου (εκτιμάται από την ΕΥΔΑΠ με βάση τους χρόνους άντλησης) και Κωπαΐδας (εκτιμάται επίσης από την ΕΥΔΑΠ), και
- τη διαφορά αποθήκευσης στη λίμνη (προκύπτει άμεσα από τις μετρήσεις στάθμης)

προκύπτουν οι ποσότητες που διαφεύγουν υπόγεια μέσω των καταβοθρών και λοιπών διόδων του καρστικού υπόβαθρου της Υλίκης.

Η εκτίμηση αυτών των ποσοτήτων είναι ακριβέστερη κατά τους θερινούς μήνες (Ιούνιος - Σεπτέμβριος), οπότε μηδενίζονται οι εισροές από τη σήραγγα Καρδίτσας (λόγω έμφραξης της διώρυγας) και από τη λεκάνη απορροής της Υλίκης.

Οπως φαίνεται στο σχήμα 10, όπου έχουν απεικονιστεί οι διαφυγές σε συνάρτηση με τη στάθμη της λίμνης, υπάρχει σαφής συσχέτιση των διαφυγών με τη στάθμη, πράγμα άλλωστε αναμενόμενο. Σημειώνεται ότι για χαμηλή στάθμη της λίμνης εμφανίζονται και αρνητικές απώλειες, που πρέπει να ερμηνευτούν ως εισροές από τον υπόγειο ορίζοντα προς τη λίμνη. Η ύπαρξη εισροών για χαμηλές στάθμες δε θα πρέπει να θεωρηθεί αδύνατη, αλλά πάντως δεν αποκλείεται οι αρνητικές τιμές να προέρχονται και από τις συνδυασμένες ανακρίβειες στις εκτιμήσεις των συνιστώσων του υδατικού ισοζυγίου.

Η σχέση διαφυγών - στάθμης περιγράφεται ικανοποιητικά από τη δευτεροβάθμια εξίσωση

$$L = 0.0124 \cdot z^2 - 0.999 z + 17.461 \quad (2.1)$$

όπου L οι διαφυγές σε $m^3 \cdot 10^6$ ανά μήνα και
z το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης της λίμνης Υλίκης

Το τυπικό σφάλμα στην παραπάνω σχέση είναι $2.636 \cdot 10^6 m^3/\text{μήνα}$
και ο συντελεστής συσχέτισης είναι $r=0.904$. Το τυπικό σφάλμα

αυτό δε θεωρείται υπερβολικό, αφού η δίαιτα της ροής σε καρστικούς ασβεστόλιθους εμφανίζει τυχαίες διακυμάνσεις. Αλλωστε δεν αποτελεί προβλήμα στη μαθηματική προσομοίωση της λειτουργίας του υδροδοτικού συστήματος, γιατί μπορεί να προσομοιώθει εύκολα και η στοχαστική συνιστώσα.

Οπως φαίνεται στο σχήμα 10, η παραπάνω εξίσωση προσαρμόζεται επίσης ικανοποιητικά και στα δεδομένα του Απριλίου και Μαΐου, παρόλο που οι μήνες αυτοί δε χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της. Στο σχήμα 11 φαίνεται ότι η εξίσωση δεν προσαρμόζεται καλά στα δεδομένα των χειμερινών μηνών (Οκτωβρίου - Μαρτίου). Γιά καλύτερη προσαρμογή η καμπύλη μετατέθηκε κατά $4.7 * 10^6 \text{ m}^3/\text{μήνα}$ προς την περιοχή των υψηλών παροχών. Ετσι η εξίσωση τροποποιείται σε

$$L = 0.0124 \cdot z^2 - 0.999 z + 22.161 \quad (2.2)$$

Με αυτή τη μορφή της το τυπικό σφάλμα είναι $5.960 * 10^6 \text{ m}^3$

Μία απόπειρα ερμηνείας της εμφανιζόμενης διαφοράς στη δίαιτα των διαφυγών τους χειμερινούς και θερινούς μήνες είναι η ακόλουθη: Τους χειμερινούς μήνες εμφανίζεται ανύψωση της στάθμης της λίμνης, η οποία πρέπει να γίνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από την αντίστοιχη ανύψωση του υπόγειου ορίζοντα, λόγω των εισροών από το Βοιωτικό Κηφισό, ενώ το καλοκαίρι, λόγω των εντατικών αντλήσεων, πραγματοποιείται ταπείνωση της στάθμης της λίμνης σε ρυθμό εντονότερο από τον αντίστοιχο ρυθμό ταπείνωσης του υπογείου ορίζοντα. Και εδώ πάντως δεν πρέπει να αποκλειστεί η διαφορά να οφείλεται (εν μέρει) σε συνδυασμένες ανακρίβειες στις εκτιμήσεις των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου.

Τέλος στα σχήματα 10 και 11 έχουν χαραχτεί για λόγους σύγκρισης και διάφορες καμπύλες που είχαν καταρτιστεί σε προηγούμενες μελέτες. Γενικά παρατηρείται ότι όλες αυτές οι καμπύλες πλησιάζουν περισσότερο στην προτεινόμενη από μας καμπύλη του σχ. 11 η οποία αντιστοιχεί στους χειμερινούς μήνες.

**2.7. Διερεύνηση χρονοσειρών ετήσιων βροχοπτώσεων και απορροών
Βοιωτικού Κηφισού**

Οπως προαναφέρθηκε, (παρ. 2.2), η χρονοσειρά των απορροών του Βοιωτικού Κηφισού, στη διώρυγα Καρδίτσας, φαίνεται να εμφανίζει μια τάση (trend). Στο σχήμα 1, όπου απεικονίζεται η εν λόγω χρονοσειρά φαίνεται ότι η τάση αυτή είναι ανοδική μέχρι το 1920-21 περίπου, ενώ στη συνέχεια μέχρι και σήμερα γίνεται πτωτική. Η τάση είναι πιο ευδιάκριτη στα σχήματα 2 και 3, όπου αντί της χρονοσειράς των απορροών έχει απεικονιστεί η σειρά των κινούμενων μέσων όρων (moving averages) 5 και 10 ετών αντίστοιχα (π.χ. στο διάγραμμα 3 η τιμή του έτους 1930-31 είναι ο μέσος όρος των απορροών της δεκαετίας 1921-22 μέχρι 1930-31).

Η πτωτική τάση μετά το 1920 θα μπορούσε κατ' αρχήν να εξηγηθεί εν μέρει από την όλο και πιο εντατική εκμετάλλευση της απορροής για αρδευτικούς σκοπούς, που πραγματοποιείται τους θερινούς μήνες, ενώ είναι δυνατό να έχουν επιδράσει σε αυτή την κατεύθυνση και τα αντιπλημυρικά έργα της ΒΟΟΤ, που κατασκευάστηκαν στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού περί το 1940. (Η προσωρινή αποθήκευση των πλημμυρών ανάντη των θυροφραγμάτων, θα μπορούσε να εκληφθεί ότι μειώνει την απορροή στη σήραγγα Καρδίτσας, επειδή πιθανόν ένα τμήμα της επιφανειακής απορροής κατεισδύει προς τους υπόγειους υδροφορείς).

Παρ' όλα αυτά υπάρχουν 3 λόγοι που μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η πτωτική τάση συνδυάζεται με κλιματική μεταβολή. Οι λόγοι αυτοί είναι:

1. η εμφανιζόμενη μείωση της μέσης απορροής από το 1920 μέχρι σήμερα είναι πολύ μεγάλη, και δε μπορεί να δικαιολογηθεί από τις επί πλέον ποσότητες που χρησιμοποιήθηκαν για άρδευση,
2. η εμφανιζόμενη πτωτική τάση είναι συνεχής, και δεν παρουσιάζεται με τη μορφή άλματος, οπότε θα μπορούσε να αποδοθεί στα αντιπλημυρικά έργα που κατασκευάστηκαν, και το κυριότερο,
3. η πτωτική τάση της απορροής φαίνεται να συνοδεύεται και από

αντίστοιχη πτωτική τάση της βροχής.

Οι παράλληλες τάσεις βροχής και απορροής μπορούν να διαπιστωθούν στα σχήματα 1 έως 3, όπου εκτός από τις χρονοσειρές και τις σειρές των κινούμενων μέσων όρων των απορροών έχουν χαραχτεί και οι αντίστοιχες σειρές της βροχής. Χρησιμοποιήθηκε η βροχή του σταθμού Αλιάρτου, ο οποίος βρίσκεται στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού και έχει τη μεγαλύτερη περίοδο λειτουργίας, που ξεκινά από το 1907. Η αντίστοιχία των τάσεων βροχής και απορροής είναι πιο εμφανής στα σχήματα 2 και 3. Η αντίστοιχία αυτή επιβεβαιώνεται επίσης και από το σχήμα 4, όπου έχει χαραχτεί η διπλή αθροιστική καμπύλη των χρονοσειρών βροχής-απορροής, η οποία εμφανίζεται με ενιαία κλίση σε όλη την περίοδο από το 1907-08 μέχρι σήμερα. Τέλος η σχετική διερεύνηση έδειξε ότι στις λεκάνες Μόρνου και Ευήνου δε διακρίνονται εμφανείς παράλληλες τάσεις, όπως φαίνεται στα σχήματα 5 και 6. Σημειώνεται πάντως ότι οι περίοδοι για τις οποίες υπάρχουν δείγματα στις λεκάνες Μόρνου και Ευήνου δεν είναι αρκετά μεγάλες, ώστε να μπορούν να διαπιστωθούν με ασφάλεια τυχόν τάσεις των χρονοσειρών.

Ας έλθουμε τώρα στην ποσοτική περιγραφή των τάσεων βροχής στην Αλιάρτο και απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Ειδικότερα θα εξετάσουμε την πτωτική τάση μετά το 1920-21.

Η ύπαρξη τάσης ελέγχεται συνήθως με τη δοκιμή του Κένταλ (Kendall test), η οποία εξετάζει το σχετικό μέγεθος (τάξη) των διαδοχικών στοιχείων ενός ιστορικού δείγματος. Η μηδενική στατιστική υπόθεση που χρησιμοποιούμε είναι ότι δεν υπάρχει καμιά τάση στο καθένα από τα δύο δείγματα, με εναλλακτική υπόθεση ότι υπάρχει πτωτική τάση. Η διατύπωση αυτή των υποθέσεων επιβάλλει ένα μονόπλευρο στατιστικό έλεγχο της σχετικής παραμέτρου του Κένταλ. Το αποτέλεσμα του ελέγχου για τη βροχή είναι ότι η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται σε όλα τα συνήθη επίπεδα σημαντικότητας ($10\% - 5\% - 1\%$) ενώ για να γίνει αποδεκτή θα έπρεπε να δεχτούμε επίπεδο σημαντικότητας 0.02% . Όμοιο είναι και το αποτέλεσμα και για την απορροή, όπου για να αποδεχθούμε τη μηδενική υπόθεση θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε επίπεδο σημαντικότητας 0.04% . Κατά συνέπεια η ύπαρξη πτωτικής τάσης και στη βροχή και στην απορροή πρέπει να θεωρείται δεδομένη.

Οπως διαπιστώνεται από τα σχήματα 7 έως 9 (αντίστοιχα με τα σχήματα 1 έως 3, αλλά μόνο για την περίοδο μετά το 1920-21) οι πτωτικές τάσεις βροχής και απορροής μπορούν να περιγραφούν με γραμμικές συναρτήσεις του χρόνου. Οι συναρτήσεις αυτές προκύπτουν με τη γνωστή μεθοδολογία της γραμμικής παλινδρόμησης:

$$P = 785.0 - 3.25 t \quad (2.3)$$

$$Q = 263.4 - 1.63 t \quad (2.4)$$

όπου, P : η μέση βροχόπτωση της Αλιάρτου σε mm
 Q : η απορροή στη διώρυγα Καρδίτσας σε mm, και
 t : ο χρόνος σε έτη, με αφετηρία ($t=0$) το υδρολογικό έτος 1919-20.

Οι συντελεστές συσχέτισης στις παραπάνω γραμμικές σχέσεις είναι 0.444 και 0.463 αντίστοιχα.

Για μια περαιτέρω επιβεβαίωση της ύπαρξης πτωτικής τάσης ελέγχεται η σημαντικότητα του συντελεστή της ανεξάρτητης μεταβλητής β στις παραπάνω γραμμικές σχέσεις (-3.25 και -1.63 αντίστοιχα). Χρησιμοποιείται ως μηδενική υπόθεση η $\beta=0$ και εναλλακτική η $\beta<0$ (μονόπλευρος έλεγχος). Οι έλεγχοι και για τις δυο μεταβλητές δείχνουν ότι η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται για όλα τα συνήθη επίπεδα σημαντικότητας, ενώ για να μην απορριφθεί θα έπρεπε να δεχτούμε επίπεδο σημαντικότητας 0.003%. Κατά συνέπεια οι παραπάνω γραμμικές πτωτικές τάσεις είναι στατιστικά σημαντικές.

Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί φαίνονται ορισμένες χαρακτηριστικές μέσες τιμές των απορροών στη διώρυγα Καρδίτσας, που προκύπτουν είτε άμεσα από την ιστορική χρονοσειρά, είτε έμμεσα από την παραπάνω γραμμική σχέση που αναφέρεται στη μέση τιμή της απορροής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΤΗ ΔΙΩΡΥΓΑ ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ

α/α	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ	ΑΠΟΡΡΟΗ mm	ΑΠΟΡΡΟΗ $m^3 * 10^6$
1	Ολόκληρο το ιστορικό δείγμα από το 1907-08 μέχρι το 1987-88	206.4	414.8
2	Ιστορικό δείγμα περιόδου πτωτικής τάσης από το 1920-21 μέχρι 1987-88	209.5	421.2
3	Ιστορικό δείγμα της εικοσαετίας με τη μέγιστη υδροφορία (1920-21 μέχρι 1939-40)	251.2	505.0
4	Ιστορικό δείγμα της τελευταίας εικοσαετίας με την ελάχιστη υδροφορά (1968-69 μέχρι 1987-88 - με ελλείψεις)	171.9	345.6
5	Ετος 1920-21, με βάση τη γραμμική σχέση	261.8	526.2
6	Ετος 1987-88, με βάση τη γραμμική σχέση	152.6	306.6
7	Ετος 2008-09 με επέκταση της γραμμικής σχέσης	118.3	237.8

Παρατηρούμε ότι οι μέσες τιμές του πίνακα 1 εμφανίζουν εντονότατες διακυμάνσεις, και αυτό δημιουργεί σοβαρό πρόβλημα στην πρόβλεψη των εισροών της Υλίκης για τα επόμενα υδρολογικά έτη. Θα πρέπει να τονιστεί ότι δεν είναι δυνατό να προβλέψουμε τη χρονική εξέλιξη της τάσης στα επόμενα χρόνια.

Σήμερα η μέση τιμή των απορροών στη διώρυγα Καρδίτσας βρίσκεται στο επίπεδο των $306.6 * 10^6 m^3$, ενώ αν συνεχιστεί η πτωτική τάση, σε 20 χρόνια θα πέσει στα $237.8 * 10^6 m^3$. Δεν αποκλείεται όμως και η αναστροφή της τάσης κατά τα επόμενα χρόνια, σε τρόπο ώστε να ξαναφτάσουμε π.χ. στη μέγιστη μέση τιμή των $526.2 * 10^6 m^3$. Άλλωστε πριν το 1920-21 είχε πράγματι εμφανιστεί πολύ έντονη αυξητική τάση.

Μετά τα παραπάνω θα δεχτούμε ως μέση πρόβλεψη για τα επόμενα χρόνια τη σημερινή τιμή των $306.6 * 10^6 m^3$, που μαζί με την

προσαύξηση κατά 6% για την απορροή της λεκάνης Υλίκης, φτάνει τα $325.0 * 10^6 \text{ m}^3$. Ακόμα θα χρησιμοποιήσουμε ως εναλλακτική αισιόδοξη πρόβλεψη τη μέση τιμή της τελευταίας 20ετίας με την ελάχιστη υδροφορία, δηλαδή $345 * 10^6 \text{ m}^3$, που μαζί με την απορροή της λεκάνης Υλίκης φθάνει τα $365.7 * 10^6 \text{ m}^3$. Πάντως δεν είναι απίθανο όπως εξηγήθηκε παραπάνω η μέση εισροή στην Υλίκη κατά τα επόμενα έτη να πέσει κάτω από τη μέση πρόβλεψη των $325.0 * 10^6 \text{ m}^3$

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΝ

3.1. Τοποθέτηση του προβλήματος

Η αντιμετώπιση του σχεδιασμού και της λειτουργίας ενός συστήματος ταμιευτήρων (reservoir system) είναι ένα πρόβλημα αρκετά πολύπλοκο, που χαρακτηρίζεται από σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεταβλητών που το περιγράφουν. Οι κυριότερες από αυτές τις μεταβλητές μπορούν να ομαδοποιηθούν με τον ακόλουθο τρόπο¹:

(a) Υδρολογικές μεταβλητές

- (a1) εισροή, I_i (inflow)
- (a2) κατακρημνίσματα, P_i (precipitation)
- (a3) εξάτμιση, E_i (evaporation)
- (a4) υπόγεια διαφυγή, L_i (leekage)
- (a5) καθαρή εισροή, $N_i (= I_i + P_i - E_i - L_i)$ (net inflow)

(β) Ζήτηση ή επιθυμητή απόληψη D_j (demand, desired draft)²

(γ) Χαρακτηριστικά συστήματος

- (γ1) χωρητικότητα ταμιευτήρα,³ K_i (storage capacity)
- (γ2) παροχετευτικότητα κάθε αγωγού, C_i (discharge capacity)

1. Γενικά, ο δείκτης i χαρακτηρίζει ένα συγκεκριμένο ταμιευτήρα ($i=1, \dots, k$), ενώ ο δείκτης j αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη θέση κατανάλωσης νερού.

2. Σε μεμονωμένους ταμιευτήρες συχνά η ολική ζήτηση D_i εκφράζεται ως ποσοστό της μέσης ετήσιας καθαρής εισροής I . Το μέγεθος αυτό περιγράφεται με τους όρους επίπεδο ανάπτυξης (level of development) ή βαθμός ρύθμισης (degree of regulation) και είναι προφανώς μικρότερο από 100%.

3. Η χωρητικότητα εκφράζεται συχνά ως ποσοστό της μέσης εισροής I ή της τυπικής απόκλισης σι. Τα μεγέθη αυτά περιγράφονται με τους όρους συντελεστής χωρητικότητας (storage capacity coefficient) ή λόγος χωρητικότητας (storage ratio).

(δ) Λειτουργικές μεταβλητές

- (δ1) αποθήκευση (ή απόθεμα), S_i (storage)
- (δ2) στάθμη, Z_i (water level)
- (δ3) επιφάνεια ταμιευτήρα, A_i (reservoir area)
- (δ4) απόληψη, R_i (draft, release)
- (δ5) έλλειμμα, DF_i (deficit), που είναι η διαφορά της ζήτησης μείον την απόληψη
- (δ6) υπερχείλιση, SP_i (spill), που πραγματοποιείται μόνον όταν ο ταμιευτήρας είναι πλήρης και ταυτόχρονα η εισροή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση.

(ε) Μεταβλητές αξιοπιστίας συστήματος

- (ε1) αξιοπιστία a (reliability), η οποία εκφράζεται με έναν από τους ακόλουθους τρόπους

$$a_1 = n'/n$$

$$a_2 = t'/t$$

$$a_3 = R/D$$

όπου n' : αριθμός των ετών στα οποία ικανοποιείται η ζήτηση
 n : συνολικός αριθμός ετών

t' : χρονική περίοδος στην οποία ικανοποιείται η ζήτηση

t : συνολική χρονική περίοδος

R : μέση απόληψη

D : ζήτηση

Προφανώς ισχύει $a_1 \leq a_2 \leq a_3$ δεδομένου ότι η μη ικανοποίηση της ζήτησης σε ένα έτος, δε σημαίνει ότι εκτείνεται σε όλη τη διάρκεια του έτους, και ακόμα κατά την περίοδο που δεν ικανοποιείται η ζήτηση η απόληψη δεν είναι μηδενική αλλά $0 \leq R \leq D$.

- (ε2) πιθανότητα αστοχίας $a' = 1 - a$ (probability of failure)

- (ε3) χρόνος επαναφοράς εκκένωσης $T = 1/(1 - a_1)$ (recurrence time of emptiness), χρησιμοποιείται συνήθως σε μεμονωμένους ταμιευτήρες.

Στην απλή περίπτωση ενός μεμονωμένου ταμιευτήρα μιας σκοπιμότητας, με καθορισμένη ζήτηση D οι μαθηματικές σχέσεις που

ενδιαφέρουν είναι:

- για την περίπτωση της διαστασιολόγησης

$$K = f(I, P, E, L, D, R) \quad (3.1)$$

- για την περίπτωση της λειτουργίας

$$D = g(I, P, E, L, K, R) \quad (3.2)$$

Οι λειτουργικές μεταβλητές, αποτελούν ενδιάμεσες μεταβλητές και δεν υπεισέρχονται στις (3.1) και (3.2).

Στην περίπτωση πολλαπλών ταμιευτήρων απλής ή πολλαπλής σκοπιμότητας δεν είναι γνωστή η ζήτηση D_i από κάθε ταμιευτήρα. Μπορεί όμως να είναι γνωστή η ολική ζήτηση $D = \sum D_i$, αλλά και αυτό δεν είναι γενικός κανόνας. Σε αυτή την περίπτωση, προϋπόθεση για τη μελέτη αποτελεί η κατάστρωση ενός κανόνα λειτουργίας (operation rule) που στη γενικότερη μορφή του, είναι ένα σύνολο από μαθηματικές σχέσεις της μορφής

$$h(D_i, I_i, P_i, E_i, L_i, K_i, C_i, S_i, Z_i, A_i, R_i, DF_i, SP_i) = 0 \quad (3.3)$$

Οι τελικές μαθηματικές σχέσεις που ενδιαφέρουν είναι πάλι παρόμοιες με τις (3.1) και (3.2), με τη διαφορά ότι οι μεταβλητές ικανοποιούν και τις δεσμεύσεις (3.3).

Εποι έχουμε

- για την περίπτωση της διαστασιολόγησης

$$K_i = f_i(I_i, P_i, E_i, L_i, D_i, R_i) \quad (3.4)$$

- για την περίπτωση της λειτουργίας

$$D_i = g_i(I_i, P_i, E_i, L_i, K_i, R_i) \quad (3.5)$$

Γενικά έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την κατάστρωση και επίλυση των εξισώσεων μεμονωμένου ταμιευτήρα (3.1) και (3.2) από εμπειρικές (γραφικές ή υπολογιστικές) μέχρι αναλυτικές, αλλά μόνο για απλές συνθήκες υδρολογικών εισόδων (π.χ. ανεξάρτητες χρονο-

σειρές διακριτών εισροών χωρίς να παίρνονται υπόψη οι άλλες μεταβλητές). Ωστόσο η μόνη γενικευμένη, ορθολογική και μαθηματικά συνεπής μέθοδος είναι η μέθοδος της προσομοίωσης. Η μέθοδος αυτή μπορεί πολύ εύκολα να επεκταθεί και στην περίπτωση συστήματος ταμιευτήρων (εξισώσεις (3.4) και (3.5)).

Το πρώτο βήμα για την προσομοίωση του συστήματος ταμιευτήρων είναι η προσομοίωση των υδρολογικών μεταβλητών. Πρόκειται για την παραγωγή παράλληλων συνθετικών χρονοσειρών μεγάλου μήκους, η οποία γίνεται με τη χρήση τυχαίων αριθμών (μέθοδος Monte Carlo). Βασική απαίτηση για την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών είναι η διατήρηση ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών της στοχαστικής δομής των μεταβλητών (περιθώριες κατανομές, συσχετίσεις), όπως αυτή προκύπτει από τα υπάρχοντα δεδομένα.

3.2. Κύρια χαρακτηριστικά στοχαστικής δομής εισροής

Προκειμένου να εξετάσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά της εισροής που επηρεάζουν την αξιοπιστία ενός ταμιευτήρα, θα θεωρήσουμε μια απλουστευμένη περίπτωση ταμιευτήρα υπερετήσιας εξίσωσης, κάνοντας τις ακόλουθες υποθέσεις

- a) Οι απώλειες εξάτμισης και οι υπόγειες διαφυγές θεωρούνται αμελητέες
- β) Θεωρείται ότι η εισροή και η απόληψη γίνονται στιγμιαία και άπαξ του ετους, σε τρόπο ώστε η απόληψη να προηγείται της αποθήκευσης.

Με την παραδοχή (β) ουσιαστικά αγνοούμε τη διακύμανση, κατά τη διάρκεια ενός έτους, της εισροής και της απόληψης. Στην πραγματικότητα η διακύμανση αυτή υπάρχει πάντοτε και οδηγεί σε επαύξηση της χωρητικότητας του ταμιευτήρα. Απλουστευτικά μπορεί να θεωρηθεί ότι η ολική χωρητικότητα ενός ταμιευτήρα υποδιαιρείται στη χωρητικότητα που διατίθεται για υπερετήσια εξίσωση και στη χωρητικότητα για την κάλυψη των διακυμάνσεων μέσα στο έτος. Εδώ, λοιπόν, η παραδοχή (β) ουσιαστικά σημαίνει ότι παίρνουμε υπόψη μόνο τη χωρητικότητα υπερετήσιας εξίσωσης. Σημειώνεται ότι σε

ταμιευτήρες υψηλού βαθμού ρύθμισης, όπως ο ταμιευτήρας Μόρνου η χωρητικότητα υπερετήσιας εξίσωσης αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας (στο Μόρνο το ποσοστό αυτό είναι περίπου 80%).

Στην απλουστευμένη περίπτωση που εξετάζουμε ενδιαφέρουν μόνο τα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς των ετήσιων εισροών και μόνο. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να απομονώσουμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς της εισροής:

- (1) Τη μέση τιμή μι και την τυπική απόκλιση σι
- (2) Τον τύπο της περιθώριας συνάρτησης κατανομής
- (3) Τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς.

Για δεδομένη χωρητικότητα ταμιευτήρα K, και ζήτηση D, η αξιοπιστία R αυξάνει προφανώς με την αύξηση της μέσης τιμής μι. Η αξιοπιστία R θα είναι περίπου σταθερή, αν τα μεγέθη D και μι μεταβάλλονται με τρόπο ώστε ο βαθμός ρύθμισης D/μι να παραμένει σταθερός.

Για δεδομένη χωρητικότητα ταμιευτήρα K και ζήτηση D η αξιοπιστία R προφανώς μειώνεται με την αύξηση της τυπικής απόκλισης σι. Η αξιοπιστία θα είναι περίπου σταθερή αν τα μεγέθη K και σι μεταβάλλονται με τρόπο ώστε η ανηγμένη χωρητικότητα K/σι να παραμένει σταθερή.

Για δεδομένα K και D φαίνεται κατ' αρχήν ότι συναρτήσεις κατανομής με θετική ασυμμετρία δίνουν μικρότερη αξιοπιστία, σε σχέση με την κανονική κατανομή (μηδενική ασυμμετρία).

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των εισροών επηρεάζει καθοριστικά την αξιοπιστία του ταμιευτήρα. Η μελέτη της επίδρασης αυτής είναι αρκετά πολύπλοκη. Κατ' αρχήν υπάρχει το θέμα της επιλογής ορισμένων χαρακτηριστικών παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. Η πλέον χαρακτηριστική παράμετρος είναι ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης για βήμα 1, ρ_1 , ενώ ενδεχόμενα ενδιαφέρει και ένας πεπερασμένος αριθμός συντελεστών αυτοσυσχέτισης για μεγαλύτερα βήματα ρ_i , $1 \leq i \leq k$. Ενα μοντέλο τύπου ARMA, κατάλληλου βαθμού, μπορεί να αναπαραστήσει τη συνάρτηση

αυτοσυσχέτισης στην περιοχή $1 \leq i \leq k$. Το υπόλοιπο τμήμα της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης, για $i > k$, περιγράφεται από μια φθίνουσα εκθετική συνάρτηση, και αυτό ανεξάρτητα από την τάξη και τις παραμέτρους του μοντέλου ARMA. Κατά συνέπεια στα μοντέλα ARMA, το ολοκλήρωμα της συνάρτησης, από βήμα 0 μέχρι άπειρο, είναι πεπερασμένο. Το ολοκλήρωμα αυτό εκφράζει μαθηματικά την εμμονή (persistence) της στοχαστικής ανέλιξης. Το φυσικό νόημα της εμμονής είναι η παρατηρούμενη ιδιότητα των φυσικών χρονοσειρών, σύμφωνα με την οποία υψηλές τιμές ενός μεγέθους τείνουν να συσσωρεύονται και παράλληλα το ίδιο συμβαίνει και με τις χαμηλές τιμές, (φαινόμενο Ιωσήφ).

Στο θέμα της εμμονής, αξίζει να σημειωθεί η ανακάλυψη του Hurst, ότι τα μεγάλου μεγέθους δείγματα γεωφυσικών μεγεθών εμφανίζουν ορισμένα χαρακτηριστικά που δε μπορούν να περιγραφούν από τα μοντέλα ARMA (φαινόμενο Hurst). Τα χαρακτηριστικά αυτά αποδίδονται με μια παράμετρο, που ο ορισμός της είναι αρκετά πολύπλοκος και η εκτίμηση της αρκετά δύσκολη: Πρόκειται για την παράμετρο Hurst, h , που παίρνει τιμές στο διάστημα $0 \leq h \leq 1$. Ο Hurst εξέτασε περίπου 800 ιστορικές χρονοσειρές υδρολογικών και γεωφυσικών μεταβλητών, από διάφορα μέρη της γης, με μεγέθη από 40 μέχρι 2000 έτη, και βρήκε ότι η παράμετρος h γι' αυτές κυμαίνεται από 0.46 μέχρι 0.96 με μέση τιμή 0.73 και τυπική απόκλιση 0.09. Αντίθετα, όπως θεωρητικά αποδεικνύεται, τα μοντέλα ARMA δίνουν συντελεστές h που ασυμπτωτικά τείνουν στην τιμή $h = 0.5$ για μεγάλο μέγεθος δείγματος. Ο Hurst απέδωσε την αναντιστοιχία αυτή στο γεγονός ότι οι ιστορικές χρονοσειρές εμφανίζουν πολύ μεγάλη μνήμη. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην εισαγωγή και χρήση μιας άλλης κατηγορίας μοντέλων, που λέγονται μοντέλα κλασματικού γκαουσιανού θορύβου (fractional gaussian noise - FGN), με τα οποία αντί της διατήρησης (τμήματος) της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης, επιδιώκεται η διατήρηση του συντελεστή h . Οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης που προκύπτουν από τα μοντέλα FGN οδηγούν σε άπειρη εμμονή, ενώ δεν είναι δυνατή η παραγωγή χρονοσειράς με καθορισμένη εκ των προτέρων συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (πέρα από τη διατήρηση του συντελεστή h , που είναι κατ' αρχήν δυνατή). Σημειώνεται ότι η προσομοίωση των εισροών με μοντέλα FGN είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα, (οι υπολογιστικοί χρόνοι συγκρινόμενοι με τους αντίστοιχους χρόνους των μοντέλων ARMA μπορεί να είναι μεγαλύτεροι κατά 10^3

φορές ή και περισσότερο).

Δύο ακόμη κατηγορίες μοντέλων έχουν αποδειχτεί ότι μπορούν να διατηρήσουν το συντελεστή Hurst, εισάγοντας τα χαρακτηριστικά μεγάλης μνήμης στις παραγόμενες χρονοσειρές. Πρόκειται για τα μοντέλα ανελίξεων τεθλασμένης γραμμής (broken-line processes) και τα μοντέλα ARIMA, κάτω από ειδικές συνθήκες.

Επισημαίνεται τέλος ότι το βασικό συμπέρασμα του Hurst για την πολύ μεγάλη μνήμη των ιστορικών χρονοσειρών έχει αμφισβητηθεί (WMO, 1983) με το επιχείρημα ότι οι ανακαλύψεις του Hurst είναι δυνατό να αποδοθούν π.χ. σε μη μονιμότητα της μέσης τιμής της χρονοσειράς, η οποία μπορεί να είναι το αποτέλεσμα κλιματικών αλλαγών, ανθρωπίνων δραστηριοτήτων ή απλώς της ανομογένειας των δεδομένων.

3.3. Γενικές αρχές μοντελοποίησης υδρολογικών μεταβλητών συστήματος ταμιευτήρων ύδρευσης Αθηνών

3.3.1. Βασικές παρατηρήσεις και Παραδοχές

1. Το τελικό σύστημα περιλαμβάνει τρεις θέσεις κύριων ταμιευτήρων (τους υφιστάμενους ταμιευτήρες Μόρνου και Υλίκης, και το μελλοντικό ταμιευτήρα Ευήνου) και υπάρχει έντονη στοχαστική εξάρτηση κάθε υδρολογικής μεταβλητής στις διάφορες θέσεις. Κατά συνέπεια είναι επιβεβλημένη η χρήση πολυδιάστατων μοντέλων υδρολογικής προσομοίωσης.
2. Το κύριο μέγεθος που ενδιαφέρει είναι προφανώς η απορροή της κάθε λεκάνης, δηλαδή η εισροή σε κάθε ταμιευτήρα.
3. Οι δύκοι της βροχόπτωσης και της εξάτμισης εξαρτώνται από την επιφάνεια του ταμιευτήρα, και σε τελική ανάλυση από τη στάθμη του. Κατά συνέπεια οι δύκοι αυτοί μπορούν να προσδιοριστούν μόνο στη φάση της προσομοίωσης του συστήματος ταμιευτήρων. Στη φάση της προσομοίωσης των υδρολογικών μεταβλητών παράγονται χρονοσειρές ύψους βροχής και ύψους εξάτμισης.

4. Οι απώλειες υπόγειων διαφυγών είναι σημαντικές για τον ταμιευτήρα Μόρνου και ακόμα πιο σημαντικές για τον ταμιευτήρα Υλίκης. Για τους εναλλακτικούς ταμιευτήρες Ευήνου δε μπορεί να γίνει από τώρα εκτίμηση των απώλειών, αλλά πάντως αναμένεται ότι θα είναι μικρές (μικρότερες από την αβεβαιότητα των υδρολογικών υπολογισμών) και γι' αυτό θα αγνοηθούν. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα των αναλύσεων του Α' μέρους του ερευνητικού έργου, οι απώλειες του Μόρνου μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά, χωρίς σημαντικό σφάλμα, με μία σχέση στάθμης-όγκου απώλειών. Αντίστοιχη σχέση έχει προκύψει και για την Υλίκη (παρ. 2.7), με τη διαφορά ότι υπάρχει σημαντική διασπορά των σημείων γύρω από τη σχέση αυτή. Η διασπορά αυτή λαμβάνεται υπόψη για την προσομοίωση, και η απώλεια της Υλίκης θα θεωρηθεί ως τυχαία μεταβλητή, με μέση τιμή εξαρτώμενη από τη στάθμη και διασπορά σταθερή. Λόγω της εξάρτησης των απώλειών από τη στάθμη των ταμιευτήρων, η προσομοίωση τους έχει υπαχθεί στην επόμενη φάση της προσομοίωσης του συστήματος ταμιευτήρων.
5. Η απορροή και η βροχόπτωση εμφανίζουν (προφανώς) έντονη στοχαστική εξάρτηση μεταξύ τους, και γι' αυτό η προσομοίωσή τους δε μπορεί να γίνει ανεξάρτητα, αλλά συνδυασμένα.
6. Η εξάτμιση δεν είναι στοχαστικά εξαρτημένη με τη βροχόπτωση και την απορροή, και γι' αυτό η προσομοίωσή της μπορεί να γίνει ανεξάρτητα από την προσομοίωση των άλλων δύο.
7. Η προσομοίωση γίνεται σε μηνιαία βάση. Η χρονική αυτή βάση είναι υπερεπαρκής για την παρακολούθηση και της ετήσιας και της υπερετήσιας ρύθμισης των ταμιευτήρων. Λόγω της σαφούς υπεροχής των χωρητικοτήτων για υπερετήσια ρύθμιση, σε σχέση με αυτές για ετήσια ρύθμιση, οι κρίσιμες χρονοσειρές είναι οι ετήσιες, ενώ οι μηνιαίες είναι δευτερεύουσες.
8. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης των υπερετήσιων χρονοσειρών που εξετάστηκαν δε διαφέρουν σημαντικά από το μηδέν. Ειδικότερα οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης των απορροών είναι πολύ μικροί, ($0 \div 0.10$). Αυτό σημαίνει ότι οι απορροές δε

χαρακτηρίζονται από σημαντική εμμονή. Εν πάσῃ περιπτώσει, κατά την προσομοίωση των εισροών επιδιώκεται η διατήρηση των συντελεστών αυτοσυσχέτισης των απορροών. Αντίθετα οι αντίστοιχοι συντελεστές των βροχών θεωρούνται ίσοι με μηδέν, πράγμα που δικαιολογείται θεωρητικά. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης ρι των εξατμίσεων έχουν τιμές από -0.06 μέχρι 0.36, και οι τιμές αυτές επιδιώκεται να διατηρηθούν.

9. Οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης των μηνιαίων εισροών είναι εν γένει σημαντικοί (τους θερινούς μήνες φθάνουν την τιμή 0.80) και επιδιώκεται η διατήρησή τους. Αντίθετα, οι αντίστοιχοι συντελεστές για τις βροχές είναι ασήμαντοι (όπως άλλωστε αναμενόταν) και γι' αυτό θεωρούνται ίσοι με μηδέν. Τέλος οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης των εξατμίσεων είναι σε μερικές περιπτώσεις αρκετά υψηλοί (μέχρι 0.85).
10. Η κατανομή γάμα δύο παραμέτρων, με παραμέτρους που υπολογίζονται με τη μέθοδο των ροπών (από τη μέση τιμή και διασπορά) προσαρμόζεται ικανοποιητικά στα δείγματα ετήσιων και μηνιαίων βροχών και απορροών. Επειδή τα μεγέθη των δειγμάτων είναι πολύ μικρά για ασφαλείς εκτιμήσεις της τρίτης ροπής, θεωρείται ότι ο συντελεστής ασυμμετρίας κάθε μεταβλητής είναι αυτός που προκύπτει θεωρητικά για την κατανομή γάμα 2 παραμέτρων. Αντίθετα για τις εξατμίσεις είναι γενικά δεκτή η κανονική κατανομή.

3.3.2. Γενικό σχήμα προσομοίωσης της απορροής-βροχής

Το γενικό σχήμα που υιοθετήθηκε για τη συνδυασμένη προσομοίωση απορροής-βροχής συνίσταται από

- Ένα Μαρκοβιακό μοντέλο ετήσιων απορροών 6 διαστάσεων (2 μεγέθη * 3 θέσεις) το οποίο διατηρεί τους συντελεστές ετήσιας αυτοσυσχέτισης ρι, τους συντελεστές ετεροσυσχέτισης (βροχής-βροχής, απορροής-απορροής, απορροής-βροχής σε όλους τους συνδυασμούς θέσεων) καθώς και τις τρεις πρώτες ροπές των περιθώριων κατανομών κάθε μεταβλητής (μέση τιμή - διασπορά - ασυμμετρία).

- Ενα Μαρκοβιανό μοντέλο επιμερισμού ετήσιων σε μηνιαίες απορροές, 6 διαστάσεων και 12 τμηματικών μεταβλητών, ήτοι συνολικά 72 μεταβλητών. Το μοντέλο αυτό διατηρεί τις ίδιες ομάδες στατιστικών χαρακτηριστικών για κάθε μήνα, και επί πλέον διατηρεί τη λεγόμενη προσθετική ιδιότητα (το άθροισμα των μηνιαίων τιμών σε ένα έτος είναι ίσο με την ετήσια τιμή).

Η δομή αυτή του μοντέλου δύο φάσεων αν και είναι πολλαπλώς πολυπλοκότερη, προτιμήθηκε από την απευθείας παραγωγή μηνιαίων τιμών και στη συνέχεια την άθροισή τους για παραγωγή ετήσιων τιμών, γιατί η άμεση, σε πρώτη φάση, παραγωγή των ετήσιων χρονοσειρών υπερτερεί στα εξής:

- α) Αποφεύγονται τα σφάλματα που υπάρχουν στις εκτιμήσεις των μηνιαίων στατιστικών χαρακτηριστικών. Οι συνδυασμοί σφαλμάτων και αποκλίσεων θα μπορούσε να δώσουν πολλαπλασιαστικές αποκλίσεις για τις ετήσιες χρονοσειρές.
- β) Με τη χρησιμοποίηση πολυδιάστατου μοντέλου σε μηνιαία βάση και στη συνέχεια άθροιση των μηνιαίων τιμών για την εξαγωγή ετήσιων, είναι σχεδόν αδύνατο να διατηρηθούν οι πολύ σημαντικές ιδιότητες της εμμονής. Αυτή η μέθοδος θα οδηγούσε σε πρακτικά μηδενικούς συντελεστές αυτοσυσχέτισης των ετήσιων τιμών.
- γ) Οπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι ετήσιες χρονοσειρές, και όχι οι μηνιαίες, είναι κρίσιμες για τη μελέτη μας.

Το μαρκοβιανό μοντέλο ετήσιων εισροών θεωρείται επαρκές λόγω των χαμηλών συντελεστών αυτοσυσχέτισης που παρατηρήθηκαν (μικρή εμμονή). Η χρήση μοντέλων FGN κλπ. για τη διατήρηση συντελεστών Hurst (που άλλωστε δε θα ήταν εύκολο να εκτιμηθούν) δε θα είχε νόημα στην περίπτωση των μικρών συντελεστών αυτοσυσχέτισης. Εξ άλλου δεν είναι βέβαιο αν με τέτοια μοντέλα μακράς μνήμης είναι δυνατό να παράγουμε χρονοσειρές με τόσο μικρούς συντελεστές αυτοσυσχέτισης.

Οι όροι διατήρησης των χαρακτηριστικών των μηνιαίων χρονοσειρών

που τέθηκαν είναι απόλυτα ικανοποιητικοί, δεδομένου μάλιστα ότι οι χρονοσειρές αυτές είναι δευτερεύουσας σημασίας (π.χ. δε θα επηρέαζε σε τίποτα ένας όρος για τη διατήρηση συντελεστών αυτοσυσχέτισης μεγαλύτερου βήματος).

Σε σχέση με τους λόγους που μας οδήγησαν στην υιοθέτηση ενός μοντέλου συνδυασμένης προσομοίωσης της απορροής και της βροχόπτωσης αντί ενός τυπικού μοντέλου βροχής-απορροής στο οποίο η βροχή θα ήταν η είσοδος και η απορροή η έξοδος, έχουμε να παρατηρήσουμε τα ακόλουθα:

- Οπως προέκυψε από την επεξεργασία των δεδομένων κατά το A' μέρος του ερευνητικού έργου, τα βροχομετρικά δεδομένα είναι γενικά μειωμένης αξιοπιστίας, ενώ υπάρχουν και αναντιστοιχίες μεταξύ των δεδομένων βροχής και παροχής.
- Τα μεγέθη των δειγμάτων της βροχής δεν ήταν σημαντικά μεγαλύτερα αυτών της απορροής (25 έναντι 19 έτη για τις λεκάνες Μόρνου και Ευήνου). Εξ άλλου η τυχόν στατιστική επέκταση των δειγμάτων απορροής με βάση τα μεγαλύτερα δείγματα βροχής θα οδηγούσε σε υποεκτίμησεις των διασπορών των δειγμάτων απορροής, οι οποίες είναι απαραίτητο να εκτιμηθούν με τη μεγαλύτερη δυνατή αμεροληψία προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση.
- Η χρήση ενός στοχαστικού μοντέλου βροχής-απορροής τύπου μαύρου κουτιού (black box) δε θα έδινε μεγαλύτερη αξιοπιστία στην προσομοίωση της απορροής. Ουσιαστικά το μοντέλο που υιοθετήθηκε υπερτερεί από ένα τέτοιο μοντέλο, γιατί αφ' ενός λαμβάνει υπόψη τις αλληλοσυσχετίσεις μεταξύ βροχής και απορροής και τις αυτοσυσχετίσεις της κάθε χρονοσειράς, ενώ παράλληλα θεωρεί τις χρονοσειρές της απορροής ως πρωτεύουσα πληροφορία και όχι ως παράγωγη της βροχομετρικής πληροφορίας.
- Η χρήση ενός **εννοιολογικού** (conceptual) μοντέλου βροχής-απορροής, είναι πιθανό ότι θα έδινε ικανοποιητικές χρονοσειρές απορροής, υπό τις προϋποθέσεις ότι (a) θα εφαρμόζονταν σε ημερήσια χρονική κλίμακα και (b) τα βροχομετρικά δεδομένα θα ήταν επαρκώς αξιόπιστα και σε πλήρη αντιστοιχία με τα δεδομένα απορροής, ώστε να μπορεί να γίνει

σωστή ρύθμιση του μοντέλου. Ο δεύτερος όρος όμως δεν εκπληρώνεται, ενώ η ημερήσια χρονική κλίμακα δεν είναι απαραίτητη για την προσομοίωση του συστήματος ταμιευτήρων. Επίσης το όφελος από μια τέτοια αρκετά επίπονη προσπάθεια δεν θα ήταν σημαντικό, λόγω της μικρής διαφοράς των χρονικών μεγεθών των δειγμάτων βροχής και απορροής που προαναφέρθηκε. Για τους λόγους αυτούς εγκαταλείφθηκε και αυτή η προσέγγιση του θέματος.

- Ένας τελευταίος λόγος που συνηγορεί υπέρ της απόρριψης της προσέγγισης του μοντέλου βροχής-απορροής, είναι το γεγονός ότι μια τέτοια προσπάθεια είχε γίνει παλιότερα για τον ταμιευτήρα Μόρνου από την Lahmeyer, με αποτέλεσμα που δεν ανταποκρίνονταν στην πραγματικότητα.
- Το ίδιο σχήμα προσομοίωσης που υιοθετήθηκε, εφαρμόζεται επίσης και για τις εξατμίσεις, και αυτό είναι ένα επιπλέον πλεονέκτημα του σχήματος. Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο είναι τριών διαστάσεων (3 θέσεις ταμιευτήρων).

3.4. Το μαρκοβιανό μοντέλο παραγωγής χρονοσειρών

Εστω το διάνυσμα στοχαστικών ανελίξεων $\underline{X}^t = [X_1^t, X_2^t, \dots, X_k^t]$ με k διαστάσεις.

Το διάνυσμα αυτό θεωρείται ότι έχει μαρκοβιανή δομή όταν ικανοποιεί την εξίσωση διαφορών

$$\underline{X}^t = \underline{a}^t \underline{X}^{t-1} + \underline{b}^t \cdot \underline{y}^t \quad (3.6)$$

όπου $\underline{a}^t = \text{diag}(a_1^t, a_2^t, \dots, a_k^t) =$ διαγώνιος πίνακας σταθερών

$$\underline{b}^t = [a_{ij}^t], i, j = 1, \dots, k = \text{πίνακας σταθερών}$$

$\underline{y}^t = [v_1^t, \dots, v_k^t]^T =$ διάνυσμα τυχαίων μεταβλητών στοχαστικά ανεξάρτητων μεταξύ τους καθώς και με τις μεταβλητές v_j^{t-k} , για κάθε $j, k \neq 0$

Η σχέση (3.6) γράφεται ισοδύναμα,

$$\underline{X}^t - \underline{\xi}^t = \underline{a}^t (\underline{X}^{t-1} - \underline{\xi}^{t-1}) + \underline{b}^t (\underline{v}^t - \underline{\eta}^t) \quad (3.7)$$

οπου $\underline{\xi}^t = [\xi_1^t, \dots, \xi_k^t]^T$ = διάνυσμα των μέσων τιμών των μεταβλητών X^t , και

$$\underline{\eta}^t = [\eta_1^t, \dots, \eta_k^t]^T = \text{διάνυσμα των μέσων τιμών των μεταβλητών } V^t$$

Το μαρκοβιανό μοντέλο διατηρεί τις ακόλουθες ομάδες στατιστικών παραμέτρων των μεταβλητών X_i^t

- Μέσες τιμές
- Διασπορές
- Ασυμμετρίες
- Συντελεστές αυτοσυσχέτισης α' τάξης r_{11}^t (μεταξύ των μεταβλητών X_i^t και X_i^{t-1})
- Συντελεστές ετεροσυσχέτισης r_{111}^t (μεταξύ των μεταβλητών X_i^t και X_1^t)

Η διατήρηση εξασφαλίζεται από τον τρόπο προσδιορισμού των παραμέτρων του μοντέλου, ο οποίος συνοψίζεται στα ακόλουθα.

Οι παράμετροι a_{11}^t προσδιορίζονται από τη σχέση

$$a_{11}^t = \frac{\text{Cov} [X_1^t, X_1^{t-1}]}{\text{Var} [X_1^{t-1}]} \quad (3.8)$$

Υπό την προϋπόθεση ότι $\text{Var} [V_i^t] = 1$ για κάθε i , ο πίνακας παραμέτρων b^t προσδιορίζεται έμμεσα από τη σχέση

$$\underline{b}^t (\underline{b}^t)^T = \underline{\sigma}^t - \underline{a}^t \underline{\sigma}^{t-1} \underline{a}^t \quad (3.9)$$

$$\text{όπου } \underline{\sigma}^t = \text{Cov} [\underline{X}^t, \underline{X}^t] = E [(\underline{X}^t - \underline{\xi}^t)(\underline{X}^t - \underline{\xi}^t)^T] \quad (3.10)$$

Ο πίνακας

$$\underline{\sigma}^t = \underline{b}^t (\underline{b}^t)^T \quad (3.11)$$

δηλαδή ο γκραμιανός πίνακας του \underline{b}^t , είναι προφανώς συμμετρικός και επί πλέον έχει τη δομή ενός πίνακα συνδιασπορών αφού ισχύει

$$\underline{c}^t = \text{Cov} [(\underline{X}^t - \underline{a}^t \underline{X}^{t-1}), (\underline{X}^t - \underline{a}^t \underline{X}^{t-1})] \quad (3.12)$$

Αυτό σημαίνει ότι για κάθε i, j πρέπει να ισχύει

$$-1 \leq \frac{c_{ij}^t}{\sqrt{(c_{ii}^t c_{jj}^t)}} \leq 1 \quad (3.13)$$

Μία επί πλέον βασική περιοριστική συνθήκη αποτελεί το γεγονός ότι ο πίνακας \underline{c}^t πρέπει να είναι θετικά ορισμένος, αλλιώς δεν υπάρχει πραγματικός πίνακας \underline{b}^t ώστε να ισχύει η (3.11). Αντίθετα αν ισχύουν οι παραπάνω θεωρητικές προϋποθέσεις, τότε υπάρχει απειρία πινάκων \underline{b}^t που ικανοποιούν την (3.11). Ο απλούστερος και πλεονεκτικότερος από άποψη αριθμητικών χειρισμών πίνακας \underline{b}^t είναι ο κάτω τριγωνικός, με στοιχεία που υπολογίζονται διαδοχικά με τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} b_{ij}^t &= 0 && (i < j) \\ b_{jj}^t &= [c_{jj}^t - \sum_{k=1}^{j-1} (b_{jk}^t)^2]^{1/2} && (i=j) \\ b_{ij}^t &= [c_{ij}^t - \sum_{k=1}^{j-1} b_{jk}^t b_{ik}^t] / b_{jj} && (i > j) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Η ακόλουθη σχέση που προκύπτει άμεσα από την (3.6) χρησιμοποιείται για την παραγωγή των \underline{X}^t , αφού πρώτα παραχθούν ως τυχαίοι αριθμοί οι \underline{V}^t :

$$\underline{X}_j^t = a_j^t \underline{X}_{j-1} + \sum_{k=1}^j b_{jk}^t V_k^t \quad (3.15)$$

Από την (3.15) προκύπτουν και τα στατιστικά χαρακτηριστικά των \underline{V}^t (μετά από διαδοχική εφαρμογή):

$$\mathbb{E}[V_j^t] = \eta_j^t = (\xi_j^t - a_j^t \xi_{j-1} - \sum_{k=1}^{j-1} b_{jk}^t \eta_k^t) / b_{jj}^t \quad (3.16)$$

$$\text{Var}[V_j^t] = 1 \quad (\text{εξ ορισμού})$$

$$\text{με } [V_j^t] = v_j^t = (\lambda_j^t - (a_j^t)^2 \lambda_{j-1} - \sum_{k=1}^{j-1} (b_{jk}^t)^2 v_k^t) / (b_{jj}^t)^2 \quad (3.17)$$

$$\text{όπου } \lambda_j^t = \text{με } [X_j^t]$$

3.5. Γενική περιγραφή του μοντέλου επιμερισμού

Με δεδομένες τις (συνθετικές) ετήσιες χρονοσειρές των υδρολογικών μεταβλητών, οι οποίες παράγονται με το μοντέλο της προηγούμενης παραγράφου στο επιθυμητό μήκος (εδώ 10.000 χρόνια), το μοντέλο επιμερισμού αναλαμβάνει την πύκνωση τους σε μηνιαία βάση. Συγκεκριμένα αναλαμβάνει την παραγωγή τιμών των μηνιαίων μεταβλητών X_{ij}^t , όπου οι δείκτες t , i και j αναφέρονται αντίστοιχα στο έτος, τη θέση και το μήνα. Η παραγωγή των τιμών γίνεται έτσι ώστε να ικανοποιείται η λεγόμενη αθροιστική ιδιότητα, δηλαδή

$$\sum_{j=1}^V X_{ij}^t = Z_i^t, \quad i = 1 \dots k, \quad (3.18)$$

όπου Z_i^t η (γνωστή) ετήσια τιμή της αντίστοιχης χρονοσειράς και $V = 12$.

Επί πλέον διατηρούνται και οι ακόλουθες ομάδες στατιστικών παραμέτρων (όπως συμβαίνει και στο Μαρκοβιανό μοντέλο).

- Μέσες τιμές των μηνιαίων μεταβλητών X_{ij}^t
- Διασπορές των μηνιαίων μεταβλητών X_{ij}^t
- Ασυμμετρίες των μηνιαίων μεταβλητών X_{ij}^t
- Συντελεστές αυτοσυσχέτισης α' τάξης r_{ij}^t μεταξύ των μηνιαίων μεταβλητών X_{ij}^t και $X_{i,j-1}^t$
- Συντελεστές ετεροσυσχέτισης $r_{ii,j}^t$ μεταξύ των μεταβλητών X_{ij}^t και X_{ij}^t .

Η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου επιμερισμού και των αλγορίθμων του είναι ένα αρκετά πολύπλοκο ζήτημα, που δε θα είχε νόημα να παρουσιαστεί στην παρούσα έκθεση (προβλέπεται να γίνει σε ένα επόμενο τεύχος).

4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΔΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το γενικό μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας του υδροδοτικού συστήματος της μείζονος περιοχής Αθηνών. Πρόκειται για ένα μοντέλο προσομοίωσης λειτουργίας συστήματος ταμιευτήρων που περιλαμβάνει το σύνολο των μαθηματικών σχέσεων που συνδέουν μεταξύ τους τις υδρολογικές μεταβλητές, τα χαρακτηριστικά του συστήματος και τις λειτουργικές μεταβλητές με την αξιοπιστία του συστήματος. Εκτός από τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών, περιλαμβάνει επίσης και περιοριστικές συνθήκες για μερικές από τις μεταβλητές, που απορρέουν από φυσικούς ή άλλους λόγους. Η τοποθέτηση του προβλήματος έχει γίνει στην παρ. 3.1 όπου και επεξηγούνται και τα σύμβολα που υπεισέρχονται στις μαθηματικές εξισώσεις του μοντέλου λειτουργίας που περιγράφεται εδώ.

Το σημερινό υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας περιλαμβάνει τους ταμιευτήρες Μόρνου και Υλίκης. Μελλοντικά προβλέπεται η ένταξη στο σύστημα ενός ταμιευτήρα στη λεκάνη του Ευήνου, ενώ εξετάζεται και η δυνατότητα κατασκευής ενός ταμιευτήρα αναρρύθμισης κοντά στην Αθήνα (πιθανότατα στη λεκάνη του ποταμού Ασωπού).

Πρέπει να τονιστεί ότι οι εξισώσεις του μοντέλου προσομοίωσης λειτουργίας, όπως αναλύονται στις επόμενες παραγράφους, αναφέρονται στο τελικό υδροδοτικό σχήμα, που περιλαμβάνει το σύνολο των ταμιευτήρων. Οι εξισώσεις αυτές κωδικοποιήθηκαν σε πρόγραμμα H/Y σε γλώσσα Pascal, που τρέχει σε μικρούπολογιστές IBM και συμβατούς.

Για τις ανάγκες του τεύχους αυτού χρησιμοποιήθηκε ουσιαστικά μόνο το τμήμα του γενικού μοντέλου που αφορά στο υπαρχον υδροδοτικό σύστημα (ταμιευτήρες Μόρνου και Υλίκης). Παρ' όλα αυτά, κρίθηκε σκόπιμο να περιγραφεί το μοντέλο στο σύνολό του για λόγους πληρότητας της παρουσίασης.

Οι κωδικοί αριθμοί για κάθε ταμιευτήρα (που είναι και δείκτες των μεταβλητών του προβλήματος) είναι οι εξής:

1 = Εύηνος, 2 = Μόρνος, 3 = Υλίκη, 4 = ταμιευτήρας αναρρύθμισης.

4.2. Περιγραφή του μοντέλου - Εξισώσεις ισοζυγίου για κάθε ταμιευτήρα

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται οι εξισώσεις του μοντέλου που απορρέουν από την αρχή διατήρησης της μάζας του νερού σε κάθε ταμιευτήρα. Μία άλλη κατηγορία εξισώσεων είναι εκείνες που περιγράφουν τον κανόνα λειτουργίας του θεωρούμενου συστήματος ταμιευτήρων. Οι τελευταίες εξισώσεις είναι πεπλεγμένης μορφής, αφού περιλαμβάνουν μεγέθη από περισσότερους του ενός ταμιευτήρες και εξαρτώνται άμεσα από το ποιοί ταμιευτήρες υπεισέρχονται στο σύστημα. Οι εξισώσεις της πρώτης κατηγορίας ισχύουν ανεξάρτητα από το θεωρούμενο σύστημα ταμιευτήρων και παρουσιάζονται μία μόνο φορά, στη συνέχεια αυτής της παραγράφου. Οι εξισώσεις του κανόνα λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3 για κάθε περίπτωση συνδυασμού ταμιευτήρων.

4.2.1. Ταμιευτήρας Ευήνου

Για το μοντέλο λειτουργίας έχει θεωρηθεί ένας μόνο ταμιευτήρας στον Εύηνο ο οποίος, μπορεί εναλλακτικά να είναι ο ταμιευτήρας Περίστας, Αγ. Δημητρίου ή Δενδροχωρίου. Η τροποποίηση των χαρακτηριστικών των ταμιευτήρων από μία θέση φράγματος στην άλλη καθώς και των υδρολογικών μεταβλητών που συνδέονται μ' αυτούς, γίνεται με απλούς συντελεστές αναγωγής.

Υποθέτουμε ότι η διαδικασία της προσομοίωσης έχει ολοκληρωθεί μέχρι το τέλος του (j-1) μήνα και επομένως είναι γνωστή η τιμή του αποθηκευμένου ωφέλιμου όγκου νερού $S_1(j-1)$.

Διευκρινίζεται ότι με $S_1(j-1)$ συμβολίζεται ωφέλιμος όγκος ταμιευτήρα ενώ η καμπύλη όγκου-στάθμης δίνει τη σχέση ολικού όγκου-στάθμης. Γι' αυτό κάθε φορά που χρησιμοποιείται αυτή η καμπύλη πρέπει να υπολογίζεται ο ολικός όγκος (ωφέλιμος όγκος + νεκρός όγκος).

Από την καμπύλη στάθμης-όγκου υπολογίζεται η αντίστοιχη στάθμη

$Z_1(j-1)$ και στη συνέχεια από την καμπύλη στάθμης-επιφάνειας λίμνης η αντίστοιχη επιφάνεια της λίμνης $A_1(j-1)$.

Οι υδρολογικές μεταβλητές του προβλήματος είναι:

- 1) Οι εισροές στον ταμιευτήρα. Το κύριο μέρος των εισροών αποτελείται από την απορροή του ποταμού Ευήνου στη θέση του φράγματος καθώς και των τυχόν μικρών υδατορευμάτων που εκβάλλουν απ' ευθείας στον ταμιευτήρα.

Η συνολική μηνιαία απορροή του μήνα j $I_1(j)$ δίνεται ως έξοδος (output) του μοντέλου των εισροών (βλ. Κεφ. 3) σε ύψος ισοδύναμης βροχόπτωσης στη λεκάνη του Ευήνου επιφάνειας S_1 . Επειδή όμως ζητείται η απορροή στην είσοδο του ταμιευτήρα η απορροή στη θέση του φράγματος πολλαπλασιάζεται επί $[S_1 - A_1(j-1)]$.

Ενα άλλο πολύ μικρότερο τμήμα των εισροών είναι η βροχόπτωση $P_1(j)$, απ' ευθείας πάνω στην επιφάνεια της λίμνης του ταμιευτήρα, η οποία, για να αναχθεί σε όγκο, πολλαπλασιάζονται επί $A_1(j-1)$.

- 2) Οι απώλειες νερού από τον ταμιευτήρα λόγω εξάτμισης $E_1(j)$, ενώ απώλειες λόγω διαφυγών δε λαμβάνονται υπόψη (βλ. Κεφ. 3).

Η καθαρή εισροή $N_1(j)$ του μήνα j στον ταμιευτήρα είναι ίση με

$$N_1(j) = I_1(j) * [S_1 - A_1(j-1)] + \\ + [P_1(j) - E_1(j)] * A_1(j-1) \quad (4.1)$$

Η απόληψη νερού $R_1(j)$ προκύπτει από τον κανόνα λειτουργίας του συστήματος (βλ. παρ. 4.3).

Ο όγκος νερού προς αποθήκευση, $S_{a1}(j)$, στο τέλος του μήνα j προκύπτει από το ισοζύγιο του ταμιευτήρα:

$$S_{a1}(j) = S_1(j-1) + N_1(j) - R_1(j) \quad (4.2)$$

Av $S_{A_1}(j) > K_1$, τότε υπάρχει υπερχείλιση:

$$SP_1(j) = S_{A_1}(j) - K_1$$

οπότε ο όγκος νερού στον ταμιευτήρα στο τέλος του μήνα j είναι

$$S_1(j) = K_1 \quad (4.3)$$

Αλλιώς,

$$S_1(j) = S_{A_1}(j), \quad SP_1(j) = 0$$

Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται κατά τον ίδιο τρόπο για τους επόμενους μήνες $j+1, j+2, \dots$

4.2.2. Ταμιευτήρας Μόρνου

Οι εισροές στον ταμιευτήρα Μόρνου αποτελούνται κατά το μεγαλύτερο μέρος τους από την απορροή του ποταμού Μόρνου και εκείνη των υδατορευμάτων που εισρέουν άμεσα στον ταμιευτήρα Μόρνου, και εκφράζονται σε ύψος ισοδύναμης βροχόπτωσης στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής που αντιστοιχεί στη θέση του φράγματος $I_2(j)$.

Ενα δεύτερο μέρος της συνολικής εισροής οφείλεται στη βροχή απευθείας στον ταμιευτήρα $P_2(j)$.

Οι απώλειες από τον ταμιευτήρα οφείλονται αφ' ενός μεν στην εξάτμιση $E_2(j)$, αφ' ετέρου δε στις υπόγειες διαφυγές $L_2(j)$.

Για τη μετατροπή της εισροής $I_2(j)$ σε όγκο νερού/μήνα στην είσοδο του ταμιευτήρα πολλαπλασιάζουμε επί την επιφάνεια της λεκάνης S_2 μείον την επιφάνεια της λίμνης $A_2(j-1)$. Αντίστοιχα για τα μεγέθη $P_2(j)$, $E_2(j)$ πολλαπλασιάζουμε με $A_2(j-1)$.

Η επιφάνεια της λίμνης $A_2(j-1)$ στο τέλος του μήνα $(j-1)$ καθώς και η στάθμη $Z_2(j-1)$ λαμβάνονται από τις καμπύλες στάθμης-επιφάνειας-όγκου (Σχ. 9, τεύχος 3, Α' μέρος Ερευν. Εργου), με βάση το γνωστό μέγεθος του διαθέσιμου ωφέλιμου όγκου $S_2(j-1)$.

Υπενθυμίζεται πάλι ότι η καμπύλη στάθμης-όγκου απαιτεί τον υπολογισμό του ολικού όγκου (= ωφελ. όγκος + νεκρός όγκος).

Οι υπόγειες διαφυγές από τον ταμιευτήρα εκτιμώνται στο 2-πλάσιο των διαρροών Πύρνου (Σχ. 11, Τεύχος 3, Α' μέρος Ερευν. Εργου) και εκφράζονται συναρτήσει μόνο της στάθμης του ταμιευτήρα που λαμβάνεται ίση με εκείνη του τέλους του προηγούμενου μήνα $Z_2(j-1)$.

Η σχέση αυτή δίνεται από την εξισώση

$$L_2(j) = [0.022865 [Z_2(j-1) - 390.0] + 0.132710]$$

όπου $L_2(j)$ σε εκ. m^3 και $Z_2(j-1)$ σε m

Η καθαρή εισροή $N_2(j)$ του μήνα j είναι:

$$\begin{aligned} N_2(j) &= I_2(j) [S_2 - A_2(j-1)] + \\ &+ [P_2(j) - E_2(j)] A_2(j-1) \\ &- L_2(j) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Με γνωστή την απόληψη $R_2(j)$, που προκύπτει από τον κανόνα λειτουργίας του συστήματος (παρ. 4.3) ο όγκος νερού προς αποθήκευση στο τέλος του μήνα j είναι:

$$S_{a2}(j) = S_2(j-1) + N_2(j) - R_2(j) \quad (4.5)$$

Αν $S_{a2}(j) > K_2$ τότε υπάρχει υπερχείλιση ίση με

$$SP_2(j) = S_{a2}(j) - K_2$$

οπότε ο τελικός ωφέλιμος όγκος $S_2(j)$ στο τέλος του μήνα j είναι

$$S_2(j) = K_2$$

Αλλιώς,

$$S_2(j) = S_{\alpha 2}(j), \quad SP_2(j) = 0 \quad (4.6)$$

4.2.3. Λίμνη Υλίκη

Οι εισροές στη λίμνη από τη σήραγγα Καρδίτσας καθώς και η απορροή της ίδιας της λεκάνης Υλίκης αποτελούν την ολική απορροή $I_3(j)$ του j μήνα εκφρασμένη σε ύψος ισοδύναμης βροχόπτωσης στη λεκάνη του Β. Κηφισού επιφάνειας S_3 (2010 km^2) αυξημένης κατά 6% για να ληφθεί υπόψη η επαύξηση λόγω της απορροής της λεκάνης της ίδιας της λίμνης.

Ενα άλλο μικρό μέρος των εισροών προέρχεται από τη βροχή $P_3(j)$ απ' ευθείας στη λίμνη ενώ οι απώλειες οφείλονται, κατά ένα μέρος, στην εξάτμιση $E_3(j)$ από την επιφάνεια της λίμνης, κατά δε ένα άλλο μέρος στις υπόγειες διαφυγές $L_3(j)$.

Οπως φαίνεται και στα Σχ. 10 και 11 του παρόντος τεύχους οι διαφυγές δίνονται από δευτεροβάθμιες πολυωνυμικές σχέσεις της στάθμης, ενώ λαμβάνεται υπόψη και μια συνιστώσα που θεωρείται ότι ακολουθεί κανονική κατανομή.

Η σχέση στάθμης-απωλειών για τους καλοκαιρινούς μήνες είναι

$$L_3(j) = 12422 [Z_3(j-1)]^2 - 999061 Z_3(j-1) + \\ + 17461050 + n(j) \quad (\text{σε } \text{m}^3) \quad (4.7)$$

όπου, $Z_3(j-1)$ η απόλυτη στάθμη της λίμνης σε m, και
 $n(j)$: τυχαίος αριθμός κανονικής κατανομής με μέση τιμή
μηδέν και τυπική απόκλιση 2636048 m^3 .

Για τους χειμερινούς μήνες η σχέση αυτή γίνεται

$$L_3(j) = 12422 [Z_3(j-1)]_2 - 999061 Z_3(j-1) \\ + 22161050 + n(j) \quad (\text{σε } \text{m}^3) \quad (4.8)$$

όπου, η $n(j)$ έχει τυπική απόκλιση 5959663 m^3 .

Η καθαρή εισροή του μήνα j είναι

$$\begin{aligned}
 N_3(j) = & I_3(j) [S_3 - A_3(j-1)] + \\
 & + [P_3(j) - E_3(j)] A_3(j-1) - L_3(j)
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Τα μεγέθη $A_3(j-1)$, $Z_3(j-1)$ υπολογίζονται από τις καμπύλες στάθμης-όγκου-επιφανείας.

Ανάλογα με την τιμή του $S_3(j)$ διακρίνομε τις εξής 4 περιπτώσεις:

I. $-Sd_3 \leq S_3(j) \leq 0$

Νεκρός όγκος όπου δε γίνεται καμία απόληψη.

II. $0 < S_3(j) \leq SF_3(j)$

Δε γίνεται καμία απόληψη και παραμένει στη λίμνη ο όγκος ασφαλείας $SF_3(j)$ έναντι βλάβης του υδαταγωγού Μόρνου.

III. $SF_3(j) < S_3(j) < SR_3(j) + SF_3(j)$

Γίνεται απόληψη μόνο για αρδευτικούς σκοπούς $IR_3(j)$.

IV. $SF_3(j) + SR_3(j) < S_3(j) \leq K_3$ όπου γίνεται απόληψη και για ύδρευση της Αθήνας $R_3(j)$ καθώς και για άρδευση $IR_3(j)$.

Τα όρια ασφάλειας SF_3 και SR_3 ελήφθησαν ως εξής:

a. $SF_3(j) = \min \left[\sum_{k=j}^{j+M} a(k) (Dy/12), M \cdot C_3 \right]$ (ζήτηση από Αθήνα των επόμενων M μηνών εφόσον είναι παροχετεύσιμη)

- Κμαρ (χωρητικότητα Μαραθώνα)

- $\frac{\sum_{k=j}^{j+M} Q_{min}(k)}{K+j}$ (ελάχιστη εισροή των επόμενων M μηνών)
(4.10)

όπου,

$a(k)$: συντελεστής ανισοκατανομής της ζήτησης του μήνα k

Dy : ετήσια ζήτηση

$Q_{min}(k)$: ελάχιστη παροχή του κ μήνα

M : αριθμός μηνών ασφαλείας για ύδρευση Αθήνας (=3)

$$b. \quad SR_3(j) = \sum_{K=j}^{j+M'} ar(K) (DRy/12) \quad (\text{ζήτηση των επόμενων } M' \text{ μηνών για άρδευση}) \quad (4.11)$$

όπου:

ar(K) : συντελεστής ανισοκατανομής για άρδευση

DRy : ετήσια ζήτηση για άρδευση

M' : αριθμός μηνών ασφαλείας για άρδευση (=6)

Αφού καθοριστούν οι απολήψεις $R_3(j)$ και $IR_3(j)$ βάσει των παραπάνω ορίων και του κανόνα λειτουργίας (παρ. 4.3) το ισοζύγιο της λίμνης δίνει διαθέσιμο ωφέλιμο όγκο:

$$Sa_3(j) = S_3(j-1) + N_3(j) - R_3(j) - IR_3(j) \quad (4.12)$$

Αν $Sa_3(j) > K_3$ τότε υπάρχει υπερχείλιση ίση με

$$SP_3(j) = Sa_3(j) - K_3 \quad \text{και} \quad S_3(j) = K_3$$

Αλλιώς,

$$S_3(j) = Sa_3(j) \quad \text{και} \quad SP_3(j) = 0$$

4.2.4. Ταμιευτήρας αναρρύθμισης

Η υδρολογία της λεκάνης του ταμιευτήρα αυτού δε λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς, ούτε και θεωρούνται υπόγειες διαφυγές από αυτόν. Οι μόνες εισροές στον ταμιευτήρα είναι οι απολήψεις $R_2(j)$ από το Μόρο και $R_5(j)$ από την Υλίκη (Σχήμα 15).

Επομένως η καθαρή εισροή είναι

$$N_4(j) = R_3(j) + R_5(j) \quad (4.13)$$

Η απόληψη $R_4(j)$ προκύπτει από τον κανόνα λειτουργίας (βλ. παρ. 4.3).

Το τσοζύγιο του ταμιευτήρα δίνει διαθέσιμο όγκο στο τέλος του μήνα j :

$$Sa_4(j) = S_4(j-1) + N_4(j) - R_4(j)$$

Αν $Sa_4(j) > K_4$ υπάρχει υπερχείλιση

$$SP_4(j) = Sa_4(j) - K_4 \quad \text{και} \quad S_4(j) = K_4 \quad (4.14)$$

Άλλως

$$S_4(j) = Sa_4(j) \quad \text{και} \quad SP_4(j) = 0$$

4.3. Κανόνες λειτουργίας

Οπως αναφέρθηκε ήδη στην παρ. 4.2 οι σχέσεις που περιγράφουν τον κανόνα λειτουργίας συστήματος ταμιευτήρων εξαρτώνται από το ποιοι ταμιευτήρες υπεισέρχονται στο σύστημα καθώς και από ορισμένες αποφάσεις όσον αφορά τις απολήψεις από τον κάθε ταμιευτήρα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σχέσεις αυτές για κάθε περίπτωση συνδυασμού ταμιευτήρων.

4.3.1. Σημερινό υδροδοτικό σύστημα

4.3.1.a. Μεμονωμένος ταμιευτήρας Μόρνου

Η μηνιαία ζήτηση είναι ίση με

$$D(j) = a(j) * (Dy/12) \quad (4.15)$$

Η απόληψη $R_2(j)$ είναι ίση με τη ζήτηση εφόσον η παροχετευτικότητα του υδαταγωγού Μόρνου C_2 και η διαθέσιμη για απόληψη ποσότητα νερού $S_2(j-1) + N_2(j)$ το επιτρέπουν. Η μέγιστη απόληψιμη ποσότητα νερού $\max R_2(j)$ καθορίζεται από την παροχετευτικότητα C_2 εφόσον υπάρχει διαθέσιμη ποσότητα νερού.

Σε μαθηματική μορφή

$$R_2(j) = \max [0, \min(S_2(j-1) + N_2(j), C_2, D(j))] \quad (4.16\alpha)$$

$$\max R_2(j) = \max [0, \min(S_2(j-1) + N_2(j), C_2)] \quad (4.16\beta)$$

Απόληψη γίνεται μόνον όταν $S_2(j-1) + N_2(j) > 0$ δηλαδή για ολικό όγκο μεγαλύτερο του νεκρού όγκου.

4.3.1.β. Μεμονωμένη εκμετάλλευση Λίμνης Υλίκης

Η απόληψη $IR_3(j)$ για άρδευση είναι ίση με τη ζήτηση $DR(j)$ εφόσον δεν προκαλεί μείωση του όγκου κάτω από την τιμή $SF_3(j)$ που αντιστοιχεί στον όγκο ασφαλείας έναντι βλάβης του Μόρνου.

$$IR_3(j) = \max [0, \min(S_3(j) + N_3(j) - SF_3(j), DR(j))] \quad (4.17)$$

$$\text{όπου } DR(j) = ar(j) (DRy/12) \quad (4.18)$$

είναι η μηνιαία ζήτηση για άρδευση με $ar(j)$ το συντελεστή ανισοκατανομής της ζήτησης για άρδευση εντός του έτους, (Κεφ. 5),

και DRy = ετήσια ζήτηση για άρδευση.

Η μέγιστη απολήψιμη ποσότητα νερού για ύδρευση της Αθήνας είναι εκείνη που επιτρέπει η παροχετευτικότητα C_3 του υδραγωγείου Υλίκης και εφόσον εξασφαλίζονται οι όγκοι ασφάλειας $SF_3(j)$, $SR_3(j)$ (παρ. 4.2.3)

$$\begin{aligned} \max R_3(j) = \max [0, \min(S_3(j-1) + N_3(j) - IR(j) \\ - SF_3(j) - SR_3(j), C_3)] \end{aligned} \quad (4.19)$$

Η πραγματική απόληψη $R_3(j)$ θα είναι ίση με τη ζήτηση $D(j)$ του μήνα j εφόσον αυτή δεν υπερβαίνει την τιμή $\max R_3(j)$ δηλαδή

$$R_3(j) = \min [D(j), \max R_3(j)] \quad (4.20)$$

4.3.1.y. Συνδυασμένοι ταμιευτήρες Μόρνου-Υλίκης

Εφ'όσον ο διαθέσιμος όγκος νερού στο Μόρνο ($S_2(j-1) + N_2(j)$) υπερβαίνει κάποιο κατώφλι V_2 τότε γίνεται απόληψη μόνο από τον ταμιευτήρα Μόρνου (παρ. 4.3.1.a και 5.9). Στην αντίθετη περίπτωση η ικανοποίηση της μηνιαίας ζήτησης $D(j)$ γίνεται κατά σειρά προτεραιότητας από τις εξής διαθέσιμες ποσότητες νερού:

a. Σε πρώτη προτεραιότητα παίρνεται από την Υλίκη ποσότητα νερού που να μην εξαντλεί πάνω από ένα ποσοστό β ($0 \leq \beta \leq 1$) τις δυνατότητες της Υλίκης. Η παράμετρος αυτή β ορίζεται από τη σχέση

$$\beta = \frac{\text{μέγιστη επιτρεπτή απόληψη}}{\text{μέγιστη δυνατή απόληψη} (\max R_3(j))} \quad (4.21)$$

Η ποσότητα αυτή υπολογίζεται ως εξής: Μετά τον υπολογισμό της απόληψης για αρδευτικούς σκοπούς $IR_3(j)$ από την εξίσωση 4.17 (παρ. 4.3.2.) υπολογίζεται η μέγιστη απολήψιμη ποσότητα για ύδρευση $\max R_3(j)$ από την εξίσωση 4.19.

Η απόληψη από την Υλίκη θα είναι

$$R_3(j) = \min (\beta \max R_3(j), D(j)) \quad (4.22)$$

β. Τέλος επιδιώκεται η ικανοποίηση από το Μόρνο της ζήτησης που δεν ικανοποιήθηκε ως τώρα: $D(j) - R_3(j)$

Η συμπληρωματική απόληψη από το Μόρνο θα είναι

$$R_2(j)^* = \max [0, \min(D(j) - R_3(j), \max R_2(j))] \quad (4.23)$$

και με αυτή την τιμή καταρτίζεται το ισοζύγιο του ταμιευτήρα αυτού. Στην περίπτωση όπου το κατώφλι V_2 για το Μόρνο θεωρηθεί στη μέγιστη στάθμη του τότε προκύπτει ο κανόνας απόλυτης προτεραιότητας της Υλίκης (βλ. παρ. 5.9). Άλλιώς πρόκειται για κανόνα εναλλακτικής προτεραιότητας Μόρνου-Υλίκης.

4.3.2. Μελλοντικό υδροδοτικό σύστημα

4.3.2.a. Συνδυασμένοι ταμιευτήρες Μόρνου-Ευήνου (Σχ. 14)

Η μέγιστη δυνατή παροχέτευση νερού $\max R_1(j)$ από τη σήραγγα προσαγωγής Μόρνου-Ευήνου είναι ίση με την παροχετευτικότητα C_1 της σήραγγας εφόσον υπάρχει διαθέσιμος όγκος νερού στον ταμιευτήρα Ευήνου.

$$\max R_1(j) = \max [0, \min (S_1(j-1) + N_1(j), C_1)] \quad (4.25)$$

Ελέγχεται αν η πρόσθετη αυτή εισροή στο Μόρνο προκαλεί υπερχείλιση του ταμιευτήρα Μόρνου η οποία δεν είναι επιθυμητή.

Η εισροή στο Μόρνο στην περίπτωση αυτή είναι

$$N_2(j)^* = N_2(j) + \max R_1(j) \quad (4.26)$$

όπου $N_2(j)$ δίνεται από την εξ. (4.4), η μέγιστη απόληψη από τον Εύηνο $\max R_1(j)$ από μια εξίσωση εντελώς ανάλογη της (4.16β) και η απόληψη από το Μόρνο από την εξ. (4.16a) για εισροή $N_2(j)$.

Αν από την κατάρτιση του ισοζυγίου του ταμιευτήρα Μόρνου (εξ. 4.5, 4.6) προκύψει υπερχείλιση $SP_2(j) > 0$ τότε γίνεται μείωση της απόληψης από τον Εύηνο τέτοια ώστε τελικά

$$R_1(j) = \max [0, \max R_1(j) - SP_2(j)] \quad (4.27)$$

Με τη νέα τιμή της εισροής στο Μόρνο

$$N_2(j)^{**} = N_2(j) + R_1(j) \quad (4.28)$$

καταρτίζεται το τελικό ισοζύγιο του Μόρνου.

Στην αντίθετη περίπτωση ο έλεγχος δίνεται $SP_2(j) = 0$ η απόληψη από τον Εύηνο παραμένει ίση με $R_1(j) = \max R_1(j)$.

4.3.2.β. Συνδυασμένοι ταμιευτήρες Μόρνου - Ευήνου - Ταμιευτήρα αναρρύθμισης (Σχ. 14)

Θεωρείται κατ' αρχήν ότι γίνεται η μέγιστη δυνατή απόληψη από τον Εύηνο (εξ. 4.25). Με εισροή στο Μόρνο που δίνεται από την εξ. (4.26) θεωρείται ότι γίνεται η μέγιστη δυνατή απόληψη από το Μόρνο (εξ. 4.16β) οπότε η εισροή στον ταμιευτήρα αναρρύθμισης είναι:

$$N_4(j)^* = \max R_2(j) \quad (4.29)$$

Η απόληψη από τον ταμιευτήρα αναρρύθμισης είναι:

$$R_4(j) = \max \{0, \min[S_4(j-1) + N_4(j)^*, C_4, D(j)]\} \quad (4.30)$$

Καταρτίζεται το ισοζύγιο του ταμιευτήρα αναρρύθμισης και αν προκύπτει υπερχείλιση στον ταμιευτήρα αναρρύθμισης $SP_4(j) > 0$ τότε μειώνεται η απόληψη από το Μόρνο

$$R_2(j) = \max [0, \max R_2(j) - SP_4(j)] \quad (4.31)$$

Καταρτίζεται τώρα ισοζύγιο του Μόρνου με τη νέα απόληψη $R_2(j)$ και αν προκύψει $SP_2(j) > 0$ τότε μειώνεται η απόληψη από τον Εύηνο όπως στην προηγούμενη παράγραφο (εξ. 4.27).

Γενικά, κάθε φορά που ένας ταμιευτήρας δεν παρουσιάζει υπερχείλιση με τη μέγιστη απόληψη από τον αμέσως ανάντη ταμιευτήρα, η απόληψη αυτή παραμένει τελικά ίση με τη μέγιστη.

4.3.2.γ. Συνδυασμένοι ταμιευτήρες Μόρνου-Ευήνου-Υλίκης (Σχ. 14)

Εδώ οι προτεραιότητες απόληψης είναι κατά κάποιο τρόπο αντίστροφες από ότι στην περίπτωση Μόρνου-Υλίκης (παρ. 4.3.1.γ). Σαν κύρια πηγή νερού θεωρείται το σύστημα Μόρνου-Ευήνου το οποίο λειτουργεί αποκλειστικά με βαρύτητα και αναμένεται να καλύψει μελλοντικά τις υδρευτικές ανάγκες της Αθήνας. Επειδή όμως εξετάζονται και διάφορα σενάρια αυξημένης ζήτησης της Αθήνας, ο κανόνας λειτουργίας περιλαμβάνει και κάποια περιορισμένη ίσως

εκμετάλλευση της Υλίκης σε δεύτερη προτεραιότητα.

Υπολογίζεται καταρχήν η μέγιστη δυνατή απόληψη $\max R_2(j)$ από το σύστημα Μόρνου-Ευήνου όπως στην παρ. 4.3.2.a. Επίσης υπολογίζεται η μέγιστη δυνατή απόληψη από την Υλίκη για ύδρευση της Αθήνας $\max R_3(j)$ όπως στην παρ. 4.3.1.β (εξ. 4.19).

Με επιδίωξη πλήρους ικανοποίησης της ζήτησης μόνο από το σύστημα Μόρνου-Ευήνου, η πραγματική απόληψη από το σύστημα αυτό θα είναι:

$$R_2(j) = \min [\max R_2(j), D(j)] \quad (4.32)$$

Από την Υλίκη επιδιώκεται να ικανοποιηθεί το ενδεχόμενο έλλειμμα στην ικανοποίηση της ζήτησης:

$$R_3(j) = \min [\max R_3(j), D(j) - R_2(j)] \quad (4.33)$$

4.3.2.δ. Συνδυασμένοι ταμιευτήρες Μόρνου-Ευήνου-Υλίκης-Ταμιευτήρα αναρρύθμισης (Σχ. 15)

Υπολογίζεται καταρχήν η μέγιστη δυνατή απόληψη $\max R_2(j)$ από το σύστημα Μόρνου-Ευήνου όπως στην παρ. 4.3.2.a.

Επίσης υπολογίζεται η μέγιστη δυνατή παροχέτευση από Υλίκη στον ταμιευτήρα αναρρύθμισης

$$\max R_5(j) = \max [0, \min(S_3(j-1) + N_3(j), C_5)] \quad (4.34)$$

Με εισροή στον ταμιευτήρα αναρρύθμισης

$$N_4(j) = \max R_2(j) + \max R_5(j) \quad (4.35)$$

και απόληψη από αυτόν

$$R_4(j) = \max [0, \min(S_4(j-1) + N_4(j), C_4, D(j))] \quad (4.36)$$

καταρτίζεται το ισοζύγιο του ταμιευτήρα αυτού.

Αν $SP_4(j) > 0$ τότε μειώνεται η απόληψη από την Υλίκη

$$R_5(j) = \max [0, \max R_5(j) - SP_4(j)] \quad (4.37)$$

Αν πάλι το ισοζύγιο του ταμιευτήρα δίνει $SP_4(j) > 0$ τότε μειώνεται και η απόληψη από το Μόρνο

$$R_2(j) = \max [0, \max R_2(j) - SP_4(j)] \quad (4.38)$$

Η τελική απόληψη $R_4(j)$ από τον ταμιευτήρα αναρρύθμισης προκύπτει από την εξ. (4.36) για

$$N_4(j) = R_2(j) + R_5(j) \quad (4.39)$$

Το ενδεχόμενο έλλειμμα στην ικανοποίηση της ζήτησης $D(j)$ επιδιώκεται να καλυφθεί από το υδραγωγείο Υλίκης-Αθήνας παροχετευτικότητας C_3 (Σχ. 15).

Η δυνατότητα της Υλίκης μετά την απόληψη $R_5(j)$ προς τον ταμιευτήρα αναρρύθμισης είναι

$$\begin{aligned} \max R_3(j) &= \max [0, \min(S_3(j-1) + N_3(j) - R_5(j) - IR_3(j), \\ &\quad C_3 - R_5(j))] \end{aligned} \quad (4.40)$$

Η τελική απόληψη απευθείας από την Υλίκη είναι

$$R_3(j) = \min \{\max R_3(j), D(j) - R_4(j)\} \quad (4.41)$$

5. ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ ΣΗΜΕΡΙΝΟΥ ΥΔΡΟΔΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

5.1. Επίπεδο αξιοπιστίας

Θεωρούμε ότι είναι επιβεβλημένη η αποδοχή ενός αυξημένου επιπέδου αξιοπιστίας του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, για τον κύριο λόγο ότι πρόκειται για ένα πολύ σοβαρό έργο, του οποίου η αστοχία θα είχε μείζονες συνέπειες, και για τους πρόσθετους λόγους (α) ότι υπάρχουν ανακρίβειες στα δεδομένα εισαροών στους ταμιευτήρες και διαφυγών απ' αυτούς, και (β) ότι λόγω των πολλών μεταβλητών που περιγράφουν το σύστημα και των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων τους δεν είναι δυνατό να υπολογιστούν όρια εμπιστοσύνης, παρά μόνο μέσες αναμενόμενες εκτιμήσεις των μεταβλητών απόφασης.

Κατά συνέπεια επιλέξαμε ως αποδεκτό το επίπεδο αξιοπιστίας 99%, οριζόμενο από το δυσμενέστερο συντελεστή αι (βλ. παρ. 3.1). Αυτό σημαίνει ότι δεχόμαστε πιθανότητα αστοχίας $\alpha_1 = 1\%$ κάθε χρόνο. Διευκρινίζουμε ότι η αστοχία του συστήματος δε σημαίνει παντελή έλλειψη υδροδότησης κατά το έτος που πραγματοποιείται, ούτε δηλώνει ένα φαινόμενο που επεκτείνεται σε όλη τη διάρκεια ενός (υδρολογικού) έτους. Αντίθετα, σημαίνει αποτυχία συνολικής κάλυψης της ζήτησης, η οποία εν γένει πραγματοποιείται σε ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα μέσα στο έτος. Η αποτυχία αυτή μπορεί να οφείλεται

- είτε σε ταυτόχρονο άδειασμα του συνόλου των ταμιευτήρων του υδροδοτικού συστήματος,
- είτε σε εξάντληση της παροχετευτικότητας των αγωγών μεταφοράς,
- είτε σε συνδυασμό των δύο παραπάνω (π.χ. εξάντληση του αγωγού μεταφοράς ενός ταμιευτήρα με ταυτόχρονο άδειασμα των άλλων ταμιευτήρων).

Σημειώνεται ότι το παραπάνω επίπεδο αξιοπιστίας $\alpha_1 = 99\%$ αντιστοιχεί πρακτικά (όπως έδειξαν τα αποτελέσματα από το τρέξιμο του μοντέλου) σε $\alpha_2 \approx 99.8\%$, που σημαίνει ότι σε 2 από τους 1000 μήνες εμφανίζεται πρόβλημα, και σε $\alpha_3 \approx 99.9\%$, που σημαίνει ότι

κατά μέσο όρο από 1000 μονάδες ζήτησης ικανοποιούνται στις 999.

5.2. Ασφάλεια έναντι ατυχημάτων

Τα ατυχήματα που μπορεί να αντιμετωπιστούν με κατάλληλη πρόβλεψη στη λειτουργία του συστήματος είναι οι περιορισμένες βλάβες στους αγωγούς μεταφοράς, ενώ μείζονα ατυχήματα (π.χ. κατάρρευση φράγματος Μόρνου) δε μπορεί να αντιμετωπιστούν.

Οι προβλέψεις που έγιναν αφορούν σε βλάβη ενός από τους κύριους υδαταγωγούς Μόρνου και Υλίκης, με τρίμηνη διάρκεια. Θεωρείται ότι μέσα στη διάρκεια αυτή είναι δυνατό να γίνουν οι κατάλληλες επισκευές (έστω και προσωρινές παρακάμψεις στους αγωγούς), και να ξαναμπεί σε λειτουργία ο αγωγός.

Στο σημείο αυτό επισημαίνουμε ότι η ασφάλεια του υδροδοτικού συστήματος για πρώτη φορά διερευνήθηκε με σοβαρότητα από το παρόν ερευνητικό έργο. Ήδη από το Α' μέρος της εκπόνησης του ερευνητικού έργου είχαμε τονίσει ότι, αν δεν υπάρξει δεύτερος υδαταγωγός Ευήνου-Μόρνου-Αθήνας, ή ειδικός ταμιευτήρας ασφάλειας κοντά στην Αθήνα, θα πρέπει να θεωρηθεί οριστική η ένταξη της Υλίκης στο σύστημα, δεδομένου ότι προσφέρει δεύτερο εναλλακτικό δρόμο προσαγωγής νερού.

Η περίπτωση βλάβης αγωγού δεν αντιμετωπίζεται από το πρόγραμμα της γενικής προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος. Το πρόγραμμα αυτό χειρίζεται τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας ενώ η αξιοπιστία του συστήματος δεν επηρεάζεται από τυχόν βλάβη, γιατί κατά τη διάρκεια της βλάβης εξακολουθούν να γίνονται οι εισροές στους ταμιευτήρες. Αντίθετα οι σχετικοί περιορισμοί που επιβάλλει η κάλυψη των κινδύνων βλάβης, οι οποίοι αφορούν στην εξασφάλιση ικανών όγκων νερού για ασφάλεια σε κάθε ταμιευτήρα, διατυπώνονται κατάλληλα στο μοντέλο λειτουργίας του συστήματος. Δηλαδή στο μοντέλο, επιδιώκεται να είναι πάντα διαθέσιμοι οι όγκοι ασφάλειας σε κάθε ταμιευτήρα.

Οι σχετικές παραδοχές που έγιναν είναι οι ακόλουθες:

- Ο ταμιευτήρας Μαραθώνα διατηρείται συνεχώς γεμάτος και εξασφαλίζει έτσι όγκο $40 * 10^6 \text{ m}^3$ που θα διατεθεί μόνο σε περίπτωση βλάβης.
- Ο ταμιευτήρας Μόρνου διαθέτει ένα αρκετά μεγάλο νεκρό όγκο $118 * 10^6 \text{ m}^3$, ο οποίος εκτιμάται ότι δεν έχει αναλωθεί από αποθέσεις φερτών. Σε περίπτωση βλάβης του υδραγωγείου Υλίκης θα μπορούσε να αντληθεί μέρος του όγκου αυτού κατά την περίοδο που διαρκεί η βλάβη. Κατά συνέπεια δε χρειάζεται να γίνει πρόβλεψη επιπλέον όγκου ασφαλείας στον ταμιευτήρα Μόρνου.
- Στη λίμνη Υλίκη πρέπει να διατίθεται συνεχώς ο κατάλληλος όγκος για την κάλυψη των αναγκών της Αθήνας επί τρίμηνο. Ο όγκος αυτός δεν είναι σταθερός, αλλά προκύπτει σε κάθε χρονική στιγμή ως η ζήτηση του επόμενου τριμήνου μείον τον όγκο στο Μαραθώνα μείον τις ελάχιστες αναμενόμενες εισροές του επόμενου τριμήνου. Ως ελάχιστες εισροές θεωρήθηκαν οι ελάχιστες τιμές ολικών εισροών που έχουν παρατηρηθεί την τελευταία εικοσαετία, όπως φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΟΛΙΚΕΣ ΕΙΣΡΟΕΣ ΣΤΗΝ ΥΛΙΚΗ ($\text{m}^3 * 10^6$)

ΟΚΤ.	0	ΦΕΒ.	19	ΙΟΥΝ.	0
ΝΟΕΜ.	8	ΜΑΡ.	29	ΙΟΥΛ.	0
ΔΕΚ.	21	ΑΠΡ.	11	ΑΥΓ.	0
ΙΑΝ.	24	ΜΑΪΟΣ	0	ΣΕΠΤ.	0

Σημειώνεται ότι η μεταφορά του όγκου ασφάλειας της Υλίκης σε περίπτωση βλάβης του υδαταγωγού Μόρνου τρίμηνης διάρκειας δε μπορεί να γίνει με τη σημερινή παροχετευτικότητα του υδραγωγείου Υλίκης των $7.5 \text{ m}^3/\text{sec}$, αλλά θα απαιτηθεί τουλάχιστον η

παροχετευτικότητα των $11.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ για τα σημερινά επίπεδα ζήτησης

Πράγματι, η σημερινή παροχετευτικότητα δίνεται σε ένα τρίμηνο όγκο $58 * 10^6 \text{ m}^3$, και με την πρόσθεση του όγκου του Μαραθώνα $98 * 10^6 \text{ m}^3$. Ο όγκος αυτός είναι μικρότερος της σημερινής ζήτησης της Αθήνας ακόμα και για το μέσο τρίμηνο ($105 * 10^6 \text{ m}^3$). Η παροχετευτικότητα των $11.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ δίνεται $86 * 10^6 \text{ m}^3$, και μαζί με το Μαραθώνα $126 * 10^6 \text{ m}^3$. Ο όγκος αυτός είναι περίπου ίσος με τη σημερινή ζήτηση του τριμήνου με τη μέγιστη ζήτηση ($123 * 10^6 \text{ m}^3$). Τέλος η επιλογή της παροχετευτικότητας των $15.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ δίνεται μαζί με τον Μαραθώνα $157 * 10^6 \text{ m}^3$. Ο όγκος αυτός είναι αρκετός για το τρίμηνο με τη μέγιστη κατανάλωση όταν η ετήσια κατανάλωση θα είναι $537 * 10^6 \text{ m}^3$, πράγμα που με τους σημερινούς ρυθμούς αύξησης της κατανάλωσης φαίνεται πιθανό να γίνεται σε έξι χρόνια. Κατά συνέπεια, μια ασφαλής πολιτική στο θέμα της ασφάλειας έναντι βλάβης οδηγεί στην επιλογή του διπλασιασμού της σημερινής παροχετευτικότητας του υδραγωγείου Υλίκης.

5.3. Παράλληλες χρήσεις νερού

Οι απολήψεις νερού για άρδευση, από τον ταμιευτήρα Μόρνου, έχουν διακοπεί και λόγω κρισιμότητας της κατάστασης δεν είναι πιθανό να επαναληφθούν στο μέλλον. Εξ άλλου οι παροχετεύσεις για ύδρευση πόλεων και χωριών κατά τη διαδρομή του υδαταγωγού αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της ολικής απόληψης, και γι' αυτό δε λαμβάνονται ξεχωριστά αλλά συνυπολογίζονται στη συνολική κατανάλωση της Αθήνας.

Στη λίμνη Υλίκη είναι υποχρεωτική (σύμφωνα με την απόφαση ΥΠΓΕ Ε/4256/1955) η εξασφάλιση $50 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως για την άρδευση της Κωπαΐδας. Με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα κατανάλωσης η απόληψη του όγκου αυτού, θεωρήθηκε ότι πραγματοποιείται σε 5 μήνες του έτους με την εξής κατανομή.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

ΜΗΝΙΑΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΚΩΠΑΙΔΑΣ
 (συντελεστές ανισοκατανομής της ζήτησης)

ΟΚΤ.	0	ΦΕΒ.	0	ΙΟΥΝ.	2.11
ΝΟΕΜ.	0	ΜΑΡ.	0	ΙΟΥΛ.	4.78
ΔΕΚ.	0	ΑΠΡ.	0.31	ΑΥΓ.	3.94
ΙΑΝ.	0	ΜΑΙΟΣ	0.86	ΣΕΠΤ.	0

Για την εξασφάλιση του παραπάνω όγκου, κατά την προσομοίωση του συστήματος έγινε στο μοντέλο κατάλληλη πρόβλεψη. Συγκεκριμένα θεωρήθηκε ότι κάθε στιγμή θα πρέπει να είναι ταμιευμένη -πέρα από τον όγκο ασφαλείας της Αθήνας- η ποσότητα που θα ζητηθεί για την άρδευση της Κωπαΐδας κατά το επόμενο εξάμηνο.

Ετσι, άντληση νερού για την Αθήνα πραγματοποιείται μόνο όταν το απόθεμα νερού στην Υλίκη υπερκαλύπτει αθροιστικά τον όγκο ασφαλείας για τρίμηνη βλάβη στον υδαταγωγό Μόρνου και τον όγκο για την άρδευση της Υλίκης για ένα εξάμηνο (βεβαίως ο όγκος αυτός μηδενίζεται κατά τους φθινοπωρινούς μήνες). Αντίστοιχα η άντληση νερού για την Κωπαΐδα γίνεται όταν το απόθεμα νερού στην Υλίκη υπερκαλύπτει τον όγκο ασφαλείας της Αθήνας. Αυτό σημαίνει ότι και για την απόληψη της Κωπαΐδας υπάρχει κάποια πιθανότητα αστοχίας, η οποία πάντως είναι μικρή και δεν υπολογίζεται αναλυτικά.

5.4. Χαρακτηριστικές στάθμες ταμιευτήρων

Για τον ταμιευτήρα Μόρνου η ελάχιστη στάθμη καθορίζεται από το επίπεδο της υδροληψίας. Το κατώφλι της υδροληψίας είναι στα +377m και η διάμετρος της σήραγγας Γκιώνας είναι 3.20 m. Για να εξασφαλίζεται η παροχή στη σήραγγα των $23.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ θεωρήσαμε ότι η στάθμη νερού στον ταμιευτήρα πρέπει να είναι στα +382 m που αντιστοιχεί σε όγκο $118.6 * 10^6 \text{ m}^3$. Η μέγιστη στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι στα +435 m που αντιστοιχεί σε όγκο $762 * 10^6 \text{ m}^3$. Κατά συνέπεια ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα είναι $643.4 * 10^6 \text{ m}^3$.

Στην Υλίκη τα πράγματα είναι πιο πολύπλοκα. Ο πυθμένας της λίμνης βρίσκεται στα +40 m, ενώ η στάθμη υπερχείλισης προς τη διάρυγα Μουρικίου βρίσκεται κανονικά στα +77.7 m. Όμως η διάρυγα συνήθως φράσσεται με πασσαλοσανίδες και έτσι η συνήθης μέγιστη στάθμη είναι στα +80 m που αντιστοιχεί σε ολικό όγκο $597.5 * 10^6 m^3$. Ανάλογα με το ποιά θα θεωρηθεί ως ελάχιστη στάθμη της λίμνης, προκύπτουν διάφορες τιμές του νεκρού και του ωφέλιμου όγκου, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ ΥΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΙ ΝΕΚΡΟΙ ΚΑΙ ΩΦΕΛΙΜΟΙ ΟΓΚΟΙ

ΣΤΑΘΜΗ (m)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΝΕΚΡΟΣ ΟΓΚΟΣ $* 10^6 m^3$	ΩΦΕΛΙΜΟΣ ΟΓΚΟΣ $* 10^6 m^3$
+ 43	Ελάχιστη στάθμη που μπορεί κατά την ΕΥΔΑΠ να επιτευχθεί με εγκατάσταση πλωτών αντλιοστασίων	10.0	587.5
+ 47	Στάθμη που έχει επιτευχθεί στο παρελθόν με εγκατάσταση πλωτών αντλιοστασίων και αποβαθρών	39.5	558.0
+ 55	Στάθμη που μπορεί να επιτευχθεί με οικονομικό τρόπο, χωρίς ειδικά έργα (αποβάθρες κλπ.)	128.8	468.7
+ 58	Στάθμη ασφαλείας που κατά το ΙΓΜΕ δε δημιουργεί προβλήματα λειψυδρίας στις παρακείμενες πηγές	171.0	426.5

Οι στάθμες αυτές χρησιμοποιήθηκαν εναλλακτικά στο μοντέλο προσομοίωσης ως ελάχιστες στάθμες, και υπάρχουν διάφορες σειρές αποτελεσμάτων (κεφάλαιο 6) όπου φαίνεται η επίδραση της ελάχιστης στάθμης της Υλίκης στη δυνατότητα του συστήματος.

5.5. Σημερινά αποθέματα νερού

Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΥΔΑΠ, η σημερινή στάθμη στον ταμιευτήρα Μόρνου είναι στα + 399.4 m και αντιστοιχεί σε ολικό όγκο $255 * 10^6 \text{ m}^3$ και ωφέλιμο όγκο $136 * 10^6 \text{ m}^3$. Η σημερινή στάθμη της Υλίκης είναι στα +61 m και αντιστοιχεί σε ολικό όγκο $218.8 * 10^6 \text{ m}^3$. Ο ωφέλιμος όγκος είναι 208.8 για την κατώτατη ελάχιστη στάθμη των +43.0 m και $90.0 * 10^6$ για την οικονομική ελάχιστη στάθμη των +55.0 m.

5.6. Παροχετευτικότητες αγωγών

Η παροχετευτικότητα σχεδιασμού του υδραγωγείου Μόρνου είναι $23.0 \text{ m}^3/\text{sec}$. Δεν έχει όμως ποτέ διαπιστωθεί ποιά είναι η πραγματική παροχετευτικότητα του υδραγωγείου αφού η μέγιστη παροχή που έχει περάσει δεν ξεπερνά τα $16.0 \text{ m}^3/\text{sec}$. Το θέμα αυτό έχει ήδη θιγεί κατά το Α' μέρος της έρευνας, ενώ έχουν γίνει προτάσεις προς την ΕΥΔΑΠ για την ανεξάρτητη διερεύνηση του θέματος αυτού από το ΕΜΠ. Για τις τρέχουσες ανάγκες της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν δύο εναλλακτικές τιμές της παροχετευτικότητας, η τιμή σχεδιασμού ($23.0 \text{ m}^3/\text{sec}$) και μια τιμή μειωμένη κατά 20% ($18.5 \text{ m}^3/\text{sec}$).

Για το υδραγωγείο της Υλίκης χρησιμοποιήθηκαν τρεις εναλλακτικές τιμές της παροχετευτικότητας (βλ. και κεφάλαιο 1): η σημερινή τιμή των $7.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ καθώς και δύο αυξημένες τιμές $11.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $15.0 \text{ m}^3/\text{sec}$, που θα επιτευχθούν με την κατασκευή νέου παράλληλου υδαταγωγού.

5.7. Εισροές

Το δείγμα των εισροών του ταμιευτήρα Μόρνου έχει αναλυθεί κατά το Α' μέρος της έρευνας. Για τις εισροές στην Υλίκη αν και δεν έχει ολοκληρωθεί η ανάλυση, τισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.7. Χρησιμοποιούνται δηλαδή δύο εναλλακτικές συνθετικές χρονοσειρές: η χρονοσειρά της ΜΕΣΗΣ πρόβλεψης με θεωρητική μέση τιμή $325.0 * 10^6 \text{ m}^3$ και η χρονοσειρά της ΑΙΣΙΟΔΟΣΗΣ πρόβλεψης με θεωρητική μέση τιμή $365.7 * 10^6 \text{ m}^3$. Στις παραπάνω τιμές

συμπεριλαμβάνεται και η απορροή της λεκάνης Υλίκης. Σημειώνεται ότι οι μέσες τιμές που επιτυγχάνονται κατά την προσομοίωση διαφέρουν κάπως από τις θεωρητικές τιμές, λόγω του πεπερασμένου μήκους των χρονοσειρών και των εισαγομένων μεροληφιών κατά την παραγωγή των τυχαίων αριθμών.

5.8. Κατανάλωση νερού

Το θέμα της εκτίμησης της κατανάλωσης της Αθήνας και κυρίως της χρονικής εξέλιξης της είναι αρκετά πολύπλοκο αλλά και δεν εμπίπτει στο κυρίως αντικείμενο του ερευνητικού έργου. Μια πρώτη προσπάθεια διερεύνησης των δεδομένων κατανάλωσης που αποφασίστηκε να γίνει δεν έχει ακόμη ολοκληρωθεί στην παρούσα φάση εκπόνησης του ερευνητικού έργου. Για τις ανάγκες της παρούσας έκθεσης έχουν γίνει κάποιες παραδοχές, αυθαίρετες σε ένα βαθμό, οι οποίες διατυπώνονται παρακάτω.

Η χρονική εξέλιξη της κατανάλωσης της Αθήνας μέχρι το έτος 1986-87 φαίνεται στο σχήμα 13. Κατ' αρχήν υπάρχουν δύο σειρές δεδομένων της κατανάλωσης. Η πρώτη προκύπτει από τις μετρήσεις στα διύλιστήρια, και η δεύτερη από τις μετρήσεις στις εξόδους των ταμιευτήρων (έξοδος σήραγγας Γκιώνας από υπερχειλιστές, και αντλιοστάσιο Μουρικίου από ώρες αντλιών). Δυστυχώς οι δύο σειρές εμφανίζουν σοβαρές αποκλίσεις μεταξύ τους, οι οποίες τα τελευταία χρόνια ξεπερνούν τα $50 * 10^6 \text{ m}^3$ (μεγαλύτερες τιμές εμφανίζουν τα δεδομένα της δεύτερης χρονοσειράς). Οι διαφορές αυτές οφείλονται είτε σε απώλειες κατά μήκος των δύο υδραγωγείων, μέχρι τα διύλιστήρια, είτε σε ανακρίβειες των δύο ομάδων μετρήσεων, είτε -το πιθανότερο- σε συνδυασμό των παραπάνω. Το ζήτημα είναι πάντως πολύ σοβαρό, και οπωσδήποτε θα πρέπει να μελετηθεί σε βάθος, ώστε να εντοπιστούν και να ανατρεθούν τα αίτια των διαφορών αυτών. Μάλιστα, αν αποδειχθεί ότι σημαντικό μέρος των διαφορών οφείλεται σε απώλειες που μπορούν να περιοριστούν, το όφελος θα είναι πολύ μεγάλο.

Είναι βεβαίως ευνόητο ότι στο μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος ταμιευτήρων ενδιαφέρει η ολική κατανάλωση, όπως προκύπτει από τις μετρήσεις εκροών στις εξόδους των ταμιευτήρων, δεδομένου μάλιστα

ότι σε ορισμένα υδρολογικά έτη τα δεδομένα εισροών έχουν προκύψει έμμεσα, βάσει αυτών των εκροών, και κατά συνέπεια υπάρχει συμβιβαστότητα εισροών και εκροών.

Ως τιμή αφετηρίας για το μοντέλο προσομοίωσης των ταμιευτήρων χρησιμοποιείται η αναμενόμενη κατανάλωση του τρέχοντος υδρολογικού έτους 1989-90. Κατά τις εκτιμήσεις της ΕΥΔΑΠ που στηρίζονται σε νεότερα δεδομένα κατανάλωσης των διύλιστηρίων (τα δεδομένα που φαίνονται στο σχήμα 13 σταματούν στο υδρολογικό έτος 1986-87), η τιμή αυτή αναμένεται να είναι $380 * 10^6 \text{ m}^3$. Η τιμή αυτή θα πρέπει να αυξηθεί κατά $40 \div 50 * 10^6 \text{ m}^3$ για να ληφθούν υπόψη οι ενδιάμεσες απώλειες (ή διαφορές στις μετρήσεις). Με τη λογική αυτή υιοθετήθηκε τελικά ως αναμενόμενη απόληψη από τους ταμιευτήρες κατά το τρέχον έτος η τιμή των $420 * 10^6 \text{ m}^3$.

Από το σχήμα 13 προκύπτει ότι ο ρυθμός αύξησης της κατανάλωσης κατά τα τελευταία χρόνια, φαίνεται να έχει μια μέση τιμή περίπου $20 * 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$. Η αύξηση αυτή παρατηρείται συνεχώς μετά το 1983-84, ενώ μετά το έτος 1981-82 είχε εμφανιστεί προσωρινά μια πτώση, οφειλόμενη μάλλον στην αύξηση της τιμής του νερού που είχε γίνει τότε.

Με βάση την παραπάνω παρατήρηση, και παίρνοντας υπόψη ότι η αυξητική τάση της κατανάλωσης δεν είναι πιθανό να εξακολουθήσει για πάντα, αλλά αναμένεται ότι θα σταθεροποιηθεί σε ένα οριακό επίπεδο, καταρτιστηκαν σε συνεργασία με την ΕΥΔΑΠ τα δύο ακόλουθα προσωρινά σενάρια αύξησης, που σε μεγάλο βαθμό είναι αυθαιρετα.

- Σενάριο 1 - Οριακή κατανάλωση $620 * 10^6 \text{ m}^3$

Προβλέπεται γραμμική αύξηση της κατανάλωσης με ρυθμό $20 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως επί 10 χρόνια και στη συνέχεια σταθεροποίηση στα $620 * 10^6 \text{ m}^3$.

- Σενάριο 2 - Οριακή κατανάλωση $570 * 10^6 \text{ m}^3$

Για την πρώτη πενταετία προβλέπεται γραμμική αύξηση της κατανάλωσης με ρυθμό $20 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως, για τη δεύτερη πενταετία μείωση του ρυθμού στα $10 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως και στη συνέχεια σταθεροποίηση στα $570 * 10^6 \text{ m}^3$.

Τέλος η μηνιαία διακύμανση της κατανάλωσης που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση, όπως προέκυψε από τα διαθέσιμα στοιχεία της ΕΥΔΑΠ, φαίνεται στον ακόλουθο Πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5

ΜΗΝΙΑΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΤΑΝΩΛΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ (συντελεστές ανισοκατανομής της ζήτησης)

ΟΚΤ.	1.05	ΦΕΒ.	0.79	ΙΟΥΝ.	1.12
ΝΟΕΜ.	0.93	ΜΑΡ.	0.89	ΙΟΥΛ.	1.21
ΔΕΚ.	0.93	ΑΠΡ.	0.91	ΑΥΓ.	1.17
ΙΑΝ.	0.86	ΜΑΙΟΣ	1.04	ΣΕΠΤ.	1.10

5.9. Κανόνες λειτουργίας

Ως προς τη συνολική απόληψη από τους δύο ταμιευτήρες ο κανόνας λειτουργίας είναι απλός: Ζητείται η κάλυψη της ολικής κατανάλωσης, και αυτό ανεξάρτητα από τη στάθμη στους ταμιευτήρες ή από άλλες λειτουργικές μεταβλητές. Χρειάζεται όμως μια περαιτέρω διερεύνηση του κανόνα λειτουργίας σε ότι αφορά στον επιμερισμό της απόληψης στους επί μέρους ταμιευτήρες.

Κατ' αρχήν βασική παράμετρος για την κατάρτιση ενός ορθολογικού κανόνα λειτουργίας είναι η διαίτα των απωλειών, και κυρίως των υπόγειων διαφυγών. Δεδομένου ότι οι υπόγειες διαφυγές στην Υλίκη είναι σαφώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του ταμιευτήρα Μόρνου, και μάλιστα αυξάνουν έντονα με την αύξηση της στάθμης, καθίσταται εμφανές ότι εφόσον υπάρχει περίσσευμα για αποθήκευση, αυτό είναι προτιμότερο να παραμένει στον ταμιευτήρα Μόρνου. Κατά συνέπεια ο κανόνας λειτουργίας μπορεί να διατυπωθεί με τον ακόλουθο τρόπο:

- a1. Διατηρείται στην Υλίκη ένα απόθεμα, για την άρδευση της Κωπαΐδας και για την ασφάλεια έναντι βλάβης του υδραγωγείου Μόρνου όπως αναλυτικά περιγράφηκαν στις παραγράφους 5.2 και 5.3.

- α2. Εφόσον ο αποθηκευμένος όγκος στην Υλίκη είναι μεγαλύτερος από το παραπάνω απόθεμα, το περίσσευμα αντλείται για την ύδρευση της Αθήνας με το μέγιστο ρυθμό που επιτρέπει η παροχετευτικότητα του υδραγωγείου.
- α3. Το υπόλοιπο της ζήτησης, που δεν καλύπτεται από την Υλίκη, λαμβάνεται από τον ταμιευτήρα του Μόρνου.

Ο παραπάνω κανόνας, που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως **κανόνας απόλυτης προτεραιότητας της Υλίκης** αποδείχτηκε ότι είναι ο πιο κατάλληλος για το σημερινό σύστημα, χωρίς επαύξηση της παροχετευτικότητας του υδραγωγείου Υλίκης, με την έννοια ότι οδηγεί σε μεγιστοποίηση της συνολικής απόληψης από το σύστημα. Διευκρινίζεται ότι στη φάση που διανύουμε, το ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση της απόληψης, αφού όπως ήδη είχαμε επισημάνει στην Τεχνική Έκθεση του Α' μέρους του ερευνητικού έργου, η κατανάλωση της Αθήνας τείνει στις οριακές δυνατότητες του συστήματος. Βεβαίως ο παραπάνω κανόνας δεν παίρνει υπόψη την οικονομικότητα, αλλά αντίθετα είναι ο πλέον αντιοικονομικός, δεδομένου ότι μεγιστοποιεί τις αντλήσεις νερού από την Υλίκη.

Από τα αποτελέσματα των διερευνήσεων που συνοψίζονται στο επόμενο κεφάλαιο, φάνηκε ότι στην περίπτωση που αυξάνεται η παροχετευτικότητα του υδραγωγείου Υλίκης (σε $11.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ ή $15.0 \text{ m}^3/\text{sec}$), η εφαρμογή του παραπάνω κανόνα μεγιστοποιεί μεν την απόληψη από την Υλίκη, αλλά όχι και την απόληψη από το σύστημα. Αυτό συμβαίνει γιατί γίνεται ουντηρητική εκμετάλλευση του δυναμικού του Μόρνου, και έτσι οδηγούμαστε σε σημαντικές υπερχειλίσεις στον ταμιευτήρα Μόρνου. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί άλλος κανόνας λειτουργίας, και για λόγους μεγιστοποιήσης της απόληψης, αλλά και για λόγους οικονομικότητας. Ο κανόνας που εξετάστηκε, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως **κανόνας εναλλακτικής προτεραιότητας Μόρνου - Υλίκης** είναι ο ακόλουθος.

- β1. Διατηρείται στην Υλίκη ένα απόθεμα ασφαλείας, όπως και την περίπτωση α1.
- β2. Εφόσον το απόθεμα στον ταμιευτήρα Μόρνου υπερβαίνει ένα

συγκεκριμένο κατώφλι Ήταν τότε η τροφοδότηση γίνεται αποκλειστικά από τον ταμιευτήρα Μόρνου.

- β3. Σε αντίθετη περίπτωση, και εφόσον ο αποθηκευμένος όγκος στην Υλίκη είναι μεγαλύτερος από το απόθεμα ασφαλείας, το περίσσευμα της Υλίκης αντλείται για την ύδρευση της Αθήνας με το μέγιστο ρυθμό που επιτρέπει η παροχετευτικότητα του υδραγωγείου.
- β4. Εφόσον παραμείνει υπόλοιπο, αυτό καλύπτεται από τον ταμιευτήρα Μόρνου.

Επισημαίνεται ότι και οι δύο παραπάνω κανόνες λειτουργίας προϋποθέτουν επαρκή παροχετευτικότητα του υδαταγωγού Μόρνου, δεδομένου ότι υπάρχουν αναγκαστικά περίοδοι κατά τις οποίες δε λειτουργεί καθόλου το υδραγωγείο Υλίκης. Εφόσον θεωρηθεί εξασφαλισμένη η παροχετευτικότητα των $23.0 \text{ m}^3/\text{sec}$, δε δημιουργείται πρόβλημα, αλλά αν αυτή είναι μικρότερη, θα πρέπει να τροποποιηθεί ο κανόνας λειτουργίας.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

6.1. Απόληψη από τον ταμιευτήρα Μόρνου

Με τις παραδοχές του προηγούμενου κεφαλαίου 5, από το μοντέλο μηνιαίας προσομοίωσης του ταμιευτήρα Μόρνου και με βάση χρονοσειρές εισροών, βροχών και εξατμίσεων μήκους 2000 ετών, προέκυψε ότι η ασφαλής απόληψη από τον ταμιευτήρα Μόρνου είναι $262 * 10^6 \text{ m}^3$. Αναλυτικά το μέσο ισοζύγιο του ταμιευτήρα φαίνεται στους πίνακες 8 και 9. Σημειώνεται ότι η παραπάνω εκτίμηση του απολήψιμου όγκου είναι πολύ κοντά στην αρχική εκτίμηση των $265 * 10^6 \text{ m}^3$ που είχαμε δώσει πριν από 20 μήνες, με τη δεύτερη αναγνωριστική έκθεση.

6.2. Απόληψη από τη λίμνη Υλίκη

Η αντίστοιχη απόληψη από τη λίμνη Υλίκη, αν αυτή θεωρηθεί ως μεμονωμένος ταμιευτήρας (χωρίς τη συμμετοχή του Μόρνου) είναι $172 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως για το ΜΕΣΟ σενάριο εισροών και $192 * 10^6 \text{ m}^3$ έως $196 * 10^6 \text{ m}^3$ για το ΑΙΣΙΟΔΟΕΟ σενάριο εισροών, όπως ειδικότερα φαίνεται στους πίνακες 6 και 7 και αναλύεται στους πίνακες 8 και 9. Τα παραπάνω μεγέθη αναφέρονται σε καθαρή απόληψη για την ύδρευση της Αθήνας, πέραν της απόληψης για άρδευση της Κωπαΐδας που θεωρήθηκε $50 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως. Επίσης τα μεγέθη αυτά αντιστοιχούν σε ελάχιστη σταθμη της Υλίκης στα +43 m.

6.3. Απόληψη από το σύστημα Υλίκης - Μόρνου

Η συστηματική διερεύνηση με τη μέθοδο της προσομοίωσης του συστήματος Μόρνου-Υλίκης με τον κανόνα λειτουργίας της απόλυτης προτεραιότητας της Υλίκης έδειξε ότι οι ασφαλείς απολήψεις από το σύστημα κυμαίνονται από $461 * 10^6 \text{ m}^3$ μέχρι $498 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως, ανάλογα με το σενάριο εισροών και τις παροχετευτικότητες των δύο υδραγωγείων. Ειδικότερα τα παραπάνω μεγέθη που αντιστοιχούν σε ελάχιστη σταθμη Υλίκης στα +43 m φαίνονται στους Πίνακες 6 και 7 και αναλύονται στους Πίνακες 8 και 9. Στους Πίνακες αυτούς παρατηρούμε τα ακόλουθα.

- a. Η συνδυασμένη εκμετάλλευση του συστήματος αποφέρει σημαντικά οφέλη, αφού η απόληψη από το σύστημα είναι σημαντικά μεγαλύτερη (κατά $17 * 10^6 \text{ m}^3$ έως $41 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως) από το άθροισμα των ασφαλών απολήψεων των μεμονωμένων ταμιευτήρων.
- β. Στην περίπτωση του ΜΕΣΟΥ σεναρίου εισροών της Υλίκης, η παροχετευτικότητα του υδραγωγείου Μόρνου δεν επηρεάζει σοβαρά την ολική απόληψη του συστήματος εφόσον αυτή είναι τουλάχιστον ίση με το 80% της παροχετευτικότητας σχεδιασμού ή $18,5 \text{ m}^3/\text{sec}$. Αντίθετα στην περίπτωση του ΑΙΣΙΟΔΟΞΟΥ σεναρίου εισροών η απόληψη επηρεάζεται σαφώς από την παροχετευτικότητα του υδραγωγείου Μόρνου.
- γ. Η επαύξηση της παροχετευτικότητας του υδραγωγείου Υλίκης από $7.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ σε $11.0 \text{ m}^3/\text{sec}$, οδηγεί σε αύξηση της απόληψης κατά $11.0 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως για το ΜΕΣΟ σενάριο εισροών και $19.0 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως για το ΑΙΣΙΟΔΟΞΟ σενάριο εισροών. Τα αντίστοιχα μεγέθη για την επαύξηση της παροχετευτικότητας σε $15.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ είναι $14 * 10^6 \text{ m}^3$ και $20 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως. Στους Πίνακες 8 και 9 παρατηρούμε ότι η επιμέρους απόληψη από την Υλίκη αυξάνει σημαντικά (π.χ. για την παροχετευτικότητα των $15.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ έχουμε αύξηση της απόληψης από την Υλίκη κατά $34 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως για το ΜΕΣΟ σενάριο και $45 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως για το αισιόδοξο), αλλά ένα μέρος της αύξησης ανατρείται από τις μεγαλύτερες υπερχειλίσεις του ταμιευτήρα Μόρνου.

Η τελευταία παρατήρηση μας οδηγεί στην περαιτέρω διερεύνηση του απολήψιμου όγκου του συστήματος, με άλλο κανόνα λειτουργίας. Τέτοια διερεύνηση έγινε με τον κανόνα εναλλακτικής προτεραιότητας Μόρνου-Υλίκης (παρ. 5.9) για την περίπτωση του ΜΕΣΟΥ σεναρίου εισροών Υλίκης. Κατά την εφαρμογή του κανόνα προσδιορίστηκε η βέλτιστη τιμή του κατωφλίου του όγκου στον ταμιευτήρα Μόρνου, στον οποίο αντιστοιχεί η εναλλαγή της προτεραιότητας απόληψης. Τα αποτελέσματα είναι ελάχιστα καλύτερα στην περίπτωση αυτού του κανόνα, όπως αναλυτικά φαίνεται στον Πίνακα 10. Η αύξηση που επιτυγχάνεται στον απολήψιμο όγκο είναι πολύ μικρή (0 έως $2 * 10^6 \text{ m}^3$) αλλά ο κανόνας αυτός έχει το πλεονέκτημα των μικρότερων (κατά 18 έως $24 * 10^6 \text{ m}^3$) αντλήσεων από την Υλίκη.

Τέλος εξετάστηκε και η επίπτωση της ελάχιστης στάθμης της Υλίκης στον απολήψιμο όγκο, η οποία φαίνεται να είναι σημαντική. Πράγματι για το ΜΕΣΟ σενάριο εισροών, και για ελάχιστη στάθμη στα +58 m (στάθμη ασφαλείας κατά το ΙΓΜΕ, βλ. παρ. 5.4) η απόληψη του συστήματος μειώνεται:

- από $461 * 10^6 \text{ m}^3$ σε $439 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως για παροχετευτικότητα του υδραγωγείου Υλίκης $7.5 \text{ m}^3/\text{sec}$, και
- από $472 * 10^6 \text{ m}^3$ σε $455 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως για παροχετευτικότητα του υδραγωγείου Υλίκης $11.0 \text{ m}^3/\text{sec}$.

6.4. Κίνδυνοι μη επάρκειας του συστήματος για το άμεσο μέλλον

Η ποσοτικοίηση των κινδύνων μπορεί να γίνει με την εισαγωγή της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος σε κάθε συγκεκριμένο έτος. Οι πιθανότητες αυτές προκύπτουν με τη στοχαστική προσομοίωση του συστήματος. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν 100 χρονοσειρές μεγέθους 50 έτών η κάθε μια, και για κάθε χρονοσειρά υπολογίστηκε ο χρόνος στον οποίο πραγματοποιείται η πρώτη αστοχία του συστήματος. Κατά τον τρόπο αυτό έγινε η παραγωγή ενός συνθετικού δείγματος της μεταβλητής χρόνος (σε έτη) μέχρι την πρώτη αστοχία του συστήματος, και από το δείγμα αυτό εκτιμήθηκαν στη συνέχεια οι ζητούμενες πιθανότητες.

Η σχετική διερεύνηση περιέλαβε όλους τους συνδυασμούς των ακόλουθων σεναρίων.

- Σενάριο εισροών Υλίκης ΜΕΣΟ και ΑΙΣΙΟΔΟΣ
- Σενάριο κατανάλωσης Αθηνών 1 (με οριακή κατανάλωση $620 * 10^6 \text{ m}^3$) και 2 (με οριακή κατανάλωση $570 * 10^6 \text{ m}^3$).
- Ελάχιστη στάθμη Υλίκης +43 m και +55 m.
- Παροχετευτικότητα υδραγωγείου Υλίκης $7.5 \text{ m}^3/\text{sec}$, $11.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $15.0 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε ο κανόνας λειτουργίας με απόλυτη προτεραιότητα της Υλίκης, ο οποίος είναι ο πιο κατάλληλος για τη διανυόμενη περίοδο, ενώ χρησιμοποιήθηκαν κατά το ξεκίνημα της προσομοίωσης οι σημερινές τιμές των αποθεμάτων στο Μόρνο και την Υλίκη.

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης φαίνονται στους Πίνακες 11 και 12, απ' όπου προκύπτουν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα.

- a. Με ελάχιστη στάθμη Υλίκης στα +43 m η πιθανότητα αστοχίας διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα της τάξης του 1% για τα πρώτα 5-6 χρόνια. Αντίθετα για ελάχιστη στάθμη στα +55 m η πιθανότητα αστοχίας ανεβαίνει σε υψηλά επίπεδα της τάξης του 5% σε 2 χρόνια από σήμερα.
- β. Η επίδραση της επαύξησης της παροχετευτικότητας του υδραγωγείου Υλίκης στις πιθανότητες αστοχίας είναι ευνοϊκή αλλά πάντως όχι σημαντική.
- γ. Με τις πιο αισιόδοξες προοπτικές (ΑΙΣΙΟΔΟΕΟ σενάριο εισροών - σενάριο κατανάλωσης 2 - ελάχιστη στάθμη Υλίκης στα +43 m) το σημερινό υδροδοτικό σύστημα κρίνεται ικανοποιητικό για ένα διάστημα 8 έως 10 ετών από σήμερα.

6.5. Τελικά συμπεράσματα

1. Η σημερινή δυνατότητα απόληψης από τον ταμιευτήρα Μόρνου για αξιοπιστία 99% είναι $262 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως. Η αντίστοιχη δυνατότητα της Υλίκης για ελάχιστη στάθμη στα +43 και για το ΜΕΣΟ σενάριο εισροών είναι $172 * 10^6 \text{ m}^3$ (πέραν των $50 * 10^6 \text{ m}^3$ της Κωπαΐδας). Με συνδυασμένη εκμετάλλευση του συστήματος με τον κανόνα απόλυτης προτεραιότητας της Υλίκης, οι δυνατότητες αυξάνουν σε $461 * 10^6 \text{ m}^3$ συνολικές απολήψεις για αξιοπιστία 99%.
2. Αν πραγματοποιηθεί επαύξηση της παροχετευτικότητας του υδραγωγείου Υλίκης κατά $3.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ (σύνολο $11.0 \text{ m}^3/\text{sec}$) αναμένεται να αυξηθεί η απολήψιμη ποσότητα από το σύστημα

κατά $11.0 * 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως, για το ΜΕΣΟ σενάριο εισροών. Η αντίστοιχη αύξηση για διπλασιασμό της παροχετευτικότητας του υδραγωγείου Υλίκης ($15.0 \text{ m}^3/\text{sec}$) είναι $18.0 * 10^6 \text{ m}^3$. Οι αυξήσεις αυτές κρίνονται αρκετά μικρές σε σχέση με το κόστος των έργων που απαιτούν, αλλά τα έργα μπορούν να δικαιολογηθούν κυρίως για την κάλυψη των κινδύνων βλάβης του υδαταγωγού Μόρνου, όπως αναλυτικά περιγράφεται στην παράγραφο 5.2.

3. Το σημερινό υδροδοτικό σχήμα μπορεί να καλύψει ικανοποιητικά (με πιθανότητα αστοχίας της τάξης του 1% για κάθε χρόνο) τις υδρευτικές ανάγκες της Αθήνας για τα προσεχή 5-6 χρόνια, με την προϋπόθεση ότι η ελάχιστη στάθμη άντλησης μπορεί να φθάσει τα +43 m. Η επαύξηση της παροχετευτικότητας του υδραγωγείου Υλίκης αυξάνει το παραπάνω διάστημα κατά 1 χρόνο περίπου. Με τις πιο αισιόδοξες συνθήκες εισροών και κατανάλωσης το διάστημα αυτό μπορεί να αυξηθεί σε 10 χρόνια περίπου. Τα παραπάνω χρονικά διαστήματα μειώνονται πολύ (περίπου στα 2-3 χρόνια) αν θεωρηθεί ελάχιστη στάθμη Υλίκης στα +55 m. Κατά συνέπεια η ΕΥΔΑΠ θα πρέπει μέσα στην επόμενη διετία να έχει έτοιμα τα έργα για την άντληση από τη στάθμη +43 m.
4. Υπάρχουν δύο σοβαρά θέματα που θα πρέπει να μελετηθούν σε βάθος, και τα οποία δεν εμπίπτουν στο αντικείμενο του ερευνητικού έργου: το θέμα της πρόγνωσης της εξέλιξης της κατανάλωσης και των δυνατοτήτων παρέμβασης σε αυτή, και το θέμα της εκτέλεσης ενός προγράμματος συστηματικών μετρήσεων για τον εντοπισμό και τον περιορισμό των απωλειών στα υδραγωγεία. Οι ορθολογικές παρεμβάσεις στα παραπάνω θέματα αναμένεται να οδηγήσουν σε βελτίωση της αξιοπιστίας του υδροδοτικού συστήματος για το άμεσο μέλλον.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6

ΕΤΗΣΙΕΣ ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΟΡΝΟΥ - ΥΛΙΚΗΣ σε $m^3 * 10^6$

ΓΙΑ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ $\alpha_1 = 99\%$

ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΥΛΙΚΗΣ: +43 m

ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΙΣΡΟΩΝ ΥΛΙΚΗΣ: ΜΕΣΟ

ΚΑΝΟΝΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: ΑΠΟΛΥΤΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΥΛΙΚΗΣ

ΠΑΡΟΧΕΤΕΥΤΙΚΟΤΗΤΑ ΥΛΙΚΗΣ / ΜΟΡΝΟΥ	0	18.5 m^3/sec	23 m^3/sec
0		262	262
7.5	172	461 (+27)	461 (+27)
11.0	172	472 (+38)	472 (+38)
15.0	172	475 (+41)	475 (+41)

Σημείωση: Μέσα στις παρενθέσεις αναγράφεται το καθαρό όφελος που προκύπτει από τη συνδυασμένη εκμετάλλευση του συστήματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7

ΕΤΗΣΙΕΣ ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΟΡΝΟΥ - ΥΛΙΚΗΣ σε $m^3 * 10^6$

ΓΙΑ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ $\alpha_1 = 99\%$

ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΥΛΙΚΗΣ: +43 m

ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΙΣΡΟΩΝ ΥΛΙΚΗΣ: ΑΙΣΙΟΔΟΣΟ

ΚΑΝΟΝΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: ΑΠΟΛΥΤΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΥΛΙΚΗΣ

ΠΑΡΟΧΕΤΕΥΤΙΚΟΤΗΤΑ ΥΛΙΚΗΣ / ΜΟΡΝΟΥ	0	18.5 m^3/sec	23 m^3/sec
0		262	262
7.5	192	475 (+21)	478 (+24)
11.0	196	475 (+17)	497 (+39)
15.0	196	475 (+17)	498 (+40)

Σημείωση: Μέσα στις παρενθέσεις αναγράφεται το καθαρό όφελος που προκύπτει από τη συνδυασμένη εκμετάλλευση του συστήματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8

ΜΕΣΑ ΕΤΗΣΙΑ ΙΕΟΖΥΓΙΑ ΣΥΕΤΗΜΑΤΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΜΟΡΝΟΥ-ΥΑΙΚΗΣ (σε $m^3 * 10^6$)
ΠΙΑ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ $\alpha_1 = 99\%$

ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΥΑΙΚΗΣ : +43 m
ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΙΣΡΟΩΝ ΥΑΙΚΗΣ : ΜΕΣΟ

KANONAS ΔΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: ΑΠΟΛΥΤΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΥΑΙΚΗΣ

ΠΑΡΟΧ.ΜΟΡΝΟΥ->	0	18.5 m ³ /sec	23 m ³ /sec			
ΠΑΡΟΧ.ΥΑΙΚΗΣ						
V						
ZHTHEH =	262	ZHTHEH =	262			
$\alpha_2=99.84\%$	$\alpha_3=99.91\%$	$\alpha_2=99.84\%$	$\alpha_3=99.91\%$			
MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ						
ΑΠΟΡΡΟΗ	293	293	ΑΠΟΡΡΟΗ	293	293	
ΒΡΟΧΩΝ.	25	25	ΒΡΟΧΩΝ.	25	25	
ΕΙΣΡΟΕΣ						
ΕΙΣΡΟΕΣ	318	318	ΕΙΣΡΟΕΣ	318	318	
ΥΔΡΕΥΣΗ	262	262	ΥΔΡΕΥΣΗ	262	262	
ΑΡΔΕΥΣΗ	0	0	ΑΡΔΕΥΣΗ	0	0	
ΕΞΑΤΜ.	22	22	ΕΞΑΤΜ.	22	22	
ΔΙΑΦΥΓΗ	11	11	ΔΙΑΦΥΓΗ	11	11	
ΥΠΕΡΧ.	23	23	ΥΠΕΡΧ.	23	23	
ΕΚΡΟΕΣ						
ΕΚΡΟΕΣ	318	318	ΕΚΡΟΕΣ	318	318	
ZHTHEH =	172	ZHTHEH =	461	ZHTHEH =	461	
$\alpha_2=99.82\%$	$\alpha_3=99.90\%$	$\alpha_2=99.78\%$	$\alpha_3=99.90\%$	$\alpha_2=99.78\%$	$\alpha_3=99.90\%$	
MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ						
ΑΠΟΡΡΟΗ	325	325	ΑΠΟΡΡΟΗ	293	326	619
ΒΡΟΧΩΝ.	9	9	ΒΡΟΧΩΝ.	26	8	34
ΕΙΣΡΟΕΣ						
ΕΙΣΡΟΕΣ	334	334	ΕΙΣΡΟΕΣ	319	334	653
ΥΔΡΕΥΣΗ	172	172	ΥΔΡΕΥΣΗ	266	195	461
ΑΡΔΕΥΣΗ	50	50	ΑΡΔΕΥΣΗ	0	50	50
ΕΞΑΤΜ.	25	25	ΕΞΑΤΜ.	23	24	47
ΔΙΑΦΥΓΗ	86	86	ΔΙΑΦΥΓΗ	12	64	76
ΥΠΕΡΧ.	1	1	ΥΠΕΡΧ.	18	1	19
ΕΚΡΟΕΣ						
ΕΚΡΟΕΣ	334	334	ΕΚΡΟΕΣ	319	334	653
7.5 m ³ /sec						

ΠΙΝΑΚΑΣ 8 (Συνέχεια)

ΜΕΣΑ ΕΤΗΣΙΑ ΓΕΟΖΥΓΙΑ ΔΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΜΟΡΝΟΥ-ΥΑΙΚΗΣ (σε $m^3 * 10^6$)
ΓΙΑ ΑΞΙΟΠΕΤΙΑ αι = 99%

ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΥΑΙΚΗΣ : +43 m
ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΙΕΡΟΩΝ ΥΑΙΚΗΣ : ΜΕΣΟ

ΚΑΝΟΝΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: ΑΠΟΔΥΤΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΥΑΙΚΗΣ

ΖΗΤΗΣΗ = 172 α2=99.82% α3=99.90%			ΖΗΤΗΣΗ = 472 α2=99.74% α3=99.87%			ΖΗΤΗΣΗ = 472 α2=99.74% α3=99.87%		
MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ			MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ			MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ		
ΑΠΟΡΡΟΗ	325	325	ΑΠΟΡΡΟΗ	292	326	618	ΑΠΟΡΡΟΗ	292
ΒΡΟΧΩΝ.	9	9	ΒΡΟΧΩΝ.	27	7	34	ΒΡΟΧΩΝ.	27
ΕΙΕΡΟΕΣ	334	334	ΕΙΕΡΟΕΣ	319	333	652	ΕΙΕΡΟΕΣ	319
ΥΔΡΕΥΣΗ	172	172	ΥΔΡΕΥΣΗ	252	220	472	ΥΔΡΕΥΣΗ	252
ΑΡΔΕΥΣΗ	50	50	ΑΡΔΕΥΣΗ	0	49	49	ΑΡΔΕΥΣΗ	0
ΕΞΑΤΜ.	25	25	ΕΞΑΤΜ.	23	22	45	ΕΞΑΤΜ.	23
ΔΙΑΦΥΓΗ	86	86	ΔΙΑΦΥΓΗ	12	42	54	ΔΙΑΦΥΓΗ	12
ΥΠΕΡΧ.	1	1	ΥΠΕΡΧ.	32	0	32	ΥΠΕΡΧ.	32
ΕΚΡΟΕΣ	334	334	ΕΚΡΟΕΣ	319	333	652	ΕΚΡΟΕΣ	319
ΖΗΤΗΣΗ = 172 α2=99.82% α3=99.91%			ΖΗΤΗΣΗ = 475 α2=99.76% α3=99.88%			ΖΗΤΗΣΗ = 475 α2=99.76% α3=99.88%		
MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ			MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ			MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ		
ΑΠΟΡΡΟΗ	325	325	ΑΠΟΡΡΟΗ	292	326	618	ΑΠΟΡΡΟΗ	292
ΒΡΟΧΩΝ.	9	9	ΒΡΟΧΩΝ.	27	6	33	ΒΡΟΧΩΝ.	27
ΕΙΕΡΟΕΣ	334	334	ΕΙΕΡΟΕΣ	319	332	651	ΕΙΕΡΟΕΣ	319
ΥΔΡΕΥΣΗ	172	172	ΥΔΡΕΥΣΗ	246	229	475	ΥΔΡΕΥΣΗ	246
ΑΡΔΕΥΣΗ	50	50	ΑΡΔΕΥΣΗ	0	49	49	ΑΡΔΕΥΣΗ	0
ΕΞΑΤΜ.	25	25	ΕΞΑΤΜ.	23	20	43	ΕΞΑΤΜ.	23
ΔΙΑΦΥΓΗ	86	86	ΔΙΑΦΥΓΗ	12	34	46	ΔΙΑΦΥΓΗ	12
ΥΠΕΡΧ.	1	1	ΥΠΕΡΧ.	38	0	38	ΥΠΕΡΧ.	38
ΕΚΡΟΕΣ	334	334	ΕΚΡΟΕΣ	319	332	651	ΕΚΡΟΕΣ	319

ΠΙΝΑΚΑΣ 9

ΜΕΣΑ ΕΤΗΣΙΑ ΙΕΩΣΥΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΜΟΡΝΟΥ-ΥΑΙΚΗΣ (σε $m^3 * 10^6$)
ΓΙΑ ΑΕΙΩΝΙΕΤΙΑ $a_1 = 99\%$

ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΤΑΘΜΗ ΥΑΙΚΗΣ : +43 m
ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΙΕΡΩΝ ΥΑΙΚΗΣ : ΑΙΓΑΙΟΛΟΣΟ

ΚΑΝΟΝΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: ΑΠΟΔΥΤΗ ΠΡΩΤΕΑΙΟΤΗΤΑ ΥΑΙΚΗΣ

ΜΑΡΟΧ. ΜΟΡΝΟΥ->	0	18.5 m ³ /sec		23 m ³ /sec	
ΜΑΡΟΧ. ΥΑΙΚΗΣ		ZHTHEH = 262 $a_2=99.84\%$ $a_3=99.91\%$		ZHTHEH = 262 $a_2=99.84\%$ $a_3=99.91\%$	
-V					
		MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ		MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ	
		ΑΠΟΡΡΟΗ 293	293	ΑΠΟΡΡΟΗ 293	293
		ΒΡΟΧΟΠ. 25	25	ΒΡΟΧΟΠ. 25	25
		ΕΙΕΡΟΕΣ 318	318	ΕΙΕΡΟΕΣ 318	318
0		ΥΑΡΕΥΗΝ 262	262	ΥΑΡΕΥΗΝ 262	262
		ΑΡΑΕΥΗΝ 0	0	ΑΡΑΕΥΗΝ 0	0
		ΕΞΑΤΜ. 22	22	ΕΞΑΤΜ. 22	22
		ΔΙΑΦΥΓΗ 11	11	ΔΙΑΦΥΓΗ 11	11
		ΥΠΕΡΧ. 23	23	ΥΠΕΡΧ. 23	23
		EKPOES 318	318	EKPOEI 318	318
		ZHTHEH = 192 $a_2=99.83\%$ $a_3=99.88\%$	ZHTHEH = 475 $a_2=99.89\%$ $a_3=99.98\%$	ZHTHEH = 478 $a_2=99.81\%$ $a_3=99.92\%$	
		MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ		MOPN. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ	
		ΑΠΟΡΡΟΗ 362	362	ΑΠΟΡΡΟΗ 362	655
		ΒΡΟΧΟΠ. 9	9	ΒΡΟΧΟΠ. 8	33
		ΕΙΕΡΟΕΣ 371	371	ΕΙΕΡΟΕΣ 370	688
7.5 m ³ /sec		ΥΑΡΕΥΗΝ 192	192	ΥΑΡΕΥΗΝ 270	475
		ΑΡΑΕΥΗΝ 50	50	ΑΡΑΕΥΗΝ 0	50
		ΕΞΑΤΜ. 27	27	ΕΞΑΤΜ. 23	49
		ΔΙΑΦΥΓΗ 100	100	ΔΙΑΦΥΓΗ 12	98
		ΥΠΕΡΧ. 2	2	ΥΠΕΡΧ. 13	16
		EKPOES 371	371	EKPOEE 318	688
				EKPOEE 319	689
				EKPOEE 370	689

ΠΙΝΑΚΑΣ 9 (Συνέχεια)

ΜΕΣΑ ΕΤΗΣΙΑ ΙΔΟΥΖΤΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΜΟΡΝΟΥ-ΥΑΙΚΗΣ (σε $m^3 * 10^6$)
ΓΙΑ ΑΕΙΟΨΙΣΤΙΑ $a1 = 99\%$

ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΥΑΙΚΗΣ : +43 m
ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΙΕΡΟΩΝ ΥΑΙΚΗΣ : ΑΙΓΑΙΟΔΟΞΟ

ΚΑΝΟΝΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: ΑΠΟΔΥΤΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΥΑΙΚΗΣ

	ΖΗΤΗΣΗ = 196 $a2=99.80\%$ $a3=99.89\%$			ΖΗΤΗΣΗ = 475 $a2=99.75\%$ $a3=99.88\%$			ΖΗΤΗΣΗ = 497 $a2=99.73\%$ $a3=99.88\%$				
	ΜΟΡΝ. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ			ΜΟΡΝ. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ			ΜΟΡΝ. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ				
11 m ³ /sec	ΑΠΟΡΡΟΗ	362	362	ΑΠΟΡΡΟΗ	292	362	654	ΑΠΟΡΡΟΗ	292	362	654
	ΒΡΟΧΩΝ.	9	9	ΒΡΟΧΩΝ.	28	7	35	ΒΡΟΧΩΝ.	27	7	34
	ΕΙΕΡΟΕΣ	371	371	ΕΙΕΡΟΕΣ	320	369	689	ΕΙΕΡΟΕΣ	319	369	688
	ΥΔΡΕΥΣΗ	196	196	ΥΔΡΕΥΣΗ	245	230	475	ΥΔΡΕΥΣΗ	256	241	497
	ΑΡΔΕΥΣΗ	50	50	ΑΡΔΕΥΣΗ	0	50	50	ΑΡΔΕΥΣΗ	0	50	50
	ΕΞΑΤΜ.	26	26	ΕΞΑΤΜ.	25	23	48	ΕΞΑΤΜ.	24	22	46
	ΔΙΑΦΥΓΗ	97	97	ΔΙΑΦΥΓΗ	13	64	77	ΔΙΑΦΥΓΗ	12	55	67
	ΥΠΕΡΧ.	2	2	ΥΠΕΡΧ.	37	2	39	ΥΠΕΡΧ.	27	1	28
	ΕΚΡΟΕΣ	371	371	ΕΚΡΟΕΣ	320	369	689	ΕΚΡΟΕΣ	319	369	688
	ΖΗΤΗΣΗ = 196 $a2=99.80\%$ $a3=99.89\%$	ΖΗΤΗΣΗ = 475 $a2=99.67\%$ $a3=99.83\%$			ΖΗΤΗΣΗ = 498 $a2=99.78\%$ $a3=99.90\%$						
15 m ³ /sec	ΜΟΡΝ. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ	ΜΟΡΝ. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ			ΜΟΡΝ. ΥΑΙΚΗ ΣΥΝΟΛΟ						
	ΑΠΟΡΡΟΗ	362	362	ΑΠΟΡΡΟΗ	292	362	654	ΑΠΟΡΡΟΗ	292	362	654
	ΒΡΟΧΩΝ.	9	9	ΒΡΟΧΩΝ.	28	7	35	ΒΡΟΧΩΝ.	27	6	33
	ΕΙΕΡΟΕΣ	371	371	ΕΙΕΡΟΕΣ	320	369	689	ΕΙΕΡΟΕΣ	319	368	687
	ΥΔΡΕΥΣΗ	196	196	ΥΔΡΕΥΣΗ	232	243	475	ΥΔΡΕΥΣΗ	246	252	498
	ΑΡΔΕΥΣΗ	50	50	ΑΡΔΕΥΣΗ	0	50	50	ΑΡΔΕΥΣΗ	0	49	49
	ΕΞΑΤΜ.	26	26	ΕΞΑΤΜ.	25	23	48	ΕΞΑΤΜ.	24	22	46
	ΔΙΑΦΥΓΗ	97	97	ΔΙΑΦΥΓΗ	13	52	65	ΔΙΑΦΥΓΗ	12	44	56
	ΥΠΕΡΧ.	2	2	ΥΠΕΡΧ.	50	1	51	ΥΠΕΡΧ.	37	1	38
	ΕΚΡΟΕΣ	371	371	ΕΚΡΟΕΣ	320	369	689	ΕΚΡΟΕΣ	319	368	687

MINAKAΣ 10

ΜΕΣΑ ΕΤΗΣΙΑ ΙΕΩΖΥΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΜΟΡΝΟΥ-ΥΛΙΚΗΣ (σε $m^3 * 10^6$)

ΓΙΑ ΑΕΙΟΝΙΤΙΑ $\alpha_1 = 99\%$

ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΥΔΙΚΗΣ: +43 π.

ΕΕΝΑΡΙΟ ΕΙΕΡΟΩΝ ΥΔΙΚΗΣ: ΜΕΣΟ

ΠΑΡΟΧΕΤΕΥΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΟΡΝΟΥ 23 m³/sec

ΚΑΝΟΝΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΜΟΡΝΟΥ-ΥΔΙΚΗΣ

ΠΑΡΟΧΕΤΕΥΤΙΚΟΤΗΤΑ ΥΔΙΚΗΣ	ΖΗΤΗΣΗ Κ.ΑΠ.	ΕΙΣΙΟΣ				ΕΚΠΟΣΣ			
		MOP.	ΥΑ.	ΣΥΝ.		MOP.	ΥΑ.	ΣΥΝ.	
7.5 m ³ /sec	D = 461	ΑΠΟΡΡΟΗ	293	326	619	ΥΔΡΕΥΣΗ	266	195	461
	a ₂ = 99.78 %	ΒΡΟΧΟΠΤ.	26	8	34	ΑΡΔΕΥΣΗ	0	50	50
	a ₃ = 99.90 %					ΕΞΑΤΜΙΣΗ	23	24	47
	Κατώφλι αλλαγής προτεραιότητας 643 * 10 ⁶ m ³	ΣΥΝΟΛΟ	319	334	653	ΔΙΑΦΥΓΗ	12	64	76
						ΥΠΕΡΧΕΙΑ.	18	1	19
		ΣΥΝΟΛΟ	319	334	653				
11 m ³ /sec	D = 472	ΑΠΟΡΡΟΗ	293	326	619	ΥΔΡΕΥΣΗ	270	202	472
	a ₂ = 99.74 %	ΒΡΟΧΟΠΤ.	26	7	33	ΑΡΔΕΥΣΗ	0	49	49
	a ₃ = 99.87 %					ΕΞΑΤΜΙΣΗ	23	23	46
	Κατώφλι αλλαγής προτεραιότητας 593 * 10 ⁶ m ³	ΣΥΝΟΛΟ	319	333	652	ΔΙΑΦΥΓΗ	12	58	70
						ΥΠΕΡΧΕΙΑ.	14	1	15
		ΣΥΝΟΛΟ	319	333	652				
15 m ³ /sec	D = 477	ΑΠΟΡΡΟΗ	293	326	619	ΥΔΡΕΥΣΗ	272	205	477
	a ₂ = 99.73 %	ΒΡΟΧΟΠΤ.	26	7	33	ΑΡΔΕΥΣΗ	0	49	49
	a ₃ = 99.86 %					ΕΞΑΤΜΙΣΗ	22	23	45
	Κατώφλι αλλαγής προτεραιότητας 593 * 10 ⁶ m ³	ΣΥΝΟΛΟ	319	333	652	ΔΙΑΦΥΓΗ	12	55	67
						ΥΠΕΡΧΕΙΑ.	13	1	14
		ΣΥΝΟΛΟ	319	333	652				

ΕΙΝΑΚΑΣ 11

ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΕΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΛΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΟΡΝΟΥ-ΥΑΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΕΠΟΜΕΝΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΈΤΗ

ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΙΕΡΟΩΝ: ΜΕΣΟ

ΚΑΝΟΝΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: ΑΠΟΛΥΤΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΥΑΙΚΗΣ

ΣΕΝΑΡΙΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ	ΠΑΡΟΧΕΤΕΥ- ΤΙΚΟΤΗΤΑ ΥΑΙΚΗΣ m^3/sec	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΥΑΙΚΗΣ(m)	ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΕΤΟΧΙΑΣ % (μεσικές/αθροιστικές) ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ:															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	≥16
1 ($620 \times 10^6 m^3$)	7.5	+ 43	0	1	0	4	0	3	8	6	3	29	16	9	12	6	2	1
			0	1	1	5	5	8	16	22	25	54	70	79	91	97	99	100
"	11.0	+ 43	0	1	0	1	1	3	2	2	8	38	27	7	7	0	2	1
"			0	1	1	2	3	6	8	10	18	56	83	90	97	97	99	100
"	15.0	+ 43	0	1	0	1	1	2	3	1	6	45	24	9	6	0	1	0
			0	1	1	2	3	5	8	9	15	60	84	93	99	99	100	100
"	7.5	+ 55	1	5	6	7	5	5	8	8	15	24	9	5	0	2	0	0
			1	6	12	19	24	29	37	45	60	84	93	98	98	100	100	100
"	11.0	+ 55	1	4	4	4	4	4	6	8	16	36	10	3	0	0	0	0
			1	5	9	13	17	21	27	35	51	87	97	100	100	100	100	100
"	15.0	+ 55	1	3	5	4	2	6	5	8	12	42	11	1	0	0	0	0
			1	4	9	13	15	21	26	34	46	88	99	100	100	100	100	100
2 ($570 \times 10^6 m^3$)	7.5	+ 43	0	1	0	4	0	3	7	4	4	8	10	13	4	10	11	21
			0	1	1	5	5	8	15	19	23	31	41	54	58	68	79	100
"	11.0	+ 43	1	1	0	1	1	3	2	2	5	7	3	8	5	12	11	39
			0	1	1	2	3	6	8	10	15	22	25	33	38	50	61	100
"	15.0	+ 43	0	1	0	1	1	2	3	1	5	7	3	7	6	11	9	43
			0	1	1	2	3	5	8	9	14	21	24	31	37	48	57	100
"	7.5	+ 55	1	5	6	7	5	5	8	5	13	10	7	8	5	7	3	5
			1	6	12	19	24	29	37	42	55	65	72	80	85	92	95	100
"	11.0	+ 55	1	4	4	4	4	4	5	8	8	12	10	10	1	10	5	10
			1	5	9	13	17	21	26	34	42	54	64	74	75	85	90	100
"	15.0	+ 55	1	3	5	4	2	6	5	6	6	14	12	8	3	9	5	11
			1	4	9	13	15	21	26	32	38	52	64	72	75	84	89	100

ΠΙΝΑΚΑΣ 12

ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΕΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΔΙΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΟΡΝΟΥ-ΥΑΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΕΠΟΜΕΝΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΕΤΗ

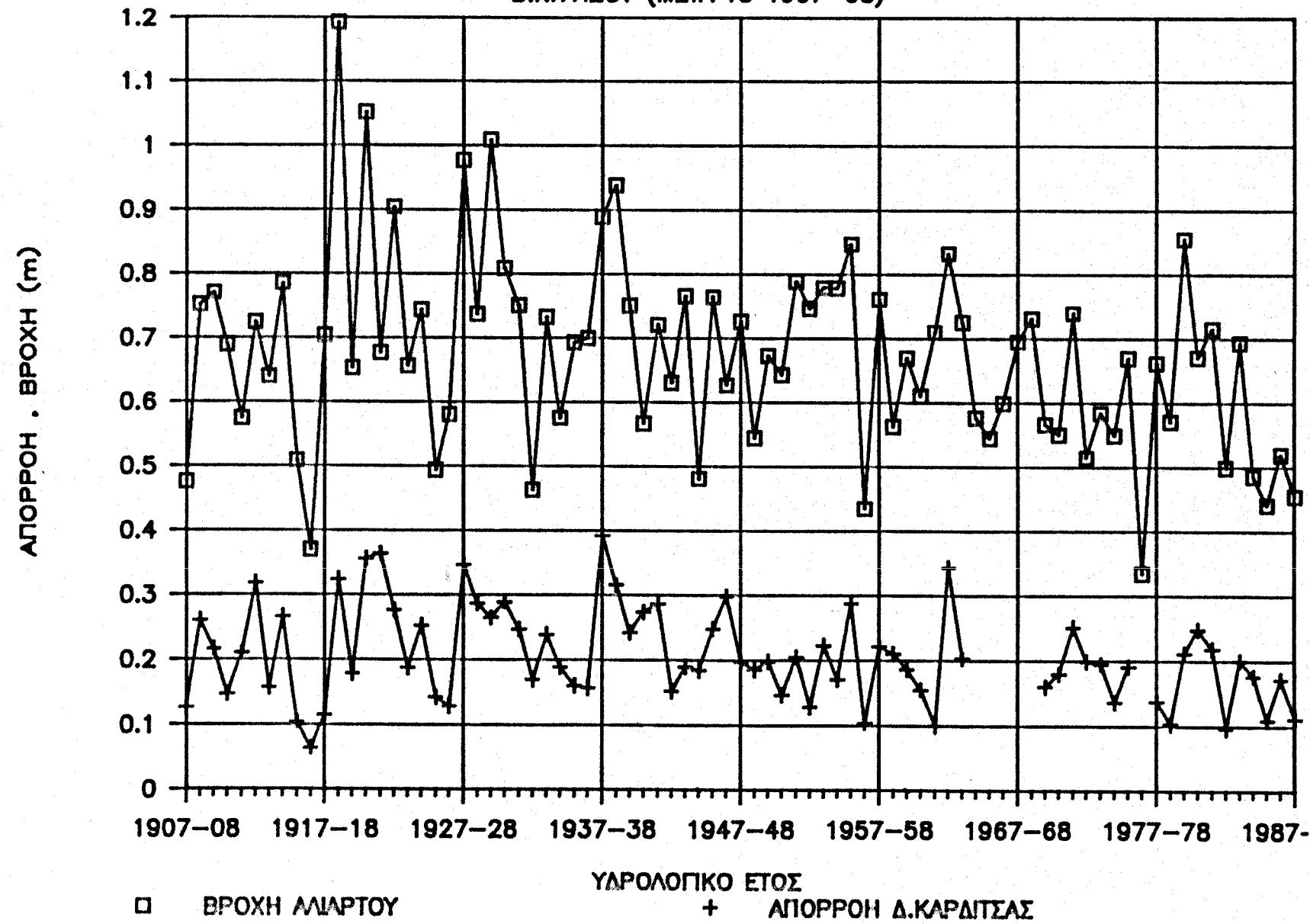
ΕΞΑΡΙΟ ΕΙΕΡΟΩΝ: ΑΙΓΑΙΟΔΟΞΟ

ΚΑΝΟΝΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: ΑΠΟΛΥΤΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΥΑΙΚΗΣ

ΕΞΑΡΙΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ	ΠΑΡΟΧΕΤΕΥ- ΤΙΚΟΤΗΤΑ ΥΑΙΚΗΣ m^3/sec	ΕΛΑΚΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΥΑΙΚΗΣ(m)	ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΕΤΟΧΙΑΣ % (μερικές/αθροιστικές) ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ:															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	≥16
1 ($620 \times 10^6 m^3$)	7.5	+ 43	0	1	0	3	0	3	1	3	6	16	15	12	16	8	7	9
			0	1	1	4	4	7	8	11	17	33	48	60	76	84	91	100
"	11.0	+ 43	0	1	0	1	0	3	1	2	2	35	21	9	8	10	3	4
			0	1	1	2	2	5	6	8	10	45	66	75	83	93	96	100
"	15.0	+ 43	0	1	0	1	0	1	2	1	4	39	23	12	9	1	5	1
			0	1	1	2	2	3	5	6	10	49	72	84	93	94	99	100
"	7.5	+ 55	1	4	3	3	3	5	6	2	12	28	12	11	6	4	0	0
			1	5	8	11	14	19	25	27	39	67	79	90	96	100	100	100
"	11.0	+ 55	1	1	3	3	0	5	5	4	3	54	13	8	0	0	0	0
			1	2	5	8	8	13	18	22	25	79	92	100	100	100	100	100
"	15.0	+ 55	1	1	3	2	0	4	3	5	2	60	14	5	0	0	0	0
			1	2	5	7	7	11	14	19	21	81	95	100	100	100	100	100
2 ($570 \times 10^6 m^3$)	7.5	+ 43	0	1	0	3	0	3	1	2	5	5	7	6	10	11	12	34
			0	1	1	4	4	7	8	10	15	20	27	33	43	54	66	100
"	11.0	+ 43	0	1	0	1	0	3	1	1	2	3	2	4	1	6	8	67
			0	1	1	2	2	5	6	7	9	12	14	18	19	25	33	100
"	15.0	+ 43	0	1	0	1	0	1	2	1	2	3	3	2	3	5	6	70
			0	1	1	2	2	3	5	6	8	11	14	16	19	24	30	100
"	7.5	+ 55	1	4	3	3	3	5	5	3	4	13	12	9	5	8	6	16
			1	5	8	11	14	19	24	27	31	44	56	65	70	78	84	100
"	11.0	+ 55	1	1	3	3	0	5	4	4	2	8	6	10	9	7	9	23
			1	2	5	8	8	13	17	21	23	31	37	47	56	63	72	100
"	15.0	+ 55	1	1	3	2	0	4	3	2	5	5	5	9	8	11	9	32
			1	2	5	7	7	11	14	16	21	26	31	40	48	59	68	100

Σ Χ Η Μ Α 1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΒΡΟΧΗΣ

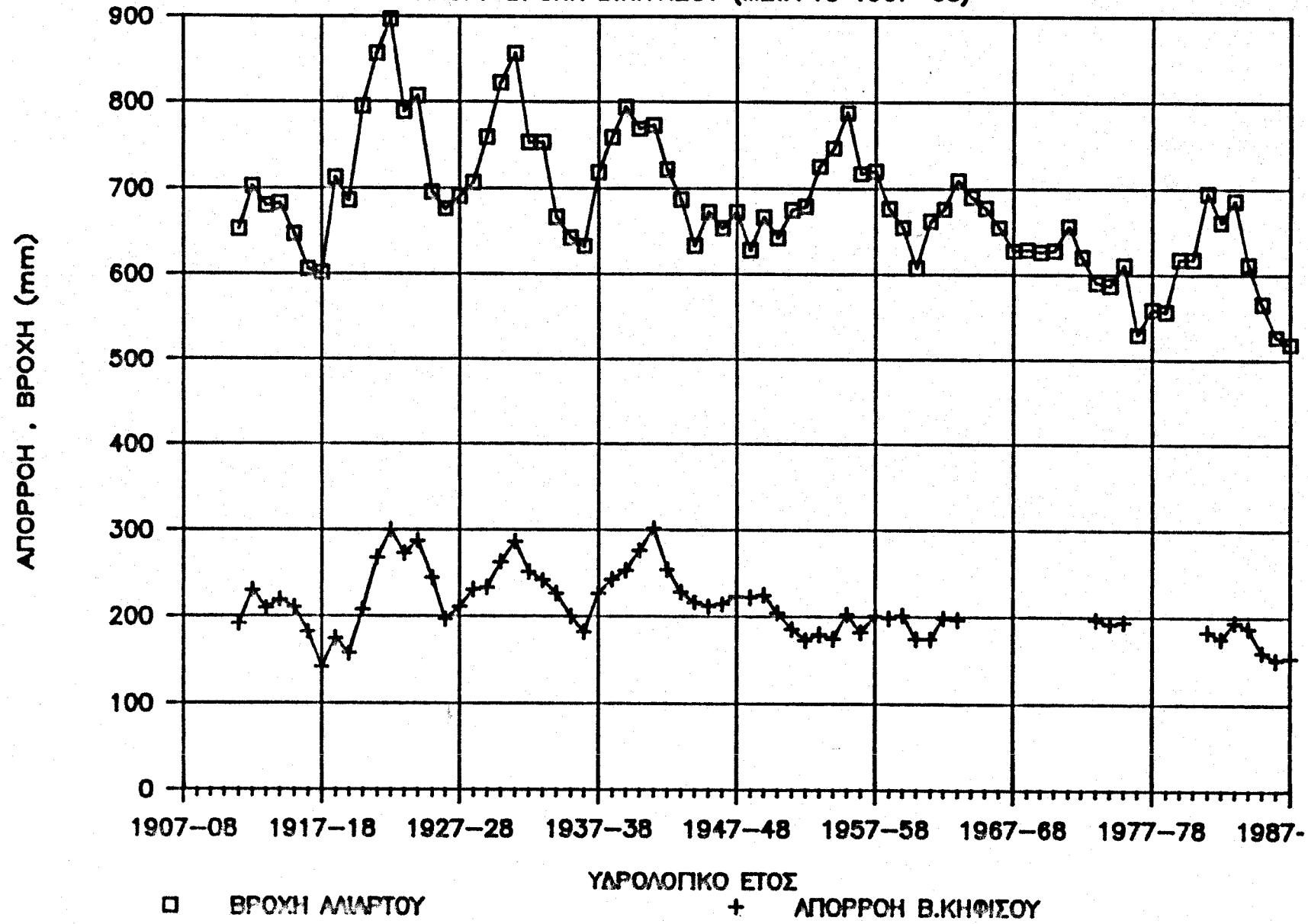
Β.ΚΗΦΙΣΟΥ (ΜΕΤΑ ΤΟ 1907-08)



Σ Χ Η Μ Α 2

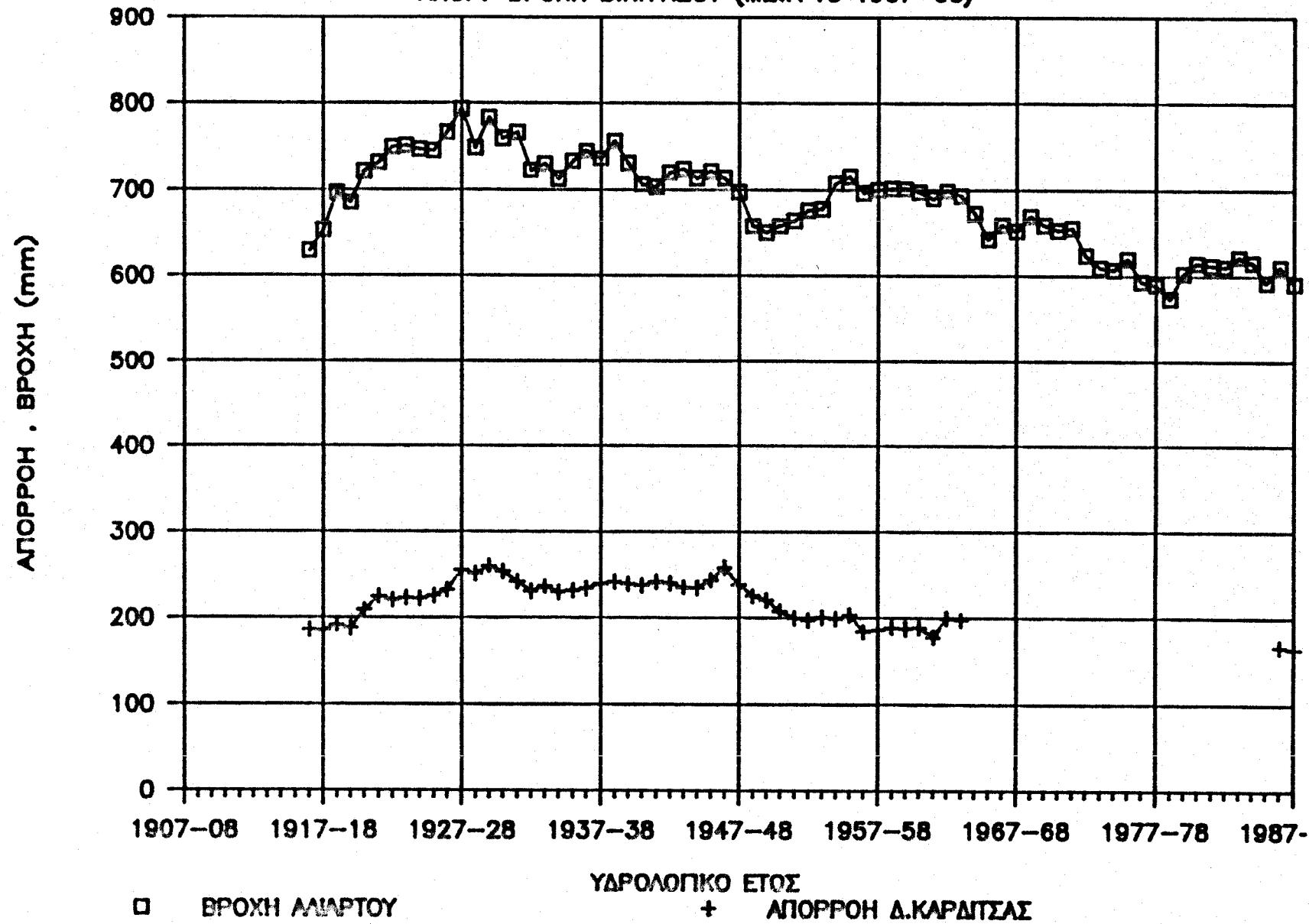
ΚΙΝΟΥΜΕΝΟΙ ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ 5ΕΤΙΑΣ

ΑΠΟΡ.-ΒΡΟΧΗ Β.ΚΗΦΙΣΟΥ (ΜΕΤΑ ΤΟ 1907-08)



Σ Χ Η Μ Α 3 ΚΙΝΟΥΜΕΝΟΙ ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ 10ΕΤΙΑΣ

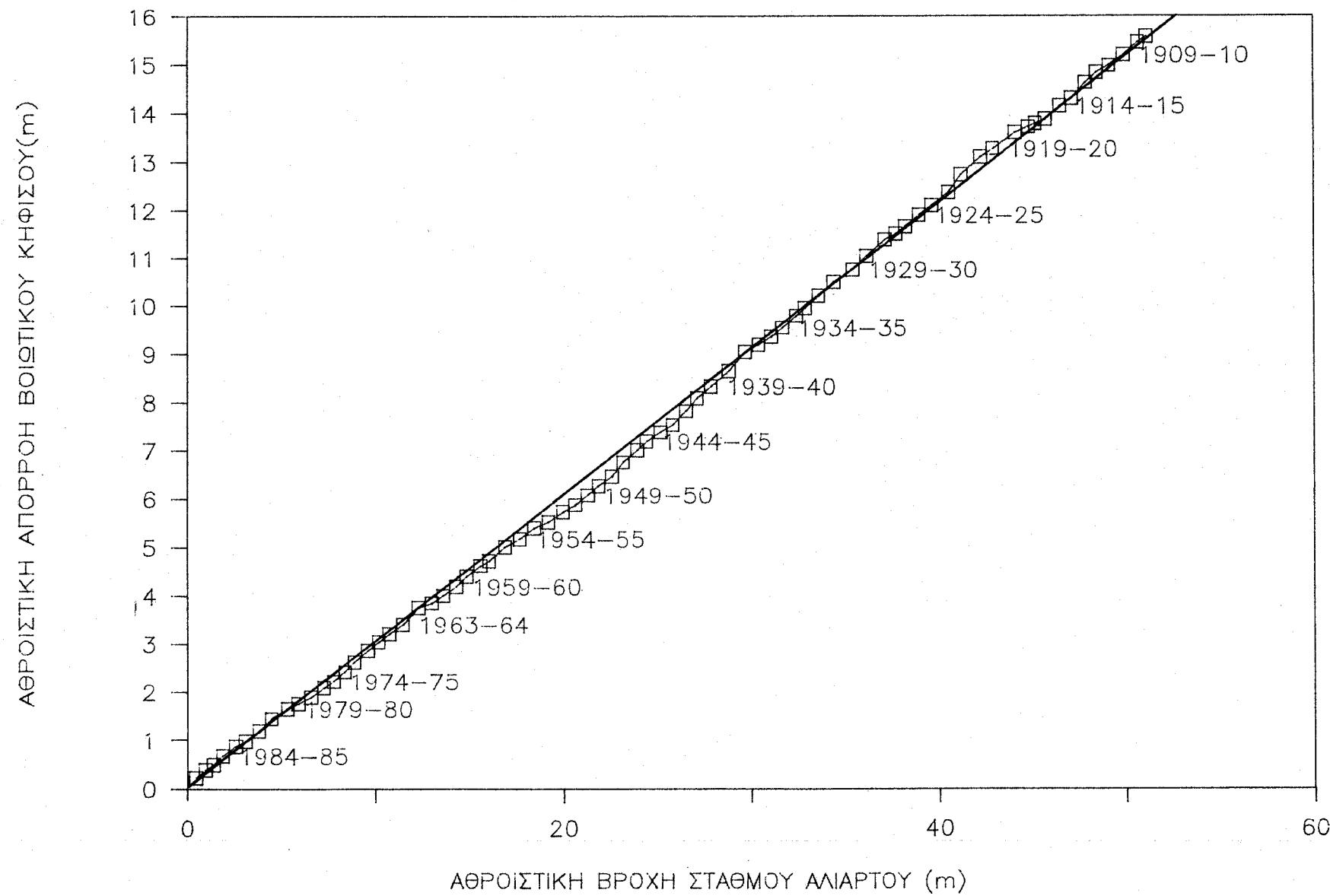
ΑΠΟΡ.-ΒΡΟΧΗ Β.ΚΗΦΙΣΟΥ (ΜΕΤΑ ΤΟ 1907-08)



Σ Χ Η Μ Α 4

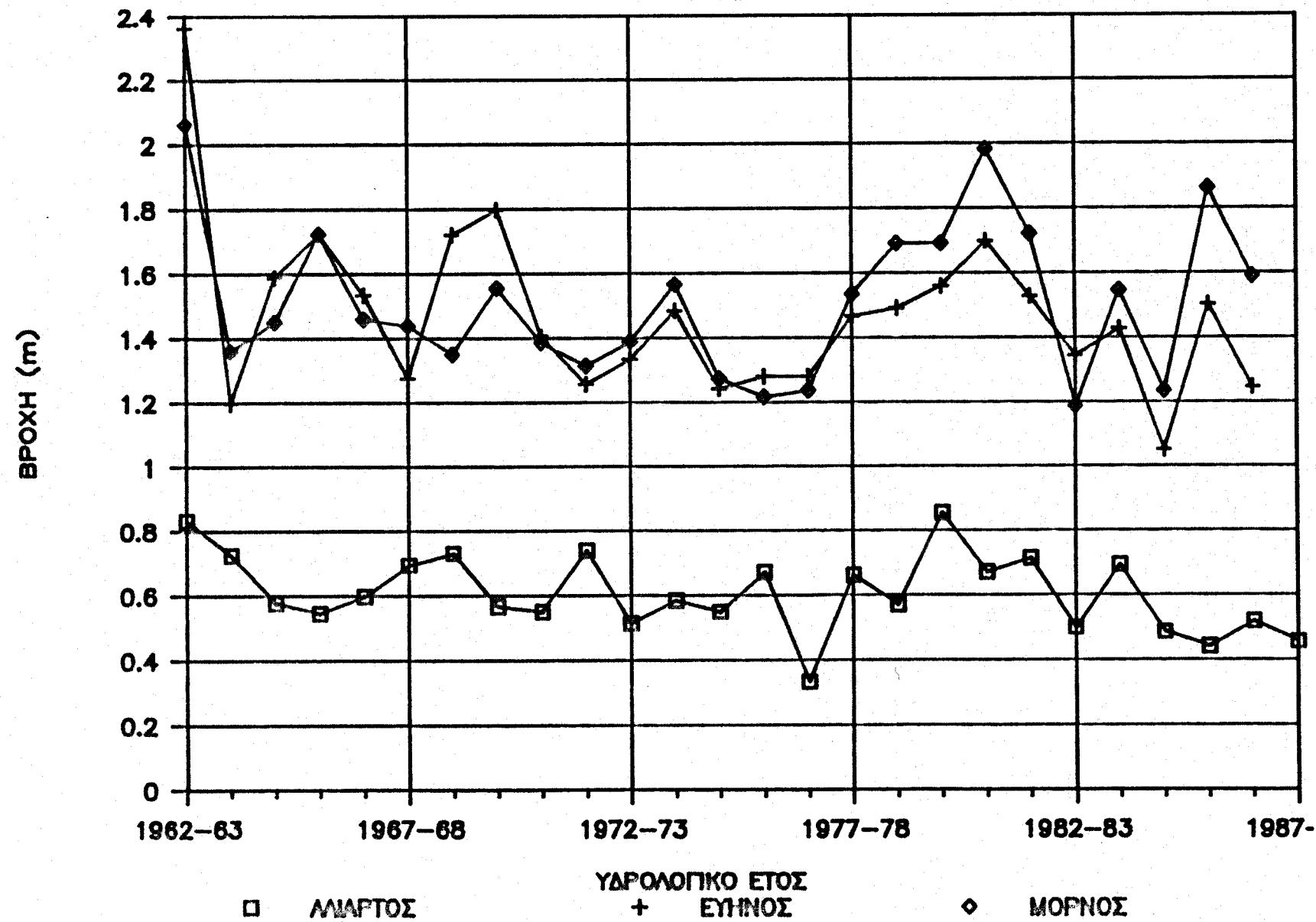
ΔΙΠΛΗ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ

ΑΠΟΡ.Β.ΚΗΦΙΣΟΥ-ΒΡΟΧΗ ΑΛΙΑΡΤΟΥ



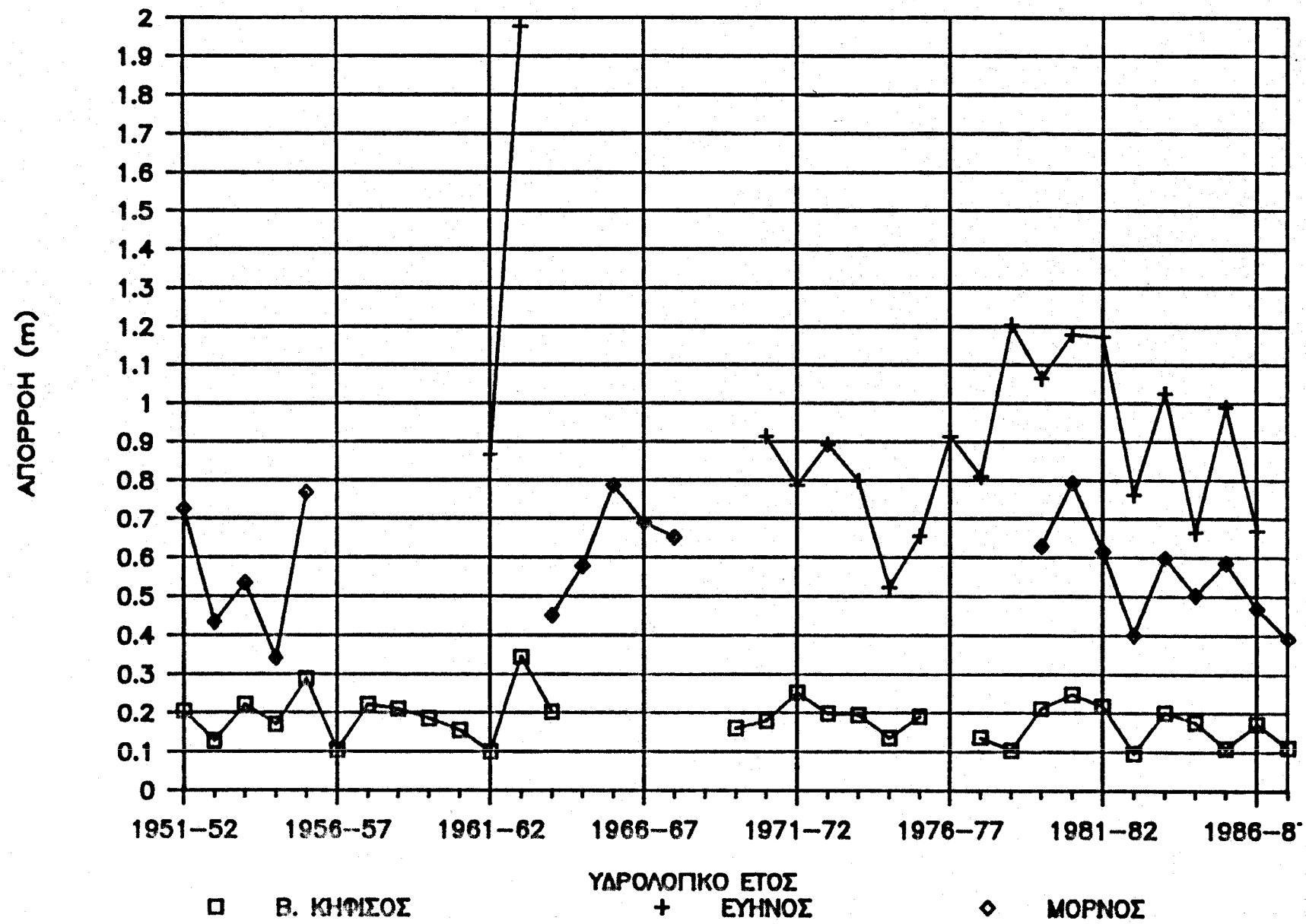
Σ Χ Η Μ Α 5

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΒΡΟΧΩΝ



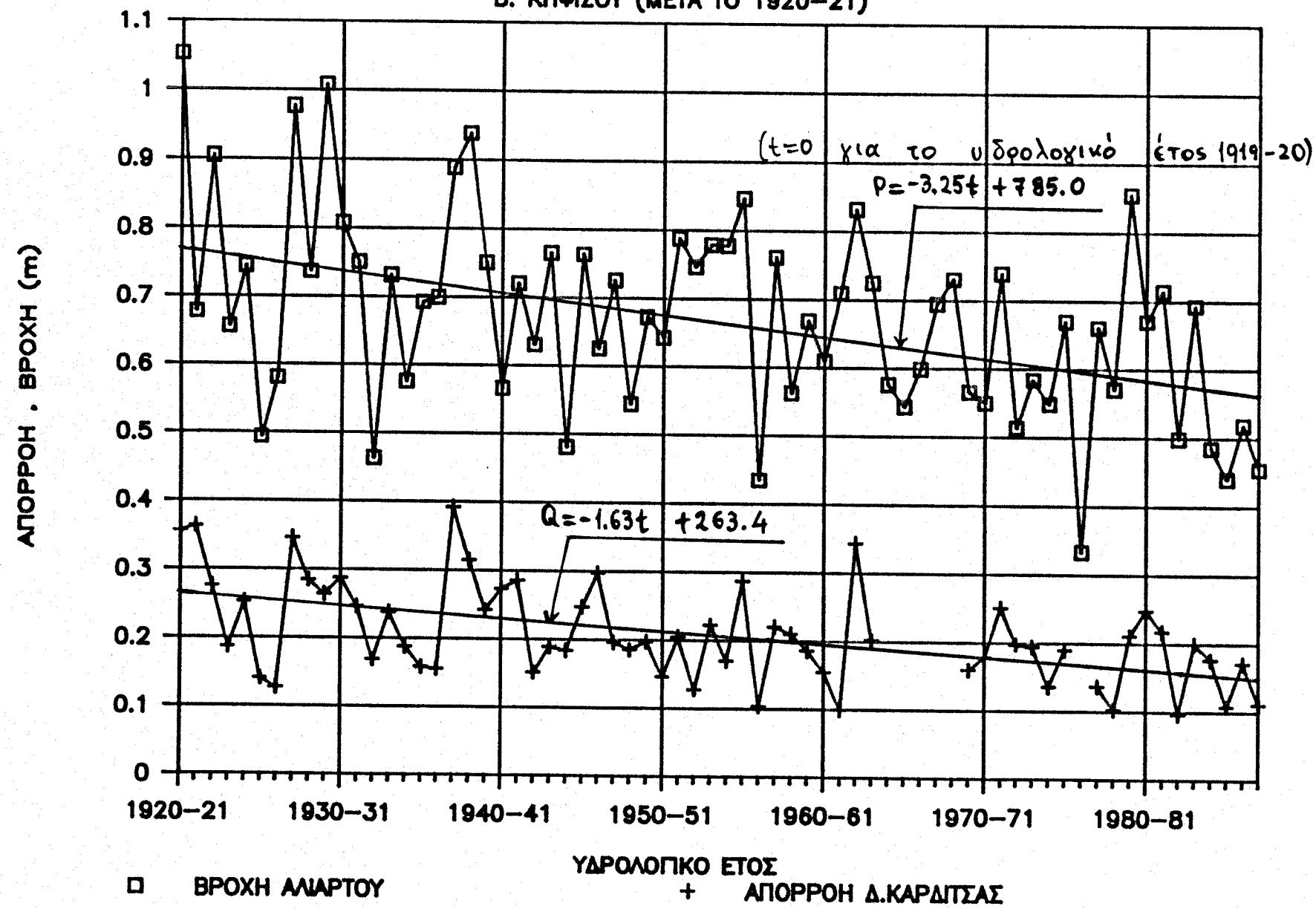
ΣΧΗΜΑ 6

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΡΡΟΩΝ



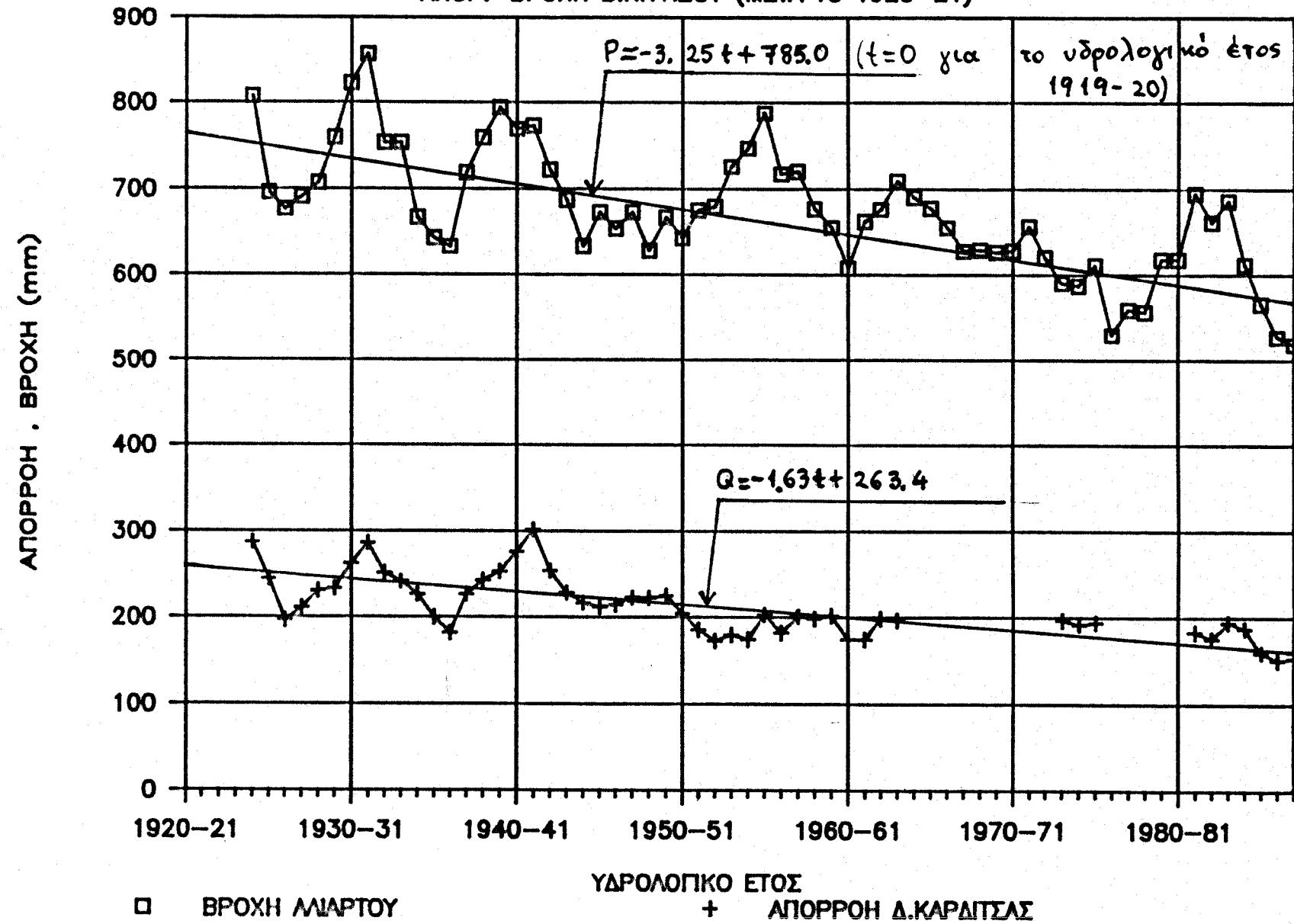
ΣΧΗΜΑ 7 ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΒΡΟΧΗΣ

Β. ΚΗΦΙΣΟΥ (ΜΕΤΑ ΤΟ 1920-21)



Σ Χ Η Μ Α 8 ΚΙΝΟΥΜΕΝΟΙ ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ 5ΕΤΙΑΣ

ΑΠΟΡ.-ΒΡΟΧΗ Β.ΚΗΦΙΣΟΥ (ΜΕΤΑ ΤΟ 1920-21)

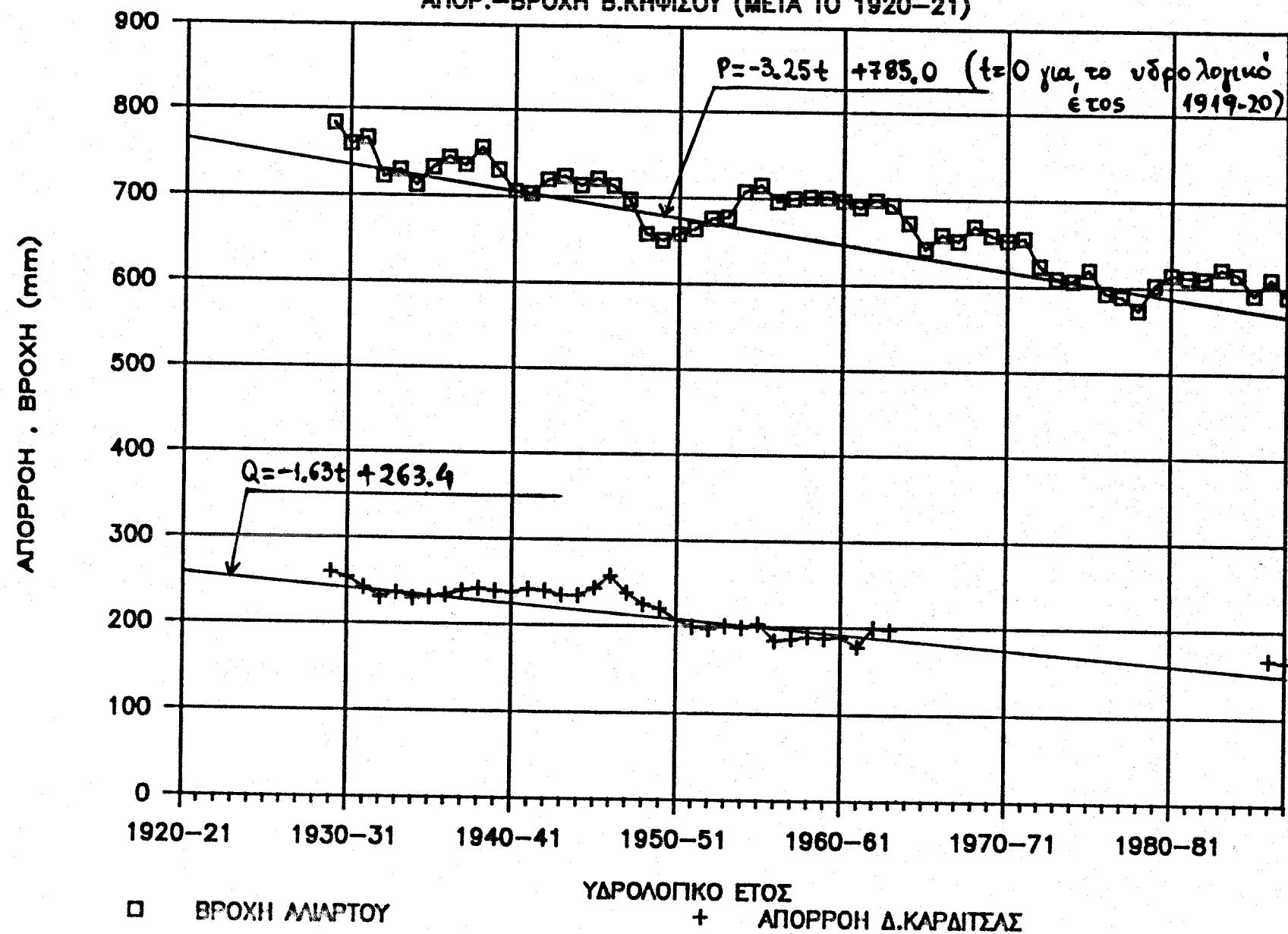


□ ΒΡΟΧΗ ΛΙΑΡΤΟΥ

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΕΤΟΣ
+ ΑΠΟΡΡΟΗ Δ.ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ

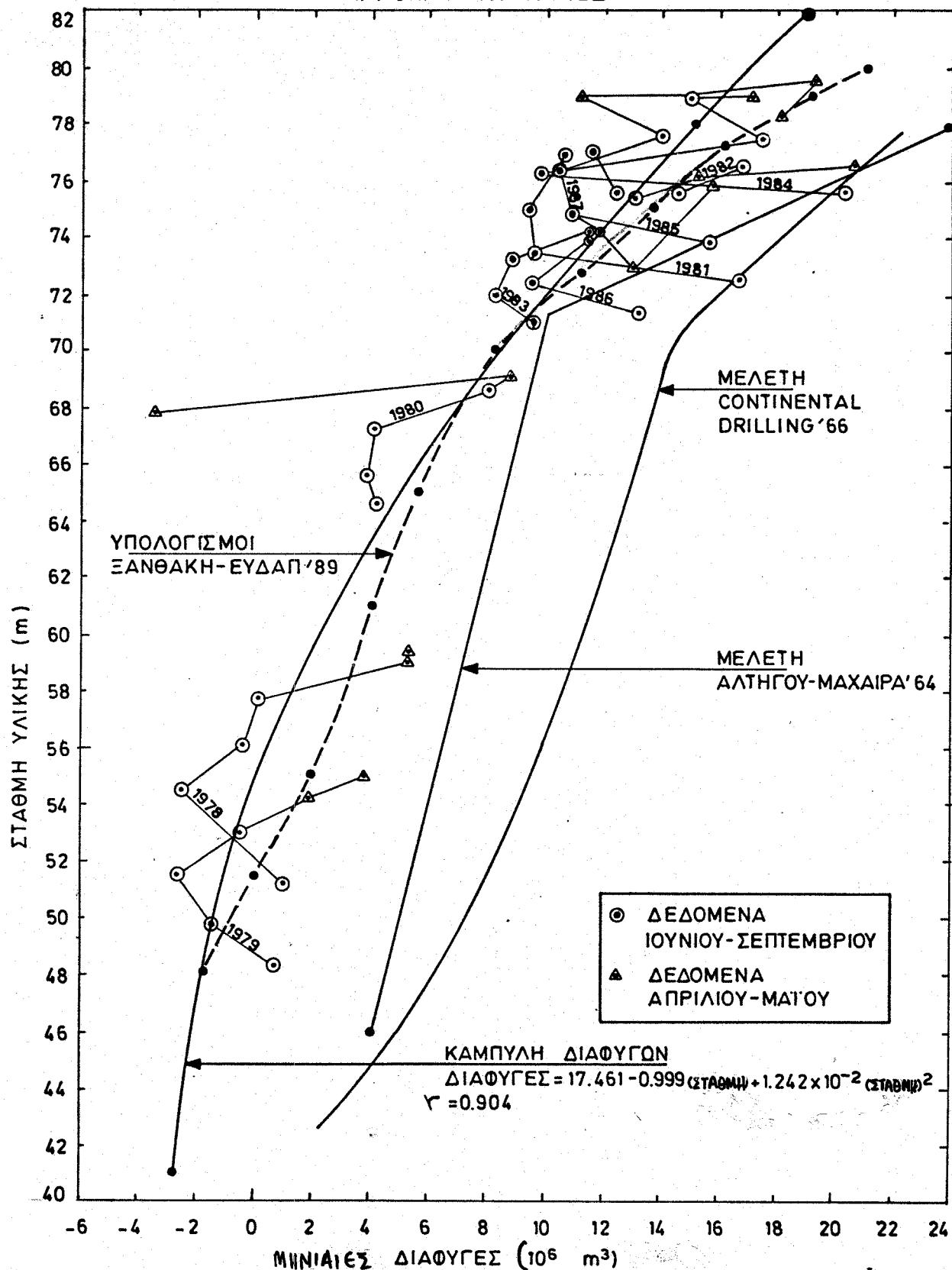
Σ Χ Η Μ Α 9 ΚΙΝΟΥΜΕΝΟΙ ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ 10ΕΤΙΑΣ

ΑΠΟΡ.-ΒΡΟΧΗ Β.ΚΗΦΙΣΟΥ (ΜΕΤΑ ΤΟ 1920-21)

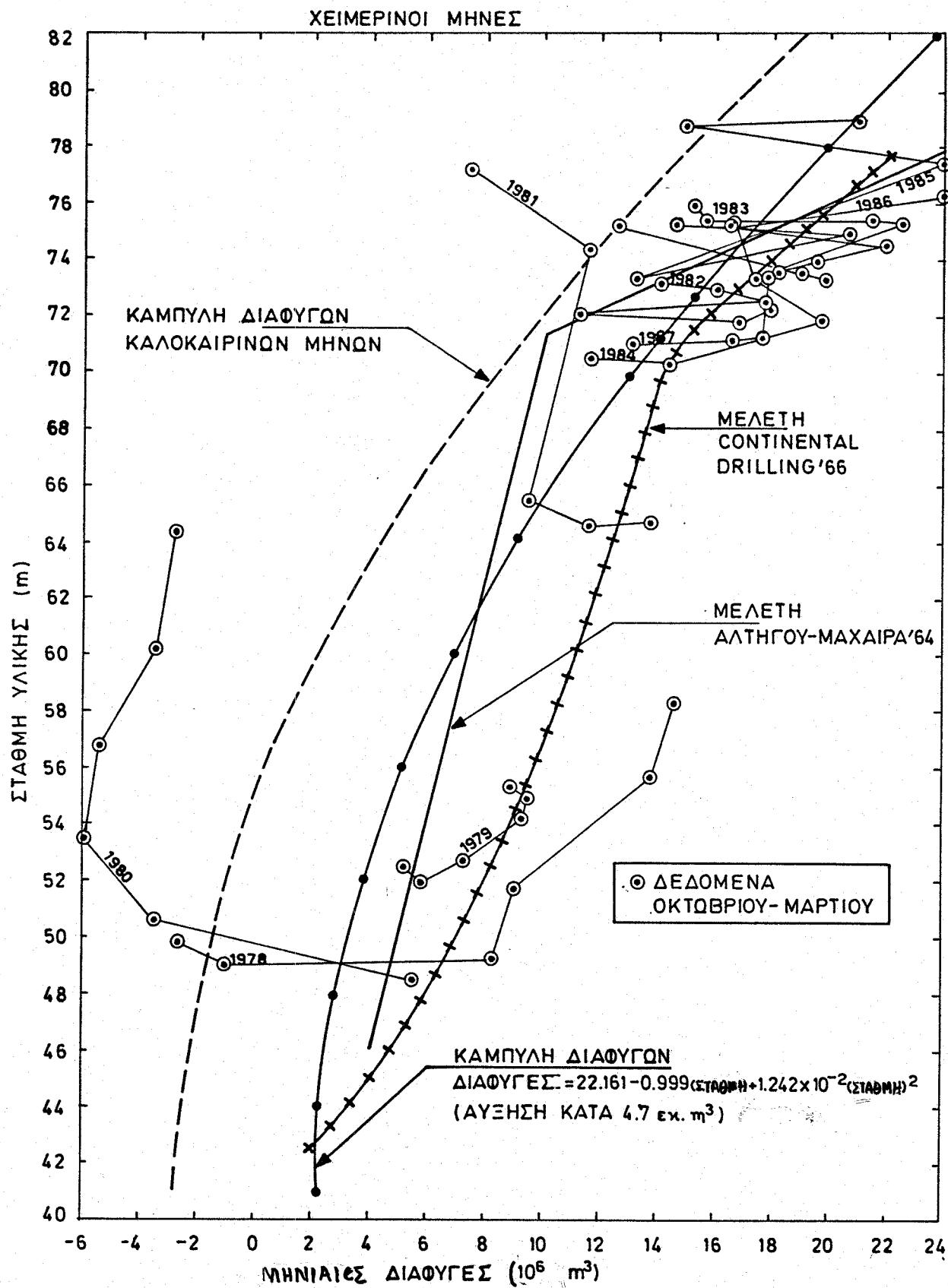


ΔΙΑΦΥΓΕΣ ΥΛΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ

ΚΑΛΟΚΑΙΡΙΝΟΙ ΜΗΝΕΣ



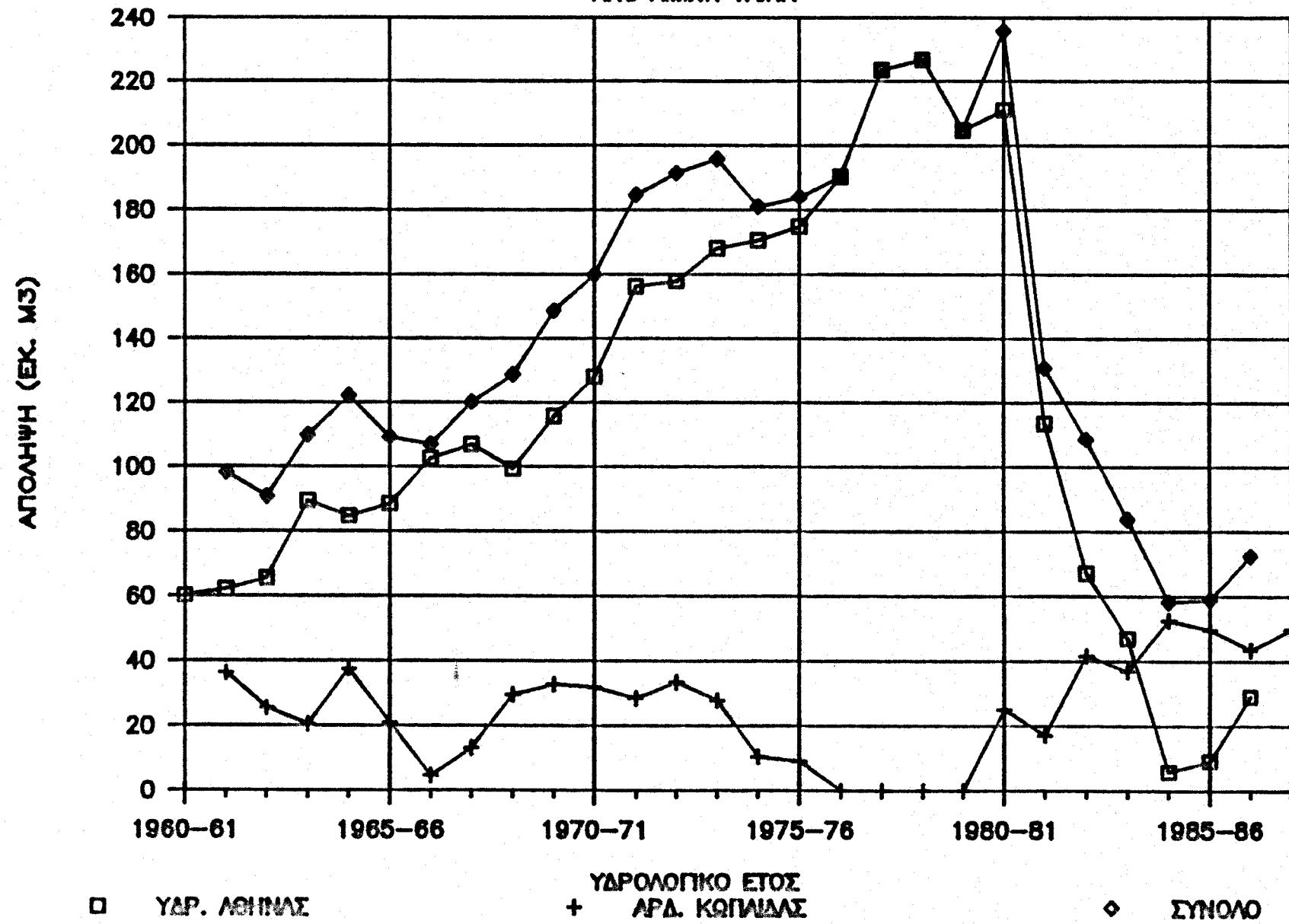
ΔΙΑΦΥΓΕΣ ΥΛΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ



ΣΧΗΜΑ 12

ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΠΟΛΗΨΕΩΝ

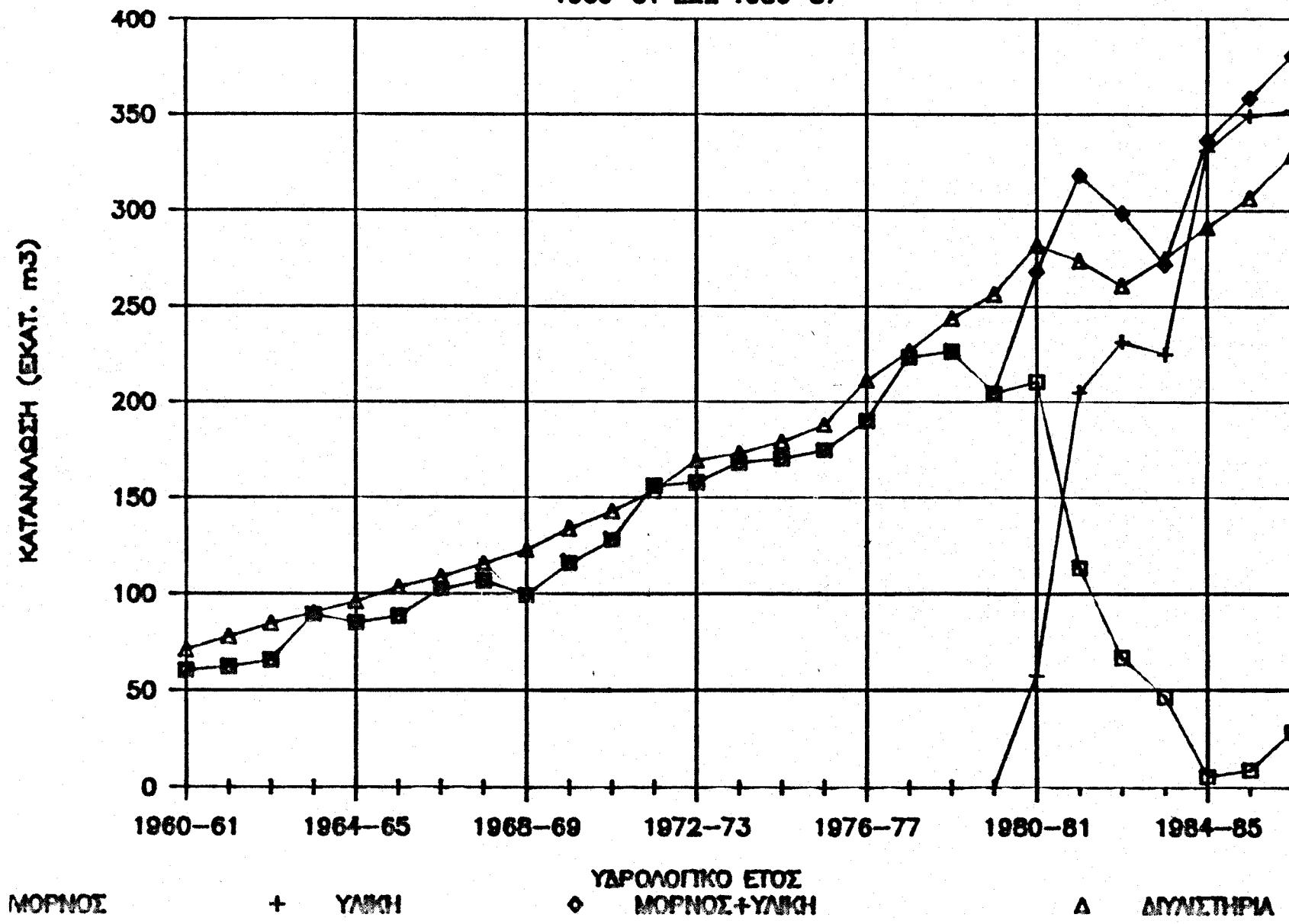
ΑΠΟ ΛΙΜΝΗ ΥΔΡΙ

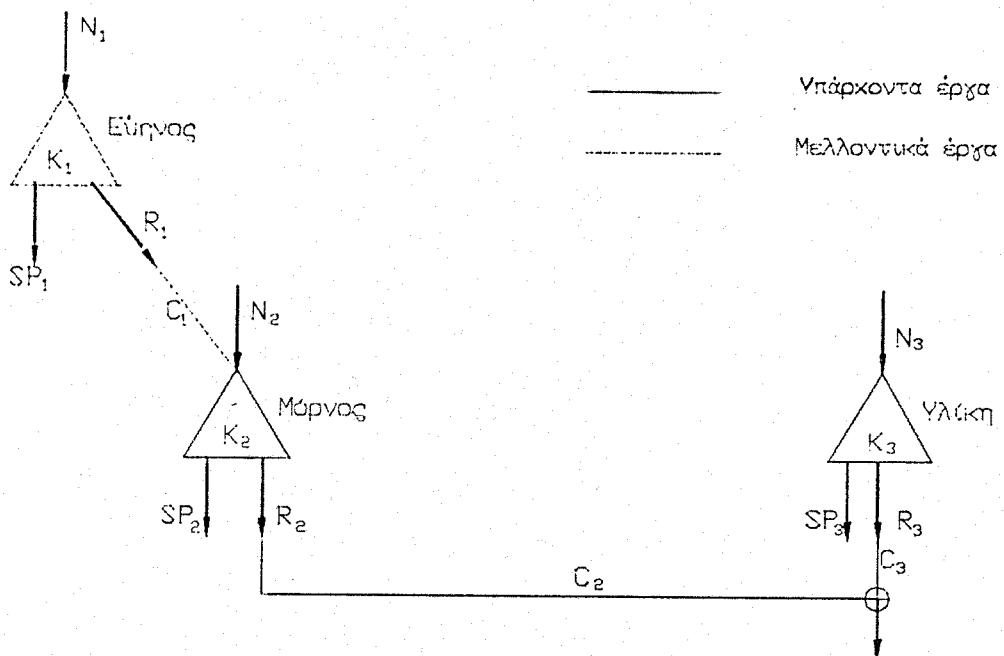


Σ Χ Η Μ Α 13

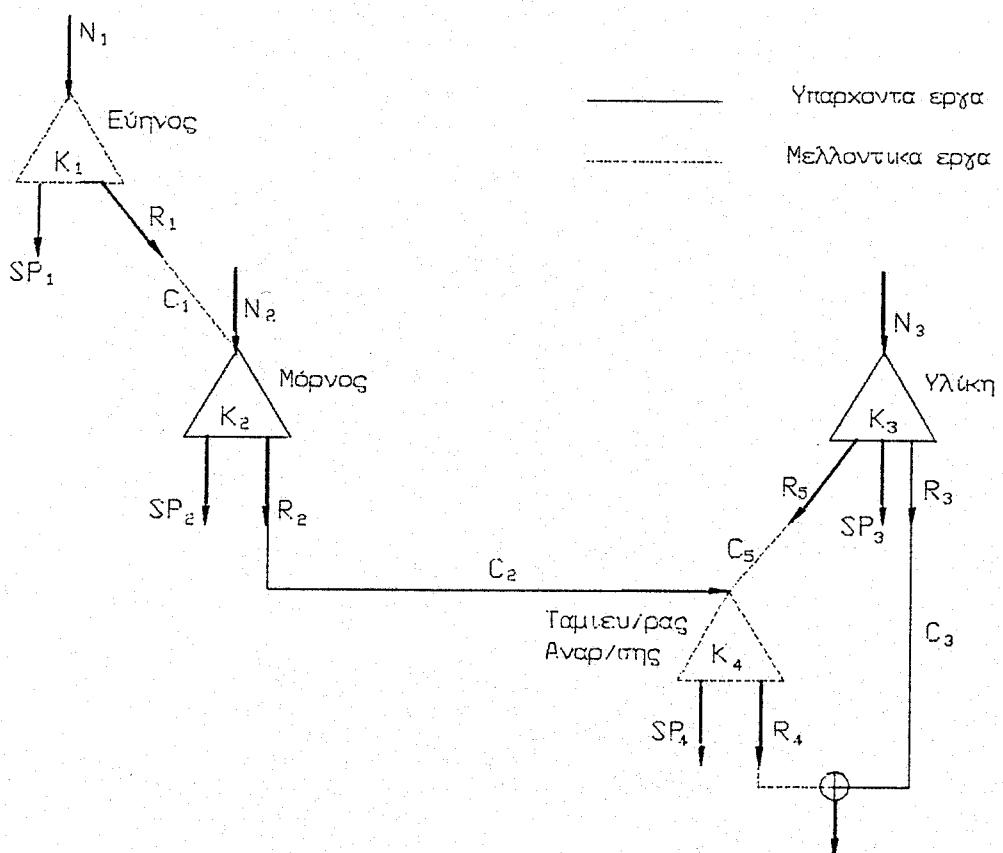
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΑΘΗΝΑΣ

1960-61 ΕΩΣ 1986-87





Σχ. 14 Μοντέλο υδροδοτικού συστήματος Αθήνας
(χωρίς ταμιευτήρα αναρρύθμισης)



Σχ. 15 Μοντέλο υδροδοτικού συστήματος Αθήνας
(με ταμιευτήρα αναρρύθμισης)