



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εκτίμηση της οικολογικής ροής στο φράγμα Μόρνου



Τέγος Μιλτιάδης

Επιβλέπων: Ναλμπάντης Ι., Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβρης 2014

Αφιερωμένη
στον πατέρα μου Χρήστο

Ευχαριστίες

Με την διπλωματική εργασία τελειώνει ο κύκλος της φοίτησής μου στην Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Ναλμπάντη Ιωάννη, για την αμέριστη βοήθεια του στις δυσκολίες που προέκυψαν, την άψογη συνεργασία που διατηρήσαμε και την πάντα διακριτική και ευγενική παρουσία του.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και φίλες μου για τις στιγμές που μοιραστήκαμε όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, ένα ειλικρινές ευχαριστώ στην οικογένεια μου.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

Ευχαριστίες	iv
Περίληψη	viii
Abstract	ix
Κατάλογος συμβόλων	x
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	1
2 Μεθοδολογίες εκτίμησης οικολογικής παροχής	3
2.1 Γενικά	3
2.2 Μεθοδολογίες που βασίζονται σε υδρολογικούς δείκτες	5
2.2.1 Γενικά.....	5
2.2.2 Μέθοδος Tennant	5
2.2.3 Μέθοδος ελάχιστης ετήσιας παροχής	5
2.2.4 Μέθοδος Texas.....	6
2.2.5 Ανάλυση βάσει της καμπύλης διάρκειας παροχής (Flow Duration Curve).....	6
2.2.6 Μέθοδος βασικής παροχής διατήρησης (Basic Maintenance Flow).....	7
2.2.7 Μέθοδος RVA (Range of Variability Approach).....	8
2.3 Μεθοδολογίες που βασίζονται σε υδραυλικούς δείκτες.....	10
2.3.1 Γενικά.....	10
2.3.2 Η τεχνική της υγρής περιμέτρου	11
2.3.3 Μέθοδος toe-width.....	13
2.3.4 Προσαρμοσμένη προσέγγιση οικολογικής υδραυλικής ακτίνας (AEHRA)	13
2.3.5 Μέθοδος Flow Event.....	13
2.4 Μεθοδολογίες προσομοίωσης ενδιαιτημάτων	14
2.5 Μεθοδολογίες ολιστικής προσέγγισης	15
2.6 Η οικολογική παροχή στην Ελλάδα	16
3 Περιοχή μελέτης	17
3.1 Επιλογή περιοχής μελέτης.....	17
3.2 Γενικά.....	19
3.2.1 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά	19
3.2.2 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά	19
3.2.3 Χλωρίδα και πανίδα	20
3.2.4 Ο ταμιευτήρας του Μόρνου	21

3.2.5	Χρήσεις γης.....	21
4	Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων	23
4.1	Γενικά.....	23
4.2	Δεδομένα.....	23
4.3	Επεξεργασία υδρολογικών δεδομένων.....	26
4.3.1	Έλεγχος ομοιογένειας βροχομετρικών παρατηρήσεων.....	26
4.3.2	Συμπλήρωση κενών βροχομετρικών παρατηρήσεων.....	28
4.3.3	Υπολογισμός μέσου βροχομετρικού ύψους λεκάνης απορροής.....	30
4.3.4	Εκτίμηση της εξάτμισης και της διαπνοής.....	33
4.3.5	Μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής.....	35
4.4	Επεξεργασία δεδομένων για τις υδραυλικές μεθόδους.....	40
5	Αποτελέσματα εφαρμογής στον Μόρνο	43
5.1	Εφαρμογή των υδρολογικών μεθόδων.....	43
5.1.1	Μέθοδος Tennant.....	43
5.1.2	Μέθοδος ελάχιστης ετήσιας παροχής.....	44
5.1.3	Μέθοδος βασικής παροχής διατήρησης (Basic Maintenance Flow).....	44
5.1.4	Ανάλυση βάσει της καμπύλης διάρκειας παροχής (Flow Duration Curve).....	45
5.1.5	Μέθοδος RVA (Range of Variability Approach).....	46
5.2	Εφαρμογή των υδραυλικών μεθόδων.....	48
5.2.1	Η τεχνική της υγρής περιμέτρου.....	48
5.3	Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	51
6	Αξιολόγηση - Συμπεράσματα	53
	Αναφορές	55
	Στην ελληνική γλώσσα.....	55
	Ξενόγλωσσες.....	55
	Παράρτημα Α: Πίνακες	57
	Παράρτημα Β: Σχήματα	63

Περίληψη

Είναι γνωστό ότι το καθεστώς ροής ενός ποταμού είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την υγεία και την βιωσιμότητα του αντίστοιχου ποτάμιου οικοσυστήματος, καθώς και με τα υδραυλικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοίτης και της παρόχθιας ζώνης. Η λειτουργία τεχνητών φραγμάτων τροποποιεί δραστικά την φυσική ροή των ποταμών, και, εάν αυτή πραγματοποιηθεί χωρίς περιορισμούς, έχει αρνητικές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον.

Είναι επίσης γνωστό ότι η οικολογική παροχή επιχειρεί να δώσει λύση στο περιβαλλοντικό πρόβλημα της ροής κατάντη ενός φράγματος. Για την εκτίμησή της, υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες μεθόδων: οι υδρολογικές μέθοδοι, οι υδραυλικές μέθοδοι, οι μέθοδοι προσομοίωσης των ενδαιτημάτων και η ολιστική προσέγγιση.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η οικολογική ροή κατάντη του φράγματος Μόρνου. Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Μόρνου απαντάται ένα οικοσύστημα σημαντικής περιβαλλοντικής αξίας. Το φράγμα κατασκευάστηκε το 1979 χωρίς πρόβλεψη οικολογικής ροής. Εφαρμόστηκαν μέθοδοι των δύο πρώτων κατηγοριών: υδρολογικές και υδραυλικές μέθοδοι.

Οι υδρολογικές μέθοδοι απαιτούν τη διαθεσιμότητα χρονοσειρών παροχής ημερήσιου χρονικού βήματος που να καλύπτουν τουλάχιστον δώδεκα συνεχή έτη. Η φιλοσοφία των συγκεκριμένων μεθόδων είναι ότι η παροχή του ποταμού συσχετίζεται με το σύνολο των διεργασιών του οικοσυστήματος. Οι μέθοδοι που βασίζονται σε υδραυλικούς δείκτες χρησιμοποιούν υδραυλικά, μορφομετρικά και γεωμετρικά μεγέθη τα οποία συνδέονται με την ακεραιότητα των ενδαιτημάτων. Η οικολογική παροχή εκτιμήθηκε με χρήση έξι διαφορετικών μεθόδων: πέντε υδρολογικών και μίας υδραυλικής.

Η πρώτη από τις υδρολογικές μεθόδους που εφαρμόστηκαν είναι η μέθοδος Tennant. Αυτή υπολογίζει την οικολογική ροή ως ποσοστό της μέσης ετήσιας παροχής. Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή της ελάχιστης ετήσιας παροχής η οποία εκτιμά την οικολογική ροή βάσει του ξηρότερου μήνα του δείγματος. Η μέθοδος ανάλυσης βάσει της καμπύλης διάρκειας παροχής υπολογίζει την οικολογική ροή με επιλογή της πιθανότητας υπέρβασης. Οι δύο τελευταίες υδρολογικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν είναι η μέθοδος της βασικής παροχής διατήρησης και η RVA (Range of Variability Approach). Αυτές λαμβάνουν υπόψη την εποχικότητα της απορροής. Η μέθοδος της βασικής παροχής διατήρησης πέρα από μια ελάχιστη ροή που υπολογίζει, σε κάθε μήνα, προσθέτει και μια εποχιακή διακύμανση. Η μέθοδος RVA προτείνει, για κάθε μήνα, διαφορετική οικολογική ροή η οποία συμβαδίζει με το φυσικό καθεστώς ροής. Για την υδραυλική προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της υγρής περιμέτρου η οποία χρησιμοποιεί εμπειρικά μοντέλα για τη σχέση υγρής περιμέτρου και παροχής.

Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων που εφαρμόστηκαν.

Abstract

It is known that the flow regime of a river is inextricably linked to the health and sustainability of the respective river ecosystem, as well as the hydraulic and geometric characteristics of the riverbed and the riparian zone. The operation of artificial dams drastically modifies the natural flow of rivers and, if left without restrictions, it has negative impacts on the natural environment.

It is also known that environmental flow attempts to solve the environmental problem downstream of a dam. For its assessment, there are four categories of methods: hydrological, hydraulic, methods for habitat simulation and the holistic approach.

In this thesis the environmental flow downstream of the Mornos dam is studied. In the Mornos river basin an ecosystem of significant environmental value is found. The dam was constructed in 1979 without provision of environmental flow. Methods were applied which concern the first two categories, i.e. hydrological and hydraulic methods.

The hydrological methods require the availability of runoff series at the daily time step, covering at least twelve consecutive years. The philosophy of these methods is that the river flow is closely associated with all the ecosystem processes. The methods that are based on hydraulic indices employ hydraulic, morphometric and geometric quantities associated with the integrity of the habitat. The environmental flow was assessed using six different methods: five hydrological and one hydraulic.

The first of the hydrological methods applied is the Tennant method. This calculates the environmental flow as a percentage of the average annual flow. The second method is the method of minimum annual flow which considers the flow of the driest month in the sample as the environmental flow. The method of analysis based on the flow duration curve calculates the environmental flow by selecting the probability of exceedance. The last two hydrological methods applied are the method of basic flow for conservation and RVA (Range of Variability Approach). These take into account the seasonality of runoff. The method of basic flow for conservation apart from estimating a minimum flow every month, adds a seasonal variation as well. The RVA method suggests, for each month, a different environmental flow which is consistent with the natural flow regime. For the hydraulic approximation, the wetted perimeter technique is used which applies empirical models for the relationship between flow and wetted perimeter.

Finally, a comparison of the applied methods is provided.

Κατάλογος συμβόλων

Q	Παροχή
R	Υδραυλική ακτίνα
S_f	Κλίση υδατορεύματος
k	Καμπυλότητα καμπύλης υγρής περιμέτρου - παροχής
α	Κλίση καμπύλης υγρής περιμέτρου - παροχής
R^2	Συντελεστής συσχέτισης
P	Βροχόπτωση
P	Παράγοντας βάρους
A	Εμβαδόν υγρής διατομής
A	Εμβαδόν λεκάνης απορροής
E	Εξατμισοδιαπνοή
T_a	Θερμοκρασία
S_0	Εξωγήινη ακτινοβολία
n	Συντελεστής τραχύτητας Manning
RO	Επιφανειακή απορροή
I	Άρδευση
D	Βαθιά διήθηση
κ	Ποσοστό περισσεύματος βροχόπτωσης
K	Χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας
H_1	Κατώφλι αποθέματος δεξαμενής εδαφικής υγρασίας
H_2	Κατώφλι αποθέματος δεξαμενής υπόγειου νερού
SW	Αρχικό απόθεμα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας

1 Εισαγωγή

1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Η παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού, η ρύπανση του περιβάλλοντος και η έλλειψη επαρκών υποδομών, επιβάλλουν σήμερα, όσο ποτέ άλλοτε, την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων. Άλλωστε, οι υδατικοί πόροι αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για την διατήρηση της ζωής και της βιώσιμης ανάπτυξης της κοινωνίας.

Η κατασκευή και λειτουργία φραγμάτων αποτελεί βασική ενέργεια προς την κατεύθυνση της διαχείρισης και αξιοποίησης των υδατικών πόρων. Τα φράγματα σχεδιάζονται με σκοπό την αποθήκευση, εκτροπή και αλλαγή της φυσικής διανομής του νερού. Όπως είναι λογικό, η ανθρωπογενής αυτή παρέμβαση, πέρα από την θετική της πλευρά, δημιουργεί και περιβαλλοντικά προβλήματα. Η μεγάλη συσσώρευση νερού δημιουργεί πιέσεις στο υπέδαφος της περιοχής, κατολισθήσεις και διαβρώσεις, ενώ η μεταβολή της ροής του ποταμού διαταράσσει την οικολογική ισορροπία του συνδεδεμένου με τον ποταμό υδροβιότοπου.

Η φυσική ροή των ποτάμιων συστημάτων είναι βασικός παράγοντας της εύρυθμης λειτουργίας των οικοσυστημάτων. Η τροποποίησή της χωρίς περιορισμούς, μπορεί να επιφέρει μεγάλο πλήγμα στο φυσικό περιβάλλον με ανεπανόρθωτα αποτελέσματα.

Η οικολογική παροχή εισάγει, στην ουσία, περιορισμούς στην λειτουργία των ταμιευτήρων, προκειμένου να υπάρξει προστασία στο οικοσύστημα. Η προστασία αυτή επιτυγχάνεται είτε επειδή μειώνεται το απολήψιμο δυναμικό και δεσμεύεται μέρος του αποθηκευμένου όγκου για περιβαλλοντική χρήση, είτε επειδή επιβάλλεται κατάλληλη χρονική κατανομή των εκροών.

Σε αυτή την διπλωματική εργασία επιδιώκεται η μελέτη της οικολογικής παροχής κατάντη του φράγματος του Μόρνου.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια και δύο παραρτήματα.

Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη στο πρόβλημα της οικολογικής παροχής και περιγράφει την δομή της διπλωματικής εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφεται η μεθοδολογική προσέγγιση για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής. Οι σχετικές μεθοδολογίες μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με τα όγκο, την ποιότητα, το είδος και την διαθεσιμότητα των πρωτογενών δεδομένων, καθώς επίσης, και τις παραδοχές που θα γίνουν. Οι τέσσερις βασικές μεθοδολογίες εκτίμησης οικολογικής παροχής είναι:

1. Μεθοδολογίες που βασίζονται σε υδρολογικούς δείκτες
2. Μεθοδολογίες που βασίζονται σε υδραυλικούς δείκτες
3. Μεθοδολογίες προσομοίωσης ενδαιτημάτων

4. Μεθοδολογία ολιστικής προσέγγισης

Ακόμη, σχολιάζεται η ισχύουσα οικολογική παροχή στην Ελλάδα και το σχετικό νομοθετικό πλαίσιο που υφίσταται.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης της εργασίας, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της, καθώς και η χλωρίδα, η πανίδα και η γεωμορφολογία της περιοχής. Όπως είναι φυσικό, η χλωρίδα, η πανίδα και η γεωμορφολογία, ειδικά της παραποτάμιας ζώνης, αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιέχει τα πρωτογενή δεδομένα της εργασίας και την επεξεργασία που αυτά υπέστησαν ώστε να εφαρμοστούν οι κατάλληλες μεθοδολογίες εκτίμησης της παροχής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εφαρμόζονται οι μεθοδολογίες για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής και παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται εφαρμογή δύο εκ των προσεγγίσεων, αυτών που βασίζονται σε υδρολογικούς και σε υδραυλικούς δείκτες.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία.

Στο Παράρτημα Α παρατίθενται οι μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις και τα στοιχεία των καμπυλών υγρής περιμέτρου-παροχής.

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται οι επιλεγμένες διατομές στις οποίες έγιναν μετρήσεις της υγρής περιμέτρου και του εμβαδού υγρής διατομής, οι καμπύλες υγρής περιμέτρου-παροχής και οι διπλές αθροιστικές καμπύλες για τον έλεγχο της ομογένειας των χρονομετρικών δεδομένων.

2 Μεθοδολογίες εκτίμησης οικολογικής παροχής

2.1 Γενικά

Η υγεία και βιωσιμότητα των ποτάμιων οικοσυστημάτων εξαρτάται από το καθεστώς της ροής, τα υδραυλικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κύριας κοίτης και της παρόχθιας ζώνης, την μορφολογία του εδάφους, την πραγματοποίηση, ή μη, απολήψεων και την ύπαρξη τεχνητών ή φυσικών φραγμάτων.

Η κατασκευή φραγμάτων, η υπεράντληση επιφανειακών και υπόγειων γλυκών υδάτων και οι διάφορες εκτροπές επηρεάζουν άμεσα την φυσική ροή ενός ποταμού. Η αλλαγή της φυσικής ροής του ποταμού, χωρίς περιορισμούς, μπορεί να διαταράξει την οικολογική ισορροπία και να επιφέρει αλλαγές στο οικοσύστημα, όπως αλλαγή της θερμοκρασίας του νερού, της γεωμορφολογίας του εδάφους κ.ά.

Το κύριο μέτρο αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η εφαρμογή ενός κατάλληλου υδρολογικού καθεστώτος που περιλαμβάνει όχι μόνο μια ελάχιστη ροή, αλλά και μια χρονική μεταβλητότητα αυτής σύμφωνα με το φυσικό καθεστώς ροής (Alcazar et al., 2008). Γενικά, η υγεία των οικοσυστημάτων μπορεί να διατηρηθεί, εάν τα βασικά χαρακτηριστικά της διαίτας του ποταμού, μετά από μια επέμβαση, αντιστοιχούν σε εκείνα της φυσικής διαίτας του ποταμού πριν την επέμβαση.

Η οικολογική παροχή καλείται να θέσει περιορισμούς στην τροποποίηση της φυσικής ροής και η εφαρμογή της περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, γίνεται η εκτίμηση των θεωρητικών αναγκών του οικοσυστήματος σε ποιότητα, ποσότητα και χρονική διαθεσιμότητα της ροής. Στο δεύτερο στάδιο γίνεται ουσιαστικά η εφαρμογή του πρώτου σταδίου με την επιβολή περιορισμών και την κατάλληλη προσαρμογή στην λειτουργία των τεχνικών έργων, ώστε να ικανοποιούνται οι παραπάνω ανάγκες.

Σύμφωνα με μία ευρύτερα χρησιμοποιούμενη απόδοση του όρου, ως ελάχιστη διατηρητέα παροχή ή οικολογική παροχή μπορεί να θεωρηθεί το μέγεθος ροής ενός ποταμού το οποίο επιτρέπει τη διατήρηση συγκεκριμένων επιθυμητών οικολογικών γνωρισμάτων του ποτάμιου συστήματος, που αφορούν είτε σε βιολογικά χαρακτηριστικά, είτε στο φυσικοχημικό του προφίλ ή ακόμα και στις μεταξύ τους σχέσεις (Acrceman et al., 2008).

Τα γνωρίσματα του ποτάμιου συστήματος αφορούν:

1. Τα παρόχθια συστήματα στην πλημμυρική κοίτη, των οποίων η βιωσιμότητα και η υγεία εξαρτώνται από τη διαθέσιμη υγρασία και τα πλημμυρικά φαινόμενα, και
2. τα υγροτοπικά συστήματα στις περιοχές των εκβολών ή/και λιμνών.

Οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν την υγεία των παρόχθιων συστημάτων είναι:

- ποσότητα νερού
- στάθμη νερού
- πλημμυρικά φαινόμενα (εποχικότητα και διάρκεια), και
- στάθμη των υπογείων νερών.

Αντίστοιχα, οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν την υγεία των υγροτοπικών συστημάτων είναι:

- όγκος νερού που εισέρχεται στον υγρότοπο
- εποχιακή μεταβολή της στάθμης του νερού στο υγροτοπικό σύστημα, και
- διάρκεια και συχνότητα των πλημμυρικών φαινομένων.

Ακόμα, κρίσιμη παράμετρος για την υγεία του οικοσυστήματος είναι τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του ποταμού, δηλαδή το είδος της βλάστησης, η κλίση του εδάφους, το καθεστώς της ροής, οι γεωλογικοί σχηματισμοί και το φορτίο των ιζημάτων (Arthington & Zalucki, 1998).

Γενικά, η διαχείριση των υδατικών πόρων, επιβάλλει λύσεις οι οποίες προστατεύουν το περιβάλλον. Για το σκοπό αυτό, η οικολογική παροχή αποτελεί πλέον, διεπιστημονικό αντικείμενο αιχμής. Η έννοια της περιβαλλοντικής παροχής τυποποιείται στην παγκόσμια βιβλιογραφία για πρώτη φορά το 1963 (U.K Water Resources Act) και το 1972 (U.S. Clean Water Act). Από το 1990, η έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο επιστημονικό αντικείμενο έχει επεκταθεί θεαματικά (Acreman & Dunbar, 2004).

Σύμφωνα με την παγκόσμια βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί αρκετές μεθοδολογίες για την οικολογική παροχή. Οι μεθοδολογίες αυτές ανάλογα με τα διαθέσιμα πρωτογενή δεδομένα και τις διάφορες παραδοχές μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες μεθοδολογιών. Οι βασικές κατηγορίες είναι:

- Μεθοδολογίες που βασίζονται σε υδρολογικούς δείκτες
- Μεθοδολογίες που βασίζονται σε υδραυλικούς δείκτες
- Μεθοδολογίες προσομοίωσης ενδιαιτημάτων
- Μεθοδολογίες ολιστικής προσέγγισης

Βέβαια, όλες οι παραπάνω μεθοδολογίες και, ιδίως αυτές των πρώτων τριών κατηγοριών, θα πρέπει να χαρακτηριστούν παραδοσιακές. καθόσον αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της διατήρησης των ποτάμιων οικοσυστημάτων με ιδιαίτερα δραστικές παραδοχές και απλοποιήσεις. Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση απαιτεί την θεώρηση και της κοινωνικοοικονομικής και πολιτικής διάστασης του προβλήματος. Ως παράδειγμα ολοκληρωμένης προσέγγισης αναφέρεται η μεθοδολογία που είναι γνωστή ως Ecosystem Management (EM) (Pavlikakis & Tsihrintzis, 2000).

2.2 Μεθοδολογίες που βασίζονται σε υδρολογικούς δείκτες

2.2.1 Γενικά

Οι μεθοδολογίες που βασίζονται σε υδρολογικούς δείκτες (Hydrological index methodologies) είναι οι πιο απλές, κυρίως λόγω της σχετικά μεγάλης διαθεσιμότητας των πρωτογενών δεδομένων τα οποία είναι απαραίτητα για την τις μεθοδολογίες αυτές. Γίνεται επεξεργασία παροχών με χρονικό βήμα ημερήσιο ή εβδομαδιαίο ή και μηνιαίο. Επειδή, χρησιμοποιούνται ιστορικά δεδομένα, οι μεθοδολογίες ονομάζονται και Μέθοδοι ιστορικής ροής (Historical flows methods) (Jowett, 1997).

Η οικολογική παροχή υπολογίζεται από τον συσχετισμό παροχής-κατάσταση ενδιαιτήματος ο οποίος έχει καθοριστεί από μετρήσεις και παραδοχές σε άλλα ποτάμια συστήματα με παρόμοια υδρολογικά και βιολογικά χαρακτηριστικά. Ακόμη, υπάρχουν και εφαρμογές που πέρα από τα υδρολογικά δεδομένα του οικοσυστήματος, συσχετίζουν και την μορφολογία του ποτάμιου συστήματος αλλά και κάποια είδη ψαριών με την επιθυμητή ροή. Γενικά, οι μεθοδολογίες των υδρολογικών δεικτών, σε ποσοστό 30%, υπολογίζουν την παροχή με τα υδρολογικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα και δεν εισάγουν στην επίλυση τους γεωμορφολογικές και βιολογικές παραμέτρους (Tharne, 2003).

2.2.2 Μέθοδος Tennant

Η μέθοδος Tennant, ή αλλιώς γνωστή ως μέθοδος Montana, αποτελεί την πιο διαδεδομένη παγκοσμίως μέθοδο και είναι μια από τις παλαιότερες αναπτυγμένες μεθόδους Αρχικά, αναπτύχθηκε για τις δυτικές ΗΠΑ αλλά, στη συνέχεια, εφαρμόστηκε σε πολλές χώρες. Ως μεθοδολογία, δεν απαιτεί εργασία πεδίου καθώς βασίζεται μόνον σε υδρολογικά στοιχεία.

Η οικολογική παροχή ορίζεται ως:

- το 10% της μέσης ετήσιας παροχής για την επιβίωση των ενδιαιτημάτων
- το 30% της μέσης ετήσιας παροχής για ικανοποιητική υγεία των ενδιαιτημάτων
- το 60%-100% της μέσης ετήσιας παροχής για την διατήρηση παρθένων οικοσυστημάτων

Παράλληλα, στην συγκεκριμένη μεθοδολογία για την διαφύλαξη των παρόχθιων ενδιαιτημάτων καθορίζεται η οικολογική παροχή της θερινής (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) και της χειμερινής περιόδου (Οκτώβρης-Μάρτιος). Τα ποσοστά της ροής που επιλέγονται, εξαρτώνται από τα ενδιαιτήματα της περιοχής.

Στην Ισπανία, για τους ποταμούς όπου τα διαθέσιμα στοιχεία είναι περιορισμένα, καθορίζεται η ελάχιστη διατηρητέα παροχή ως το 10% της μέσης ετήσιας παροχής, ενώ στην Πορτογαλία εφαρμόζεται ευρέως ποσοστό 2,5% – 5% (Tharne, 2003).

2.2.3 Μέθοδος ελάχιστης ετήσιας παροχής

Αποτελεί μια από τις πιο απλές μεθόδους, τόσο σε απαίτηση δεδομένων, όσο και στην εφαρμογή της. Ορίζεται ως ελάχιστη παροχή καθ' όλη την διάρκεια του έτους η μέση μηνιαία παροχή που εμφανίζεται το ξηρότερο μήνα του έτους. Αυτή θεωρείται ότι επαρκεί για τη διαβίωση των ψαριών του ποτάμιου συστήματος. Όπως παρατηρείται, η μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψη την εποχιακή διακύμανση της ροής όλων των μηνών του έτους, αλλά μόνον τον ξηρότερο μήνα.

2.2.4 Μέθοδος Texas

Αναπτύχθηκε ως μέθοδος στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Χρησιμοποιεί ένα υδροδυναμικό μοντέλο προσομοίωσης της ροής, σε συνδυασμό με τα είδη των ενδαιτημάτων, με σκοπό τον προσδιορισμό της ελάχιστης ροής για την συντήρηση στοχευμένων ειδών ψαριών. Η προσομοίωση γίνεται με μεθόδους παλινδρόμησης.

Οι συγκεκριμένες τεχνικές παλινδρόμησης απαιτούν, ως δεδομένα, υδρολογικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του οικοσυστήματος. Τελικά, η μέθοδος υπολογίζει διαφορετική οικολογική παροχή για κάθε μήνα, ανάλογα με τις ανάγκες των ειδών ψαριών (περίοδος ωοτοκίας, περίοδος επώασης κ.α.). Γενικά, τα στοιχεία τα οποία είναι αναγκαία για την μέθοδο Texas και αφορούν κυρίως λεπτομέρειες για τις βιολογικές παραμέτρους του οικοσυστήματος, είναι σε αρκετές περιπτώσεις δύσκολα διαθέσιμα και κάνουν την εφαρμογή της μεθόδου εξαιρετικά δύσκολη (Evans & Russel, 1995).

2.2.5 Ανάλυση βάσει της καμπύλης διάρκειας παροχής (Flow Duration Curve)

Σκοπός της μεθόδου είναι να διερευνήσει και να αναπτύξει εφαρμογές με βάση τις καμπύλες διάρκειας, ώστε να συσχετίσει την μεταβολή στην υδρολογία της λεκάνης απορροής με την ποιότητα και την ποσότητα του νερού.

Η μέθοδος βάσει της καμπύλης διάρκειας παροχής αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους εκτίμησης της οικολογικής παροχής. Η οικολογική παροχή υπολογίζεται μέσω της πιθανότητας υπέρβασης. Αρχικά, για την δημιουργία της καμπύλης διάρκειας παροχής απαιτούνται στοιχεία παροχής ημερήσιου, εβδομαδιαίου ή μηνιαίου χρονικού βήματος και συνολικής διάρκειας από δέκα ως και πενήντα έτη. Οι παροχές οι οποίες χρησιμοποιούνται είναι είτε μέσες τιμές του χρονικού βήματος, είτε οι ελάχιστες. Η παροχή η οποία είναι ίση με την παροχή με πιθανότητα υπέρβασης για ορισμένο ποσοστό του χρόνου (συνήθως 90%) ορίζεται ως η ελάχιστη παροχή (Fennesy & Vogel, 1990).

Οι απορροές ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά και για την κάθε μία υπολογίζεται η αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης. Η πιθανότητα υπέρβασης υπολογίζεται από την εξίσωση Weibull:

$$P(X \geq x) = \frac{m}{N+1} \quad (2.1)$$

Όπου:

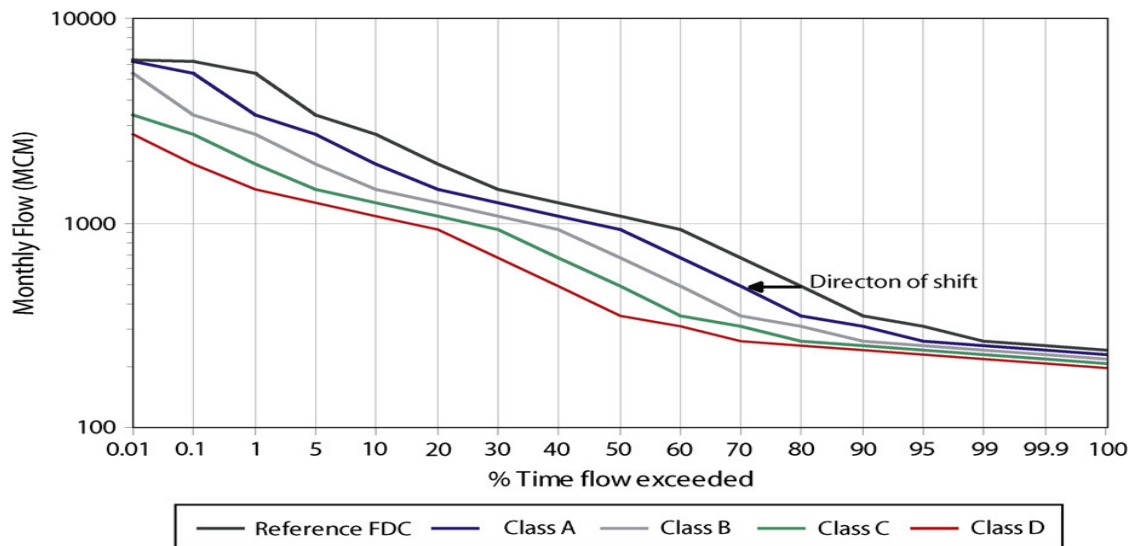
$P(X \geq x)$: Πιθανότητα υπέρβασης

m : Η τάξη της συγκεκριμένης παροχής

N : Το πλήθος των τιμών του δείγματος

Βέβαια, η πιθανότητα υπέρβασης η οποία τελικά επιλέγεται συνδέεται με τον τύπο, το μέγεθος του ποταμού και τους οικολογικούς στόχους. Για αυτό το λόγο, έχουν εφαρμοστεί και μικρότερα ποσοστά, όπως 70% και 80% (Smakhtin, 2000).

Σε αρκετές περιπτώσεις έχει, επίσης, εφαρμοστεί και η Q_{364} δηλαδή η τιμή της παροχής πάνω από την οποία η παροχή εμφανίζεται 364 ημέρες το χρόνο. Αυτή η πρακτικά αντιστοιχεί στην παροχή με πιθανότητα υπέρβασης στο 99.7% του χρόνου (Morrison & Bonta, 2008, Smakhtin, & Eriyagama, 2001).



Σχήμα 2-1: Καμπύλες διάρκειας παροχής

2.2.6 Μέθοδος βασικής παροχής διατήρησης (Basic Maintenance Flow)

Η μέθοδος της βασικής παροχής διατήρησης αναπτύχθηκε για τις ανάγκες υπολογισμού της οικολογικής παροχής του ποταμού Ebro της Ισπανίας (Palau & Alcazar, 2012). Βασική αρχή της μεθόδου είναι ότι οι οργανισμοί που ζουν στο ποτάμιο σύστημα έχουν προσαρμοστεί στις εποχικές διακυμάνσεις, άρα και στις αυξομειώσεις της παροχής. Επομένως, οι οργανισμοί μπορούν να δεχθούν χαμηλές παροχές, ανάλογα με το οικοσύστημα, για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Έτσι, σκοπός της μεθόδου αυτής είναι, να υπολογίσει τη μέση διάρκεια και την τάξη μεγέθους των περιόδων με χαμηλή παροχή.

Επιπρόσθετα, η υπολογιζόμενη οικολογική παροχή υπάρχει ανάγκη να ελεγχθεί αν καλύπτει τις εκάστοτε ανάγκες της κινητικότητας των ψαριών. Στην περίπτωση του Ebro, η βασική παροχή επηρέαζε το ελάχιστο βάθος, άρα και την κινητικότητα των ψαριών. Για αυτό το λόγο, προστέθηκε επιπλέον παροχή. Το άθροισμα των δύο παροχών ονομάζεται παροχή διατήρησης.

Παράλληλα, η μέθοδος λαμβάνει υπόψη την εποχιακή διακύμανση των φυσικοποιημένων απορροών. Η εποχιακή διακύμανση μπορεί να χαρακτηριστεί με τη χρήση του συντελεστή της εποχιακής διακύμανσης ο οποίος ορίζεται ως το κλάσμα μεταξύ της μέσης μηνιαίας παροχής και της ελάχιστης μέσης μηνιαίας. Η απόλυτη ελάχιστη παροχή πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή που προκύπτει για κάθε μήνα (IUCN, 2004). Η παροχή διατήρησης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q_{MT} = Q_b \sqrt{\frac{Q_{mean}}{Q_{mean,min}}} \quad (2.2)$$

όπου:

Q_b : η βασική ροή που υπολογίστηκε μέσω των κυλιόμενων μέσων ελαχίστων τιμών

Q_{mean} : η μέση μηνιαία παροχή

$Q_{mean,min}$: η ελάχιστη μέση μηνιαία παροχή

Τα βήματα της μεθοδολογίας είναι τα εξής:

- Αξιοποιούνται οι μέσες ημερήσιες παροχές 10-12 συνεχόμενων χρόνων ή μίας περιόδου η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι αρκετά μεγάλη ώστε να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Υπολογίζεται ο κυλιόμενος μέσος όρος για 100 συνεχόμενες τιμές κάθε χρόνου. Η αρχή του υδρολογικού έτους επιλέγεται ώστε να μην υπάρχουν περιόδοι χαμηλής παροχής στα άκρα των ετήσιων σειρών. Με τον τρόπο αυτό συμπεριλαμβάνεται το σύνολο των περιόδων με χαμηλή παροχή ενός υδρολογικού κύκλου (για τον Ebro ως αρχή του υδρολογικού έτους επιλέχθηκε ο Απρίλιος, ο οποίος είναι και ο μήνας με την υψηλότερη βιολογική δραστηριότητα).
- Υπολογίζονται οι ελάχιστες τιμές των κυλιόμενων μέσων όρων κάθε έτους και λαμβάνεται η μέση τιμή τους.
- Η Βασική παροχή αντιστοιχεί στην τιμή όπου εμφανίζεται το μέγιστο εύρος μεταξύ δύο συνεχόμενων μέσων τιμών.

2.2.7 Μέθοδος RVA (Range of Variability Approach)

Στην μέθοδο RVA συμμετέχουν 32 οικολογικές-υδρολογικές παράμετροι οι οποίες είναι χωρισμένες σε πέντε κατηγορίες που αφορούν το καθεστώς ροής (μέγεθος, συχνότητα, χρονοδιάγραμμα, διάρκεια και ποσοστό μεταβολής) (Richter et al. 1996). Οι 32 υδρολογικές παράμετροι συνδέονται άμεσα με την ποιότητα του οικοσυστήματος (Vogel et al., 2006).

Η μέθοδος απαιτεί δεδομένα ημερήσιων παροχών τουλάχιστον 20 συνεχόμενων ετών. Επίσης, είναι καλό τα δεδομένα να καταλαμβάνουν χρονική περίοδο πριν και μετά την ανθρωπογενή παρέμβαση. Για τις 32 παραμέτρους εισάγονται περιορισμοί και ορίζεται ένα εύρος διακύμανσης για την κάθε παράμετρο ξεχωριστά. Στην περίπτωση όπου τα δεδομένα είναι πριν και μετά την κατασκευή, η μέθοδος χωρίζεται σε δύο στάδια. Το πρώτο το οποίο περιλαμβάνει την βαθμονόμηση και το δεύτερο που γίνεται ο έλεγχος της επίτευξης των αναγκών του οικοσυστήματος. Η μέθοδος RVA εντάσσεται στην κατηγορία των υδρολογικών μεθόδων λόγω των υδρολογικών παραμέτρων, όμως, ως μέθοδος, έχει άμεση σχέση με την μεθοδολογία της ολιστικής προσέγγισης η οποία εξετάζεται παρακάτω.

Η μέθοδος RVA προσδιορίζει χρονικά μεταβαλλόμενους στόχους οικολογικής ροής, με βάση στατιστική ανάλυση του καθεστώτος της ροής. Έτσι, προτείνεται ένα εύρος μηνιαίων τιμών παροχής που συμβαδίζει με την φυσική διακύμανση της ροής. Προφανώς, η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου εισάγει έντονη πολυπλοκότητα στη διαχείριση συστημάτων ταμειυτήρων, λόγω του εύρους και των πολλών παραμέτρων που εμπεριέχει.

Πίνακας 2.1: Οι παράμετροι της μεθόδου RVA

Πρώτη κατηγορία παραμέτρων	
Δείκτης υδρολογικής μεταβολής	Εύρος των μηνιαίων υδρολογικών συνθηκών
Υδρολογική παράμετρος	Εξέταση μέσης τιμής παροχής (m^3/s) για κάθε ημερολογιακό μήνα
Οικολογική σημασία	Διαθεσιμότητα βιοτόπου για υδρόβιους οργανισμούς, συνθήκες υγρασίας για παραποτάμιες περιοχές. Φυτικές διαπλάσεις, διαθεσιμότητα νερού για χερσαία ζώα, επιδράσεις σε φυσικοχημικές παραμέτρους.

Πίνακας 2.2 (συνέχεια): Οι παράμετροι της μεθόδου RVA

Δεύτερη κατηγορία παραμέτρων	
Δείκτης υδρολογικής μεταβολής	Εύρος και διάρκεια ετησίων ακραίων υδρολογικών συνθηκών
Υδρολογική παράμετρος	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ελάχιστη μέση παροχή μίας ημέρας ➤ Ελάχιστη μέση παροχή 3 ημερών (σε διαδοχικά διαστήματα) κατ' έτος ➤ Μέγιστη μέση παροχή 3 ημερών (σε διαδοχικά διαστήματα) κατ' έτος ➤ Ελάχιστη μέση παροχή 7 ημερών (σε διαδοχικά διαστήματα) κατ' έτος, ➤ Μέγιστη μέση παροχή 7 ημερών (σε διαδοχικά διαστήματα) κατ' έτος ➤ Ελάχιστη μέση παροχή 30 ημερών (σε διαδοχικά διαστήματα) κατ' έτος ➤ Μέγιστη μέση παροχή 30 ημερών (σε διαδοχικά διαστήματα) κατ' έτος ➤ Ελάχιστη μέση παροχή 90 ημερών (σε διαδοχικά διαστήματα) κατ' έτος ➤ Μέγιστη μέση παροχή 90 ημερών (σε διαδοχικά διαστήματα) κατ' έτος
Οικολογική σημασία	Διαδικασίες αποικισμού, διάρκεια ακραίων συνθηκών για διάφορες κατηγορίες οργανισμών (αφυδάτωση για τα ζώα), αναερόβιο στρες για τα φυτά, υψηλές συγκεντρώσεις χημικών, συνθήκες χαμηλής/υψηλής υγρασίας, χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου.
Τρίτη κατηγορία παραμέτρων	
Δείκτης υδρολογικής μεταβολής	Χρονική περίοδος εμφάνισης των ετησίων ακραίων γεγονότων
Υδρολογική παράμετρος	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Αύξων αριθμός ημέρας εμφάνισης της μέγιστης παροχής από την αρχή του έτους ➤ Αύξων αριθμός ημέρας εμφάνισης της ελάχιστης παροχής από την αρχή του έτους
Οικολογική σημασία	Σχέση με στάδια κύκλων ζωής διαφόρων οργανισμών, ερεθίσματα αναπαραγωγικής συμπεριφοράς, πρόσβαση σε συγκεκριμένους βιοτόπους

Πίνακας 2.3 (συνέχεια): Οι παράμετροι της μεθόδου RVA

Τέταρτη κατηγορία παραμέτρων	
Δείκτης υδρολογικής μεταβολής	Συχνότητα και διάρκεια υψηλών και χαμηλών παροχών
Υδρολογική παράμετρος	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Αριθμός υψηλών παροχών κατ' έτος ➤ Αριθμός χαμηλών παροχών κατ' έτος ➤ Μέση διάρκεια σε ημέρες των υψηλών παροχών εντός του έτους ➤ Μέση διάρκεια χαμηλών παροχών εντός του έτους
Οικολογική σημασία	Διάρκεια και εύρος συνθηκών υγρασίας για παραποτάμιες διαπλάσεις Διάρκεια και εύρος αναερόβιου στρες, διάρκεια και έκταση συγκεκριμένων εποχιακών βιοτόπων (π.χ πλημμυρικών εκτάσεων), εδαφολογικά χαρακτηριστικά, επίδραση στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του συστήματος
Πέμπτη κατηγορία παραμέτρων	
Δείκτης υδρολογικής μεταβολής	Ρυθμός και συχνότητα αλλαγών στις υδρολογικές συνθήκες
Υδρολογική παράμετρος	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Μέσος όρος όλων των θετικών διαφορών παροχής ανάμεσα σε διαδοχικές ημέρες ➤ Μέσος όρος όλων των αρνητικών διαφορών παροχής ανάμεσα σε διαδοχικές ημέρες ➤ Αριθμός περιόδων ανοδικής πορείας των παροχών (ανοδικοί κλάδοι υδρογραφήματος) ➤ Αριθμός περιόδων καθοδικής πορείας των παροχών (καθοδικοί κλάδοι του υδρογραφήματος)
Οικολογική σημασία	Συνθήκες ξηρασίας, πλημμυρικές συνθήκες

2.3 Μεθοδολογίες που βασίζονται σε υδραυλικούς δείκτες

2.3.1 Γενικά

Οι μεθοδολογίες που βασίζονται σε υδραυλικούς δείκτες (Hydraulic rating methodologies) συσχετίζουν διάφορες παραμέτρους γεωμετρικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών του ποταμού, όπως είναι το πλάτος, το βάθος και η υγρή περίμετρος, με την αναγκαία παροχή για προστασία των ενδιαιτημάτων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση θεωρεί ότι η παροχή η οποία είναι επαρκής για την διατήρηση των γεωμετρικών υδραυλικών χαρακτηριστικών του ποτάμιου συστήματος, έχει την δυνατότητα να προστατεύσει τα κρίσιμα ενδιαιτήματα της περιοχής και να αποτελέσει την οικολογική παροχή.

Στην διεθνή βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί 23 μέθοδοι με υδραυλικούς δείκτες με την πιο διαδεδομένη να είναι η τεχνική της υγρής περιμέτρου (Tharme et al., 2003). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, γενικά, σε ρηχά και μεγάλου πλάτους ποτάμια, η υγρή περίμετρος εμφανίζεται ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος σε σχέση με ποτάμια που χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρό πλάτος κοίτης και μεγαλύτερα βάθη (Acrceman & Dunbar, 2004).

2.3.2 Η τεχνική της υγρής περιμέτρου

Η τεχνική της υγρής περιμέτρου για τον υπολογισμό της οικολογικής παροχής πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και βασίζεται στην σχέση μεταξύ της παροχής και της υγρής περιμέτρου. Άλλωστε, είναι γνωστό ότι ακόμα και η μικρή μεταβολή της υγρής περιμέτρου μπορεί να επιφέρει αλλαγές στην κατάσταση των ενδιαιτημάτων.

Η μέθοδος βασίζεται στην θεώρηση ότι η κατάσταση του υδατικού οικοσυστήματος συσχετίζεται άμεσα με αυτή της υγρής περιμέτρου. Για την ασφαλή προστασία του συνόλου του οικοσυστήματος, επιλέγονται κρίσιμα σημεία του υδατορεύματος τα οποία διαθέτουν είτε ιδιαίτερα οικολογικά χαρακτηριστικά, είτε αφορούν αβαθείς σχετικά περιοχές όπου η κίνηση και η διέλευση των ψαριών συναντά μεγαλύτερες δυσκολίες.

Χρησιμοποιούνται εμπειρικά μοντέλα συσχετισμού της υγρής περιμέτρου και της παροχής που συνίστανται στην κατασκευή της καμπύλης υγρής περιμέτρου-παροχής σε καθορισμένες θέσεις. Για τον καθορισμό της ελάχιστης παροχής, θεωρείται η παροχή κάτω από την οποία η προαναφερθείσα καμπύλη εμφανίζει ριζική μεταβολή και η οποία πρακτικά αφορά στην παροχή η οποία μειούμενη κατά το ελάχιστο δίνει τη μεγαλύτερη μείωση της υγρής περιμέτρου. Στην ουσία, ως ελάχιστο όριο για την παροχή επιλέγεται το σημείο της καμπύλης υγρής περιμέτρου και παροχής εμφανίζει την μέγιστη καμπυλότητα. Για τον υπολογισμό της παροχής χρησιμοποιείται ο τύπος του Manning (Stewardson & Gippel, 1998).

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

όπου:

n : ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning

A : το εμβαδόν της υγρής διατομής (m^2)

R : η υδραυλική ακτίνα (m)

S_f : η κλίση της γραμμής ενέργειας και της κοίτης στην περιοχή των μετρήσεων

Για τον υπολογισμό της μέγιστης καμπυλότητας της καμπύλης προσαρμόζεται αναλυτική σχέση υγρής περιμέτρου – λογαρίθμου της παροχής της οποίας η καμπυλότητα είναι

$$k = \frac{\left| \frac{-a}{Q^2} \right|}{\left[1 + \left(\frac{a}{Q} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (2.4)$$

Όπου:

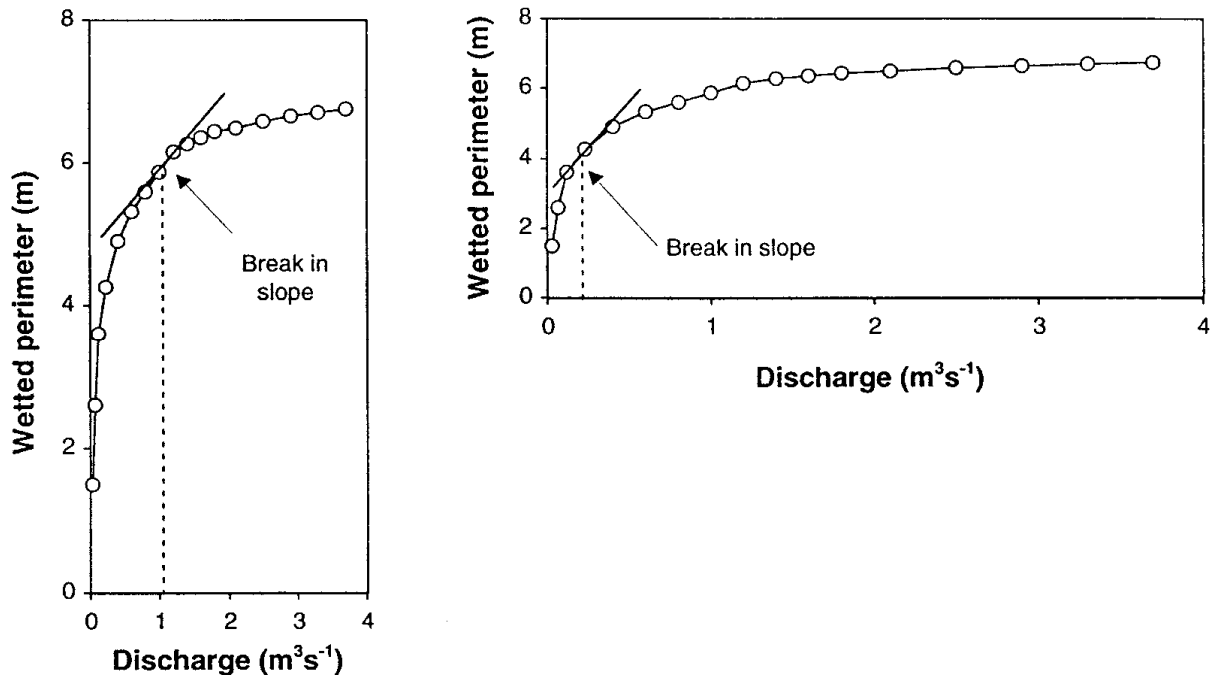
k : Η καμπυλότητα της λογαριθμικής καμπύλης

a : Η κλίση της λογαριθμικής καμπύλης

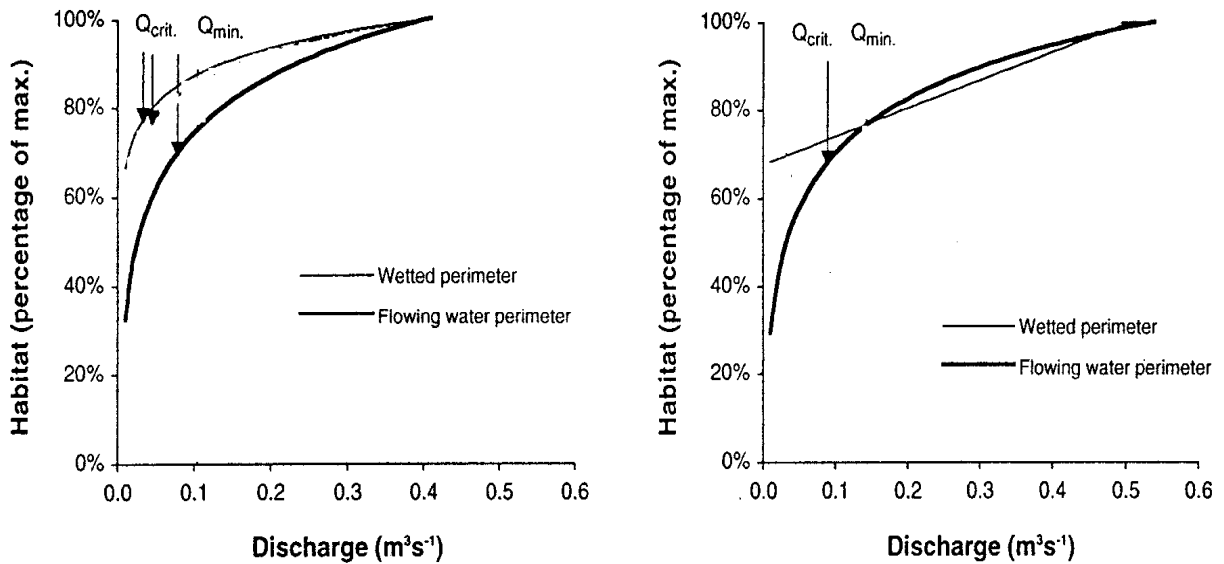
Q : Η παροχή

Στο Σχήμα 2.1 εμφανίζεται η βασική αρχή της μεθόδου για τον υπολογισμό της οικολογικής παροχής, ενώ στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η καμπύλη παροχής-ποσοστό προστασίας των ενδιαιτημάτων. Στο Σχήμα 2.3 αναπαρίσταται γραφικά η τεχνική της υγρής περιμέτρου. Με ένα προκαθορισμένο βήμα για την στάθμη της διατομής υπολογίζεται η περίμετρος και το

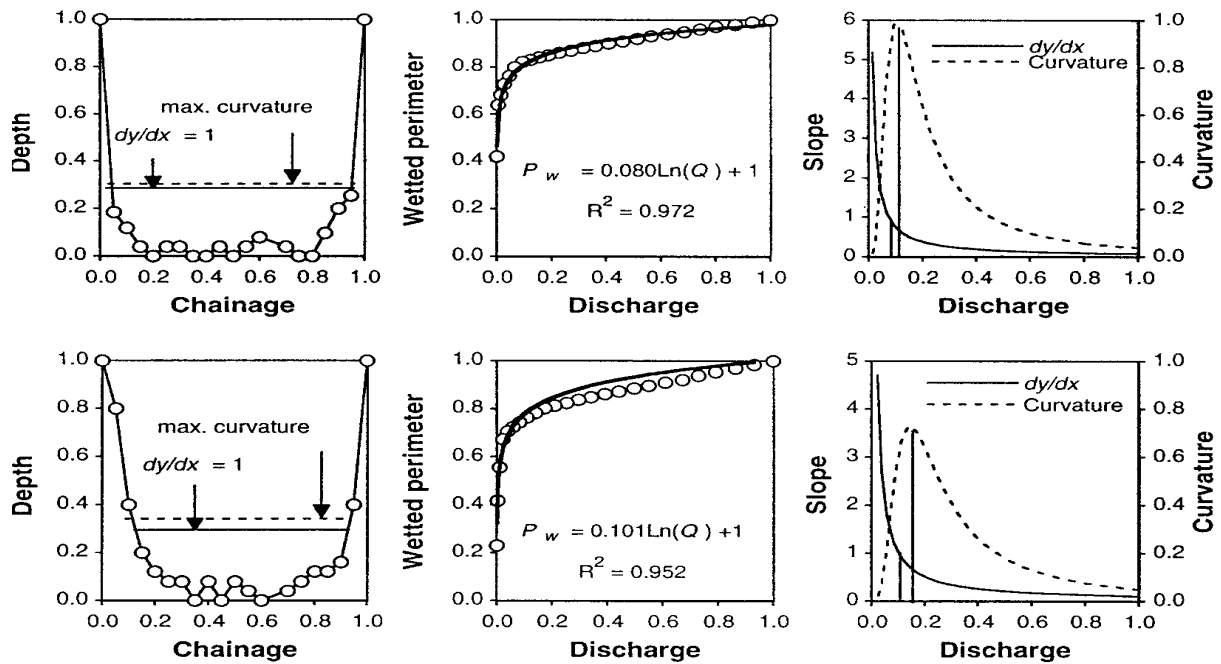
εμβαδόν. Στην συνέχεια, κατασκευάζεται η καμπύλη μεταξύ της υγρής περιμέτρου-παροχής από την οποία υπολογίζεται η κλίση της. Τέλος, εκεί όπου η καμπύλη εμφανίσει την μέγιστη καμπυλότητα επιλέγεται και η αντίστοιχη ελάχιστη οικολογική παροχή.



Σχήμα 2.1: Γραφική αναπαράσταση της τεχνικής της υγρής περιμέτρου με την καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου-παροχής



Σχήμα 2.2: Καμπύλη παροχής-ποσοστό προστασίας των ενδιαιτημάτων.



Σχήμα 2.3: Μελέτη της οικολογικής παροχής με την τεχνική της υγρής περιμέτρου

2.3.3 Μέθοδος toe-width

Η μέθοδος toe-width αναπτύχθηκε πρώτη φορά το 1976 στην Ουάσινγκτον, την ίδια περίπου χρονική περίοδο με την τεχνική της υγρής περιμέτρου. Πέρα από κοινή χρονική περίοδο εμφάνισής των, οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες. Η μέθοδος toe-width βασίζεται στο βάθος του ποταμού και στην ιδιαιτερότητα της ταχύτητας κάποιων ειδών ψαριών, ειδικά στις θέσεις ωοτοκίας. Έτσι, η οικολογική παροχή υπολογίζεται συσχετίζοντας τις ανάγκες των ψαριών (π.χ., ωοτοκία) και την εκάστοτε αναγκαία παροχή. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει εφαρμοστεί μόνον στην Ουάσινγκτον όπου και αναπτύχθηκε.

2.3.4 Προσαρμοσμένη προσέγγιση οικολογικής υδραυλικής ακτίνας (AEHRA)

Η μέθοδος της προσαρμοσμένης προσέγγισης οικολογικής υδραυλικής ακτίνας (Adapted Ecological Hydraulic Radius Approach) είναι πρόσφατη μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί την υδραυλική ακτίνα ως υποκατάστατο των υδραυλικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συστήματος. Η υδραυλική ακτίνα προσδιορίζεται με την χρήση της εξίσωσης ροής του Manning σε επιλεγμένες διατομές με σκοπό τον υπολογισμό του κατώτατου ορίου της οικολογικής ταχύτητας ροής. Η ελάχιστη οικολογική ταχύτητα προστατεύει και συντηρεί το ποτάμιο σύστημα και τις στοιχειώδεις λειτουργίες του.

2.3.5 Μέθοδος Flow Event

Το 2003 αναπτύχθηκε η μέθοδος flow event η οποία αποτελεί μια νέα προσέγγιση της οικολογικής παροχής (Stewardson & Gippel, 2003). Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται πέρα από την γεωμορφολογία του οικοσυστήματος, και σε βιολογικές παραμέτρους. Αποτελείται από πέντε βήματα τα οποία είναι :

- Προσδιορίζονται διάφορες οικολογικές παράμετροι όπως είναι η ξηρασία, οι πλημμύρες, η ηλιοφάνεια, η μεταφορά ανόργανων ιζημάτων, η οργανική ύλη, η σύρση και η τριβή.

- Εντοπίζεται η σχέση μεταξύ της ροής και διαφόρων υδραυλικών παραμέτρων (παρόμοια με την τεχνική της υγρής περιμέτρου).
- Μοντελοποιούνται οι υδραυλικές διεργασίες με την χρήση συνήθως του μοντέλου HEC-RAS.
- Αξιολογούνται τα σενάρια διαχείρισης της ροής.
- Προσδιορίζεται η οικολογική παροχή και οι οικολογικοί στόχοι.

2.4 Μεθοδολογίες προσομοίωσης ενδιαιτημάτων

Οι μεθοδολογίες προσομοίωσης των ενδιαιτημάτων (Habitat simulation methodologies) είναι οι πιο διαδεδομένες μετά τις υδρολογικές μεθόδους. Ουσιαστικά, πρόκειται για επέκταση των μεθοδολογιών που βασίζονται σε υδραυλικούς δείκτες. Αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 στις ΗΠΑ και στην παγκόσμια βιβλιογραφία συναντώνται 60 διαφορετικές μέθοδοι του συγκεκριμένου είδους.

Γενικά, με τις μεθόδους αυτές, η οικολογική παροχή προκύπτει από την ανάλυση της ποιότητας και της καταλληλότητας των ενδιαιτημάτων συγκεκριμένων ειδών στόχων (κυρίως ψαριών), κάτω από διαφορετικές συνθήκες διαίτας, βάσει πρωτογενών στοιχείων υδρολογικών, υδραυλικών και βιολογικών παραμέτρων. Η υδραυλική κατάσταση συνδυάζεται με τις απαιτήσεις και τις ιδιαιτερότητες του οικοσυστήματος και των ενδιαιτημάτων. Έτσι, η ροή συσχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του φυσικού περιβάλλοντος, την ποιότητα του νερού αλλά και με κάποιες ακόμα παραμέτρους όπως είναι η μεταφορά ιζημάτων και το υπέδαφος της περιοχής.

Συνήθως, οι μεταβολές των ενδιαιτημάτων σε σχέση με τις παροχές προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας δεδομένα μίας ή περισσότερων υδραυλικών παραμέτρων σε διατομές του υπό μελέτη συστήματος (ταχύτητα, βάθος, υπόστρωμα πυθμένα κλπ). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δίνουν το συσχετισμό της ζωτικότητας ή/και των απαιτήσεων διατήρησης των ενδιαιτημάτων με την παροχή και χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση της πρότασης για την οικολογική παροχή.

Η σημαντικότερη μέθοδος της προσομοίωσης των ενδιαιτημάτων είναι η IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) η οποία περιλαμβάνει το υπολογιστικό μοντέλο Phabsim (Physical Habitat Simulation) στο οποίο ενσωματώνονται στοιχεία υδρολογικά, μορφολογίας του ποταμού και βιολογικές παράμετροι, ενώ εξάγεται η παροχή η οποία ικανοποιεί τις οικολογικές ανάγκες. Το μοντέλο IFIM αναπτύχθηκε στα τέλη του 1970 και έχει εφαρμοστεί σε 38 πολιτείες των ΗΠΑ, στην Ιαπωνία, την Πορτογαλία και την Τσεχία. Οι μεθοδολογίες αυτές απαιτούν σημαντικό όγκο οικολογικών και υδρολογικών δεδομένων και μοντελοποίηση των ενδιαιτημάτων για συγκεκριμένες τιμές υδρολογικών και υδραυλικών παραμέτρων, καθώς επίσης και μετρήσεις σε συγκεκριμένες διατομές ποταμών για διαφορετικές παροχές.

Ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει στην προσπάθεια απλοποίησης των μοντέλων αυτών σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε από το Laboratoire Quantitative της Cemagref της Λυών ένα στοχαστικό μοντέλο ποσοτικοποίησης της διαφοροποίησης των ενδιαιτημάτων σε σχέση με την παροχή (Cemagref, 2002). Ως βασικά δεδομένα εισόδου στο μοντέλο αυτό απαιτούνται 2 εποχικές μετρήσεις παροχής, της υγρής περιμέτρου και της μέσης στάθμης, καθώς επίσης και των βασικών χαρακτηριστικών του υποστρώματος του τμήματος που εξετάζεται. Με βάση τα στοιχεία αυτά συσχετίζεται γραφικά η παροχή με την

ζωτικότητα των ενδαιτημάτων διαφόρων ειδών ψαριών όπως μοντελοποιήθηκε με βάση δεδομένα πεδίου. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται δίνουν το όριο της παροχής κάτω από την οποία η δυνητική ζωτικότητα των ενδαιτημάτων συγκεκριμένων ειδών ψαριών μειώνεται σημαντικά.

2.5 Μεθοδολογίες ολιστικής προσέγγισης

Η μεθοδολογία της ολιστικής προσέγγισης, αν και αντιπροσωπεύει μόλις το 7.7% του συνόλου των μεθοδολογιών, έχει μεγάλη συμβολή στο επιστημονικό αντικείμενο της οικολογικής παροχής. Μέχρι σήμερα, έχουν καταγραφεί 23 μέθοδοι που ανήκουν στην συγκεκριμένη κατηγορία.

Οι μεθοδολογίες αυτές (Holistic methodologies) αποτελούν τις πιο περίπλοκες από τις προαναφερθείσες μεθόδους. Και αφορούν πρακτικά στο συνδυασμό των παραπάνω μεθοδολογιών. Οι μέθοδοι αυτές απαιτούν πολλές μετρήσεις πεδίου και προγράμματα παρακολούθησης. Επιπλέον, δεν δίνουν συγκεκριμένη οικολογική παροχή αλλά επικεντρώνονται στον καθορισμό των επιπτώσεων από διαχειριστικά σενάρια και, για το λόγο αυτό, θεωρούνται ιδανικές για διαχειριστικές μελέτες και σχέδια.

Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί, και κυρίως αυτές που βασίζονται σε υδρολογικά δεδομένα ή και υδραυλικούς δείκτες, συνήθως βασίζονται σε παραδοχές οι οποίες θεωρείται ότι καλύπτουν είτε ικανοποιητικά είτε λιγότερο ικανοποιητικά το σύνολο ή μέρος των προαναφερθεισών παραμέτρων που καθορίζουν την υγεία των ποτάμιων οικοσυστημάτων. Οι παράμετροι αυτές εξετάζονται, σε μεγαλύτερο βαθμό, ή ακόμα και εξαντλητικά, στις ολιστικές μεθόδους και στις μεθόδους προσομοίωσης των οικοσυστημάτων. Όμως, για το σκοπό αυτό απαιτούνται τα εξής: αφενός σημαντικός αριθμός δεδομένων πεδίου που αφορούν βιολογικούς δείκτες ή και συγκεκριμένα είδη και, αφετέρου, επιστημονική έρευνα για τις σχέσεις διαφόρων υδρολογικών και υδραυλικών δεικτών (πλημμύρες, στάθμες κλπ.) με την υγεία των ενδαιτημάτων του εξεταζόμενου ποτάμιου συστήματος.

Η πρώτη και πιο διαδεδομένη από αυτές είναι η Building Block Methodology η οποία αναπτύχθηκε στη Νότιο Αφρική όπου έχει εφαρμοστεί σε 15 περιπτώσεις. Η μέθοδος αυτή ξεκινά από την παραδοχή ότι τα είδη που συνδέονται με ένα ποτάμιο σύστημα μπορούν μεν να ανταπεξέλθουν ή/και να επιβιώσουν σε καθεστώς μειωμένης ροής όμως, είναι άμεσα εξαρτημένα και από τις μεγαλύτερες παροχές που εμφανίζει το σύστημα. Επομένως, είναι απαραίτητη η αναγνώριση των συνθηκών αυτών και η εξασφάλισή τους στο τροποποιημένο καθεστώς ροής (Symphorian et al.,2003).

Τα βασικά εξαγόμενα του μοντέλου είναι:

- οι προτεινόμενες μέγιστες και ελάχιστες μηνιαίες παροχές, καθώς και οι προτεινόμενες διάρκειες αυτών, και
- οι ημερήσιες απαιτήσεις του υδάτινου όγκου για την κάλυψη των υδατικών αναγκών.

Τελευταία, η εξέλιξη των μεθόδων αυτών στην Νότιο Αφρική οδήγησε στη δημιουργία μίας νέας προσέγγισης, της DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformations), η οποία εξετάζει διαφορετικά σενάρια παροχών και χρήσεων νερού στα υδάτινα σώματα με τα αντίστοιχα οικονομικά και κοινωνικά αποτελέσματα και προσομοιώνει την αναμενόμενη κατάσταση των οικοσυστημάτων για κάθε ένα από αυτά. Η μέθοδος αυτή δεν δίνει συγκεκριμένα αποτελέσματα, αλλά χρησιμοποιείται ως εργαλείο άντλησης κατάλληλων πληροφοριών για τη λήψη αποφάσεων ανάπτυξης έργων αξιοποίησης υδατικών συστημάτων.

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται επίσης οι εξής μέθοδοι: η μέθοδος DRM (Desktop Reserve Model), η μέθοδος Benchmarking, η Flow Restoration Methodology και η μέθοδος ELOHA (Ecological Limits of Hydrologic Alteration).

2.6 Η οικολογική παροχή στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, η μελέτη και η εκτίμηση της οικολογικής παροχής σε έργα διαχείρισης υδατικών πόρων εμφανίζεται μόλις την τελευταία δεκαετία. Η νομική έννοια της οικολογικής παροχής έχει τυποποιηθεί μόνον για μικρά υδροηλεκτρικά έργα. Η συγκεκριμένη υπουργική απόφαση αναφέρει ότι η ελάχιστη παροχή καθορίζεται ως το 30% της μέσης παροχής κατά την θερινή περίοδο και είναι υποχρεωτική για την αδειοδότηση του έργου. Ο περιορισμός αυτός εφαρμόστηκε και σε μεγαλύτερα έργα αξιοποίησης και διαχείρισης υδατικών πόρων.

Στην ελληνική νομοθεσία η οικολογική παροχή εμφανίζεται με την εφαρμογή του νόμου 1650/86, όμως, η τάση είναι προς μια πιο αυστηρή πολιτική διαχείρισης των υδάτων, λόγω της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2000/60. Οι απαιτήσεις της οδηγίας συνοπτικά είναι:

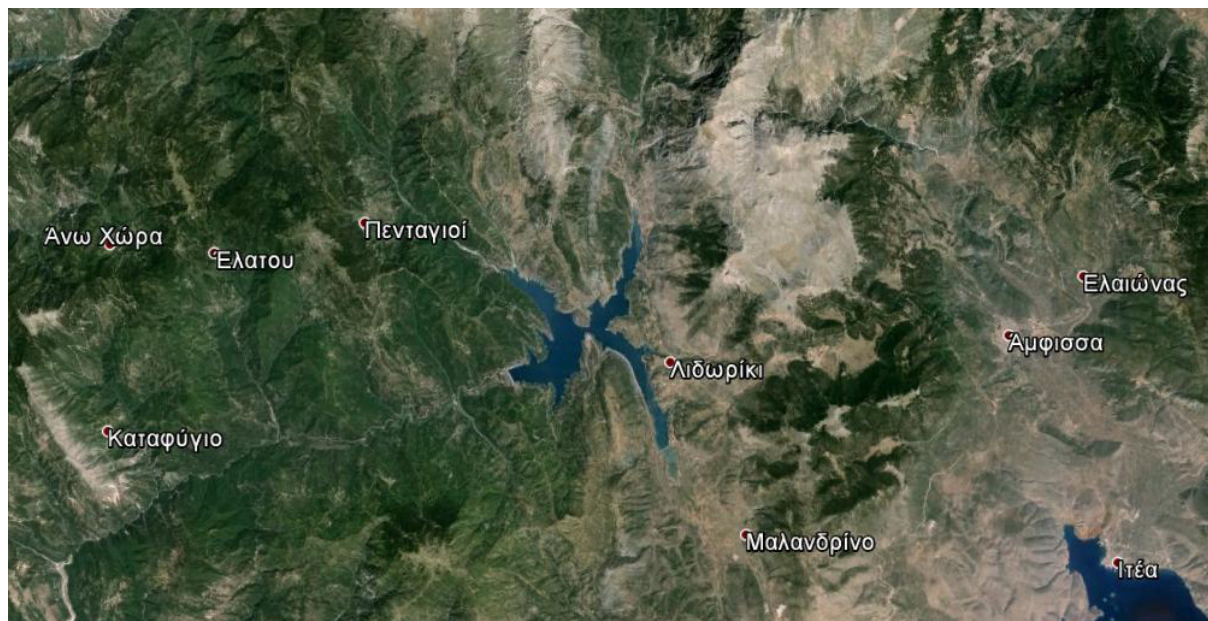
- στην κατάταξη των υδατικών συστημάτων σε μία κατηγορία οικολογικής κατάστασης βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων που αφορούν υδρομορφολογικά, φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά
- στην υποχρέωση μη περαιτέρω υποβάθμισης των υδατικών συστημάτων αλλά και την αναβάθμισή τους στην κατηγορία της καλής οικολογικής κατάστασης ή του καλού οικολογικού δυναμικού
- στην προστασία της οικολογικής ποιότητας η οποία επιτυγχάνεται μέσα από διαχειριστικά σχέδια και προτάσεις προγραμμάτων μέτρων, των οποίων το αντικείμενο δεν είναι μόνον οι ποσότητες και οι χρήσεις αλλά και η οικολογική κατάσταση με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια.

Στην ελληνική πραγματικότητα, πέρα από το νομικό έλλειμμα για την θέσπιση της οικολογικής παροχής, αντιμετωπίζεται και το μεγάλο πρόβλημα της έλλειψης δεδομένων για την αξιόπιστη εφαρμογή των σχετικών μεθόδων. Επίσης, στα περισσότερα από τα υφιστάμενα φράγματα της Ελλάδας, η υλοποίηση περιορισμών περιβαλλοντικής ροής είναι αδύνατη εκ των υστέρων, καθώς για κανένα φράγμα που κατασκευάστηκε προ του 1995 δεν προβλέφθηκαν κατάλληλες διατάξεις εκροής (στα έργα αυτά υπάρχει πλήρης διακοπή της ροής κατάντη).

Παρόλα αυτά, ανά την επικράτεια εμφανίζονται μελέτες εκτίμησης της ελάχιστης ροής. Στον ποταμό Εύηνο εφαρμόστηκε πιλοτικά η μέθοδος RVA και προέκυψαν προτάσεις που αφορούν μόνον το συγκεκριμένο ποτάμιο σύστημα. Τέθηκε ως κατώτατο όριο παροχής το 1 m³/s. Επιπρόσθετα, αναλυτική μελέτη για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής με την εφαρμογή αρκετών μεθόδων της παγκόσμιας βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε για τον Αχελώο και, συγκεκριμένα, για το φράγμα Στράτου. Τέλος, στο καινούργιο φράγμα Αποσελέμη διασφαλίστηκε στη μελέτη του έργου μόνιμη ροή κατάντη του φράγματος της τάξης των 15 L/s με σκοπό την εύρυθμη λειτουργία του δέλτα του Αποσελέμη

3 Περιοχή μελέτης

3.1 Επιλογή περιοχής μελέτης



Σχήμα 3.1 : Η περιοχή μελέτης του Μόρνου

Η τεχνητή λίμνη του Μόρνου δημιουργήθηκε το 1979 με την κατασκευή του φράγματος στον ομώνυμο ποταμό. Η συνολική επιφάνεια της λίμνης ανέρχεται στα 15.5 km². Κατασκευάστηκε με σκοπό την ένταξή του στο υδροδοτικό σύστημα της πρωτεύουσας της χώρας.

Η επέμβαση στο υδρολογικό ισοζύγιο μιας λεκάνης απορροής, που προκαλείται από την κατασκευή ενός φράγματος, έχει αρνητικές επιπτώσεις στο οικοσύστημα. Οι επιπτώσεις στα ποιοτικά χαρακτηριστικά αφορούν τόσο την αλλαγή στην φυσική ροή του νερού, όσο και στην μεταφορά φερτών υλών του ποταμού

Ειδικότερα, η περιοχή μελέτης του Μόρνου αποτελεί περιοχή ιδιαίτερης οικολογικής σημασίας. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αργή υποβάθμιση του συνόλου της περιοχής. Από οικολογική άποψη, η τεχνητή λίμνη του Μόρνου, σε περιόδους έντονης ξηρασίας σε συνδυασμό με την υπεράντληση των υδάτων της, εμφανίζει απότομη πτώση της στάθμης της και νεκρές ζώνες. Ακόμη, ο ποταμός Μόρνος εμφανίζει ανά διαστήματα ιδιαίτερα χαμηλές παροχές κατάντη του τεχνητού φράγματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2. Επίσης υπάρχουν αμμοληψίες και χαλικοληψίες οι οποίες διαταράσσουν την κοίτη του ποταμού. Τέλος, στις εκβολές του ποταμού η μεγάλη επέκταση της γεωργίας μειώνει τα φυσικά διαθέσιμα ενδιαιτήματα.



Σχήμα 3.2: Ο ποταμός Μόρνος αμέσως κατάντη του φράγματος



Σχήμα 3.3: Ενδεικτική εικόνα της επέκτασης της γεωργίας στο δέλτα του ποταμού Μόρνου

Συμπερασματικά, ο Μόρνος παρουσιάζει -για αυτό τελικά επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης- ιδιαίτερο οικολογικό ενδιαφέρον. Έτσι, μελετάται η οικολογική παροχή του ποταμού κατάντη του φράγματος και προτείνονται συγκεκριμένες λύσεις-προτάσεις για την διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας από την πλευρά της ροής.

3.2 Γενικά

3.2.1 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά

Η λίμνη του Μόρνου βρίσκεται στο κέντρο του Νομού Φωκίδας, 7 km δυτικά του Λιδωρικού και καλύπτει με τα νερά του ένα λεκανοπέδιο που σχηματίζεται ανάμεσα στα όρη της Γκιώνας και των Βαρδουσίων. Συγκεντρώνει νερό, πέρα από τον κλάδο του Μόρνου, και από άλλους μικρότερους παραποτάμους, όπως ο Κοκκινοπόταμος. Επίσης, δέχεται νερό μέσω κλειστής σήραγγας από την γειτονική λίμνη του Εύηνου. Υπάγεται στο υδατικό διαμέρισμα της δυτικής Στερεάς Ελλάδος. Ο ποταμός Μόρνος έχει τις πηγές του στις νότιες πλαγιές της Οίτης και εκβάλλει στον Κορινθιακό κόλπο.

Η λεκάνη απορροής του Μόρνου έχει έκταση 588 km² και μέσο υψόμετρο 1082 m. Τα όρια της λεκάνης απορροής καθορίζονται από τους ορεινούς όγκους της Οίτης στα βόρεια, της Γκιώνας και του Λιδωρικού στα ανατολικά, και των Βαρδουσίων της ορεινής Ναυπακτίας στα δυτικά και βορειοδυτικά. Η μέση κλίση της είναι 21.5% και ο κύριος κλάδος είναι ο Μόρνος με συνολικό μήκος τα 70 km. Γειτονεύει ανατολικά με την λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, βόρεια με την λεκάνη του Σπερχειού, και δυτικά με τις λεκάνες Αχελώου και Εύηνου.

3.2.2 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Η σύσταση των εδαφών της λεκάνης απορροής επηρεάζει ιδιαίτερα την υδρολογική διαίτα, καθώς, οι μηχανικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του εδάφους καθορίζουν τον ρυθμό διήθησης και κατά συνέπεια την απορροή. Η χημική σύσταση των εδαφών καθορίζει την φυτοκάλυψη και τους επικρατούντες τύπους χλωρίδας με συνέπεια την επίδραση στην επιφανειακή απορροή.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής είναι τα 1082 m, ενώ, υψομετρικά, η λεκάνη έχει υψόμετρα από τα 320 m (στην κοίτη του Μόρνου, στην θέση του Φράγματος) ως τα 2454 m (κορυφή Γκιώνας) με το 50% της συνολικής έκτασης της λεκάνης να βρίσκεται σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 980 m. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι πρόκειται για μια περιοχή με ιδιαίτερα έντονο ανάγλυφο και αρκετά μεγάλες υψομετρικές διαφορές για την έκταση της.

Από υδρογεωλογικής απόψεως η λεκάνη χωρίζεται σε τρεις ζώνες:

1. Ζώνη Γκιώνας: Ασβεστολιθική μονάδα με υπόγειο ορίζοντα η οποία περιβάλλεται από στεγανό φλύσχη.
2. Ζώνη Βαρδουσίων: Εφίππευση ασβεστόλιθων σε στεγανό φλύσχη. Παράλληλα, ο υπόγειος υδροφορέας είναι ιδιαίτερα πλούσιος με παροχές που κυμαίνονται από 0.2 ως 5.6 m³/s με μέση ετήσια απορροή 30×10⁶ m³.
3. Ζώνη Πύργου: Μάζα ασβεστόλιθων με υδροφόρο ορίζοντα σε μεγάλο βάθος που εκφορτίζεται στον Κορινθιακό κόλπο.

Συνοπτικά, η λεκάνη απορροής καλύπτεται σε ποσοστό 52% από απολύτως υδατοστεγή πετρώματα (φλύσχη), 9% από ασβεστολιθικά που εκφορτίζονται εντός της λεκάνης και 39% από επίσης ασβεστόλιθους που εκφορτίζονται εκτός της λεκάνης.

Σημειώνεται επίσης ότι δεν παρατηρείται μεγάλη επιβάρυνση στα υπόγεια υδατικά συστήματα τα οποία βρίσκονται σε καλή κατάσταση λόγω της σχετικά μικρής άντλησης.

3.2.3 Χλωρίδα και πανίδα

Η περιοχή του Μόρνου συγκροτεί ένα πλούσιο και μοναδικής ποικιλότητας οικοσύστημα. Στα νερά του Μόρνου απαντώνται αρκετά είδη ιχθυοπανίδας όπως το *Barbus albanicus* (Στρωσίδι), *Barbus peloponnesius* (Αμμοσούρτης), *Leuciscus cephalus albus* (Τυλινάρι) και *Salmo trutta* (Πέστροφα).

Το υπό μελέτη τμήμα του ποταμού είναι σημαντικό και ως βιότοπος της βίδρας (*Lutra*), ενός σπάνιου θηλαστικού, το οποίο, παρά τις ποικίλες δραστηριότητες της περιοχής, βρίσκει καταφύγιο στην υδρόφιλη βλάστηση κατά μήκος των οχθών. Είναι επίσης γνωστή ως ευρασιαστική βίδρα (ποτάμια), κοινή βίδρα, ή βίδρα του Παλαιού Κόσμου, αλλά και ως ενυδρίδα.

Στην παραλίμνια ζώνη και στις όχθες του ποταμού ζουν αρκετά αρπακτικά πτηνά όπως είναι ο χρυσαητός (*Aquila chrysaetos*), ο φιδαιτός (*Circus gallus*), το γεράκι (*Buteo*), ο πετρίτης (*Falco*), το σαΐνι (*Accipiter*) κ.α. Εκτός από αρπακτικά, στο οικοσύστημα υπάρχουν και παρυδάτινα πτηνά όπως το νανοβουτηχάρι (*Cachybaptus ruficollis*), ο αλκυόνης (*Alcedo atthis*), γλάροι και πάπιες. Παράλληλα, υπάρχει και μεγάλος αριθμός ερπετών και αμφιβίων τα οποία έχουν καταγραφεί και αρκετά από αυτά είναι προστατευόμενα είδη.

Η φυτοκάλυψη, εκτός του ότι αποτελεί οικολογικής σημασίας στοιχείο, επηρεάζει άμεσα και την απορροή. Ανάλογα με το είδος της βλάστησης, δρα στην μείωση του όγκου άμεσης απορροής, την επιβράδυνση και εξομάλυνση των ρυθμών της, με τελική συνέπεια την μείωση των αιχμών των πλημμυρικών υδρογραφημάτων.



Σχήμα 3.4: Ενδεικτική εικόνα από την βλάστηση στην παρόχθια ζώνη του ποταμού Μόρνου

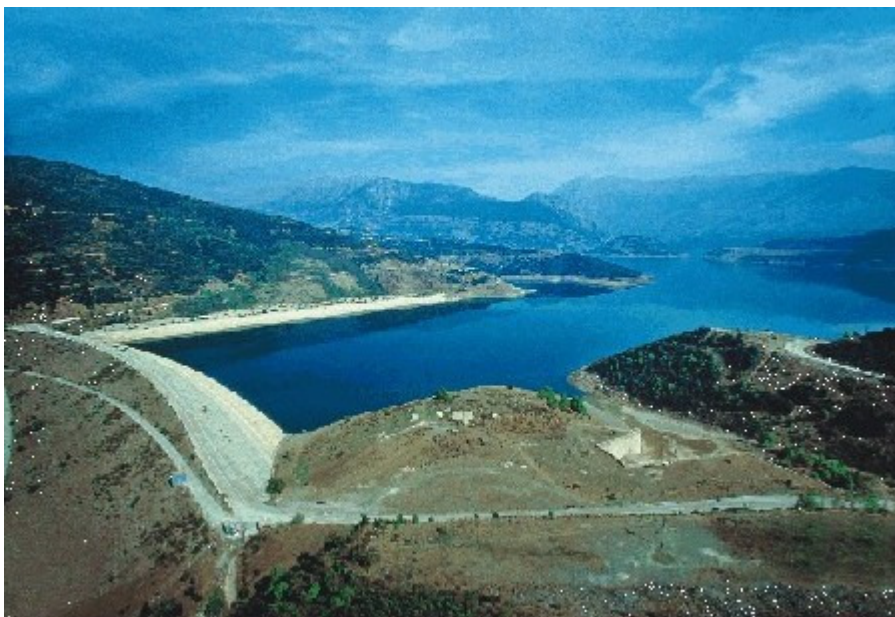
Επιπρόσθετα, στην περιοχή μελέτης πέρα από μεγάλη ποικιλία σε πανίδα, λόγω της ύπαρξης του υδατικού οικοσυστήματος, έχει αναπτυχθεί μεγάλη ποικιλία διαφορετικών φυτών δημιουργώντας έτσι μια ποικιλόμορφη χλωρίδα. Η μεσογειακή μακκία καλύπτει πολλές εκτάσεις γύρω από τη λίμνη, ενώ υπάρχει και μεγάλος αριθμός αιθαλών θάμνων.

Τη χλωρίδα εμπλουτίζουν και διάφορα είδη βελανιδιάς, όπως η χνοώδης δρυς, η πλατύφυλλη δρυς, αλλά και αριές. Άλλα δέντρα που υπάρχουν στο οικοσύστημα είναι τα σφενδάμια, τα πλατάνια, οι ιτιές, τα αγριόκεδρα, οι κουμαριές, οι κουτσουπιές, οι χρυσοξυλιές, τα σκλήθρα, τα κυπαρίσσια, τα ρείκια, ενώ υπάρχουν και συστάδες κεφαλληνιακής ελάτης.

3.2.4 Ο ταμιευτήρας του Μόρνου

Το έργο για την κατασκευή του φράγματος άρχισε το 1969 και τελείωσε το 1979, αλλά η κανονική λειτουργία άρχισε το 1981. Το φράγμα του Μόρνου είναι ένα από τα μεγαλύτερα χωμάτινα φράγματα της Ευρώπης με αργιλικό πυρήνα. Το μέγιστο ύψος του φράγματος από την στάθμη θεμελίωσης είναι 139 m, με πλάτος στέγης τα 10 m και μήκος βάσης τα 250 m. Το υψόμετρο της στέγης του φράγματος από την μέση στάθμη της θάλασσας ανέρχεται στα 446.5 m, ενώ η ανώτερη στάθμη πλημμύρας είναι 435 m.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα, η μέση εισροή νερού ανά έτος είναι $240 \times 10^6 \text{ m}^3$ και η μέση εκροή φθάνει τα $195 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά έτος. Τέλος, η μέγιστη χωρητικότητα νερού της λίμνης είναι $764 \times 10^6 \text{ m}^3$.

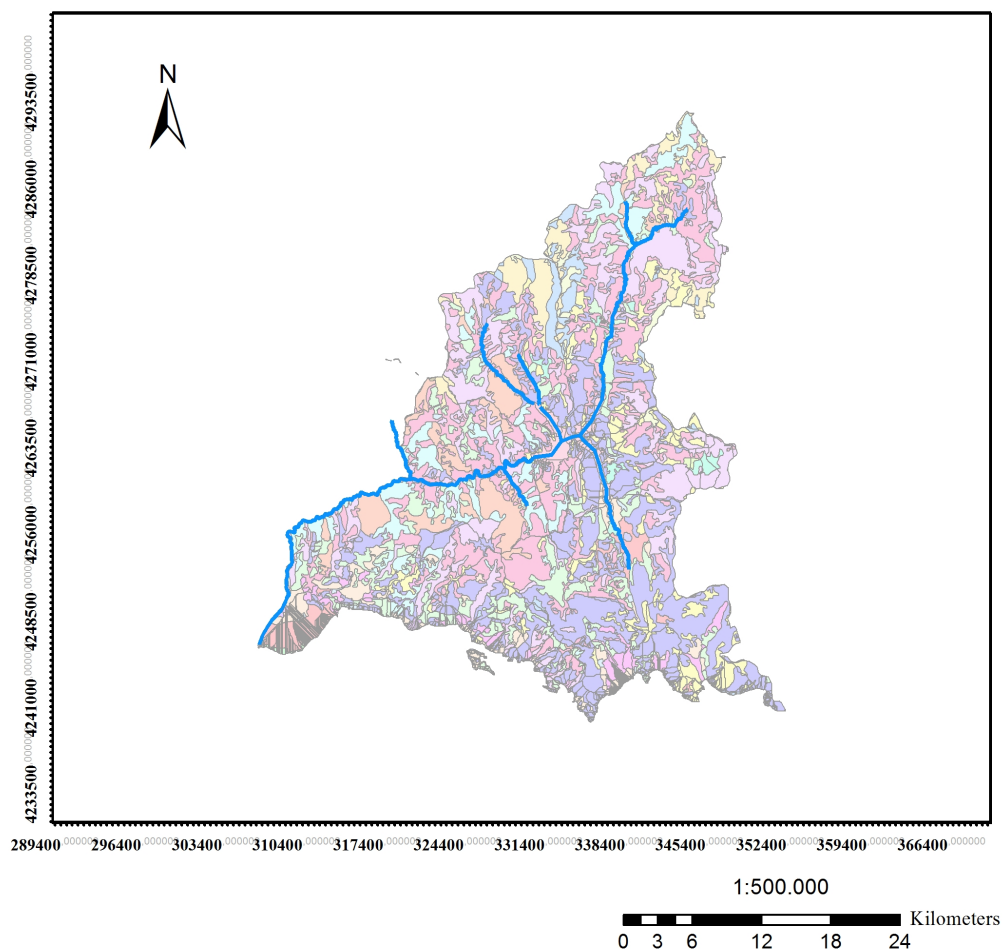


Σχήμα 3.5: Ο ταμιευτήρας Μόρνου

3.2.5 Χρήσεις γης

Οι χρήσεις γης αποτελούν σημαντικό στοιχείο της εκάστοτε περιοχής μελέτης, καθώς, σε συνδυασμό με την γενικότερη μορφολογία του εδάφους, δίνουν σημαντικές πληροφορίες για διάφορες σημαντικές παραμέτρους της λεκάνης απορροής, όπως είναι ο συντελεστής απορροής. Στην παρούσα εργασία, ο χάρτης χρήσεων γης δημιουργήθηκε μέσω των χαρτών του προγράμματος CORINE και περιλαμβάνει δεδομένα κάλυψης γης με πιο πρόσφατα αυτά του 2000. Η πληροφορία του συγκεκριμένου χάρτη προήλθε από φωτοερμηνεία εικόνων του δορυφόρου LANDSAT 7 ETM+. Η ακρίβεια των δεδομένων είναι 14 m κατά X και Y.















Επικρατέστερες χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης



Υπόμνημα

— Υδρογραφικό δίκτυο

Χρήσεις γης

 Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	 Μικτό δάσος
 Ελαιώνες	 Φυσικός βοσκότοπος
 Λιβάδια	 Θάμνοι και χερσότοποι
 Σύνθετες καλλιέργειες	 Σκληροφυλλική βλάστηση
 Καλλιεργήσιμη γη	 Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις
 Δάσος πλατύφυλλων	 Παραθαλάσσια βλάστηση
 Δάσος κωνοφόρων	 Επιφάνειες στάσιμου ύδατος

Σχήμα 3.6: Οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης

4 Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων

4.1 Γενικά

Τα αρχικά δεδομένα, όπως αυτά περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2 για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής, είναι αρκετά απαιτητικά, τόσο στον όγκο τους όσο και σε αξιοπιστία. Ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα επιλέγεται και η κατάλληλη μεθοδολογία για την μελέτη της οικολογικής παροχής. Οι μεθοδολογίες που βασίζονται σε υδρολογικούς δείκτες είναι οι πιο απλές και χρειάζονται την μικρότερη διαθεσιμότητα δεδομένων, ενώ οι αμέσως επόμενες σε απλότητα μεθοδολογίες είναι οι υδραυλικές. Όμως, ακόμα και οι απλούστερες σε εισαγόμενα δεδομένα μεθοδολογίες απαιτούν χρονοσειρές βροχοπτώσεων και παροχών, τουλάχιστον μιας συνεχόμενης δεκαετίας με χρονικό μάλιστα βήμα το ημερήσιο.

Η Ελλάδα αντιμετωπίζει βασικό και διαχρονικό πρόβλημα έλλειψης δεδομένων, που καθιστά πολλές από τις μεθόδους της βιβλιογραφίας ανεφάρμοστες. Για τις υδρολογικές προσεγγίσεις, αν και υπάρχουν αρκετοί βροχομετρικοί σταθμοί με ημερήσια μέτρηση πολλών ετών, υπάρχει έλλειψη μετρήσεων παροχών ικανού χρονικού μήκους. Μάλιστα, ακόμα και υπάρχουσες μετρημένες παροχές είναι αμφίβολης αξιοπιστίας.

Το μεγάλο πρόβλημα των δεδομένων για τον ελληνικό χώρο διαπιστώθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η επιλογή της περιοχής του Μόρνου έγινε μετά από την σύγκριση των υπάρχοντων δεδομένων με άλλες πιθανές περιοχές μελέτης. Αρχικά εξετάστηκε η περιοχή του Άραχθου ποταμού. Για τον συγκεκριμένο ποταμό, βρέθηκαν διατομές ανά 500 m που είχαν προκύψει από τοπογραφικές μετρήσεις, όμως δεν βρέθηκαν μετρήσεις παροχών, κάτι που θα έκανε εφικτή την εφαρμογή μόνον υδραυλικών μεθόδων. Επίσης, εξετάστηκε η περιοχή του Βοιωτικού Κηφισού, η οποία, λόγω των μεγάλων υπόγειων διαφυγών τελικά απορρίφθηκε.

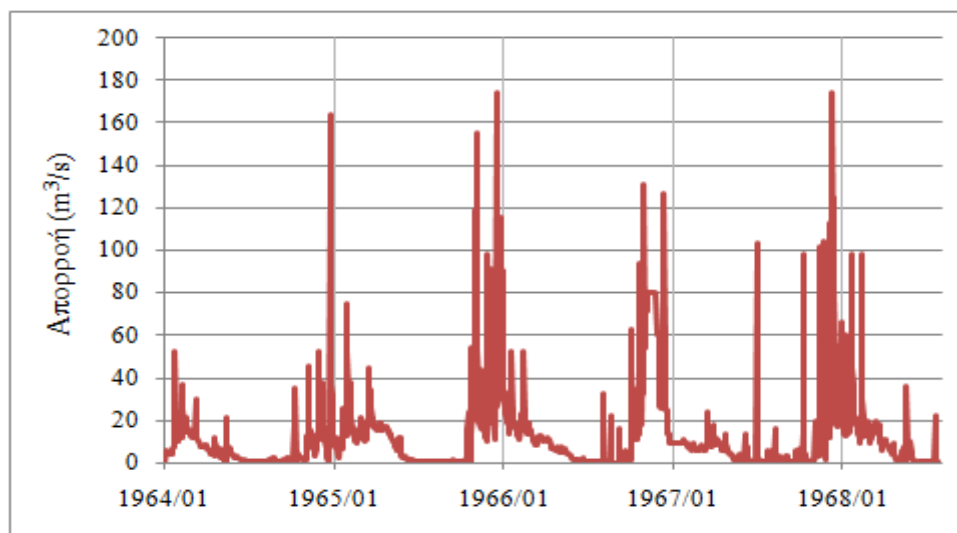
Για την περιοχή του Μόρνου συλλέχθηκαν ημερήσιες μετρήσεις βροχοπτώσεων, ημερήσιες μετρήσεις παροχών, θερμοκρασίες και τα κατάλληλα ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Αναλυτική παρουσίαση για την αξιοπιστία και την επάρκεια των συγκεκριμένων δεδομένων γίνεται στις επόμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου.

4.2 Δεδομένα

Αρχικά, για την λεκάνη απορροής του Μόρνου βρέθηκαν ημερήσιες μετρήσεις στάθμης και παροχής από το ερευνητικό πρόγραμμα «Διερεύνηση προσφερόμενων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών» του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων σε συνεργασία με το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο με επιστημονικό υπεύθυνο τον καθηγητή Θ. Ξανθόπουλο. Η θέση μέτρησης της παροχής αφορά την θέση Γέφυρα Περιβολίου για την χρονική περίοδο 1964-1968 (Πίνακας 4.1, Σχήμα 4.1).

Πίνακας 4.1: Οι μέσες μηνιαίες παροχές για την θέση Περιβολίου

Έτος	Μηνιαίες παροχές στην θέση Γέφυρα Περιβολίου (m ³ /s)											
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
1964	-	9.7	16.22	10.34	5.65	4.5	1.47	0.79	1.39	0.95	4.55	16.5
1965	23.97	16.49	16.84	19.1	16.21	7.08	1.47	0.84	0.83	0.99	20.17	32.8
1966	47.97	23.05	17.5	11	8.08	4.52	1.36	0.93	2.23	2.53	34.98	30.24
1967	33.43	22.50	7.19	10.04	8.49	2.48	5.99	1.2	1.94	1.75	5.02	22.1
1968	44.89	25.66	17.44	13.7	5.46	5.01	0.54	1.28	-	-	-	-



Σχήμα 4.1 : Οι μετρημένες παροχές σε χρονοσειρά για την θέση Περιβολίου

Για την ίδια χρονική περίοδο αναζητήθηκαν για την λεκάνη απορροής ημερήσιες μετρήσεις βροχοπτώσεων. Τελικά, βρέθηκαν ελεύθερα διαθέσιμα δεδομένα για οκτώ σταθμούς στην περιοχή μελέτης από το Υδροσκόπιο-Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (www.hydroscope.gr) με μετρήσεις από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής.

Οι ονομασίες των σταθμών που επιλέχθηκαν είναι:

1. Ο Αθ. Διάκος
2. Ο Δαφνός
3. Οι Καρούτες
4. Ο Κονιακός
5. Το Λιδωρίκι
6. Το Μαλανδρίνο
7. Οι Πενταγιοί
8. Η Συκέα

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις για το 1964 οι οποίες προέκυψαν από ημερήσιες μετρήσεις. Οι υπόλοιπες χρονιές για τις μηνιαίες βροχοπτώσεις παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Πίνακας 4.2: Μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις των σταθμών της περιοχής μελέτης για το έτος 1964

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Αθ.Διάκος	17.33	3.24	5.23	2.11	2.38	3.44	3.44	0.42	1.50	3.64	4.76	10.92
Δαφνός	5.67	1.69	7.35	3.87	2.68	3.63	3.63	1.06	0.28	2.88	5.87	8.60
Καρούτες	0.00	3.63	3.89	2.77	2.28	2.46	2.46	0.85	1.18	2.29	5.92	4.36
Κονιακός	11.83	2.76	4.83	1.96	2.55	3.24	3.24	0.66	0.85	2.82	4.50	9.97
Λιδωρίκι	10.17	1.01	3.10	1.93	1.80	2.20	2.20	0.19	1.75	1.76	4.07	4.46
Μαλανδρίνο	10.67	1.87	5.81	2.90	2.82	2.80	2.80	1.23	0.50	3.58	5.70	10.45
Πενταγιοί	10.17	2.17	3.28	0.76	1.76	3.01	3.01	0.68	0.79	2.94	3.06	6.37
Συκέα	6.70	2.40	3.07	2.52	2.14	2.00	2.00	0.88	1.32	1.86	5.78	5.09

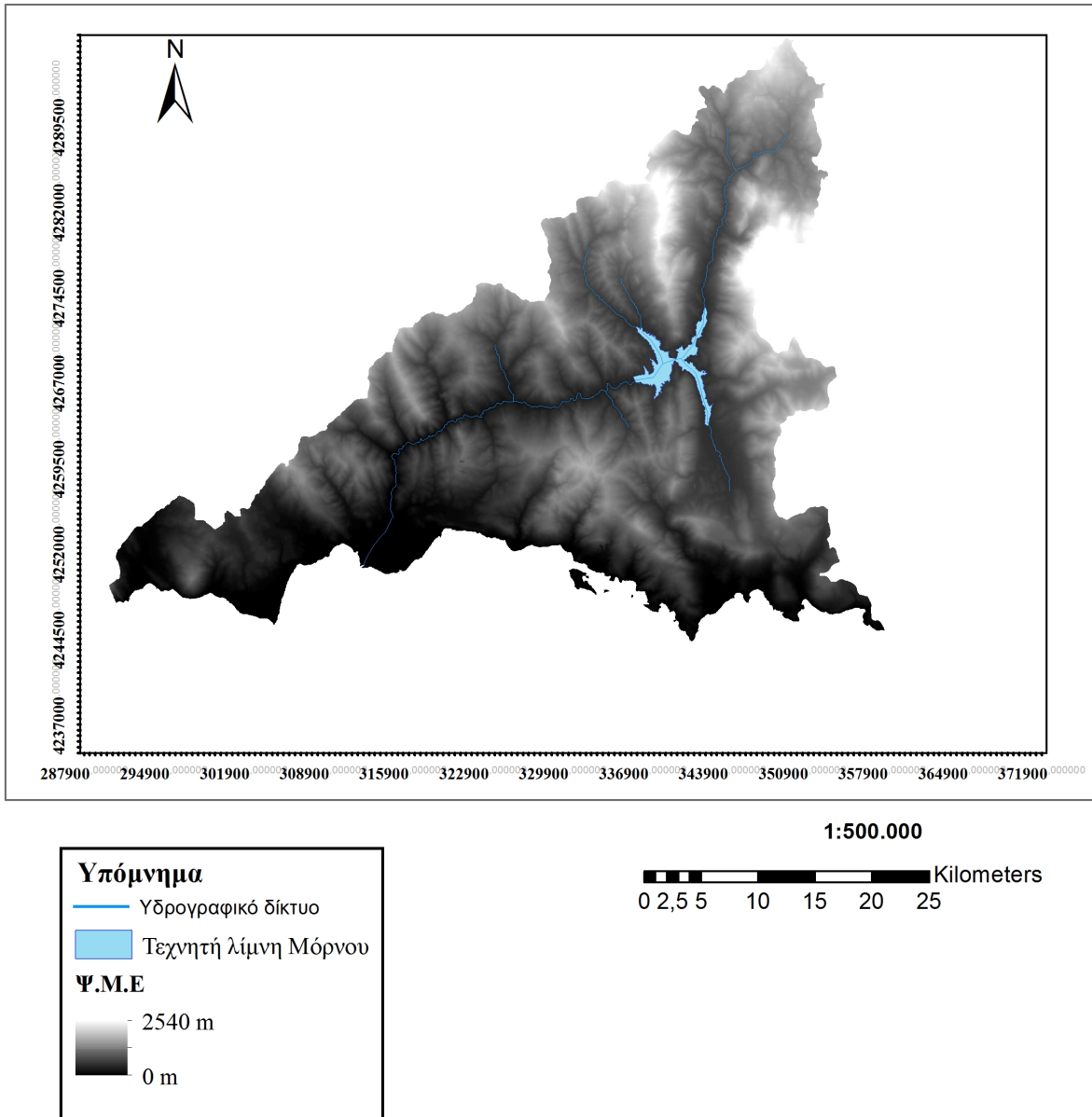
Παράλληλα, μαζί με τις βροχομετρικές παρατηρήσεις συλλέχθηκαν και ημερήσιες μέσες θερμοκρασίες για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής από τον σταθμό Λιδωρίκι. Οι θερμοκρασίες βρέθηκαν επίσης από την βάση δεδομένων του Υδροσκοπίου (Πίνακας 4.3).

Πίνακας 4.3: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες για τον σταθμό Λιδωρικού (°C)

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
1964	4.53	5.15	9.54	12.52	17.64	23.21	23.21	24.07	19.64	16.44	17.6	8.4
1965	7.95	8.54	8.93	12.03	15.78	20.97	24.47	22.58	21.72	14.22	10.50	7.68
1966	5.23	9.81	7.60	14.00	16.21	21.40	24.25	25.65	20.54	18.38	10.94	7.34
1967	3.77	6.18	9.91	12.57	18.21	20.59	23.13	25.15	19.96	18.00	11.42	8.70
1968	3.83	8.85	8.83	15.78	21.06	21.30	25.03	22.95	-	-	-	-

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκε Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής του Μόρνου με χρήση προϊόντος λογισμικού γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS). Στην συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκε το λογισμικό ArcGIS 10.1 για την επεξεργασία των ΨΜΕ της περιοχής. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε ένα ΨΜΕ της ευρύτερης περιοχής με σκοπό τον υπολογισμό της έκτασης της λεκάνης απορροής και την χάραξη των πολυγώνων Thiessen. Το συγκεκριμένο ψηφιακό μοντέλο έχει διάσταση κάθε φατνίου 25x25 m, αναφέρεται στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ 87) (Σχήμα 4.2). Στην συνέχεια, για την εφαρμογή των υδραυλικών μεθόδων χρησιμοποιήθηκε νέο ΨΜΕ για την περιοχή του ποταμού, μεγαλύτερης ακρίβειας με μέγεθος φατνίου 5x5 m, από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΑΕ και στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου παρουσιάζονται αναλυτικά οι επεξεργασίες των δεδομένων.

Ψηφιακό μοντέλο ευρύτερης περιοχής μελέτης



Σχήμα 4.2 : Το ψηφιακό μοντέλο της περιοχής μελέτης

4.3 Επεξεργασία υδρολογικών δεδομένων

4.3.1 Έλεγχος ομοιογένειας βροχομετρικών παρατηρήσεων

Πριν από την ανάλυση των βροχομετρικών δεδομένων ενός σταθμού πρέπει πρώτα να ελεγχθεί η ποιότητα και η πληρότητα των δεδομένων αυτών. Για τον έλεγχο της ποιότητας των παρατηρήσεων γίνεται ο έλεγχος ομοιογένειας των παρατηρήσεων. Ελέγχεται δηλαδή κατά πόσο το σύνολο των παρατηρήσεων προέκυψε με τις ίδιες συνθήκες μετρήσεων. Η αλλαγή της θέσης του οργάνου, η αντικατάσταση του οργάνου, και η αλλαγή του παρατηρητή είναι οι κυριότερες παράμετροι που οδηγούν συνήθως σε μη ομογενή δεδομένα (Τσακίρης, 1995).

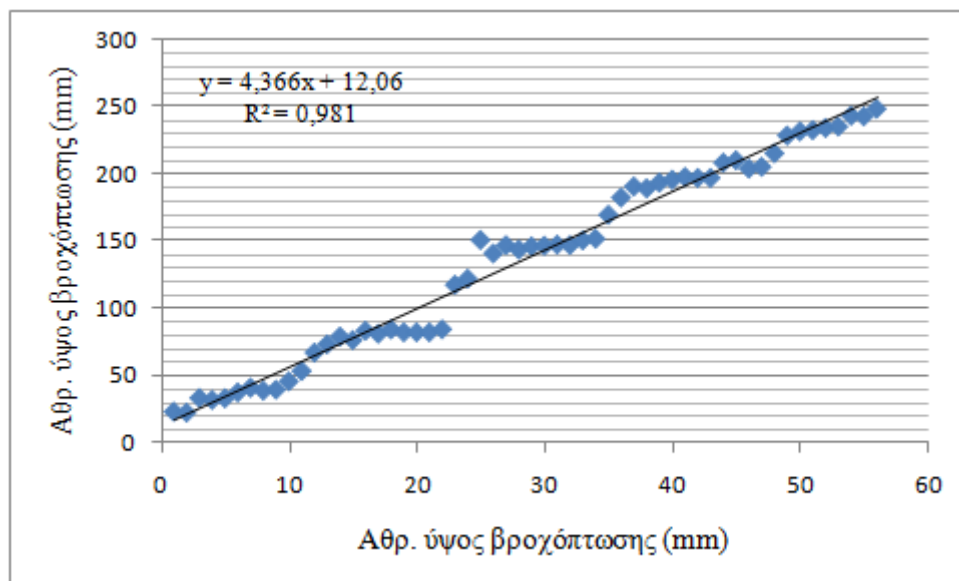
Ο έλεγχος της ομογένειας των δεδομένων ενός σταθμού επιτυγχάνεται συγκρίνοντας τα δεδομένα με ομάδα γειτονικών σταθμών (των οποίων έχει ελεγχθεί η ομογένεια) που αποτελούν τους σταθμούς βάσης. Η μέθοδος είναι γνωστή ως μέθοδος της διπλής αθροιστικής καμπύλης.

Αρχικά, επιλέγεται ο σταθμός βάσης βάσει του οποίου θα γίνει ο έλεγχος της ομογένειας με τους υπόλοιπους σταθμούς. Αναγκαία προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ο υψηλός βαθμός γραμμικής συσχέτισης μεταξύ του σταθμού που εξετάζεται και του σταθμού βάσης.

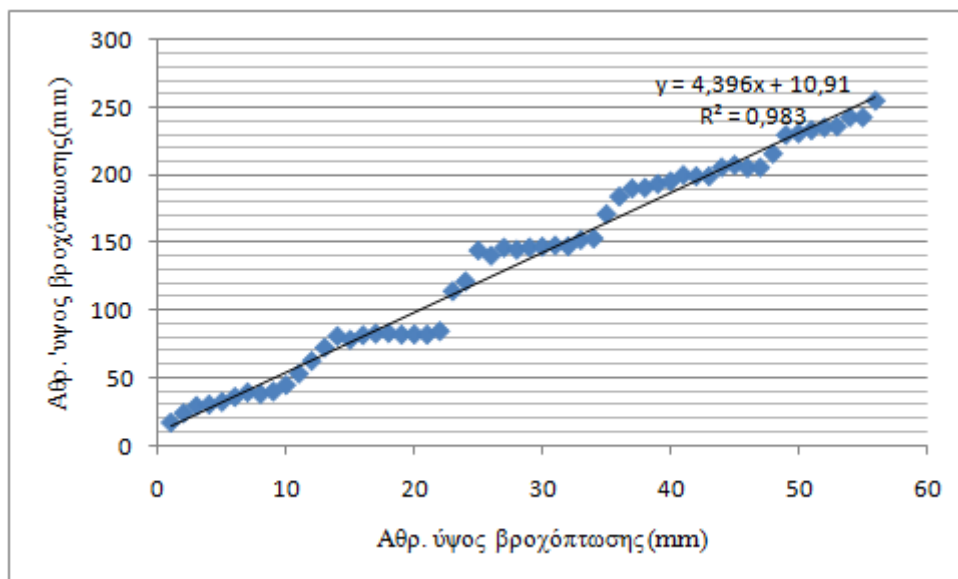
Για την κατάρτιση της Διπλής Αθροιστικής Καμπύλης υπολογίζονται για κάθε σταθμό τα αθροίσματα:

$$\sum X_{i+1} = \sum X_i + X_{i+1} \quad (4.1)$$

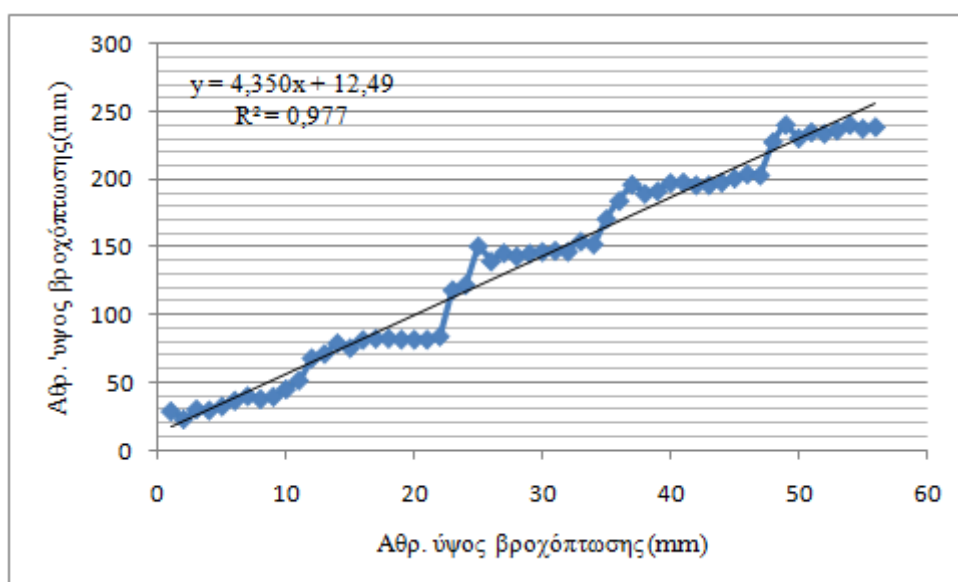
Στην περίπτωση των οκτώ σταθμών της λεκάνης απορροής του Μόρνου, ως σταθμός βάσης επιλέχθηκε ο σταθμός Αθ. Διάκος επειδή παρουσιάζει υψηλή γραμμική συσχέτιση με τους υπόλοιπους σταθμούς και έχει το μεγαλύτερο ποσοστό περιοχής επηρεασμού στα πολύγωνα Thiessen. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλοι οι σταθμοί μεταξύ τους έχουν μεγάλη συσχέτιση, μεγαλύτερη του 0.8. Στα σχήματα 4.3, 4.4 και 4.5 παρουσιάζονται ενδεικτικά τρεις διπλές αθροιστικές καμπύλες.



Σχήμα 4.3: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τον Αθ. Διάκο και ελεγχόμενο σταθμό τον Δαφνό



Σχήμα 4.4: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τον Αθ. Διάκο και ελεγχόμενο σταθμό τις Καρούτες



Σχήμα 4.5: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τον Αθ. Διάκο και ελεγχόμενο σταθμό τον Κονιακό

Οι υψηλοί συντελεστές R^2 που υπολογίστηκαν παραπάνω (σχήματα 4.3, 4.4, 4.5) φανερώνουν ότι τα δεδομένα είναι ομογενή, οπότε δεν χρειάζονται περαιτέρω διαδικασίες διορθώσεων ώστε να επέλθει η ομογενοποίηση. Στο Παράρτημα Β εμφανίζονται και οι έλεγχοι για τους υπόλοιπους πλην των παραπάνω σταθμούς.

4.3.2 Συμπλήρωση κενών βροχομετρικών παρατηρήσεων

Σε περίπτωση που σε σταθμούς βροχομετρικών παρατηρήσεων απουσιάζουν παρατηρήσεις, εμφανίζεται η αναγκαιότητα συμπλήρωσης των κενών με την βοήθεια άλλων γειτονικών σταθμών οι οποίοι έχουν ελεγχθεί για την συσχέτιση με τον εξεταζόμενο σταθμό. Η

συμπλήρωση αυτή μπορεί να γίνει με την χρήση τριών γειτονικών σταθμών που έχουν πλήρη δεδομένα και την εφαρμογή του μαθηματικού τύπου:

$$P_x = \frac{1}{3} \left[\frac{N_x P_1}{N_1} + \frac{N_x P_2}{N_2} + \frac{N_x P_3}{N_3} \right] \quad (4.2)$$

όπου:

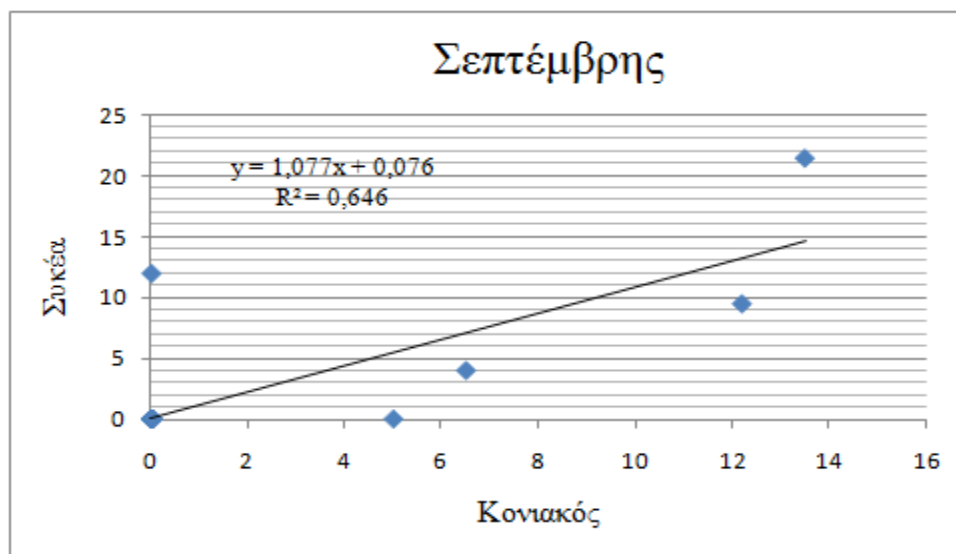
P_1, P_2, P_3 : οι αντίστοιχες τιμές των σταθμών βάσης 1, 2 και 3.

N_1, N_2, N_3 : οι τιμές της μέσης βροχόπτωσης στους σταθμούς

N_x : η μέση βροχόπτωση του υπό συμπλήρωση σταθμού

Επίσης, η συμπλήρωση των βροχομετρικών παρατηρήσεων μπορεί να γίνει με βάση τη γραμμική συσχέτιση των παρατηρήσεων του υπό συμπλήρωση σταθμού με άλλο σταθμό βάσης, εφόσον ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι αρκετά ισχυρός. Στην ουσία εφαρμόζεται απλή γραμμική παλινδρόμηση.

Για τους οκτώ σταθμούς της παρούσας εργασίας εντοπίζονται κενές παρατηρήσεις για τον σταθμό Κονιακό από 1/9/1966 ως 31/12/1966. Στην ουσία δηλαδή, υπάρχουν τέσσερις μήνες του σταθμού οι οποίοι δεν έχουν παρατηρήσεις. Αρχικά, ελέγχθηκε η συσχέτιση του Κονιακού με τον πλησιέστερο σταθμό, της Συκέας. Οι συσχετίσεις που βρέθηκαν για τους μήνες Σεπτεμβρίου, Οκτωβρίου, Νοεμβρίου και Δεκεμβρίου κυμαίνονταν από 0.8 ως 0.65. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε σωστότερο να γίνει συμπλήρωση των κενών παρατηρήσεων με την χρήση τριών γειτονικών σταθμών. Οι σταθμοί που επιλέχθηκαν είναι της Συκέας, του Αθ. Διάκου και του Δαφνού. Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε για κάθε μήνα ξεχωριστά με τις τιμές P_1, P_2, P_3 να είναι οι ημερήσιες μετρήσεις των βροχοπτώσεων των σταθμών, οι τιμές N_1, N_2, N_3 να είναι οι μέσες μηνιαίες τιμές των σταθμών για τον μήνα εφαρμογής της μεθόδου και η τιμή N_x την μέση μηνιαία τιμή του υπό συμπλήρωση σταθμού. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται η ευθεία της γραμμικής παλινδρόμησης για τον μήνα Σεπτέμβριο μεταξύ των σταθμών Κονιακού και Συκέας.



Σχήμα 4.6: Γραμμική παλινδρόμηση για τον μήνα Σεπτέμβριο μεταξύ των σταθμών Κονιακού-Συκέας

4.3.3 Υπολογισμός μέσου βροχομετρικού ύψους λεκάνης απορροής

Το επόμενο βήμα μετά την συμπλήρωση των κενών βροχομετρικών παρατηρήσεων των σταθμών της λεκάνης απορροής είναι ο υπολογισμός του μέσου βροχομετρικού ύψους της λεκάνης απορροής. Το μέσο βροχομετρικό ύψος της λεκάνης μπορεί να υπολογισθεί με τους παρακάτω τρόπους:

1. Αριθμητικός μέσος των παρατηρήσεων των σημειακών βροχομετρικών υψών των σταθμών της λεκάνης απορροής. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται σπάνια διότι απαιτεί την ομοιόμορφη κατανομή των βροχομετρικών σταθμών στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής.
2. Πολύγωνα Thiessen. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τον παράγοντα βάρους που αντιστοιχεί στα εμβαδά των πολυγώνων επιρροής κάθε σταθμού, όπως αυτός προκύπτει με την χάραξη των μεσοκαθέτων επί των αποστάσεων των σταθμών μεταξύ τους. Το μέσο βροχομετρικό ύψος της λεκάνης απορροής P_0 προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους παρατηρήσεων P_i των σταθμών, πολλαπλασιασμένων με τις αντίστοιχες τιμές της έκτασης επιρροής δια της συνολικής έκτασης της λεκάνης. Ο μαθηματικός τύπος της μεθόδου είναι:

$$P_0 = \frac{\sum A_i P_i}{A} = \sum \left(\frac{A_i}{A} P_i \right) \quad (4.3)$$

3. Ισοϋέτιες καμπύλες (ή ισόβροχες καμπύλες). Είναι η ακριβέστερη μέθοδος για τον υπολογισμό του μέσου βροχομετρικού υψομέτρου η οποία, όμως, προϋποθέτει την ύπαρξη πολλών σταθμών στην λεκάνη αλλά και την γνώση της περιοχής ώστε να εξομαλύνονται χαρακτηριστικά της βροχής που προκαλούνται από τοπικά αίτια. Οι ισοϋέτιες καμπύλες χαράσσονται με τρόπο αντίστοιχο των ισοϋψών καμπυλών στην τοπογραφία.

$$P_0 = \sum \left(\frac{A_i}{A} \overline{P_{i-1,i}} \right) \quad (4.4)$$

όπου:

A_i : η έκταση μεταξύ δύο ισοϋετών καμπυλών

A : η συνολική έκταση της λεκάνης

$\overline{P_{i-1,i}}$: το μέσο βροχομετρικό ύψος μεταξύ δύο ισοϋετιών καμπυλών

Για την εκτίμηση του μέσου βροχομετρικού υψομέτρου της λεκάνης απορροής του Μόρνου επιλέχθηκε η δεύτερη μέθοδος, αυτή των πολυγώνων Thiessen. Η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen αποφέρει πολύ καλή ακρίβεια αποτελεσμάτων για λεκάνες απορροής με σχετικά λίγους σταθμούς μέτρησης. Ο υπολογισμός έγινε στο ArcGIS 10.1 με βάση το ΨΜΕ της ευρύτερης περιοχής του Μόρνου. Αρχικά, χαράχθηκε μέσω του υδροκρίτη της περιοχής η λεκάνη απορροής του Μόρνου. Για την διευκόλυνση, στην χάραξη του υδροκρίτη δημιουργήθηκαν οι ισοϋψείς καμπύλες μέσω της εντολής:

Arctoolbox → Spatial Analyst Tools → Surface → Contour

Στην συνέχεια, έχοντας ορίσει στο GIS την λεκάνη απορροής σε πολύγωνο και γνωρίζοντας τις συνταγμένες των οκτώ σταθμών, έγινε η χάραξη των πολυγώνων Thiessen μέσω της εντολής:

Arctoolbox → Analysis Tools → Proximity → Create Polygon Thiessen

Στον Πίνακα 4.4 φαίνονται τα βάρη (ποσοστό) των περιοχών επηρεασμού του κάθε σταθμού και οι αντίστοιχες εκτάσεις.

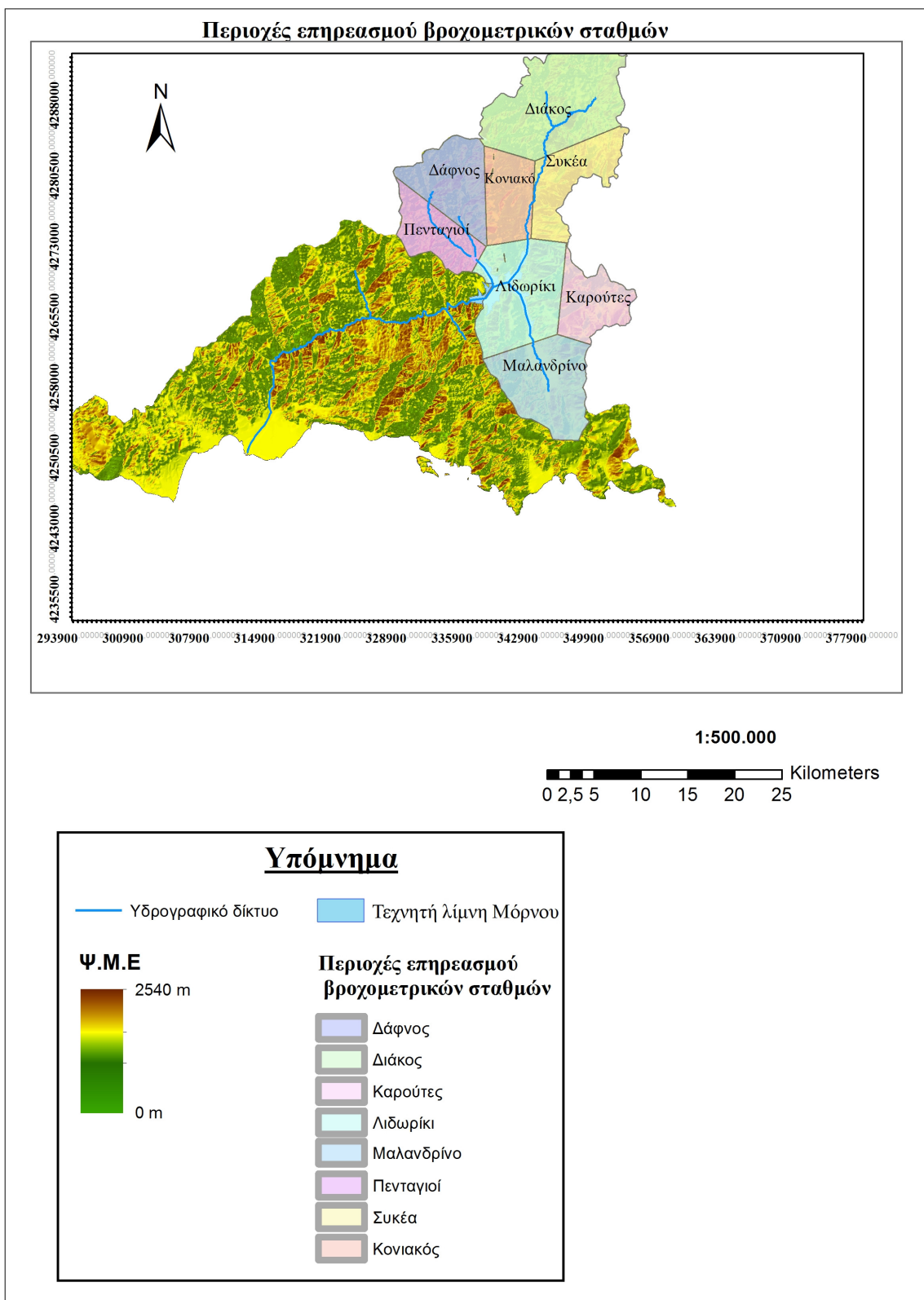
Πίνακας 4.4: Οι περιοχές επηρεασμού σύμφωνα με την μέθοδο Thiessen

Σταθμός	Εμβαδόν (m ²)	Ποσοστό (%)
Αθ. Διάκος	136906848,58	23,20
Δαφνός	63932303,40	12,00
Καρουτές	47906153,10	8,20
Κονιακός	47810479,05	8,20
Λιδωρίκι	96113041,40	16,20
Μαλανδρίνο	82885165,45	14,20
Πενταγιοί	45922832,65	7,90
Συκέα	58757900,80	10,1
Σύνολο	580370921,70	100

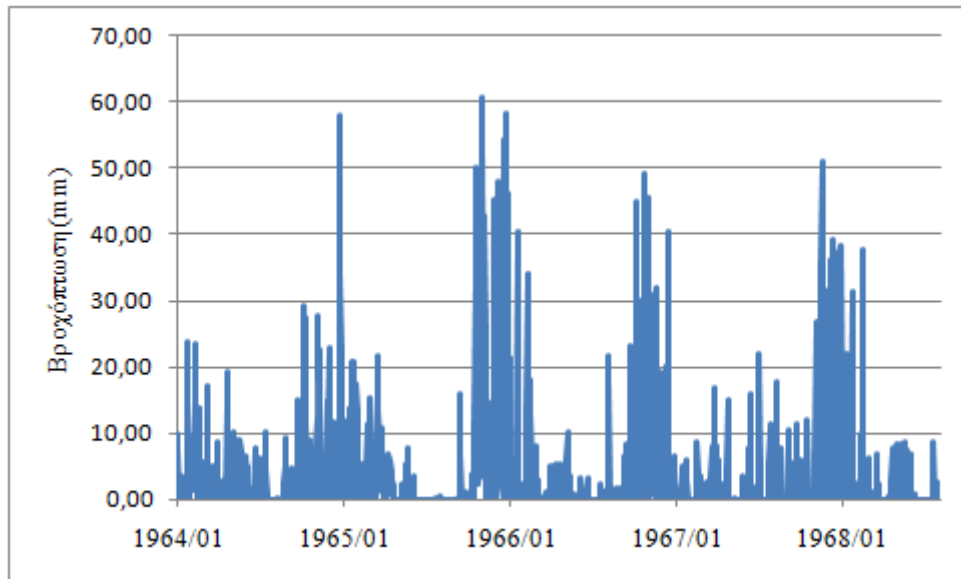
Πίνακας 4.5: Οι συντεταγμένες των σταθμών σε ΕΓΣΑ 87

Σταθμός	X(m)	Y(m)
Αθ. Διάκος	342637,81	4283353,50
Δαφνός	334344,19	4278147,50
Καρουτές	348416,00	4265442,50
Κονιακός	341174,19	4278360,50
Λιδωρίκι	343203,50	4265975,50
Μαλανδρίνο	346022,69	4257553,00
Πενταγιοί	330417,50	4273028,50
Συκέα	344754,59	4278165,50

Ο υπολογισμός της μέσης βροχόπτωσης δεν έγινε μόνον για την περίοδο για την οποία υπάρχουν μετρήσεις παροχής, αλλά για όλο το χρονικό διάστημα που υπάρχουν ημερήσιες μετρήσεις βροχόπτωσης. Ουσιαστικά, έγινε ο υπολογισμός της μέσης βροχόπτωσης για την περίοδο 1964-1980 με απώτερο σκοπό την χρονική επέκταση του μοντέλου βροχόπτωσης απορροής. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης με τα πολύγωνα Thiessen. Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται η ημερήσια βροχόπτωση σε χρονοσειρά για την περίοδο 1964-1968.



Σχήμα 4.7 : Η περιοχή μελέτης με τα πολύγωνα Thiessen



Σχήμα 4.8 : Η ημερήσια βροχόπτωση σε χρονοσειρά για την περίοδο 1964-1968

4.3.4 Εκτίμηση της εξάτμισης και της διαπνοής

Κατά την εκτίμηση της απορροής ενός ποταμού σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής. Είναι γνωστό ότι η εξάτμιση και η διαπνοή έχουν μεγάλη επιρροή στον υδρολογικό κύκλο και, για αυτό το λόγο, μελετάται παράλληλα με την απορροή σε μία υδρολογική λεκάνη.

Η εξατμισοδιαπνοή του νερού στο φυσικό περιβάλλον, είτε από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες, είτε από φυτοκαλυμμένες επιφάνειες της γης είναι μία από τις βασικές συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Ο υδρολογικός κύκλος ξεκινά με τη διαρκή προσφορά νερού από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης υπό τη μορφή υδρομετεώρων που καταλήγουν στους ποταμούς, στις λίμνες και στις θάλασσες, είτε μέσα από τη διήθηση των υπόγειων νερών είτε άμεσα ως επιφανειακή απορροή. Ο κύκλος κλείνει με την επαναφορά του νερού στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης.

Ένα σημαντικό τμήμα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που πέφτουν στο χερσαίο τμήμα της γης, πάνω από 60%, χάνεται με τους μηχανισμούς της εξάτμισης και της διαπνοής. Το μεγάλο αυτό ποσοστό των υδρολογικών απωλειών εξηγεί την ιδιαίτερη σημασία των αντίστοιχων φυσικών διεργασιών στο υδατικό ισοζύγιο και στην υδατική οικονομία μιας περιοχής. Το ποσοστό, όμως αυτό μεταβάλλεται έντονα τόσο γεωγραφικά όσο και χρονικά. Η ακριβής εκτίμηση των συνολικών απωλειών από εξάτμιση και διαπνοή θα επέτρεπε τον ακριβή προσδιορισμό του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού, δηλαδή της συνολικής απορροής.

Το νερό εισερχόμενο στη φάση της εξάτμισης του υδρολογικού κύκλου είναι πλέον μη προσιτό και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για τον όλο σχεδιασμό και την διαχείριση των υδατικών πόρων. Σε πολλά μέρη του κόσμου, οι υπάρχοντες υδατικοί πόροι βρίσκονται σε οριακό σημείο και, συνεπώς, η ορθολογιστική τους χρήση μέσω και της γνώσης της εξατμισοδιαπνοής είναι επιβεβλημένη. Η εξατμισοδιαπνοή από διάφορες επιφάνειες της γης και η βροχόπτωση καθορίζουν το ποσό της επιφανειακής απορροής των λεκανών απορροής των ποταμών. Επίσης, προσδιορίζουν σε ένα μεγάλο βαθμό, τα χαρακτηριστικά των λεκανών που μπορούν να προκαλέσουν υψηλή επιφανειακή απορροή και πλημμύρες σε περίπτωση μεγάλων βροχοπτώσεων. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή, πολλές φορές, θεωρείται ως η απαιτούμενη παροχή νερού στον σχεδιασμό

των προτεινόμενων αρδευτικών συστημάτων. Το ποσό και ο ρυθμός εξάτμισης από υδάτινες επιφάνειες είναι απαραίτητη πληροφορία για το σχεδιασμό φραγμάτων που απαιτούνται για την οικιακή και βιομηχανική υδροδότηση, την άρδευση των καλλιεργουμένων εκτάσεων κλπ.

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου που εκφράζει τη διατήρηση της μάζας σε μία εδαφική τομή μπορεί να γραφεί:

$$P + I + DSW \pm RO - D - ET = 0 \quad (4.6)$$

όπου:

P : η βροχόπτωση

I : η άρδευση

DSW : η αλλαγή του περιεχομένου νερού της εδαφικής τομής

RO : η επιφανειακή απορροή

D : η βαθιά διήθηση

ET : η εξατμισοδιαπνοή

Στην παγκόσμια βιβλιογραφία αναφέρονται πολλές μέθοδοι εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής, από αρκετά απλές στην απαίτηση τους σε δεδομένα και εφαρμογή, μέχρι και αρκετά σύνθετες. Για τον υπολογισμό είναι αναγκαία η ύπαρξη μετεωρολογικών σταθμών που θα μετρούν κυρίως θερμοκρασία αέρα (μέγιστη, ελάχιστη και μέση), την σχετική υγρασία του αέρα, την ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του ανέμου. Έτσι, υπάρχουν μοντέλα που υπολογίζουν την εξάτμιση και την διαπνοή χρησιμοποιώντας και συνδυάζοντας είτε όλα τα παραπάνω δεδομένα είτε πιο απλά μοντέλα τα οποία έχουν μικρότερες απαιτήσεις.

Η αναφορά στην θερμοκρασία του αέρα, νοείται η θερμοκρασία υπό σκιά. Η μέτρηση αυτής γίνεται με θερμομέτρα και θερμογράφους που τοποθετούνται εντός μετεωρολογικού κλωβού όπου ο αέρας κυκλοφορεί ελεύθερα και τα όργανα βρίσκονται υπό σκιά. Οι μετρήσεις που λαμβάνουν τα συγκεκριμένα όργανα αφορούν απόλυτη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας, την μέση ημερήσια θερμοκρασία, την μέση μηνιαία θερμοκρασία, την μέση ετήσια θερμοκρασία, το ημερήσιο θερμικό εύρος και το ετήσιο θερμικό εύρος.

Ένα πολύ συχνό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατά τον υπολογισμό της εξάτμισης με αρκετές μεθόδους, είναι η έλλειψη ταυτόχρονων δεδομένων θερμοκρασίας, υγρασίας, ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου για μεγάλες χρονικές περιόδους. Μια ακριβής μέθοδος με χαμηλή απαίτηση σε πρωτογενή δεδομένα είναι η εφαρμογή της εμπειρικής σχέσης (Κουτσογιάννης, 1997):

$$E = \frac{aS_0 - b}{1 - cT_a} \quad (4.7)$$

Τα a , b και c είναι εμπειρικοί συντελεστές που προσδιορίζονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, χρησιμοποιώντας τα υπολογισμένα με τη μέθοδο Penman δεδομένα της εξάτμισης E (mm/d) και τα αντίστοιχα δεδομένα θερμοκρασίας αέρα, T_a ($^{\circ}\text{C}$) και της εξωγήινης ακτινοβολίας, S_0 . Κατά συνέπεια, από μετρήσεις θερμοκρασίας, δίνεται η δυνατότητα, μέσω της εμπειρικής σχέσης 4.7, να γίνει εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής. Οι τιμές των συντελεστών αναφέρονται στην ευρύτερη περιοχή και, στην παρούσα εργασία, εκτιμήθηκαν προσαρμόζοντας αντίστοιχες παραμέτρους που βαθμονομήθηκαν με βάση δείγματα εξατμισοδιαπνοής κατά Penman-Monteith. Οι εκτιμήσεις που έγιναν εμφανίζονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6 : Μέση ημερήσια τιμή μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής με την εμπειρική μέθοδο στο σταθμό Λιδωρίκι (mm)

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
1964	1.03	1.20	1.98	2.77	3.82	5.21	5.33	4.67	3.16	2.02	1.22	0.88
1965	1.00	1.33	1.93	2.68	3.56	4.65	5.40	4.40	3.40	1.92	1.19	0.89
1966	0.77	1.25	1.85	2.87	3.58	4.70	5.25	5.18	3.22	2.19	1.21	0.88
1967	0.81	1.25	1.98	2.77	3.84	4.52	4.99	4.99	3.16	2.09	1.25	0.90
1968	0.85	1.40	1.96	3.08	4.14	4.52	5.52	4.65	-	-	-	-

4.3.5 Μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής

Με τον όρο επιφανειακή απορροή εννοούμε τη ροή του νερού, υπό την επίδραση της βαρύτητας, κατά μήκος των υδατορευμάτων. Η υδρολογική λεκάνη αποτελεί τον φυσικό υποδοχέα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και δρα, με όλα τα μορφολογικά, εδαφολογικά και λοιπά φυσικά χαρακτηριστικά της, ως ένα σύστημα μετασχηματισμού στο χώρο το οποίο δέχεται ως είσοδο τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και δίνει ως έξοδο την απορροή. Έτσι, η επιφανειακή απορροή είναι η πιο σημαντική από κάθε άλλη συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου, τόσο γιατί δίνει το μεγαλύτερο μέρος των εκμεταλλεύσιμων υδατικών πόρων, όσο γιατί συνδέεται άμεσα με φυσικούς κινδύνους όπως είναι οι πλημμύρες, η ξηρασία κ.α.

Οι απορροές αποτελούν το τμήμα εκείνο του υδρολογικού κύκλου που έχει τη μεγαλύτερη σχέση με τις δραστηριότητες και τα έργα των ανθρώπων. Επίσης, οι απορροές αποτελούν την βασική υδρολογική παράμετρο σε μια σειρά από έργα που γίνονται για τον έλεγχο, την αξιοποίηση ή την προστασία των υδατικών πόρων, όπως γίνεται και στην παρούσα εργασία. Τέλος, ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών έργων στηρίζονται και υπολογίζονται με βάση τα μεγέθη της απορροής (Τσακίρης, 1995).

Για την μελέτη της συμπεριφοράς της απορροής ενός υδατορεύματος ή μίας λεκάνης απορροής είναι αναγκαία η μακρόχρονη καταγραφή της διερχόμενης υδατοπαροχής σε διαφορετικές διατομές. Η ακριβής μέτρηση της παροχής σε φυσικούς αποδέκτες, αποτελεί το κύριο αντικείμενο μιας εφαρμοσμένης επιστημονικής περιοχής, της υδρομετρίας.

Η εκτίμηση της παροχής είναι αναγκαία τόσο από πρακτικής πλευράς, όσο και από οικονομικής αλλά και οικολογικής πλευράς με σκοπό τον προσδιορισμό ποιοτικών παραμέτρων του νερού, τη μελέτη υδατικού ισοζυγίου μιας υδρολογικής λεκάνης, για την διαστασιολόγηση τεχνικών έργων κ.α.

Η μετρήσεις που γίνονται για την εκτίμηση της απορροής περιλαμβάνουν πληθώρα διαφορετικών μετρήσεων όπως μετρήσεις της στάθμης του ποταμού, μετρήσεις για τον προσδιορισμό του εμβαδού της υγρής διατομής του ποταμού κλπ.

Για την απορροή του ποταμού Μόρνου βρέθηκαν μετρήσεις παροχών στην θέση Γέφυρα Περιβολίου που καλύπτουν την χρονική περίοδο 29/1/1964-31/8/1968. Για την ίδια χρονική περίοδο χρησιμοποιήθηκαν επίσης στο μοντέλο απορροής, η μέση βροχοπτώση και η εξατμισοδιαπνοή. Το χρονικό βήμα όλων των εισαγόμενων δεδομένων είναι το ημερήσιο.

Ως μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής χρησιμοποιήθηκε ένα Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου ημερήσιας χρονικής βάσης (Ναλμπάντης, 2014). Ο υπολογισμός της απορροής επιτυγχάνεται

στο μοντέλο με κύρια δεδομένα εισόδου το ύψος της παρατηρούμενης απορροής, το ύψος της βροχόπτωσης, τη μέση θερμοκρασία του αέρα και το ύψος της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Το Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου ημερήσιας χρονικής βάσης υλοποιεί ένα εννοιολογικό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, που αναπαριστά τις κύριες υδρολογικές διεργασίες μιας λεκάνης απορροής και του υποκείμενου υδροφορέα.. Στην πλήρη δομή του το μοντέλο περιλαμβάνει δώδεκα παραμέτρους, όπου σε κάθε παράμετρο αντιστοιχεί η ενεργός τιμή, το άνω και κάτω όριο της.

Το μοντέλο περιλαμβάνει τρεις δεξαμενές αποθήκευσης του νερού (χιονοκάλλυμα, Δεξαμενή Εδαφικής Υγρασίας, Δεξαμενή Υπόγειου Νερού) με τις εξής παραμέτρους:

T_0 , T_F , DDF: Παράμετροι μοντέλου τήξης χιονιού

ϵ : Ποσοστό βροχόπτωσης που διατίθεται για την ικανοποίηση της άμεσης εξατμισοδιαπνοής

κ : Ποσοστό του περισσέυματος βροχόπτωσης που εμφανίζεται ως άμεση απορροή (ταυτίζεται με το ποσοστό άμεσης απορροής (Q_D) που οφείλεται στην ύπαρξη αδιαπέρατων σχηματισμών, μέσω των οποίων το περίσσειμα βροχής μετατρέπεται άμεσα σε απορροή). Ουσιαστικά, είναι το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας και εκφράζει το ποσοστό που απορρέει άμεσα χωρίς να διεισδύσει στο έδαφος.

K : Η Χωρητικότητα της Δεξαμενής Εδαφικής Υγρασίας που εκφράζει την μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους (mm).

λ : Ρυθμός εκφόρτισης Δεξαμενής Εδαφικής Υγρασίας για παραγωγή υποδερμικής ροής (εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους).

H_1 : Κατώφλι αποθέματος Δεξαμενής Εδαφικής Υγρασίας για παραγωγή υποδερμικής ροής (mm). Επίσης, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά εδάφους.

μ : Ρυθμός εκφόρτισης Δεξαμενής Εδαφικής Υγρασίας για παραγωγή κατείσδυσης. Δηλαδή, ο ρυθμός που το νερό ρέει από την ακόρεστη προς την κορεσμένη ζώνη του εδάφους.

ξ : Ρυθμός εκφόρτισης Δεξαμενής Υπόγειου Νερού για την παραγωγή βασικής ροής που εξαρτάται από τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

H_2 : Κατώφλι αποθέματος Δεξαμενής Υπόγειου Νερού για παραγωγή βασικής ροής (mm).

ϕ : Ρυθμός εκφόρτισης Δεξαμενής Υπόγειου Νερού για παραγωγή υπόγειας διαφυγής.

Οι υδρολογικές διεργασίες της λεκάνης απορροής περιγράφονται από το μοντέλο με την βοήθεια των τριών δεξαμενών που αναφεθηκαν πιο πάνω.

Αρχικά, στην περίπτωση όπου η θερμοκρασία είναι κάτω από 0 ($^{\circ}\text{C}$) η βροχόπτωση θεωρείται ως χιονόπτωση και η εξατμισοδιαπνοή δεν επηρεάζει την εδαφική υγρασία. Σε αντίθετη περίπτωση όπου οι θερμοκρασίες είναι άνω από 0 ($^{\circ}\text{C}$), η εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται από την σχέση:

$$\text{PET} = (R_a / \lambda)(T + K_2) / K_1 \quad (4.8)$$

Όπου:

R_a : Η εξωγήινη ακτινοβολία

K_1 : Παράμετρος κλίμακας της θερμοκρασίας. (Συνήθως, στο μοντέλο $K_1=100^{\circ}\text{C}$)

K_2 : Κάτω όριο της θερμοκρασίας όπου η εξατμισοδιαπνοή δεν είναι 0.

Στην συνέχεια, το μοντέλο εκτιμά την τήξη του χιονιού με τον τύπο:

$$SM = DDF(T - T_F) \quad (4.9)$$

Όπου:

T_F : Η θερμοκρασία αέρα όπου αρχίζει η τήξη του χιονιού.

DDF: Παράγοντας βαθμού ημέρας (mm/d/°C)

Αρχικά από το μοντέλο εκτιμάται η άμεση εξατμισοδιαπνοή από την σχέση:

$$E_{Dx} = \min(\varepsilon P_t E_{Pt}) \quad (4.10)$$

Στην συνέχεια το περίσσειμα βροχόπτωσης, μετά την κάλυψη της άμεσης εξατμισοδιαπνοής, μετατρέπεται κατά ένα ποσοστό σε άμεση απορροή:

$$Q_D = c(P + SM) \exp(SW / K - 1) \quad (4.11)$$

Όπου:

SW: Αρχικό απόθεμα της δεξαμενής Εδαφικής Υγρασίας (mm).

Η παράμετρος κ που εκφράζει το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας δεν θα πρέπει να υπεισέρχεται στην εδαφική δεξαμενή αλλά θα πρέπει να είναι ανεξάρτητη από αυτή. Η άμεση απορροή που προέρχεται από τους αδιαπέρατους σχηματισμούς είναι μια διαδικασία που προηγείται χρονικά της διήθησης στο έδαφος

Στη συνέχεια, η διαθέσιμη εδαφική υγρασία που είναι ίση με το άθροισμα της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας και της περίσσειας της βροχόπτωσης όταν ξεπεράσει την χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας K θα απορρεύσει ως επίγεια ροή Q_S :

$$Q_S = \max(0, (SW - K) / \Delta t + P + SM - Q_D) \quad (4.12)$$

Μετά και την πραγματοποίηση της επίγεια ροής ακολουθεί η πραγματοποίηση της υποδερμικής ροής

$$Q_H = \max[0, \mu(S_{init} - H_1)] \quad (4.13)$$

Η κατείσδυση στον υπόγειο υδροφορέα είναι:

$$PERC = \nu SW \quad (4.14)$$

Η δεξαμενή του υπόγειου νερού με αρχικό απόθεμα Y_{t-1} δέχεται την κατείσδυση PERC από τη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας καθώς και υφίσταται απόληψη νερού ίση με την αντλούμενη ποσότητα από τις θεωρούμενες γεωτρήσεις στο σύνολο του υδροφορέα PUMP_t. Το διαθέσιμο για περαιτέρω διεργασίες απόθεμα στη δεξαμενή Y_{init} είναι:

$$Y_{init} = Y_t - PERC - PUMP_t \quad (4.15)$$

Η βασική ροή δημιουργείται όταν το διαθέσιμο απόθεμα νερού υπερβεί το κατώφλι H_2 :

$$Q_B = \max[0, \xi(Y_{init} - H_2)] \quad (4.16)$$

Η τελική απορροή είναι το άθροισμα των τεσσάρων παραπάνω απορροών:

$$Q = Q_D + Q_S + Q_H + Q_B \quad (4.17)$$

Το πρωταρχικό βήμα για την χρήση του λογισμικού για το Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου είναι η εισαγωγή των ημερήσιων παρατηρήσεων υδρομετεωρολογικών και υδρολογικών δεδομένων. Έτσι, εισάγεται το ύψος της ημερήσιας παρατηρούμενης απορροής (m^3/s), το ύψος της μέσης ημερήσιας βροχόπτωσης (mm), η μέση θερμοκρασία του αέρα της κάθε ημέρας ($^{\circ}C$) και το ύψος της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (mm).

Παράλληλα, ορίζονται οι δώδεκα παράμετροι με την ενεργό τιμή, το άνω και κάτω όριο. Η εφαρμογή του μοντέλου για την κατάρτιση του πλήρους προσομοιωμένου υδρογραφήματος αποτελείται από τρία βασικά βήματα, την βαθμονόμηση, την επαλήθευση και την εφαρμογή του μοντέλου. Η διαδικασία της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης του μοντέλου γίνεται για χρονική περίοδο όπου υπάρχουν μετρημένες παροχές, δηλαδή, για την περίοδο 1964-1968. Η εφαρμογή του μοντέλου, η οποία αποτελεί το τελευταίο βήμα, πραγματοποιείται και για την περίοδο επέκτασης των απορροών.

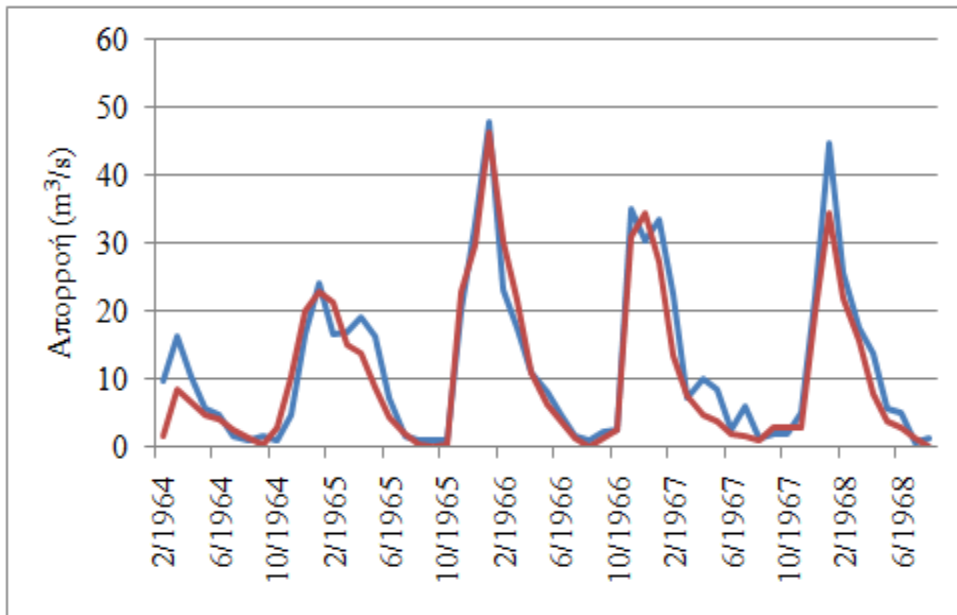
Αρχικά, για την επίλυση του μοντέλου έγινε η βαθμονόμησής του (calibration). Οι παράμετροι των εννοιολογικών υδρολογικών μοντέλων δεν είναι μετρήσιμα μεγέθη αλλά εκτιμώνται έμμεσα, μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας αξιολόγησης εναλλακτικών συνδυασμών που καλείται βαθμονόμηση (calibration). Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου γίνεται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις της λεκάνης με τις παρατηρημένες, και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή. Προφανώς, αυτό προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης της λεκάνης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα.

Κριτήριο για την επιλογή του βέλτιστου μοντέλου, δηλαδή αυτό που αποδίδει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις φυσικές διεργασίες, ήταν η τιμή του συντελεστή συσχέτισης ή όπως αναφέρεται στην φόρμα του μοντέλου η τιμή του κριτηρίου Nash-Shutcliffe Efficiency (NSE), ο οποίος και επιδιωκόταν να είναι όσο το δυνατό πλησιέστερα στη μονάδα που αποτελεί και τη βέλτιστη τιμή. Συντελεστής ίσος με τη μονάδα φανερώνει ότι το επιλεγμένο μοντέλο αναπαριστά ακριβώς τις φυσικές διεργασίες μεταξύ απορροής και βροχόπτωσης.

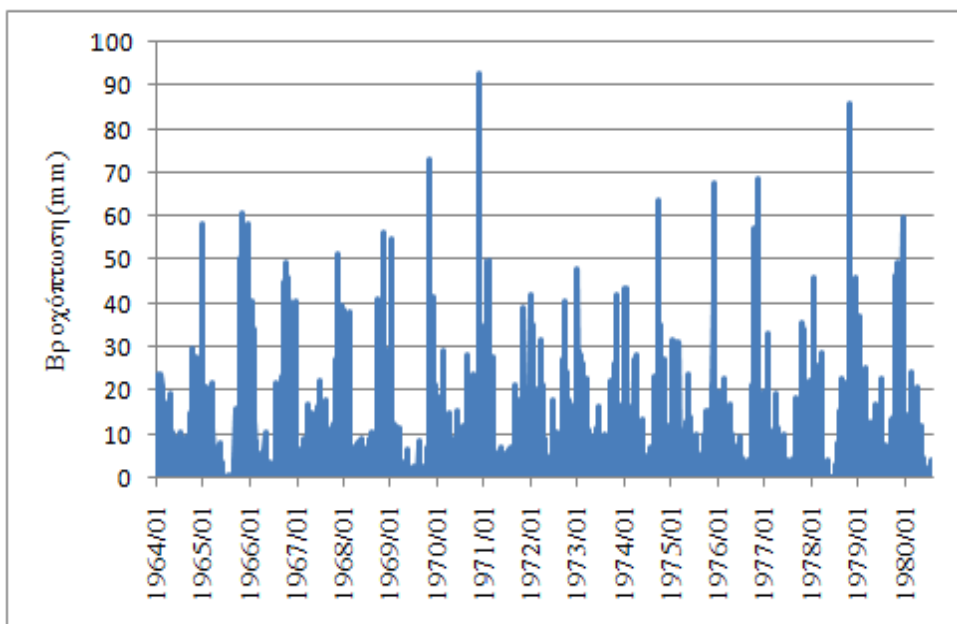
Η περίοδος στην οποία πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου είναι 29/1/1964-30/9/1966. Στη διαδικασία της βαθμονόμησης έγιναν αρκετές δοκιμές ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη τιμή του NSE και το μοντέλο να είναι σε θέση να αναπαριστά τις φυσικές διεργασίες. Η μέγιστη τιμή του κριτηρίου η οποία επιτεύχθηκε είναι 0.82.

Μετά την διαδικασία της βαθμονόμησης, πραγματοποιείται η διαδικασία επαλήθευσης του μοντέλου για την χρονική περίοδο 1/10/1966-31/8/1968. Η μέγιστη τιμή κριτηρίου για την περίοδο της επαλήθευσης είναι 0.75. Τα παρατηρημένα και προσομοιωμένα με τις τιμές των παραμέτρων υδρογραφήματα φαίνονται στο Σχήμα 4.9.

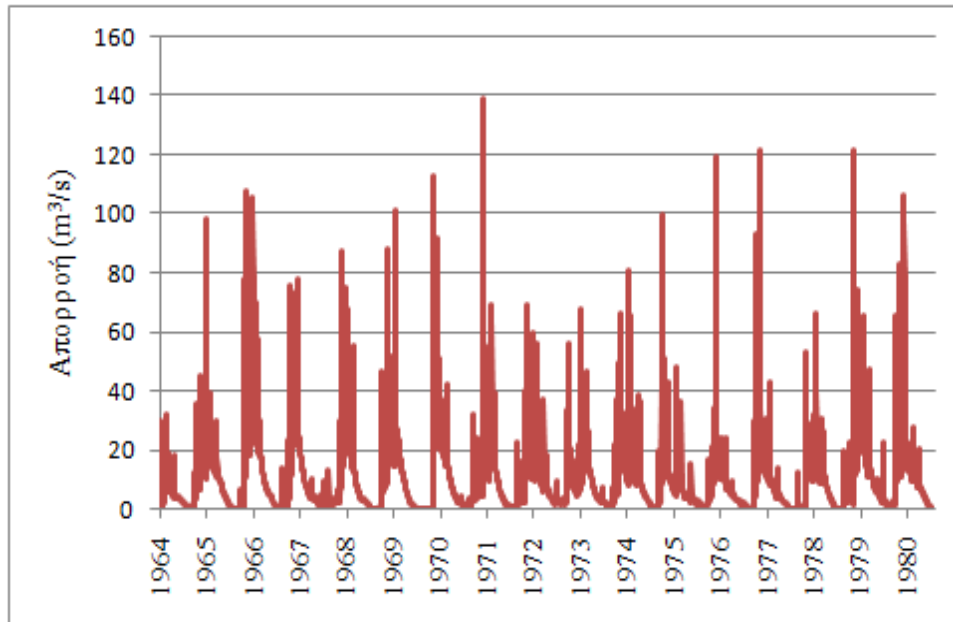
Όπως ήδη έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, η εκτίμηση της οικολογικής παροχής απαιτεί παρατηρήσεις παροχών αρκετών ετών. Τα δεδομένα μετρημένων παροχών για τον Μόρνο καλύπτουν μια πενταετία, χρονικό μήκος που κάνει ανέφικτη την εφαρμογή αρκετών μεθοδολογιών. Για το σκοπό αυτό, έγινε χρονική επέκταση των απορροών της περιοχής μελέτης. Η συγκεκριμένη επέκταση μπορεί να πραγματοποιηθεί από την στιγμή που υφίσταντο μετρημένες ημερήσιες βροχοπτώσεις για τον υπολογισμό της χωρικά μέσης βροχόπτωσης και μετρημένες θερμοκρασίες για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Έτσι, το τελευταίο βήμα υλοποίησης του μοντέλου αφορά την εφαρμογή για όλη την χρονική περίοδο του δείγματος. Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται η μέση βροχόπτωση σε χρονοσειρά για την περίοδο 1964-1980. Η αντίστοιχη υπολογισμένη απορροή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.9: Το υδρογράφημα της μετρημένης (μπλε) και της υπολογισμένης απορροής (κόκκινο)



Σχήμα 4.10: Η μέση βροχόπτωση σε χρονοσειρά για την περίοδο 1964-1980



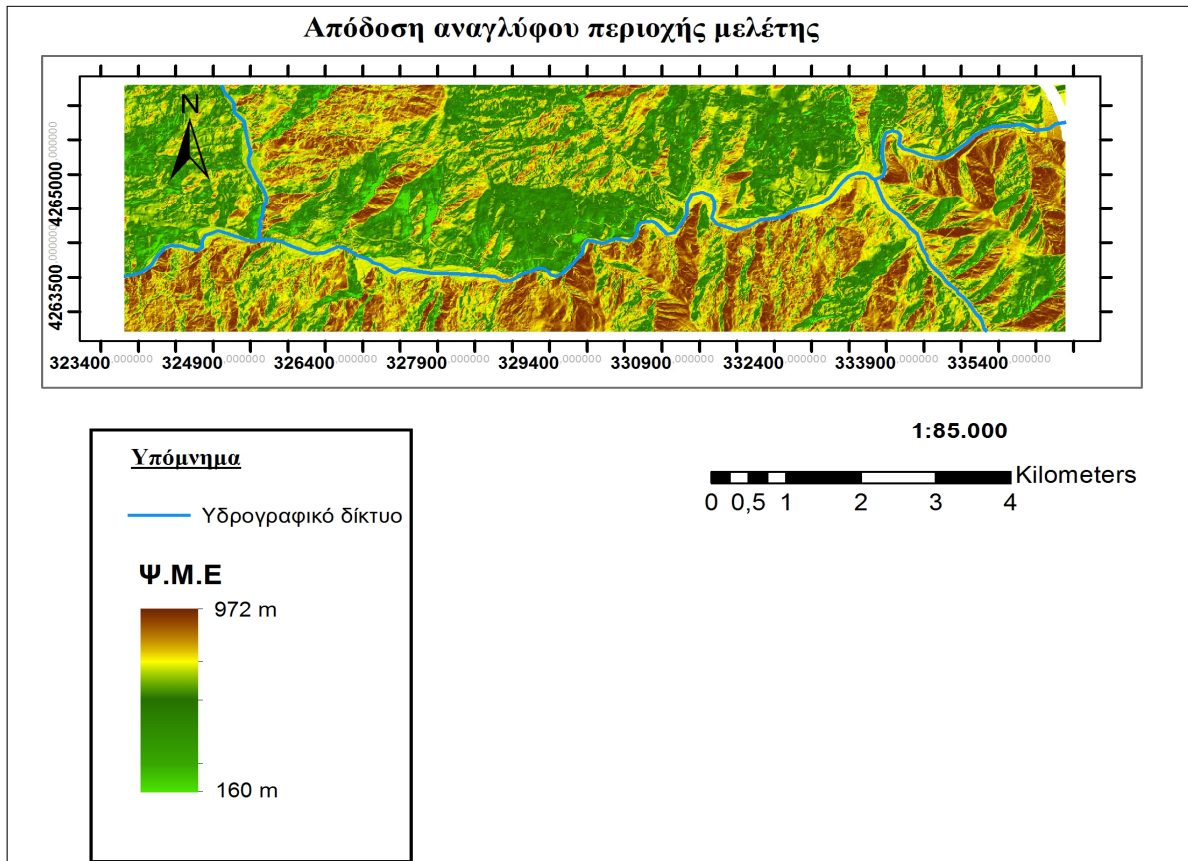
Σχήμα 4.11: Η υπολογισμένη απορροή από το Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου

Πίνακας 4.7: Υπολογισμένες απορροές από το Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου

Μηνιαίες Παροχές στην θέση Γέφυρα Περιβολίου												
έτος	Ιαν	Φεβρ	Μαρτ	Απρ	Μάιος	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοεμ	Δεκ
1964	-	1.55	8.37	6.59	4.78	3.96	2.64	1.24	0.29	2.94	10.25	20.09
1965	22.73	21.42	15.11	13.82	8.79	4.52	1.99	0.19	0.00	0.20	22.96	29.90
1966	46.40	30.46	21.70	11.00	6.28	3.83	1.28	0.06	1.38	2.50	31.06	34.37
1967	27.29	13.46	7.39	4.67	3.8	1.94	1.63	1.07	2.82	2.68	2.84	19.87
1968	34.59	22.06	15.54	7.77	3.67	2.94	1.10	0.07	0.06	4.93	10.32	24.75

4.4 Επεξεργασία δεδομένων για τις υδραυλικές μεθόδους

Από την κατηγορία των υδραυλικών μεθόδων στην διπλωματική εργασία έγινε εφαρμογή της τεχνικής της υγρής περιμέτρου. Για την εφαρμογή της μεθόδου είναι αναγκαία η ύπαρξη τοπογραφικών διατομών ώστε να γίνουν μετρήσεις οι οποίες να συσχετίσουν την παροχή με την υγρή περίμετρο του ποταμού. Όπως ήδη έχει αναφερθεί στην παράγραφο 4.1, για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής με υδραυλικές μεθόδους χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό μοντέλο εδάφους της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. με μέγεθος φατνίου 5x5 m (Σχήμα 4.12).



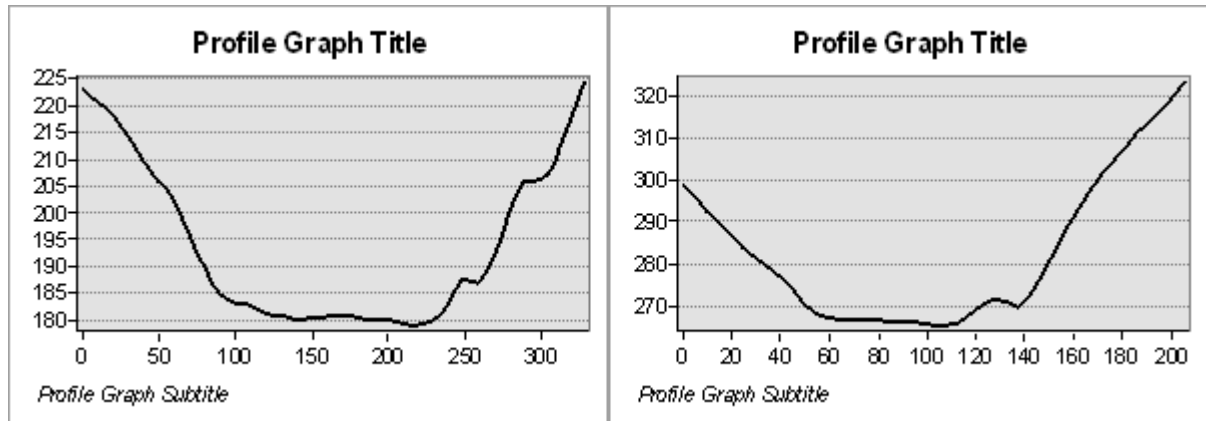
Σχήμα 4.12: Απόδοση ανάγλυφου της περιοχής μελέτης του ποταμού

Το πρώτο βήμα έγινε στο λογισμικό ArcGIS 10.1. Μέσω του ψηφιακού μοντέλου μετρήθηκαν οι διατομές. Το συγκεκριμένο ψηφιακό μοντέλο αφορά την περιοχή του ποταμού Μόρνου κατάντη του φράγματος και περιλαμβάνει μήκος του ποταμού περίπου 16 km. Αποφασίστηκε να μετρηθούν διατομές ανά 800-900 m με αρχή αμέσως κατάντη του φράγματος. Έτσι, τελικά, δόθηκε η δυνατότητα να αναλυθούν συνολικά 18 διατομές. Για την μέτρηση της διατομής στο λογισμικό ακολουθήθηκαν οι εντολές Interpolate line → Profile graph. Το λογισμικό δίνει με αυτόν τον τρόπο την διατομή σχηματικά.

Στο Σχήμα 4.13 φαίνονται δύο διατομές κατάντη του φράγματος. Το εξαγόμενο προϊόν της διατομής από το ArcGIS δεν παρέχει την δυνατότητα της μετρητικής πληροφορίας. Για αυτό το λόγο, έπρεπε να γίνει η κατάλληλη επεξεργασία στις διατομές ώστε να γίνουν εφικτές οι μετρήσεις των εμβαδών και της περιμέτρου στο Autocad. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει την δυνατότητα εξαγωγής των συντεταγμένων των διατομών. Οι διατομές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.13 έχουν κατά τον άξονα X απλά την απόσταση του ανοίγματος της διατομής και κατά τον άξονα Y δίνουν την υψομετρική πληροφορία ενταγμένη στο Κρατικό Σύστημα Υψομέτρων. Έτσι, με την εντολή στο προφίλ της διατομής export → Data → Excel γίνεται η εξαγωγή των συντεταγμένων της εκάστοτε διατομής. Τέλος, γίνεται εισαγωγή των συντεταγμένων σε σχεδιαστικό πρόγραμμα Cad με σκοπό την μέτρηση των διατομών.

Για διευκόλυνση στην σύγκριση μεταξύ των διατομών έγινε αρίθμηση με πρώτη την διατομή η οποία μετρήθηκε πλησιέστερα στον ταμιευτήρα.

Στο Σχήμα 4.14 παρατηρείται η μορφή της διατομής σε περιβάλλον Cad όπου και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της περιμέτρου και του εμβαδού της κάθε διατομής.



Σχήμα 4.13: Δύο διατομές του ποταμού Μόρνου στο ArcGIS



Σχήμα 4.14: Η μορφή της διατομής 1

5 Αποτελέσματα εφαρμογής στον Μόρνο

5.1 Εφαρμογή των υδρολογικών μεθόδων

5.1.1 Μέθοδος Tennant

Στην μέθοδο Tennant (ή Montana) η οικολογική παροχή λαμβάνεται ως ποσοστό της μέσης ετήσιας παροχής. Το ποσοστό που τελικά επιλέγεται ώστε να υπολογισθεί η ελάχιστη παροχή συνδέεται άμεσα με τους οικολογικούς στόχους, δηλαδή τον βαθμό προστασίας του οικοσυστήματος μετά την παρέμβαση.

Για την περίπτωση του ποταμού Μόρνου με την χρονική επέκταση του μοντέλου βροχόπτωσης - απορροής η συνολική περίοδος του δείγματος είναι από 29/1/1964 ως 31/8/1980, δηλαδή στην ουσία 17 συνεχόμενα έτη με ημερήσιο βήμα. Για την εφαρμογή της μεθόδου βρέθηκαν οι μέσες ετήσιες παροχές των παραπάνω ετών.

Πίνακας 5.1: Μέσες ετήσιες παροχές για την περίοδο 1964-1980

Έτος	Μέση Ετήσια παροχή (m ³ /s)	Έτος	Μέση Ετήσια παροχή (m ³ /s)
1964	5.83	1973	9.24
1965	11.68	1974	10.31
1966	15.78	1975	6.23
1967	7.38	1976	8.23
1968	10.65	1977	5.80
1969	10.56	1978	8.30
1970	9.63	1979	12.16
1971	9.17	1980	9.09
1972	8.21		

Η μέση παροχή της συγκεκριμένης περιόδου υπολογίστηκε ίση με 9.31 m³/s. Εφαρμόζοντας την μέθοδο Tennant με βάση τα ποσοστά μεταβολής της ροής ανάλογα με τους εκάστοτε στόχους, η οικολογική ροή ισούται με:

- το 10% της μέσης ετήσιας παροχής, το οποίο θεωρείται ικανό από την μέθοδο για την επιβίωση των ενδαιτημάτων, είναι ίσο με 0.93 m³/s.
- το 30% της μέσης ετήσιας παροχής, το οποίο θεωρείται απαραίτητο για την ικανοποιητική υγεία των ενδαιτημάτων, ισούται με 2.80 m³/s.
- το 60% της μέσης ετήσιας παροχής, για την προστασία παρθένων οικοσυστημάτων, είναι ίσο με 5.60 m³/s.

5.1.2 Μέθοδος ελάχιστης ετήσιας παροχής

Η μέθοδος της ελάχιστης ετήσιας παροχής αποτελεί την πιο απλή εφαρμογή υπολογισμού της οικολογικής παροχής. Σύμφωνα με την μέθοδο, η ελάχιστη παροχή προκύπτει από τον ξηρότερο μήνα του έτους. Για την θέση Περιβολίου ο ξηρότερος μήνας είναι ο Αύγουστος. Η μέση παροχή που προκύπτει για τον Αύγουστο την περίοδο 1964-1980 είναι $0.85 \text{ m}^3/\text{s}$ η οποία αποτελεί και την οικολογική παροχή.

Πίνακας 5.2: Οι μέσες μηνιαίες παροχές για τον μήνα Αύγουστο (m^3/s)

Έτος	Μέση Μηνιαία Παροχή
1964	1.24
1965	0.19
1966	0.06
1967	1.07
1968	0.07
1969	0.05
1970	0.84
1971	0.74
1972	2.56
1973	1.69
1974	0.66
1975	2.03
1976	1.00
1977	0.07
1978	0.39
1979	2.13
1980	0.07

5.1.3 Μέθοδος βασικής παροχής διατήρησης (Basic Maintenance Flow)

Βασική αρχή της μεθόδου είναι ότι οι οργανισμοί που ζουν στο οικοσύστημα μπορούν να δεχθούν χαμηλές τιμές των παροχών για ορισμένη χρονική περίοδο, ανάλογα με τις συνθήκες οι οποίες επικρατούν. Σκοπός της μεθόδου είναι να προσδιορίσει την βασική παροχή η οποία αντιπροσωπεύει το ελάχιστο όριο κάτω του οποίου οι υδρολογικές συνθήκες που καθορίζουν την δυναμική των ενδιαιτημάτων απειλούνται. Επίσης, με σκοπό να ληφθεί υπόψη η εποχιακή διακύμανση της παροχής στο ποταμό υπολογίζεται ο συντελεστής της εποχιακής διακύμανσης για κάθε μήνα ο οποίος ορίζεται ως το κλάσμα μεταξύ της μέσης μηνιαίας παροχής και της ελάχιστης μέσης μηνιαίας του έτους.

Για την εφαρμογή της μεθόδου αξιοποιούνται οι παροχές της περιόδου 1964-1980 από το υδρολογικό μοντέλο για την θέση Περιβολίου. Τα βήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- Υπολογίζεται ο κυλιόμενος μέσος όρος για 100 συνεχόμενες τιμές κάθε χρόνου
- Για τις τιμές που προκύπτουν από τον παραπάνω τύπο δημιουργείται πίνακας με τις 100 στήλες κυλιόμενων μέσων όρων κάθε έτους από όπου εντοπίζονται οι ελάχιστες τιμές και λαμβάνεται η μέση τιμή τους.

- Υπολογίζεται η βασική παροχή που αντιστοιχεί στην τιμή όπου εμφανίζεται το μέγιστο εύρος μεταξύ δύο συνεχόμενων παραπάνω μέσω ελαχίστων τιμών των κυλιόμενων μέσω όρων. Η τιμή με μέγιστο εύρος η οποία εντοπίστηκε ισούται με $1 \text{ m}^3/\text{s}$ και αντιστοιχεί σε βασική παροχή $1.06 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Τέλος, για κάθε μήνα υπολογίζεται η εποχιακή διακύμανση της παροχής η οποία οδηγεί στην τελική παροχή, την παροχή διατήρησης. Η παροχή διατήρησης προκύπτει από την σχέση 2.2.

Η μέση μηνιαία παροχή για τον κάθε μήνα παρουσιάζεται στο Πίνακα 5.3. Η ελάχιστη μέση μηνιαία παροχή του έτους προκύπτει για τον Αύγουστο και είναι ίση με $0.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

Πίνακας 5.3: Η παροχή διατήρησης για κάθε μήνα

Μήνας	Q_{mean} (m^3/s)	Q_{MT} (m^3/s)
Ιανουάριος	21.38	5.32
Φεβρουάριος	19.64	5.09
Μάρτιος	13.46	4.22
Απρίλιος	9.56	3.56
Μάιος	5.39	2.67
Ιούνιος	3.03	2.00
Ιούλιος	1.55	1.43
Αύγουστος	0.85	1.06
Σεπτέμβριος	1.36	1.34
Οκτώβριος	4.38	2.41
Νοέμβριος	13.32	4.20
Δεκέμβριος	21.49	5.33

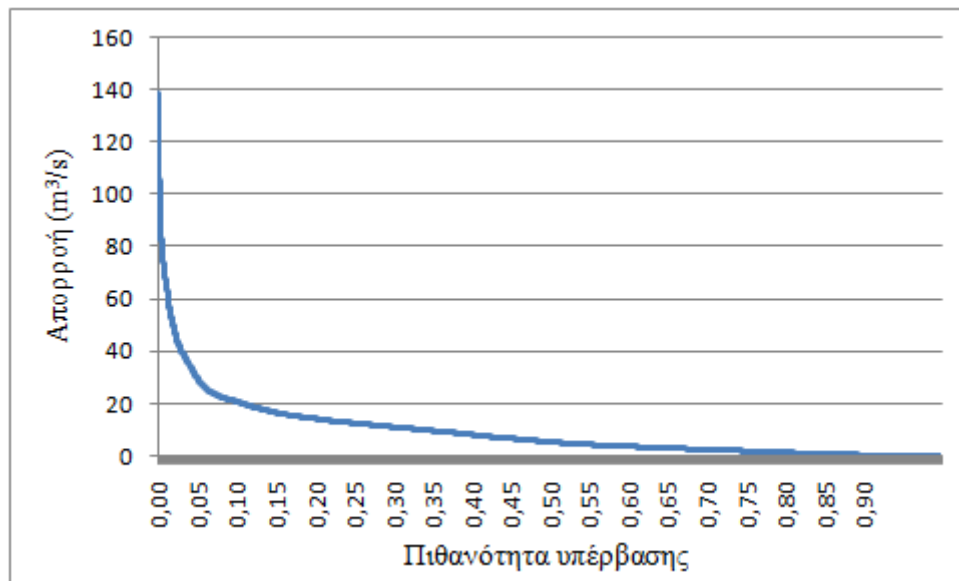
Όπως φανερώνει η εφαρμογή της μεθόδου, το εύρος διακύμανσης της οικολογικής παροχής είναι $5.33-1.06 \text{ m}^3/\text{s}$. Η οικολογική παροχή τον μήνα Αυγούστου ισούται με την βασική παροχή της μεθόδου.

5.1.4 Ανάλυση βάσει της καμπύλης διάρκειας παροχής (Flow Duration Curve)

Αρχικά, για την κατασκευή της καμπύλης διάρκειας παροχής χρησιμοποιούνται οι μέσες ημερήσιες τιμές της απορροής όλου του διαθέσιμου δείγματος, δηλαδή της περιόδου 1964-1980. Οι ημερήσιες απορροές ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά μεγέθους και για την κάθε μία υπολογίζεται η αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης. Η πιθανότητα υπέρβασης υπολογίζεται από την εξίσωση Weibull (εξίσωση 2.1). Έτσι, η απορροή, η οποία αντιστοιχεί στην πιθανότητα υπέρβασης που τίθεται ως όριο, ορίζεται ως οικολογική παροχή. Στον Πίνακα 5.4 φαίνεται η οικολογική παροχή με την αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης. Η πλήρης καμπύλη διάρκειας ημερήσιων παροχών εμφανίζεται στο Σχήμα 5.1.

Πίνακας 5.4: Η οικολογική παροχή με την αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης

Πιθανότητα υπέρβασης	Παροχή (m ³ /s)
60%	4.2
70%	3.0
80%	2.0
90%	0.9



Σχήμα 5.1: Καμπύλη διάρκειας παροχής

5.1.5 Μέθοδος RVA (Range of Variability Approach)

Για την εφαρμογή της μεθόδου εισάγεται η ημερήσια απορροή της περιόδου 1964-1980. Το τελικό αποτέλεσμα είναι το εύρος των παραμέτρων μεταξύ της μέσης τιμής και του άνω και κάτω ορίου τα οποία καθορίζονται από την τυπική απόκλιση. Λόγω των πολλών παραμέτρων και της πολυπλοκότητας της μεθόδου έγινε χρήση κατάλληλου λογισμικού. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) RVA το οποίο αναπτύχθηκε από την Nature Conservancy (The Nature Conservancy, 2005).

Οι μηνιαίες υδρολογικές συνθήκες ενός υγροβιότοπου επηρεάζουν την διαθεσιμότητα των οργανισμών και την υγρασία της παραποτάμιας περιοχής. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται το εύρος των μηνιαίων τιμών που υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου RVA

Πίνακας 5.5: Το εύρος των τιμών για την απαιτούμενη απορροή κάθε μήνα

Μήνας	Μέση μηνιαία παροχή (m ³ /s)	Κάτω όριο απαιτούμενης μέσης παροχής (m ³ /s)	Άνω όριο απαιτούμενης μέσης παροχής (m ³ /s)
Ιανουάριος	21.38	10.41	32.36
Φεβρουάριος	19.64	12.55	26.72
Μάρτιος	13.46	8.62	18.29
Απρίλιος	9.56	6.17	12.96
Μάιος	5.39	3.05	7.73
Ιούνιος	3.03	1.80	4.26
Ιούλιος	1.55	0.67	2.42
Αύγουστος	0.85	0.39	1.29
Σεπτέμβριος	1.36	0.36	2.36
Οκτώβριος	4.38	0.41	8.35
Νοέμβριος	13.32	5.97	20.67
Δεκέμβριος	21.49	12.46	30.52

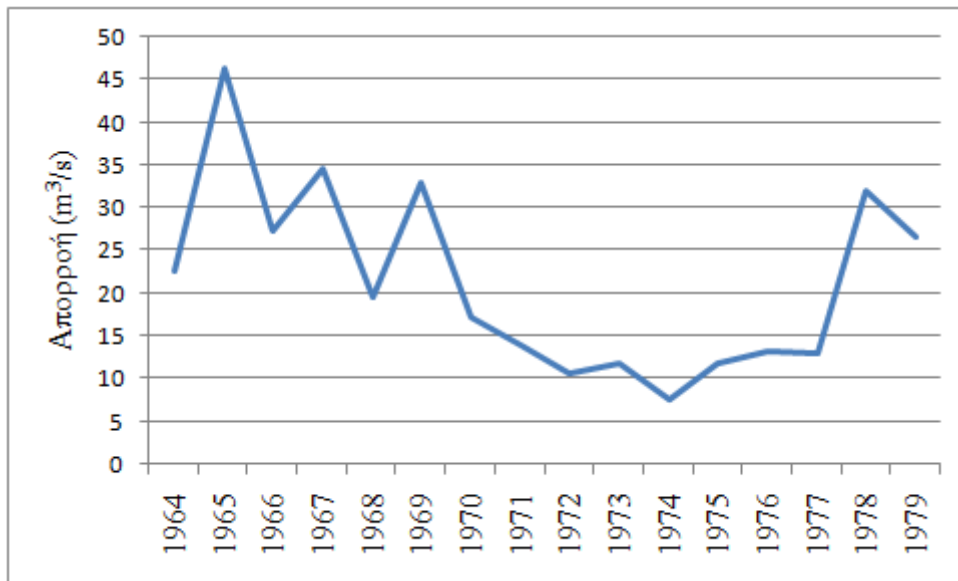
Όπως είναι αναμενόμενο, οι τρεις χειμερινοί μήνες εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές για τις ελάχιστες απαιτούμενες παροχές. Αν και ο μήνας Αύγουστος παρουσιάζει την ελάχιστη μέση μηνιαία παροχή, ο μήνας ο οποίος εμφανίζει το κατώτατο όριο απαιτούμενης παροχής είναι ο Σεπτέμβριος λόγω της μεγαλύτερης τυπικής απόκλισής του. Ο μήνας με την μεγαλύτερη τυπική απόκλιση, άρα και με την μεγαλύτερη ποσοστιαία αυξομείωση στο ελάχιστο και στο ανώτερο όριο είναι ο Οκτώβρης.

Επιπρόσθετα, σημαντικά στοιχεία για το οικοσύστημα αποτελούν και οι ακραίες υδρολογικές συνθήκες. Οι παράμετροι αυτές επιδρούν στις διαδικασίες αποικισμού, στο αναερόβιο στρες για τα φυτά, στις υψηλές συγκεντρώσεις χημικών, και καθορίζουν τις συνθήκες χαμηλής και υψηλής υγρασίας καθώς επίσης και τις χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου. Για αυτό το λόγο, για κάθε μήνα του έτους υπολογίζονται οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές της απορροής για 1, 3, 7, 30 και 90 διαδοχικές μέρες. Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ακραίων υδρολογικών παραμέτρων.

Πίνακας 5.6: Παράμετροι ακραίων υδρολογικών συνθηκών

Παροχή διαδοχικών ημερών	Ελάχιστη μέση τιμή (m ³ /s)	Μέγιστη μέση τιμή (m ³ /s)
1 ημέρας	0.15	94.67
3 ημερών	0.16	70.22
7 ημερών	0.18	47.56
30 ημερών	0.36	29.6
90 ημερών	0.92	23.28

Το λογισμικό υπολογίζει τις παραμέτρους της μεθόδου RVA χωρίζοντας την χρονική περίοδο σε δύο ίσες περιόδους για μεγαλύτερη ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Παράλληλα, πέρα από το εύρος των τιμών που παρέχει ως αποτέλεσμα, δίνει και την γραφική αναπαράσταση, είτε της ελάχιστης ροής, είτε των παραμέτρων της μεθόδου. Οι μέσες μηνιαίες παροχές του Ιανουαρίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Η μηνιαία παροχή για τον Ιανουάριο την περίοδο 1964-1980, όπως υπολογίστηκε με το λογισμικό IHA

5.2 Εφαρμογή των υδραυλικών μεθόδων

5.2.1 Η τεχνική της υγρής περιμέτρου

Για την εφαρμογή της μεθόδου της υγρής περιμέτρου γίνεται η επιλογή καθορισμένων διατομών σε επιλεγμένες θέσεις του ποταμού. Είναι καλό οι διατομές να αφορούν αβαθείς περιοχές του ποταμού, δηλαδή σημεία ήπιων κλίσεων του εδάφους όπου η κίνηση των ψαριών συναντά μεγαλύτερες δυσκολίες.

Αρχικά, κατασκευάζεται η καμπύλη υγρής περιμέτρου-παροχής και η οικολογική παροχή θεωρείται στο σημείο όπου η καμπύλη εμφανίζει ριζική αλλαγή και η οποία στην ουσία αφορά την παροχή και, κατ' επέκταση, την ελάχιστη υγρή περίμετρο. Για την επιλογή της στάθμης δεν χρειάζονται μετρήσεις στάθμης αλλά ανάλογα με το μέγεθος του ποταμού και την γεωμορφολογία επιλέγεται ένα σταθερό βήμα για την στάθμη και έτσι μετράται η περίμετρος και το εμβαδόν της υγρής διατομής για την κάθε στάθμη. Ως ελάχιστη διατομή θεωρείται το σημείο όπου η καμπύλη εμφανίζει την μέγιστη καμπυλότητα. Η καμπύλη υγρής περιμέτρου- παροχής προσομοιάζεται καλύτερα με την λογαριθμική καμπύλη. Η μέγιστη καμπυλότητα της καμπύλης υπολογίζεται από την εξίσωση 2.4.

Η παροχή υπολογίζεται από την μέτρηση της υγρής περιμέτρου και του εμβαδού της εκάστοτε διατομής μέσω της εξίσωσης 2.3 (τύπος Manning).

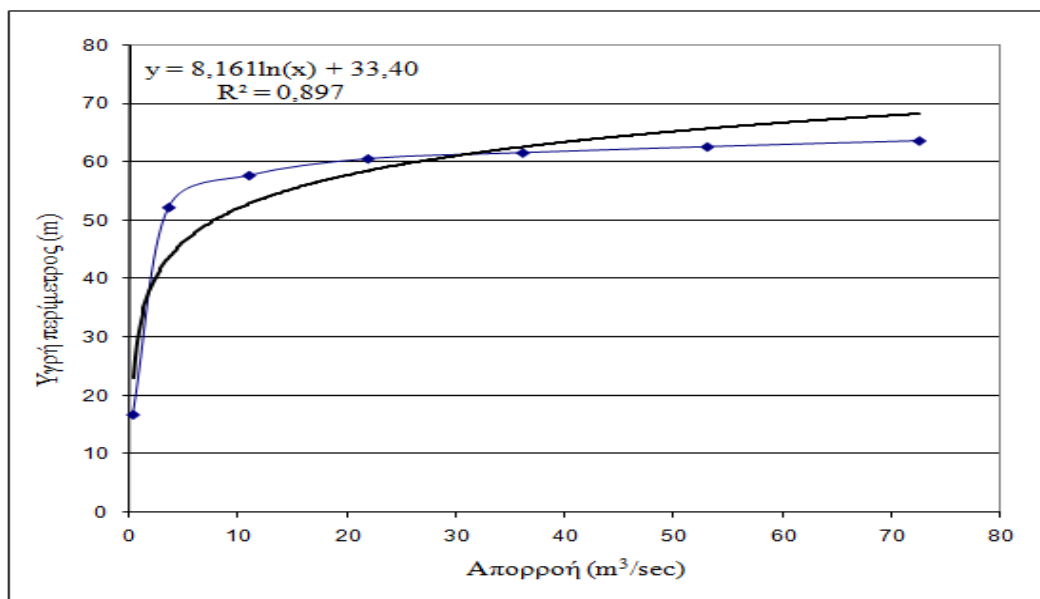
Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας λήφθηκαν 18 διατομές κατάντη του φράγματος, ανά 800 περίπου μέτρα μεταξύ τους. Για την μέτρηση των υδραυλικών ιδιοτήτων των διατομών (περίμετρος, εμβαδόν) επιλέχθηκε βήμα για την στάθμη ίσο με 0.20 m. Έτσι, σε περιβάλλον AutoCAD, με αρχικό βάθος ροής 0.2 m και ίδιο βήμα, κατασκευάζεται η καμπύλη και βρίσκεται η μέγιστη καμπυλότητα η οποία οδηγεί στην ελάχιστη οικολογική παροχή. Πέρα από την χλιομετρική απόσταση, για τις διατομές καταβλήθηκε προσπάθεια, όπου ήταν δυνατό, αυτές να έχουν ήπιο ανάγλυφο, κάτι το οποίο οδηγεί συνήθως σε αβαθείς περιοχές του ποταμού.

Για κάθε διατομή δημιουργήθηκε και ο αντίστοιχος πίνακας υπολογισμού της μέγιστης καμπυλότητας και της καμπύλης μεταξύ της υγρής περιμέτρου και της παροχής. Στον Πίνακα 5.7 δίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για την διατομή 1. Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 1 (σημεία από μετρήσεις και η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη). Στο Σχήμα 5.4 εμφανίζεται η διατομή 1 όπως εισήχθη και μετρήθηκε στο Autocad. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τις υπόλοιπες διατομές. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την διατομή 2 δίνονται στον Πίνακα 5.8 και στα σχήματα 5.4 και 5.5. Οι πίνακες υπολογισμού της ελάχιστης οικολογικής παροχής και οι αντίστοιχες καμπύλες υγρής περιμέτρου-παροχής για την κάθε διατομή παρουσιάζονται στα Παραρτήματα Α και Β αντίστοιχα. Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα για όλες τις διατομές.

Πίνακας 5.7: Υπολογισμός για την διατομή 1 της μέγιστης καμπυλότητας της καμπύλης υγρής περιμέτρου-παροχής

Στάθμη (m)	A (m)	Π (m ²)	Q (m ³ /s)	k
0	0	0	0	-
0.2	0.726	16.626	0.278	0.004
0.4	5.309	52.229	3.557	0.041
0.6	10.867	57.726	10.937	0.035
0.8	16.814	60.588	21.863	0.014
1	22.894	61.616	36.093	0.005
1.2	29.062	62.644	53.047	0.002
1.4	35.316	63.671	72.529	0.001

A = Εμβαδό υγρής διατομής, Π = υγρή περίμετρος, Q = παροχή, k = καμπυλότητα της καμπύλης υγρής περιμέτρου-παροχής



Σχήμα 5.3: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 1 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)

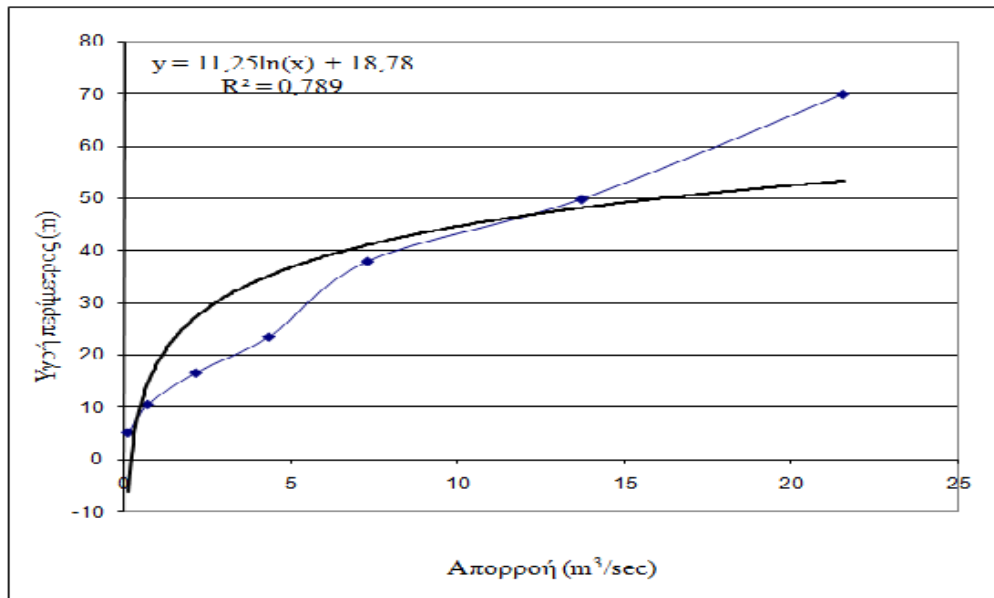


Σχήμα 5.4: Η μέτρηση της υγρής περιμέτρου για την διατομή 1

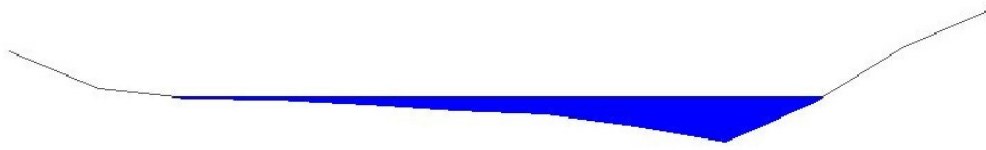
Πίνακας 5.8: Υπολογισμός για την διατομή 2 της μέγιστης καμπυλότητας της καμπύλης υγρής περιμέτρου-παροχής

Στάθμη (m)	A (m)	Π (m ²)	Q (m ³ /s)	k
0	0	0	0	-
0.2	0.264	5.333	0.11004	0.00087
0.4	1.06	10.678	0.69934	0.00549
0.6	2.489	16.721	2.14553	0.01607
0.8	4.359	23.58	4.335	0.02783
1	7.206	37.977	7.2908	0.03404
1.2	11.75	49.878	13.7129	0.02765
1.4	17.645	69.965	21.5405	0.01689

A = Εμβαδό υγρής διατομής, Π = υγρή περίμετρος, Q = παροχή, k = καμπυλότητα της καμπύλης υγρής περιμέτρου-παροχής



Σχήμα 5.4: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 2 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



Σχήμα 5.5: Η μορφή της υγρής διατομής 2

Πίνακας 5.6: Οι ελάχιστες οικολογικές παροχές για τις επιλεγμένες διατομές

α/α	Q (m ³ /s)
1	3.56
2	7.29
3	7.75
4	2.85
5	7.94
6	2.36
7	6.85
8	9.30
9	6.50
10	2.74
11	4.57
12	3.18
13	6.18
14	9.75
15	8.30
16	3.61
17	6.23
18	8.31

Όπως προκύπτει και από τον Πίνακα 5.6 η μέγιστη τιμή για την οικολογική παροχή εντοπίζεται στην διατομή 6 με τιμή 9.75 m³/s και η ελάχιστη τιμή ισούται με 2.36 m³/s στην διατομή 10. Η μέση τιμή των ελάχιστων οικολογικών παροχών που προέκυψαν με την μέθοδο της τεχνικής της υγρής περιμέτρου είναι 5.95 m³/s.

5.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Με βάση το σύνολο των πρωτογενών δεδομένων τα οποία συλλέχθηκαν για την λεκάνη απορροής του Μόρνου, έγινε εφικτή η εφαρμογή έξι διαφορετικών μεθόδων για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής του φράγματος του Μόρνου. Από τις έξι μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν, οι πέντε βασίζονται σε υδρολογικούς δείκτες και η μία σε υδραυλικούς. Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται συνοπτικά τα τελικά αποτελέσματα των μεθόδων.

Πίνακας 5.7: Τα αποτελέσματα των μεθόδων για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής

Προσέγγιση	Μέθοδος	Οικολογική παροχή (m ³ /s)	Καθεστώς ροής
	Tennant	0.93-5.60	Μόνιμη ροή
	Ελάχιστη ετήσια παροχή	0.85	Μόνιμη ροή
Υδρολογική	Βασική παροχή διατήρησης	1.06-5.33	Μεταβαλλόμενη ανά μήνα
	Καμπύλη διάρκειας παροχής	0.9-4.2	Μόνιμη ροή
	RVA	0.36-12.55	Μεταβαλλόμενη ανά μήνα
Υδραυλική	Τεχνική υγρής περιμέτρου	2.36-9.75	Μόνιμη ροή

Προφανώς, οι τιμές του εύρους το οποίο παρατηρείται για την οικολογική παροχή σε κάθε εφαρμογή δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες. Οι μέθοδοι Tennant, ελάχιστης ετήσιας παροχής, καμπύλης διάρκειας παροχής και η τεχνική της υγρής περιμέτρου υπολογίζουν την οικολογική ροή ως μόνιμη ροή, χωρίς μεταβολές εντός του έτους. Οι μέθοδοι της βασικής παροχής διατήρησης και η RVA συνυπολογίζουν την εποχιακή διακύμανση της φυσικής ροής και προτείνουν οικολογική ροή μεταβαλλόμενη ανά μήνα.

6 Αξιολόγηση - Συμπεράσματα

Από τις εφαρμογές των μεθόδων για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής κατάντη του φράγματος του Μόρνου προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα και προτάσεις για την προστασία του οικοσυστήματος.

- Η μέθοδος Tennant έχει τις ρίζες της εφαρμογής της στις Η.ΠΑ. Εκεί, οι υδρομετεωρολογικές συνθήκες παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη διαφορά σε σχέση με αυτές της Ελλάδας. Για το λόγο αυτό, δεν θα ήταν δόκιμη η αυτούσια εφαρμογή της μεθόδου. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει εφαρμοστεί, με διαφοροποίηση του ποσοστού της μέσης ετήσιας παροχής, και σε μεσογειακές χώρες οι οποίες έχουν παρόμοιες συνθήκες με την Ελλάδα. Έτσι, στην Ισπανία επικράτησε η εφαρμογή του 10-20% της μέσης ετήσιας παροχής για τον ορισμό της ελάχιστης οικολογικής παροχής. Το συγκεκριμένο ποσοστό αντιστοιχεί, για την περίπτωση του Μόρνου, σε παροχή 0.93-1.86 m³/s.
- Η μέθοδος της ελάχιστης ετήσιας παροχής βασίζεται στον ξηρότερο μήνα του έτους για να προσεγγίσει την οικολογική παροχή. Ο ξηρότερος μήνας για την περίοδο μελέτης είναι ο Αύγουστος με μέση μηνιαία παροχή 0.85 m³/s. Ο υπολογισμός της οικολογικής παροχής με την μέθοδο της ελάχιστης ετήσιας παροχής προσεγγίζει το κάτω όριο της αντίστοιχής με την μέθοδο Tennant.
- Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους εκτίμησης της ελάχιστης παροχής είναι η μέθοδος που βασίζεται στην καμπύλη διάρκειας παροχής. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις σε διάφορες χώρες παγκοσμίως. Η επιλογή της πιθανότητας υπέρβασης βάσει της οποίας υπολογίζεται και η παροχή συσχετίζεται με το μέγεθος, τον τύπο του ποταμού και τους οικολογικούς στόχους. Στην παγκόσμια βιβλιογραφία το πιο συνηθισμένο όριο είναι 90%, αλλά υπάρχουν και μελέτες που τελικά χρησιμοποίησαν είτε το 99.7% είτε χαμηλότερα όρια όπως 80%. Ο Μόρνος είναι ένας σχετικά μικρός ποταμός, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει και στην αποδοχή πιο συντηρητικών επιλογών όπως της παροχής με πιθανότητα υπέρβασης 80%, η οποία ισούται με 2.0 m³/s.
- Γενικά, στις περιπτώσεις που καθορίζεται μία τιμή οικολογικής παροχής είναι δύσκολο να επιτευχθούν ορισμένα υδρολογικά χαρακτηριστικά (εποχικότητα, πλημμύρες κλπ) τα οποία θεωρούνται σημαντικά για την υγεία και την εξέλιξη των οικοσυστημάτων. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη πιο περίπλοκων εργαλείων για τον καθορισμό κανόνων σχετικά με την οικολογική παροχή. Τα εργαλεία αυτά εφαρμόστηκαν σε ευαίσθητα ποτάμια συστήματα ή συστήματα με ιδιαίτερα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά τα οποία έχρηζαν προστασίας. Τέτοιες προσεγγίσεις είναι η μέθοδος βασικής παροχής διατήρησης και η RVA, οι οποίες εφαρμόστηκαν και στην παρούσα μελέτη. Η μέθοδος βασικής παροχής διατήρησης εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Ισπανία, μία χώρα με παρόμοια υδρομετεωρολογικά χαρακτηριστικά. Η μέθοδος, πέρα από ένα ελάχιστο όριο παροχής που εκτιμά, εισάγει και την εποχιακή διακύμανση, υπολογίζοντας τελικά την απαιτούμενη παροχή κάθε μήνα ξεχωριστά. Η εφαρμογή της μεθόδου συνυπολογίζοντας και την διεθνή πείρα χαρακτηρίζεται ως εύκολη και δίνει άμεσα την δυνατότητα ελέγχου της τήρησής των ορίων που θέτει. Η ελάχιστη παροχή

αντιστοιχεί στον Αύγουστο με τιμή $1.06 \text{ m}^3/\text{s}$ και η μέγιστη στον Δεκέμβρη που ισούται με $5.33 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Τελευταία και πιο περίπλοκη από τις υδρολογικές μεθόδους που εφαρμόστηκαν είναι η μέθοδος RVA. Στην συγκεκριμένη μέθοδο συμμετέχουν 32 υδρολογικές παράμετροι και προσδιορίζει χρονικά μεταβαλλόμενους στόχους οικολογικής ροής. Έτσι, προτείνεται ένα εύρος μηνιαίων τιμών παροχής που συμβαδίζει με την φυσική διακύμανση της ροής. Η μέγιστη οικολογική παροχή η οποία υπολογίστηκε αφορά τον Φεβρουάριο με τιμή παροχής $12.55 \text{ m}^3/\text{s}$. Η ελάχιστη οικολογική παροχή αντιστοιχεί στον Αύγουστο με παροχή $0.36 \text{ m}^3/\text{s}$. Όπως αποδεικνύει και το μεγάλο εύρος μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης οικολογικής παροχής, η μέθοδος RVA εισάγει έντονη πολυπλοκότητα στην λειτουργία των ταμιευτήρων και είναι δύσκολα εφαρμόσιμη. Για την εφαρμογή της μεθόδου στη λειτουργία του ταμιευτήρα πρέπει να καταρτιστεί ένα περίπλοκο σύστημα κανόνων λειτουργίας του ταμιευτήρα που αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τις απολήψιμες από τον ταμιευτήρα ποσότητες για ύδρευση της Αθήνας.
- Εκτός από τις υδρολογικές μεθόδους, για την εκτίμηση της οικολογικής παροχής έγινε και εφαρμογή της τεχνικής της υγρής περιμέτρου που εντάσσεται στις υδραυλικές μεθόδους. Όπως όλες οι υδραυλικές μέθοδοι, έτσι και η μέθοδος αυτή συσχετίζει τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του ποταμού με την ροή. Για την εφαρμογή της, μετρήθηκαν η υγρή περίμετρος και το εμβαδόν από 18 διατομές του ποταμού. Το εύρος των υπολογισμένων οικολογικών παροχών για τις 18 διατομές είναι $2.36\text{-}9.75 \text{ m}^3/\text{s}$ με μέση τιμή $5.95 \text{ m}^3/\text{s}$ και τυπική απόκλιση $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι ανάλογα εκείνων των απλοποιημένων υδρολογικών μεθόδων παρά το γεγονός ότι αποτελεί προσέγγιση που δεν χρησιμοποιεί ως εισερχόμενα δεδομένα υδρολογικές μετρήσεις.

Αναφορές

Στην ελληνική γλώσσα

- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Ναλμπάντης, Ι., *Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.
- Ναλμπάντης, Ι., Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου ημερήσιας χρονικής βάσης, *Εσωτερική Έκθεση*, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2014.
- Τσακίρης Γ., *Τεχνική υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1995.

Ξενόγλωσσες

- Alcázar, J., Palau, A., and Vega-Garcia, C., A neural net model for environmental flow estimation at the Ebro River Basin, Spain. *Journal of Hydrology*, 349 (1–2), 44–55, 2008
- Acreman, M., Dunbar M.J., Defining environmental river flow requirements-a review, *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(5), 861-876, 2004.
- Acreman, M., Dunbar, M., Hannaford, J., Mountford, O., Wood, P., Holmes, N., Cowx, J., Noble, R., Extence, C., Aldrick J., King, J., Black A., and Crookall D., Developing environmental standards for abstractions from UK rivers to implement the EU Water Framework Directive, *Hydrological Sciences Journal*, 53(6), 1105-1120, 2008.
- Arthington, A. H., Zalucki J. M., Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Methods, Land and water resources research and development corporation, *LWRRDC Occasional Paper 27/98*, 1998.
- Cemagref, *Estimating instream habitat quality changes associated with river managment*, 2002.
- Evans J. W., Russel H. E., *A Recommended Method to Protect Instream Flows in Georgia*, Sport fish restoration, 1995.
- Fennesy, N., Vogel R.M., Regional flow-duration curves for ungauged sites in Massachusetts, ASCE, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116(4), 530-549, 1990
- IUCN, *Assessment and Provision of Environmental Flows in Mediterranean Watercourses - The Rhone River: Hydromorphological and Ecological rehabilitation of a heavily man-used hydrosystem* – France, 2004.
- Jowett, I. G., Instream flow methods: A comparison of approaches, *Regulated Rivers: Research and management*, 13, 115–127, 1997.
- Morrison M. A., Bonta J.V., Development of Duration-Curve Based Methods for Quantifying Variability and Change in Watershed Hydrology and Water Quality, *EPA/600/R-08/065*, National risk management research laboratory, 2008.

- Palau, A., and J. Alcázar. The basic flow method for incorporating flow variability in environmental flows." *River Research and Applications* 28.1, 93-102, 2012.
- Pavlikakis, G. E., Tsihrintzis V. A., Ecosystem management: a review of a new concept and methodology, *Water Resources Management*, 14 (4), 257-283, 2000.
- Richter, B. D., Baumgartner J. V., Powell J., and Braun D. P., A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems, *Conservation Biology*, 10, 1163-1174, 1996.
- Smakhtin, V.U., Low flow hydrology: a review, *Journal of Hydrology*, 240, 147-186, 2001.
- Smakhtin, V. U., Eriyagama N., Developing a software package for global desktop assessment of environmental flows, *Environmental modelling and software*, 23, 1396-1406, 2008.
- Stewardson, M. J., Gippel C. J., Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows, *Regulated Rivers: Research and Management*, 0886-9375/98/010053,14, 53-67, 1998.
- Stewardson, M. J., Gippel C.J., Incorporating flow variability into environmental flow regimes using the flow events method, *River Research and Applications*, Wiley Interscience, DOI: 10.1002/rra.732, 19, 459-472, 2003.
- Symphorian G. R., Madamombe E., van der Zaag P., Dam operation for environmental water release; the case of Osborne dam, Save catchment, Zimbabwe, *Physics and Chemistry of the Earth* 28 985–993, 2003.
- Tharme. R. E., A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers, *River Research and Applications*, Wiley online library (wileyonlinelibrary.com), DOI:10.1002/rra.736, 19, 397-441, 2003.
- The Nature Conservancy, *Indicators of Hydrologic Alteration - Version 7 - User's Manual*, 2005.
- Vogel, R., Sieber J., Archfield S., Smith M., Apse C., Huber-Lee A., Relations among storage, yield and instream flow, *Water Resources Research*, 1-41, June 2, 2006.

Διαδικτυακές πηγές

Δημόσια ανοικτά δεδομένα, <http://www.geodata.gov.gr>

<http://www.itia.ntua.gr/>

<http://www.eydap.gr/>

Παράρτημα Α: Πίνακες

Πίνακας Α.1: Οι μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις των σταθμών

Μηνιαίες βροχοπτώσεις για το έτος 1964												
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Αθ.Διάκος	17.33	3.24	5.23	2.11	2.38	3.44	3.44	0.42	1.50	3.64	4.76	10.92
Δαφνός	5.67	1.69	7.35	3.87	2.68	3.63	3.63	1.06	0.28	2.88	5.87	8.60
Καρούτες	0.00	3.63	3.89	2.77	2.28	2.46	2.46	0.85	1.18	2.29	5.92	4.36
Κονιακός	11.83	2.76	4.83	1.96	2.55	3.24	3.24	0.66	0.85	2.82	4.50	9.97
Λιδωρίκι	10.17	1.01	3.10	1.93	1.80	2.20	2.20	0.19	1.75	1.76	4.07	4.46
Μαλανδρίνο	10.67	1.87	5.81	2.90	2.82	2.80	2.80	1.23	0.50	3.58	5.70	10.45
Πενταγιοί	10.17	2.17	3.28	0.76	1.76	3.01	3.01	0.68	0.79	2.94	3.06	6.37
Συκέα	6.70	2.40	3.07	2.52	2.14	2.00	2.00	0.88	1.32	1.86	5.78	5.09
Μηνιαίες βροχοπτώσεις για το έτος 1965												
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Αθ.Διάκος	6.89	5.17	3.00	4.34	3.05	1.02	0.27	0.00	0.00	1.36	19.55	10.10
Δαφνός	7.88	8.45	2.94	5.52	0.21	2.47	0.00	0.00	0.00	0.88	14.48	8.99
Καρούτες	7.27	10.56	4.97	3.93	2.01	1.37	0.00	0.20	0.00	1.20	11.07	8.18
Κονιακός	6.28	8.96	2.49	4.11	2.02	1.08	0.10	0.00	0.00	0.97	15.61	9.29
Λιδωρίκι	5.31	5.43	2.14	2.31	1.79	0.23	0.05	0.00	0.00	0.77	6.97	5.76
Μαλανδρίνο	9.13	12.71	2.55	6.57	2.00	2.10	0.01	0.35	0.00	0.99	16.67	6.07
Πενταγιοί	7.38	6.26	3.15	3.34	1.80	1.52	0.00	0.00	0.00	1.09	12.22	7.51
Συκέα	4.20	5.60	2.02	2.96	1.53	0.52	0.22	0.01	0.00	0.92	9.68	5.99
Μηνιαίες βροχοπτώσεις για το έτος 1966												
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Αθ.Διάκος	19.92	3.77	4.67	1.29	1.75	0.86	0.86	0.60	0.45	3.57	18.36	11.25
Δαφνός	17.85	4.08	5.52	1.01	1.65	1.22	1.22	0.28	3.39	1.03	0.46	2.12
Καρούτες	11.11	3.56	4.65	1.93	1.84	1.53	1.53	0.45	4.70	2.11	1.78	3.39
Κονιακός	18.06	3.13	4.53	0.70	1.15	1.45	1.45	0.23	7.23	1.67	1.94	4.05
Λιδωρίκι	11.39	2.86	2.83	0.49	1.75	0.91	0.91	0.13	3.49	0.37	0.71	1.94
Μαλανδρίνο	21.83	4.15	6.32	1.12	1.87	1.59	1.59	0.32	1.50	4.38	17.24	9.80
Πενταγιοί	12.93	2.76	4.31	1.31	1.32	1.15	1.15	0.02	6.65	1.58	1.74	2.36
Συκέα	10.69	3.59	3.08	0.46	0.98	1.28	1.28	0.06	2.54	1.80	6.77	5.91
Μηνιαίες βροχοπτώσεις για το έτος 1967												
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Αθ.Διάκος	8.02	0.89	1.50	3.64	1.55	0.05	0.05	1.89	1.67	1.29	1.41	12.58
Δαφνός	2.35	0.02	2.77	1.28	1.80	1.00	1.00	10.50	10.60	3.15	3.02	0.56
Καρούτες	1.32	0.93	2.29	0.50	3.71	2.69	2.69	7.29	7.43	4.03	2.84	0.45
Κονιακός	8.13	0.41	0.84	3.23	2.05	0.00	0.00	0.08	1.45	3.31	0.96	13.05

Πίνακα Α.1 (συνέχεια): Οι μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις των σταθμών

Μηνιαίες βροχοπτώσεις για το έτος 1967												
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Λιδωρίκι	0.84	0.47	1.74	0.02	1.93	2.53	2.53	10.20	8.90	3.83	2.72	0.31
Μαλανδρίνο	9.73	1.99	0.82	2.90	1.95	0.09	0.09	0.51	2.40	0.73	1.17	15.46
Πενταγιοί	0.98	0.00	2.37	0.21	2.25	2.79	2.79	7.70	12.19	3.02	2.91	0.34
Συκέα	4.63	0.31	0.84	2.04	1.03	0.41	0.41	0.13	2.59	1.99	1.31	8.34
Μηνιαίες βροχοπτώσεις για το έτος 1968												
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Αθ.Διάκος	11.45	1.69	4.64	0.75	1.45	2.99	0.00	0.94	-	-	-	-
Δαφνός	2.31	3.72	0.00	0.89	0.56	5.57	5.06	9.80	-	-	-	-
Καρούτες	2.83	2.31	0.00	1.16	0.59	4.28	4.26	15.52	-	-	-	-
Κονιακός	14.26	2.77	2.55	0.72	1.73	2.80	0.00	0.27	-	-	-	-
Λιδωρίκι	1.02	1.63	0.21	1.02	0.00	2.66	2.99	7.76	-	-	-	-
Μαλανδρίνο	17.36	5.36	3.86	0.60	1.10	3.67	0.00	0.59	-	-	-	-
Πενταγιοί	1.85	2.73	0.00	0.70	0.55	4.92	5.05	11.31	-	-	-	-
Συκέα	10.11	2.44	2.08	0.32	1.81	1.77	0.03	0.00	-	-	-	-

Πίνακας Α.2: Στοιχεία υπολογισμού της καμπυλότητας για την τεχνική της υγρής περιμέτρου

Διατομή 2					Διατομή 3				
Στάθμη (m)	A (m ²)	Π (m)	Q (m ³ /s)	\underline{k}	Στάθμη (m)	A (m ²)	Π (m)	Q (m ³ /s)	\underline{k}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.264	5.333	0.11004	0.0009	0.2	1.212	21.003	0.559	0.004
0.4	1.06	10.68	0.69934	0.0055	0.4	4.086	34.924	3.0046	0.0196
0.6	2.489	16.72	2.14553	0.0161	0.6	8.078	46.137	7.7506	0.0325
0.8	4.359	23.58	4.335	0.0278	0.8	13.147	56.175	15.277	0.0251
1	7.206	37.98	7.2908	0.034	1	19.29	64.695	26.3	0.013
1.2	11.75	49.88	13.7129	0.0276	1.2	26.492	72.527	41.298	0.0061
1.4	17.645	69.97	21.5405	0.0169	1.4	31.124	78.912	52.133	0.0012
Διατομή 4					Διατομή 5				
Στάθμη (m)	A (m ²)	Π (m)	Q (m ³ /s)	\underline{k}	Στάθμη (m)	A (m ²)	Π (m)	Q (m ³ /s)	\underline{k}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.268	5.404	0.11184	0.0002	0.2	1.112	20.791	0.4878	0.0026
0.4	1.073	10.81	0.7080	0.0011	0.4	4.097	33.487	3.1029	0.0153
0.6	2.574	21.56	2.8543	0.0185	0.6	7.855	41.453	7.9404	0.0274
0.8	25.223	129.8	25.9198	0.0139	0.8	12.623	55.662	14.366	0.0252
1	38.351	137.6	50.0112	0.0071	1	19.161	72.194	24.193	0.0154
1.2	45.568	146	64.0452	0.0049	1.2	26.705	81.033	38.897	0.0076
1.4	-	-	-	-	1.4	-	-	-	-

Πίνακας Α.2 (συνέχεια): Στοιχεία υπολογισμού της καμπυλότητας για την τεχνική της υγρής περιμέτρου

Διατομή 6					Διατομή 7				
Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	k	Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	k
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.370	6.170	0.1289	0.00729	0.2	0.449	9.036	0.18762	0.00293
0.4	1.218	12.285	0.803	0.04327	0.4	1.757	16.127	1.2326	0.01859
0.6	2.744	18.431	2.368	0.88942	0.6	3.630	21.816	3.36775	0.04120
0.8	4.797	21.66	5.374	0.71143	0.8	6.122	27.651	6.85804	0.04689
1	6.568	23.277	8.635	0.40935	1	9.186	35.132	11.4845	0.03351
1.2	9.723	26.943	11.028	0.3789	1.2	13.158	43.078	18.2277	0.01849
1.4	-	-	-	-	1.4	17.800	50.000	27.2812	0.00950

Διατομή 8					Διατομή 9				
Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	k	Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	k
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	1.992	25.918	1.11002	0.0046	0.2	0.37	7.538	0.15336	0.00048
0.4	4.933	33.117	4.25419	0.0158	0.4	1.521	15.276	1.00548	0.00316
0.6	8.587	40.766	9.30821	0.0244	0.6	3.422	22.113	3.02638	0.00916
0.8	13.124	53.558	15.72	0.0226	0.8	5.851	26.705	6.50934	0.01702
1	19.402	70.484	25.0941	0.0152	1	8.742	31.294	11.4171	0.02149
1.2	26.705	81.033	38.8967	0.0082	1.2	28.895	105.768	37.1859	0.00945
1.4	-	-	-	-	1.4	39.476	107.755	61.6581	0.00415

Διατομή 10					Διατομή 11				
Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	k	Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	k
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.166	3.377	0.06887	0.0069	0.2	0.831	13.306	0.40379	0.0115
0.4	0.633	6.750	0.40223	0.0393	0.4	2.407	18.363	1.9078	0.0471
0.6	1.493	10.134	1.27823	0.1019	0.6	4.487	23.429	4.56768	0.0648
0.8	2.65	13.501	2.74178	0.1183	0.8	7.067	28.488	8.53374	0.0451
1	4.045	15.089	5.14109	0.0739	1	10.092	31.948	14.2941	0.0228
1.2	5.597	16.686	8.24782	0.0378	1.2	13.382	35.155	21.4368	0.0115
1.4	7.289	18.275	12.0417	0.0197	1.4	17.062	38.394	30.2721	0.0061

Διατομή 12					Διατομή 13				
Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	k	Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	k
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.392	8.012	0.16213	0.0038	0.2	3.016	43.86	1.5616	0.0035
0.4	1.624	16.262	1.07568	0.02426	0.4	8.463	63.01	6.81679	0.0181
0.6	3.55	22.513	3.17877	0.05423	0.6	15.62	79.91	16.117	0.0131
0.8	6.108	27.632	6.83512	0.05285	0.8	24.809	96.93	30.5835	0.0126
1	9.12	32.661	11.9074	0.03104	1	35.264	120.8	47.4018	0.0072
1.2	12.501	37.407	18.3766	0.01617	1.2	44.534	150.4	60.4443	0.0049
1.4	16.502	42.026	26.982	0.00823	1.4	-	-	-	-

Πίνακας Α.2 (συνέχεια): Στοιχεία υπολογισμού της καμπυλότητας για την τεχνική της υγρής περιμέτρου

Διατομή 14					Διατομή 15				
Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	\underline{k}	Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	\underline{k}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	2.173	27.663	1.2284	0.0043	0.2	1.72	22.14	0.96524	0.0009
0.4	5.605	40.898	4.5751	0.0146	0.4	4.499	33.79	3.60309	0.0034
0.6	9.706	51.655	9.7571	0.0224	0.6	8.463	47.09	8.26098	0.0120
0.8	15.843	62.133	19.482	0.0192	0.8	20.756	119.5	19.8065	0.0118
1	22.622	75.373	30.977	0.0119	1	33.337	132.1	40.7112	0.0094
1.2	30.502	83.542	47.535	0.0062	1.2	50.658	150.4	74.8401	0.0045
1.4	38.641	93.237	65.472	0.0036	1.4	-	-	-	-

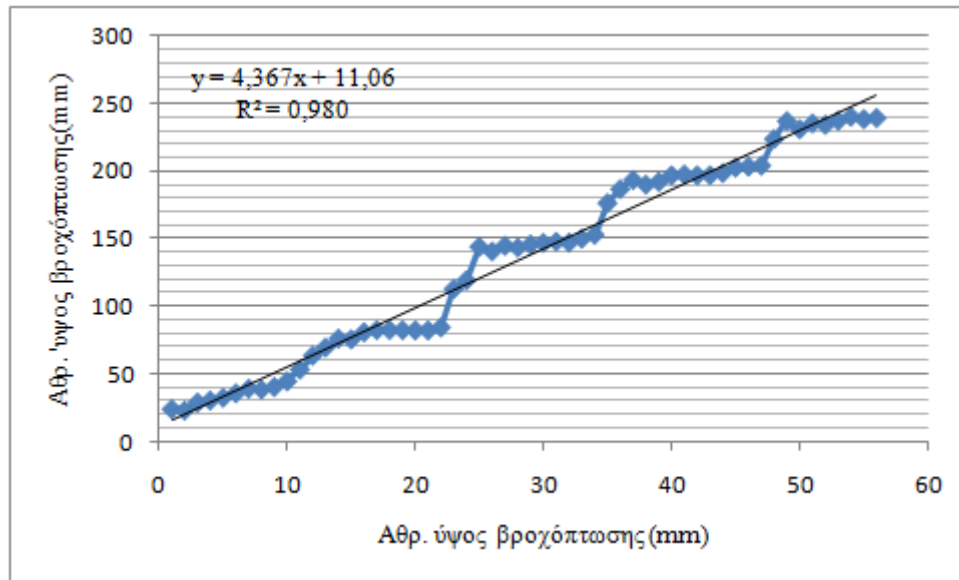
Διατομή 16					Διατομή 17				
Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	\underline{k}	Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	\underline{k}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.211	4.291	0.0876	0.0055	0.2	2.627	44.66	1.22694	0.0071
0.4	0.857	8.612	0.5663	0.0345	0.4	7.757	57.99	6.23131	0.0268
0.6	1.91	12.813	1.648	0.0817	0.6	14.159	69.45	15.0205	0.0249
0.8	3.307	15.526	3.6112	0.0924	0.8	21.559	79.69	27.5659	0.0127
1	4.997	18.248	6.4408	0.0591	1	30.083	89.47	44.4003	0.0059
1.2	6.905	20.971	10.051	0.0317	1.2	39.394	96.55	66.0647	0.0028
1.4	9.084	23.663	14.633	0.0167	1.4	-	-	-	-

Διατομή 18				
Στάθμη	A (m ²)	H (m)	Q (m ³ /s)	\underline{k}
0	0	0	-	-
0.2	0.257	5.162	0.1075	0.0017
0.4	1.018	10.31	0.6693	0.0103
0.6	4.29	32.083	3.4453	0.0415
0.8	7.689	36.647	8.3131	0.0432
1	11.56	41.219	15.137	0.0242
1.2	15.866	46.193	23.749	0.0121
1.4	-	-	-	-

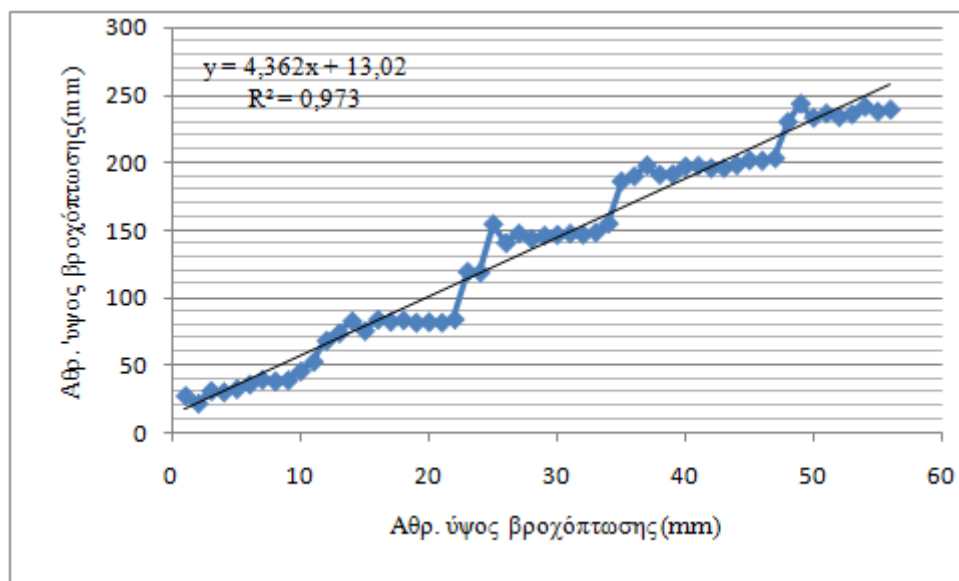
Πίνακας Α.3: Μέση βροχόπτωση της λεκάνης απορροής του Μόρνου

Μηνιαία μέση βροχόπτωση για την λεκάνη απορροής του Μόρνου												
έτος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
1964	-	2.20	4.78	2.53	2.31	2.88	1.07	0.76	0.99	2.64	5.06	7.41
1965	6.67	7.47	2.81	4.12	1.59	1.33	0.08	0.05	0.00	0.99	13.00	7.76
1966	15.01	3.54	4.43	0.89	1.53	1.21	0.38	0.25	1.50	3.25	14.12	8.99
1967	5.41	1.04	0.96	2.54	1.60	0.22	2.54	0.64	2.14	1.90	1.70	10.41
1968	10.94	3.28	2.99	0.52	2.61	2.61	0.03	0.69	0.62	4.30	4.19	10.11

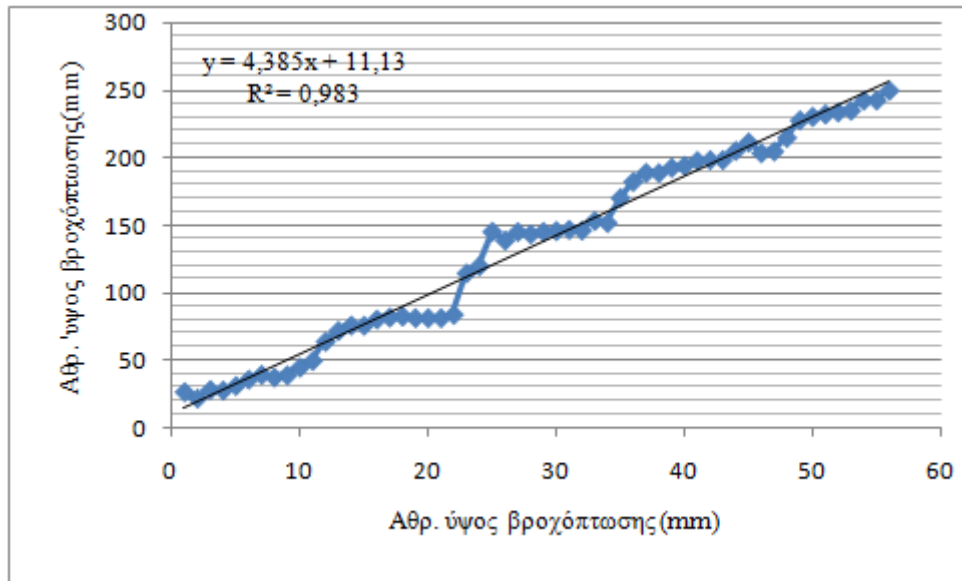
Παράρτημα Β: Σχήματα



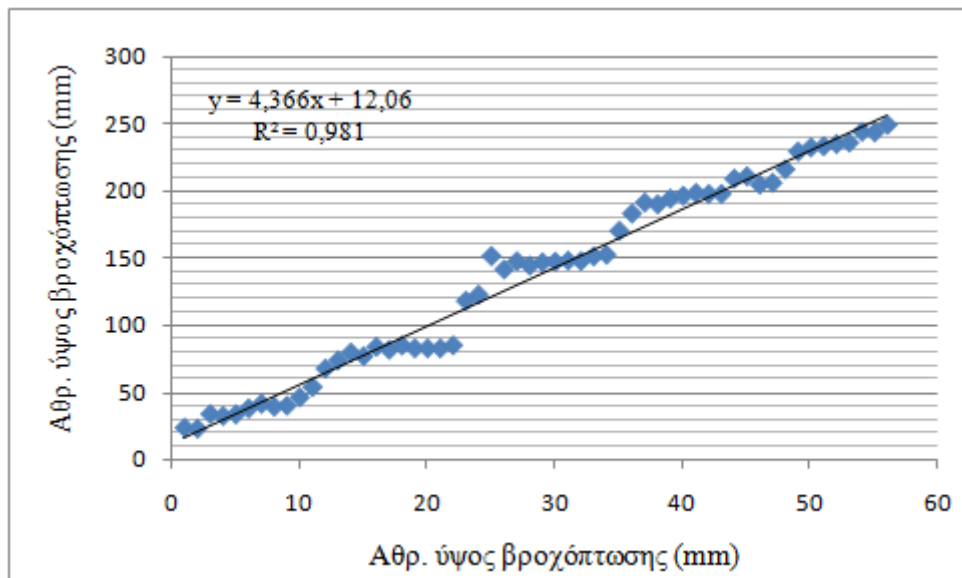
Σχήμα Β.1: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τον Αθ. Διάκο και ελεγχόμενο σταθμό τον Λιδωρίκι



Σχήμα Β.2: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τον Αθ. Διάκο και ελεγχόμενο σταθμό τον Μαλανδρίνο



Σχήμα Β.3: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τον Αθ. Διάκο και ελεγχόμενο σταθμό Πενταγιοί



Σχήμα Β.4: Διπλή αθροιστική καμπύλη με σταθμό βάσης τον Αθ. Διάκο και ελεγχόμενο σταθμό της Συκέας



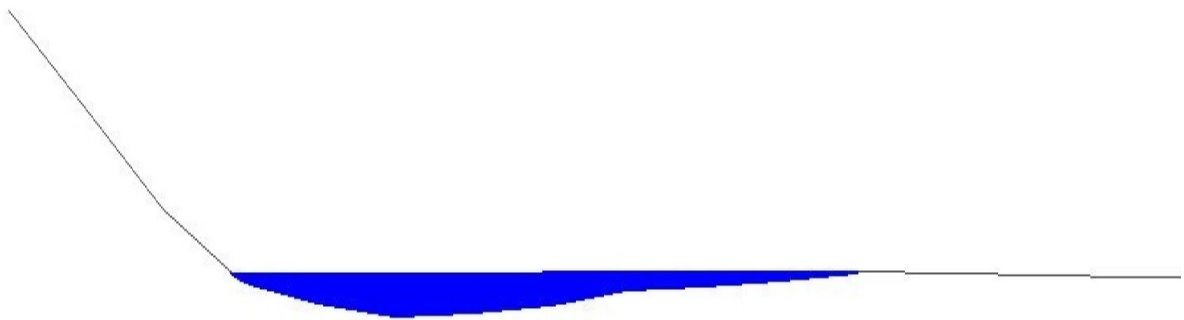
Σχήμα Β.5: Η μορφή της υγρής διατομής 2



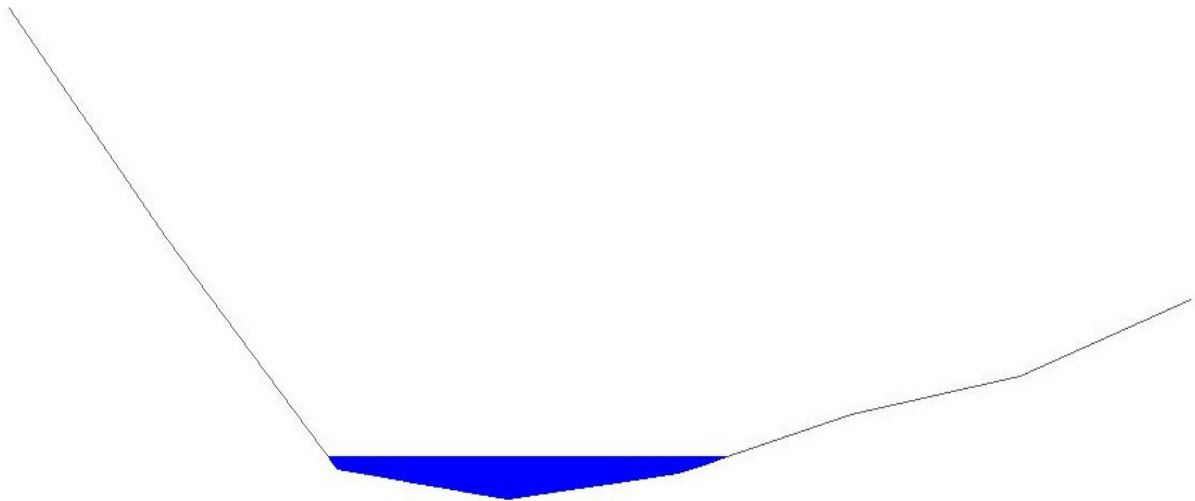
Σχήμα Β.6: Η μορφή της υγρής διατομής 3



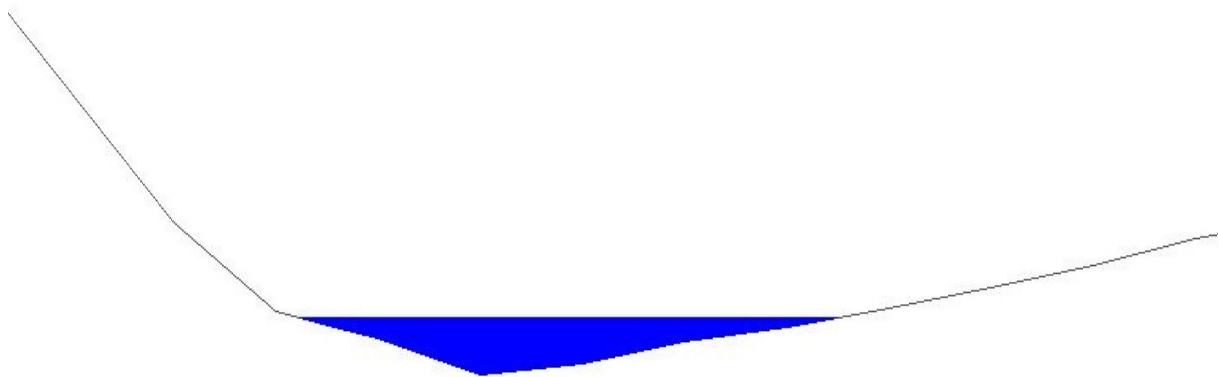
Σχήμα Β.7: Η μορφή της υγρής διατομής 4



Σχήμα Β.8: Η μορφή της υγρής διατομής 5



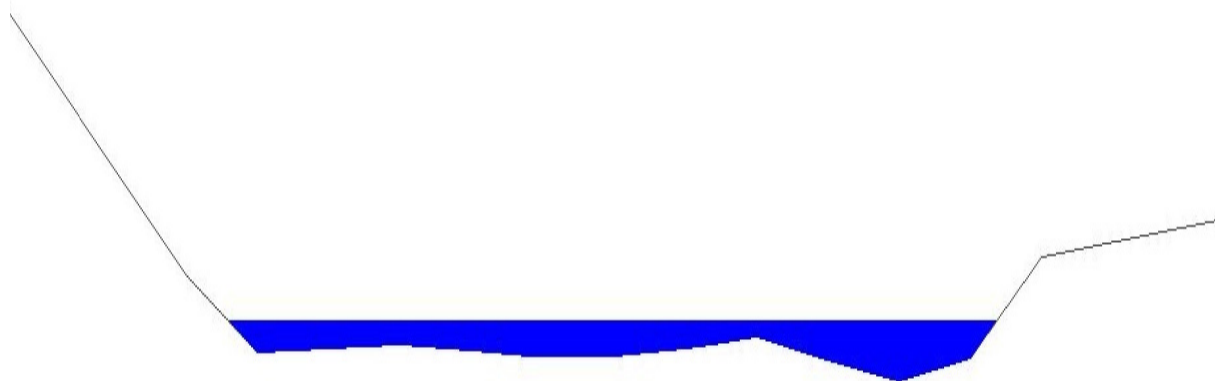
Σχήμα Β.9: Η μορφή της υγρής διατομής 6



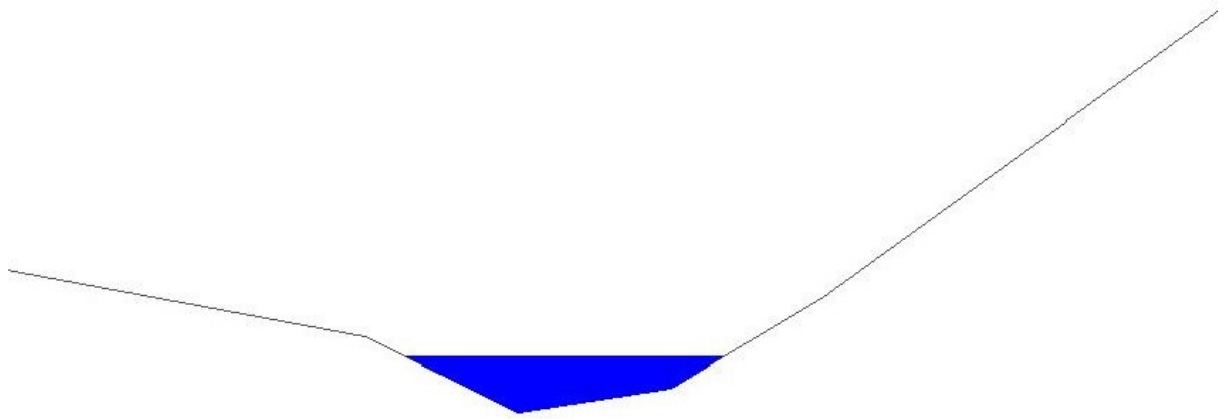
Σχήμα Β.10: Η μορφή της υγρής διατομής 7



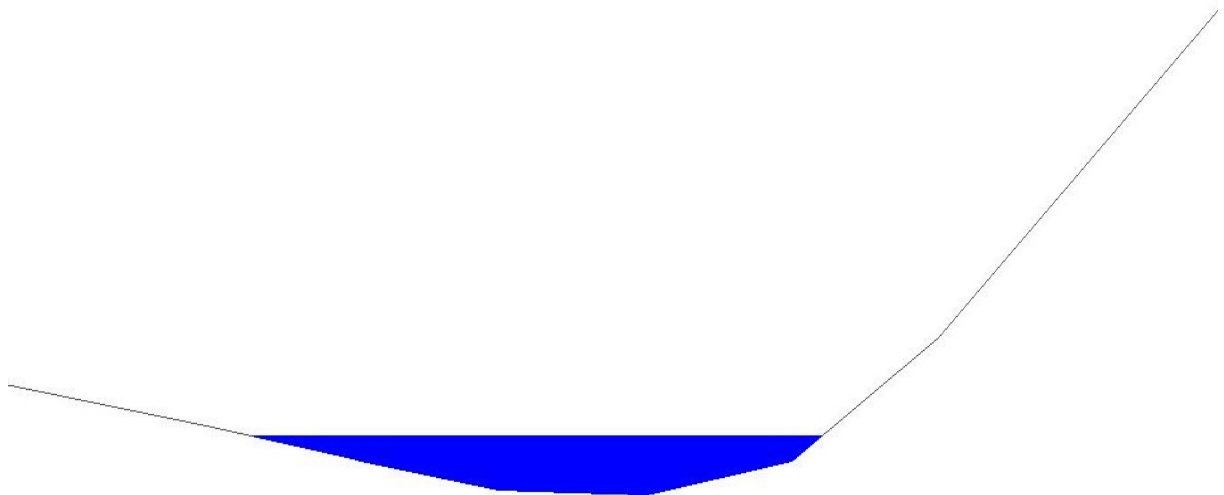
Σχήμα Β.11: Η μορφή της υγρής διατομής 8



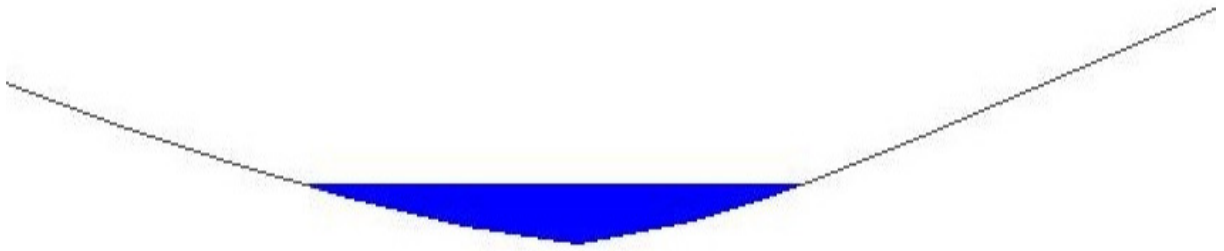
Σχήμα Β.12: Η μορφή της υγρής διατομής 9



Σχήμα Β.13: Η μορφή της υγρής διατομής 10



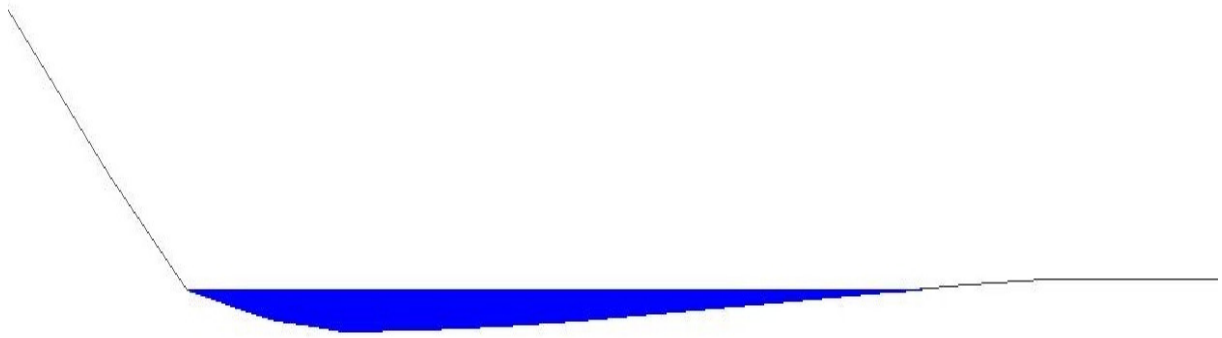
Σχήμα Β.14: Η μορφή της υγρής διατομής 11



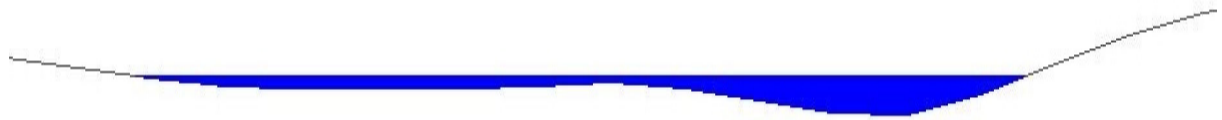
Σχήμα Β.15: Η μορφή της υγρής διατομής 12



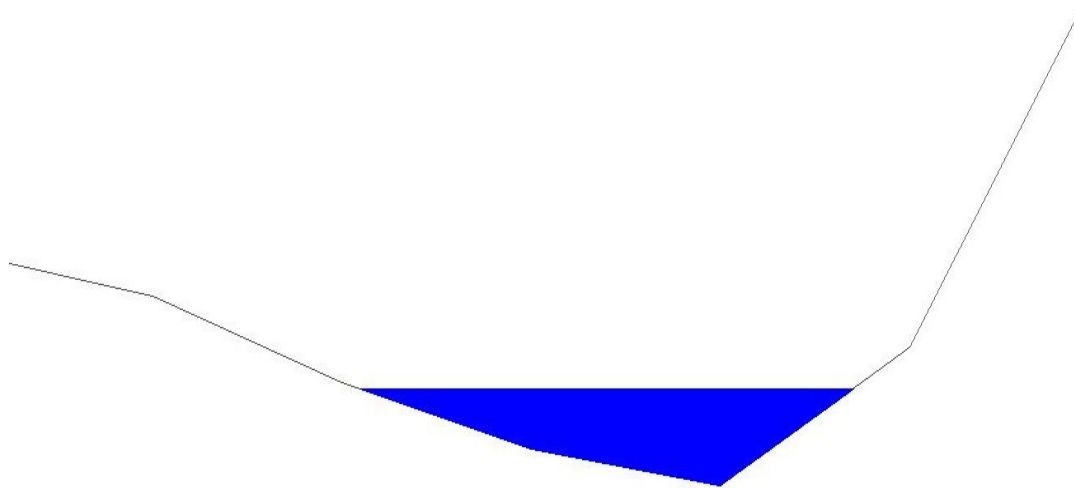
Σχήμα Β.16: Η μορφή της υγρής διατομής 13



Σχήμα B.17: Η μορφή της υγρής διατομής 14



Σχήμα B.18: Η μορφή της υγρής διατομής 15



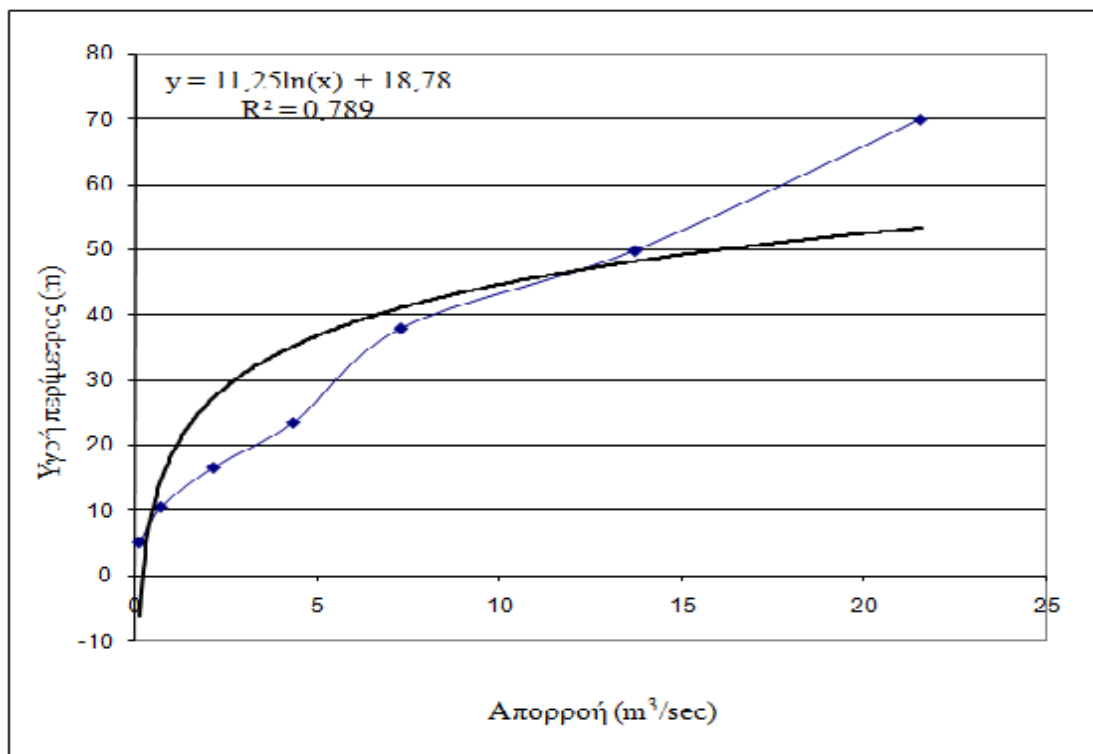
Σχήμα Β.19: Η μορφή της υγρής διατομής 16



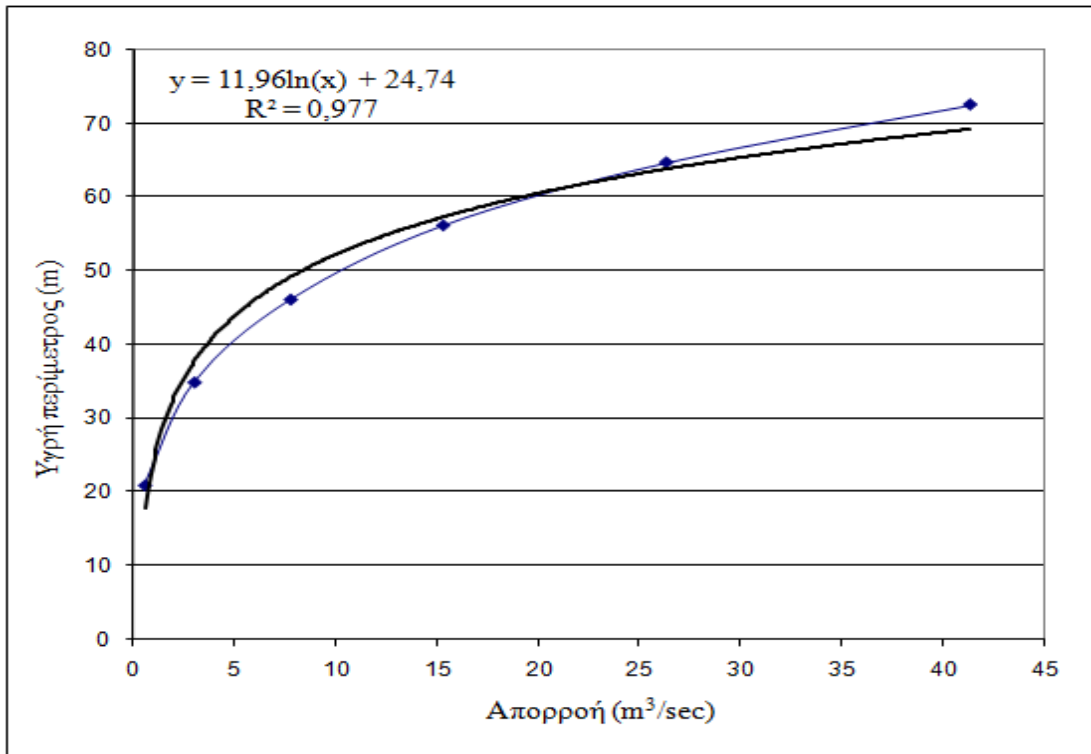
Σχήμα Β.20: Η μορφή της υγρής διατομής 17



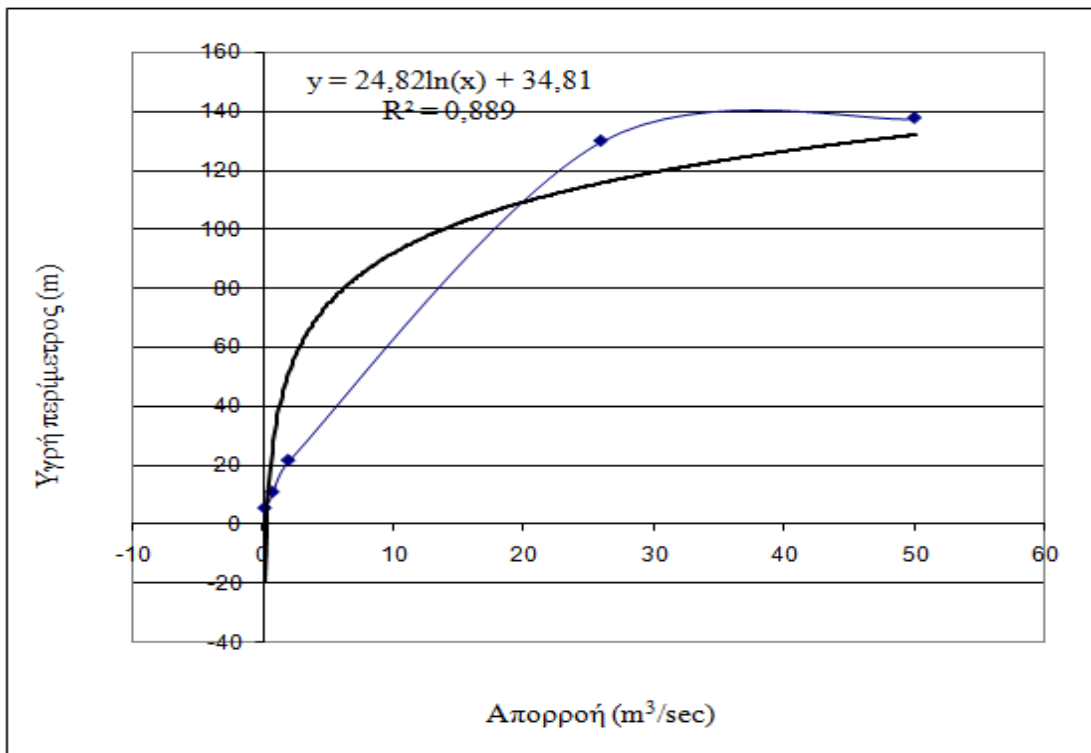
Σχήμα Β.21: Η μορφή της υγρής διατομής 18



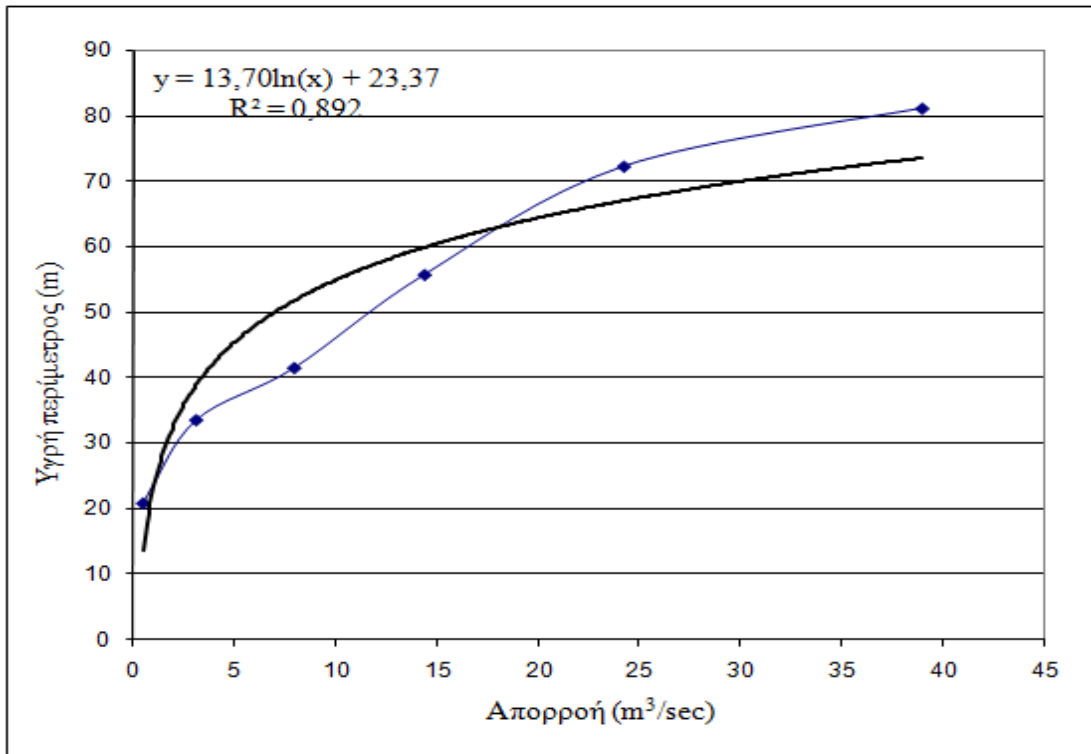
Σχήμα Β.22: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 2 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



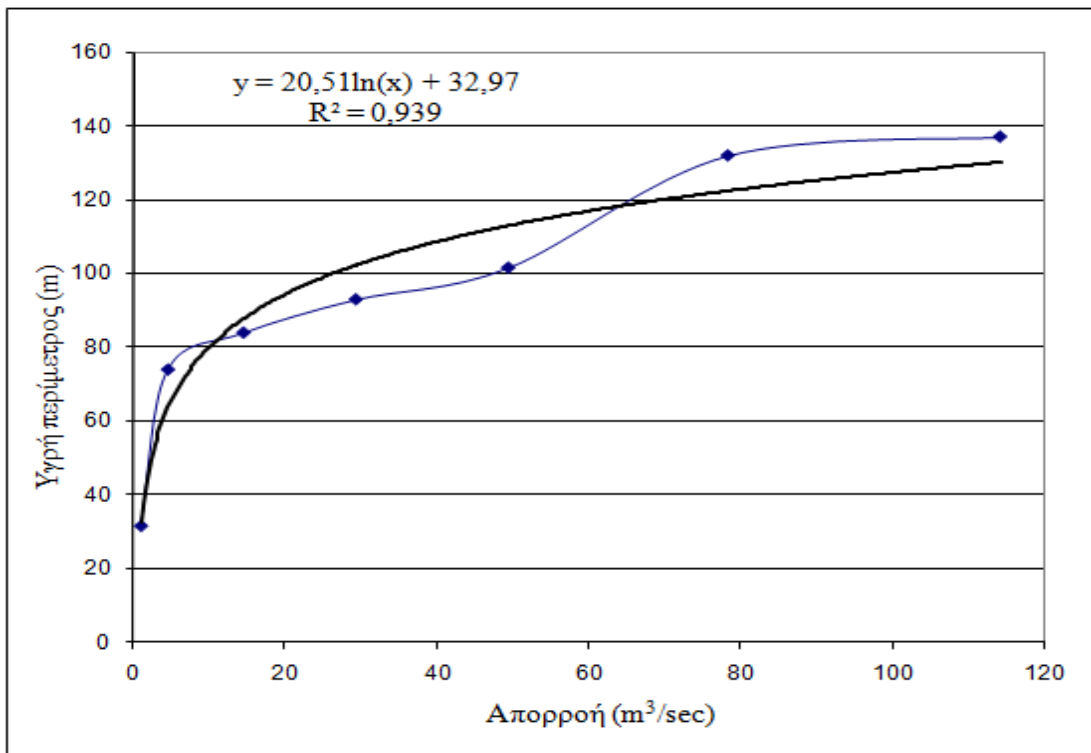
Σχήμα Β.23: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 3 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



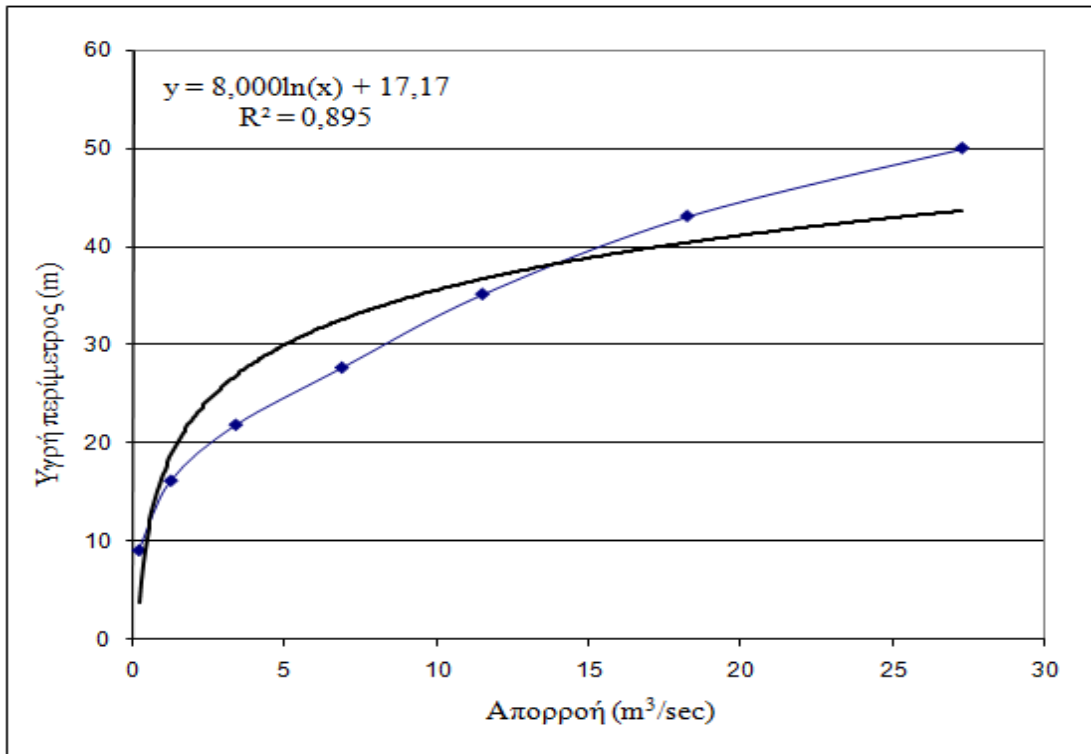
Σχήμα Β.24: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 4 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



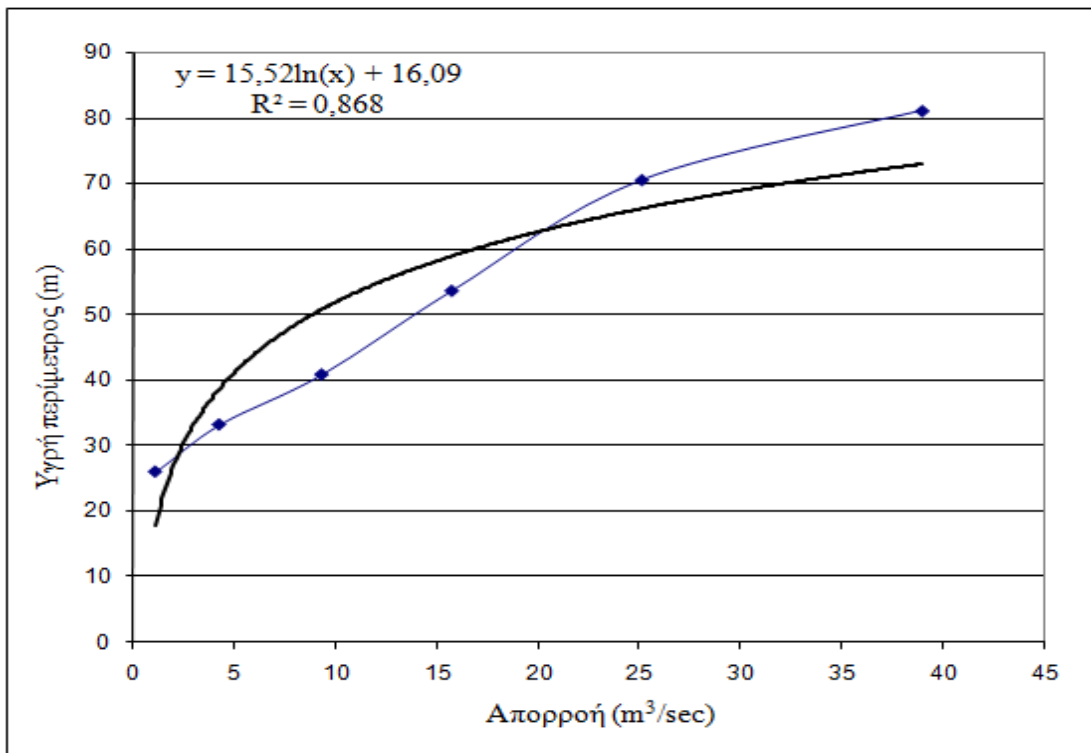
Σχήμα Β.25: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 5 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



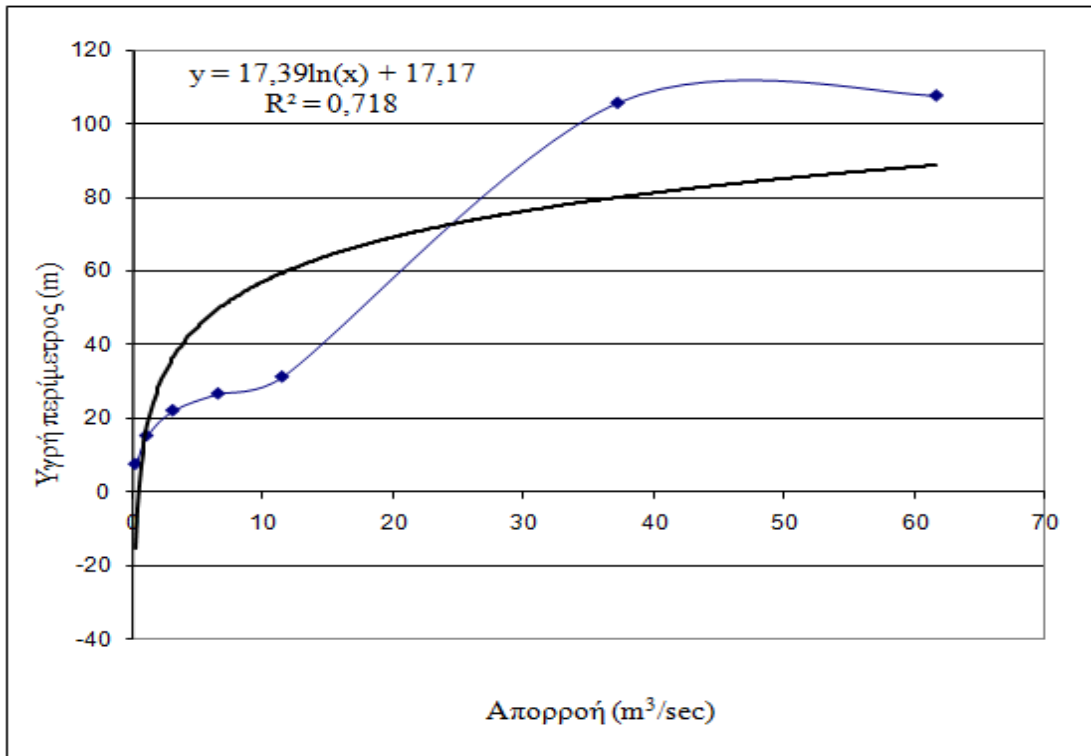
Σχήμα Β.26: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 6 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



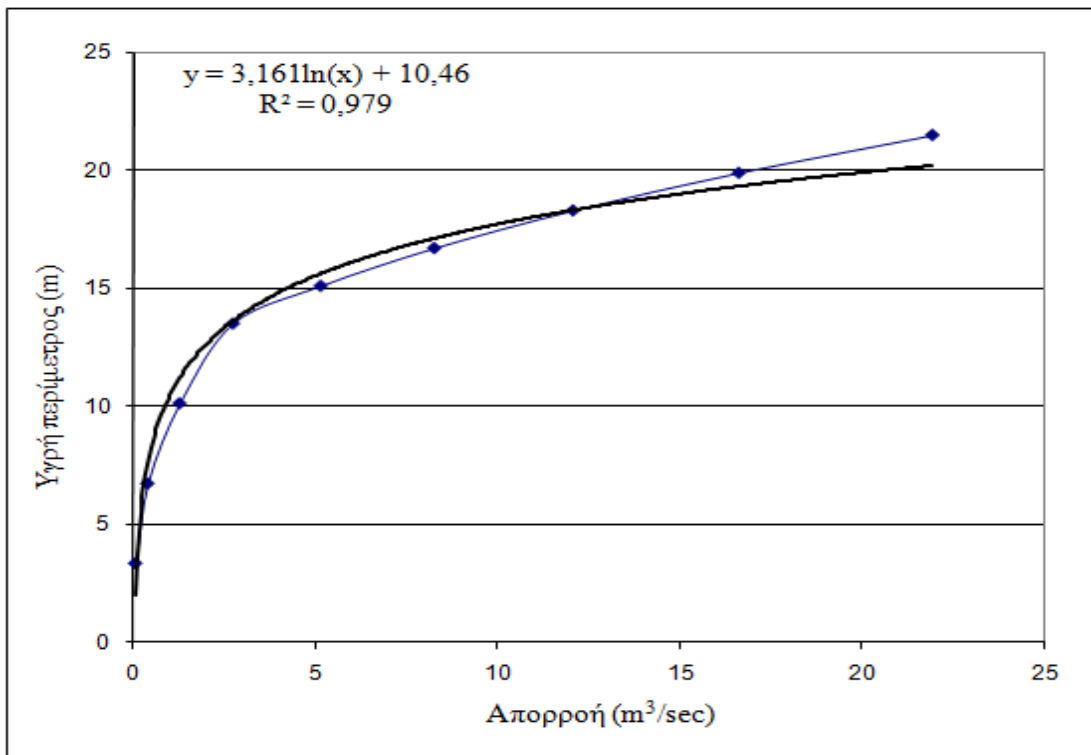
Σχήμα Β.27: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 7 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



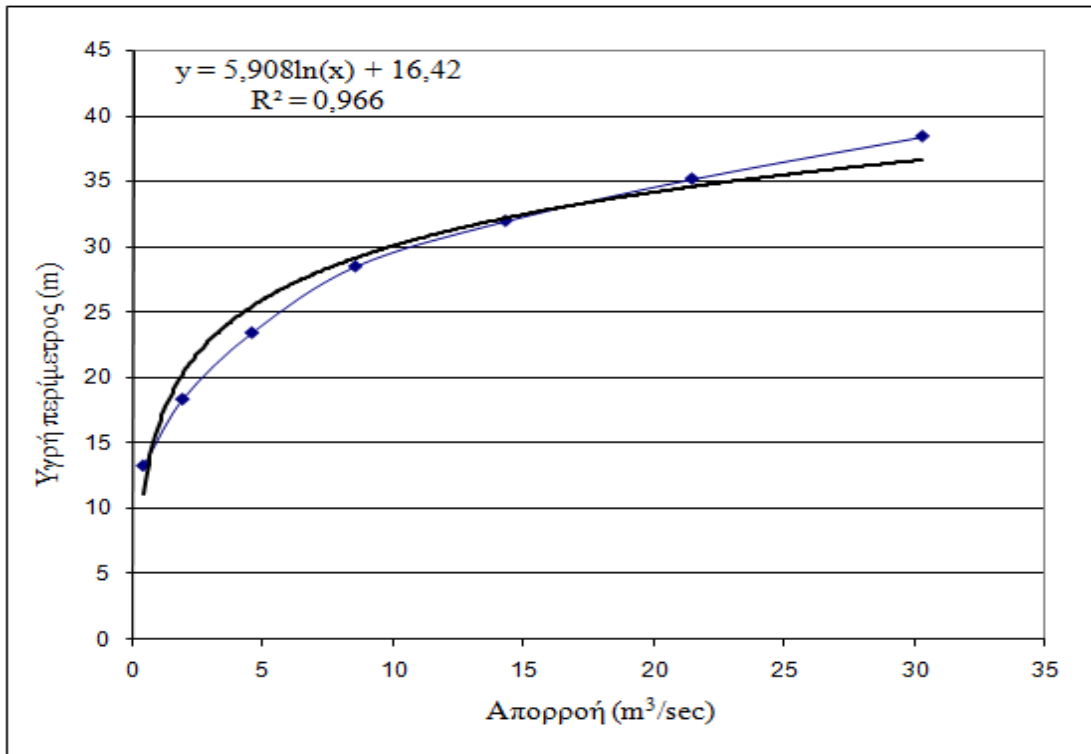
Σχήμα Β.28: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 8 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



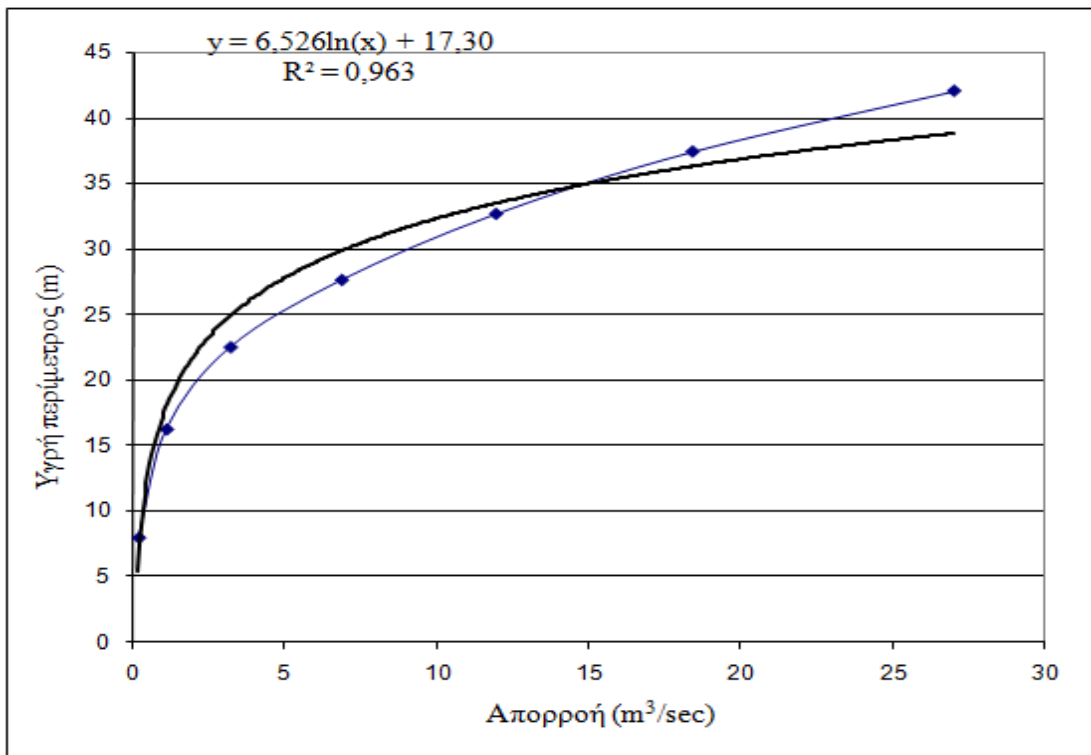
Σχήμα Β.29: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 9 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



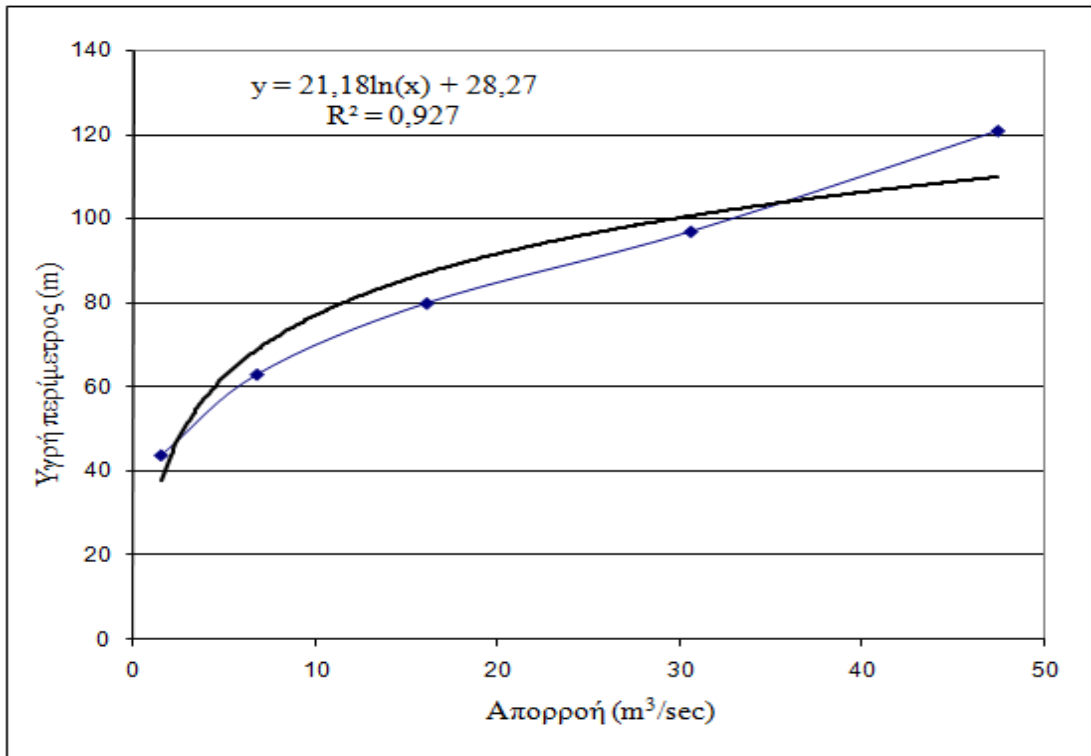
Σχήμα Β.30: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 10 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



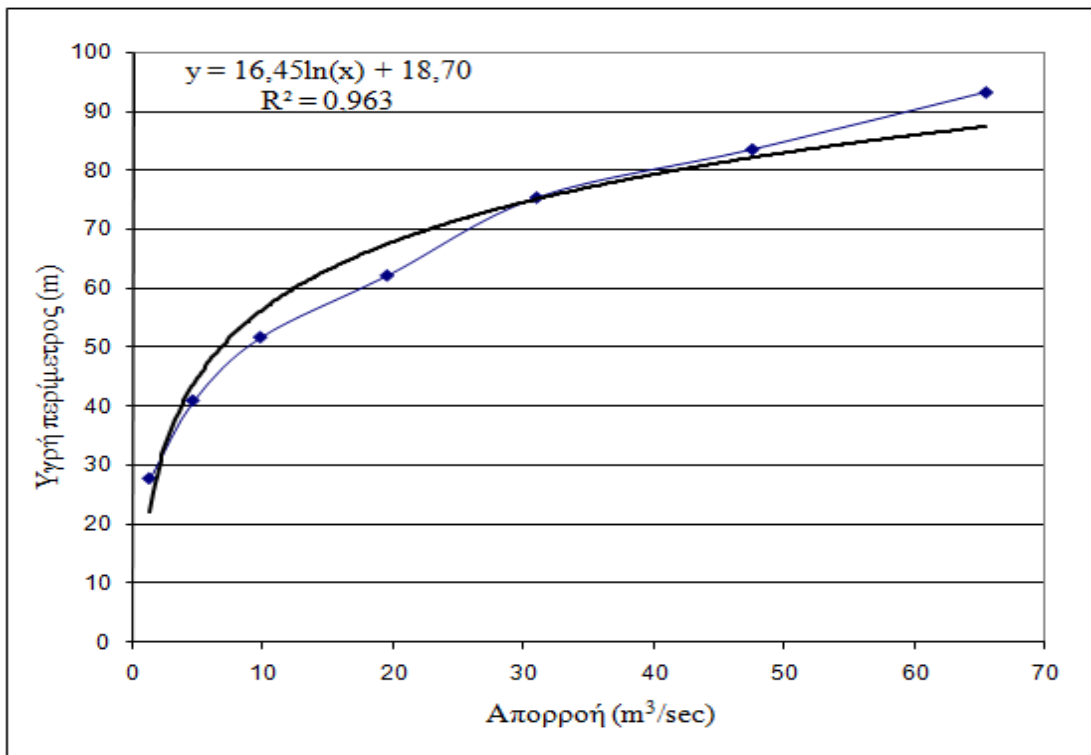
Σχήμα Β.31: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 11 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



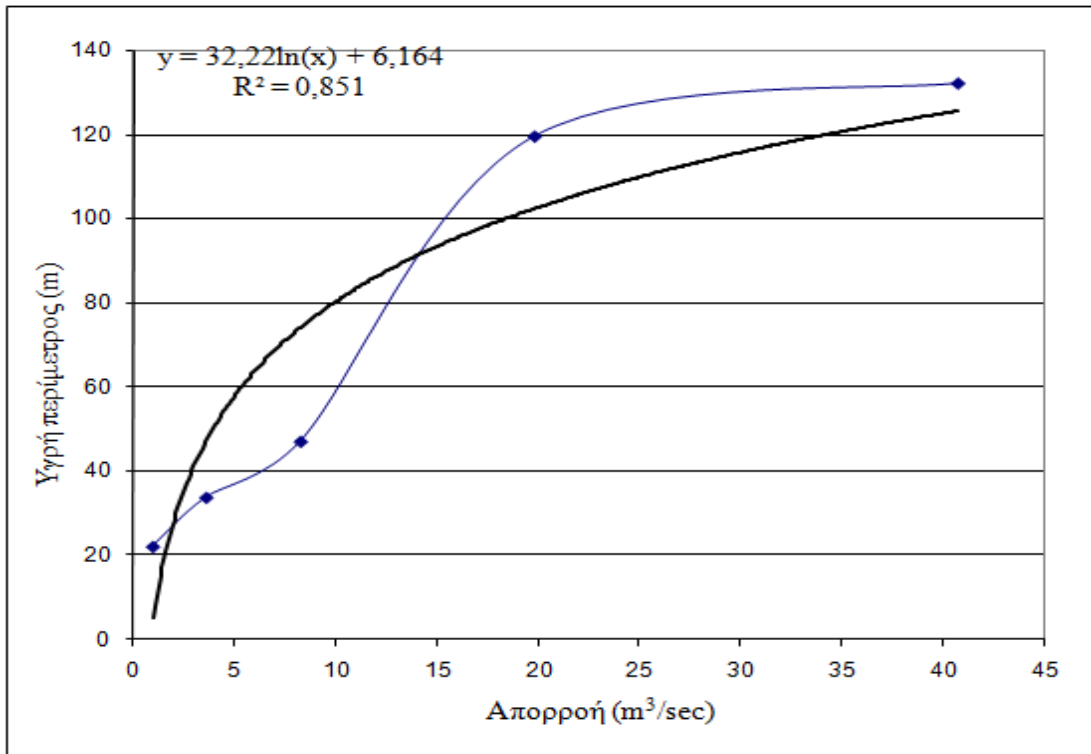
Σχήμα Β.32: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 12 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



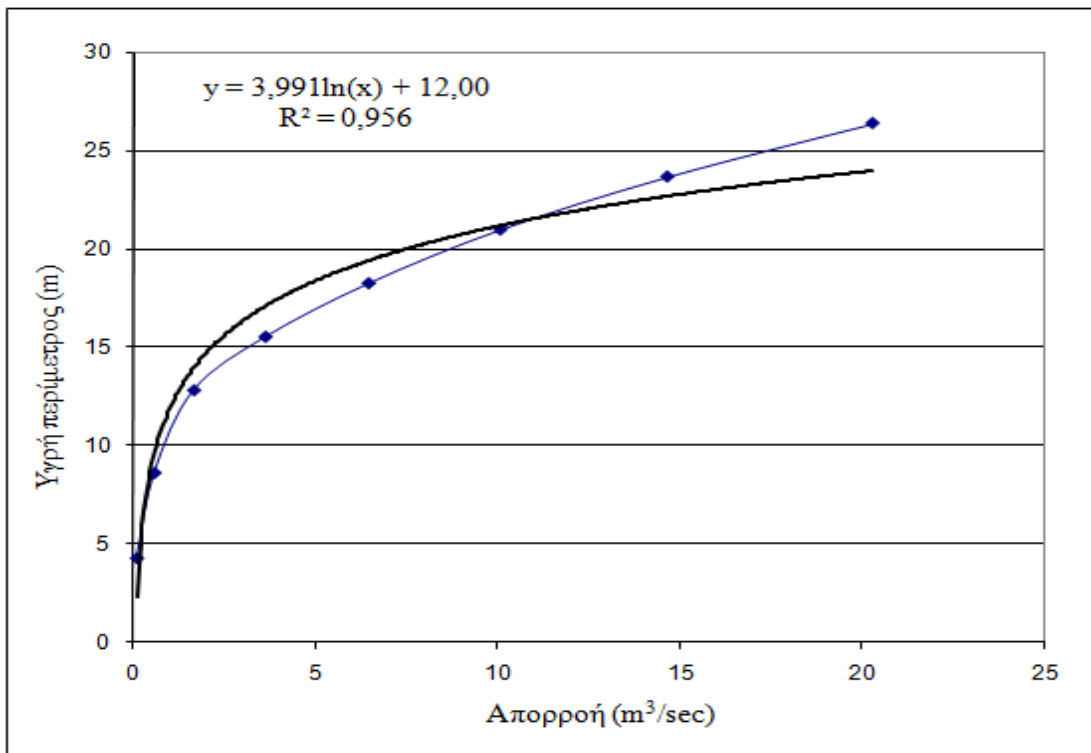
Σχήμα Β.33: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 13 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



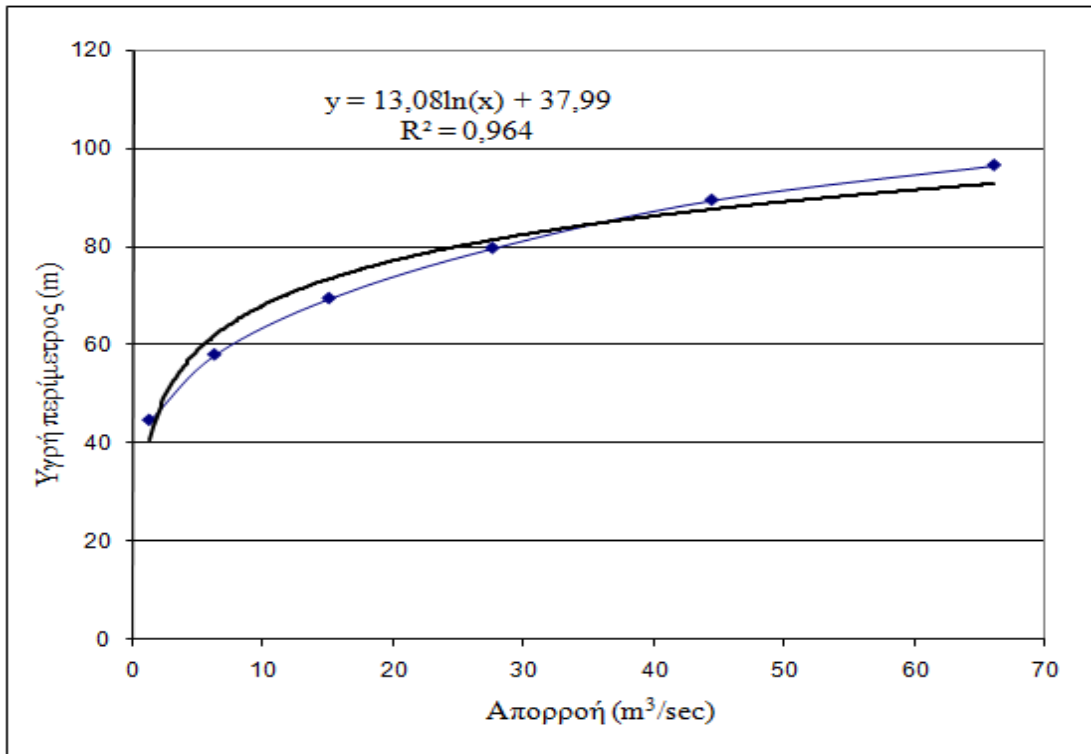
Σχήμα Β.34: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 14 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



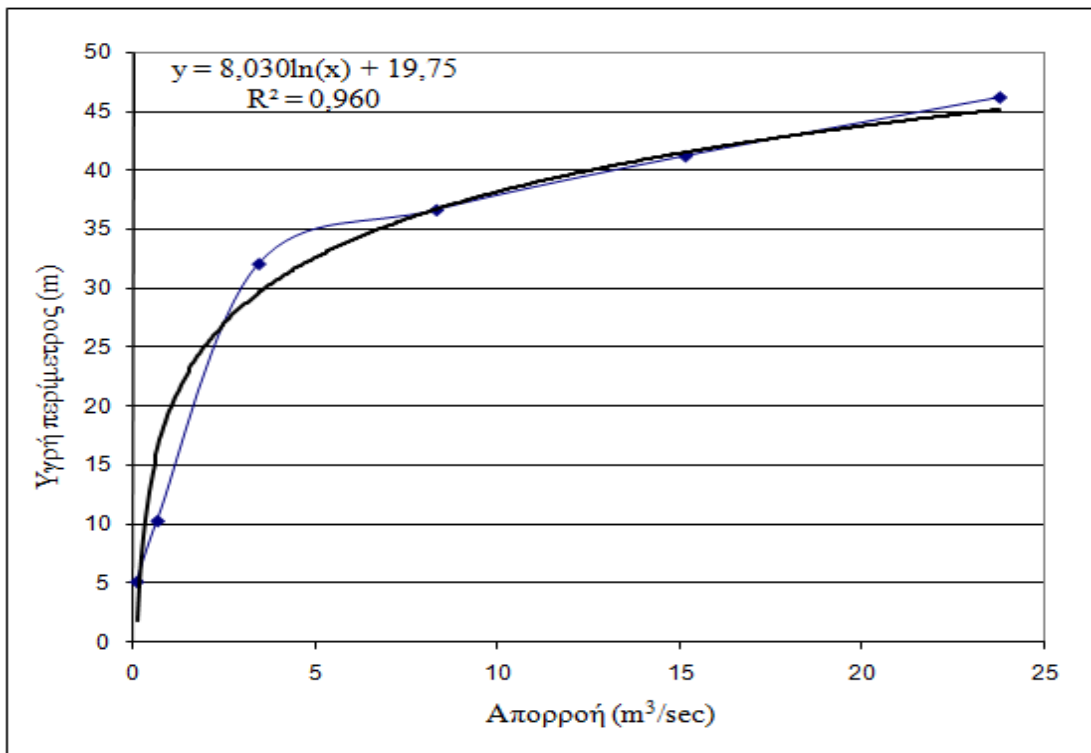
Σχήμα Β.35: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 15 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



Σχήμα Β.36: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 16 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



Σχήμα Β.37: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 17 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)



Σχήμα Β.38: Η καμπύλη μεταξύ υγρής περιμέτρου και παροχής για την διατομή 18 (με μαύρο η προσαρμοσθείσα ημιλογαριθμική καμπύλη)

