



# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΥΗΕ ΣΤΟΝ ΔΗΜΟ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΤΖΟΥΜΕΡΚΩΝ

Ολοκληρωμένο Θέμα Υδραυλικού Σχεδιασμού

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2023



ΚΟΥΤΣΟΒΙΤΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ – ΛΥΡΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ – ΠΑΓΩΤΕΛΗΣ  
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ – ΤΣΙΛΙΠΗΡΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

## Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	2
1.1 Αντικείμενο μελέτης .....	2
1.2 Περιοχή μελέτης .....	2
Κεφάλαιο 2: Χωροθέτηση και υδρολογική μελέτη .....	3
2.1 Επιλογή πιθανών θέσεων .....	3
2.2 Βροχομετρικά δεδομένα (πρωτογενή δεδομένα) .....	4
2.3 Βροχοβαθμίδα .....	5
2.4 Πολύγωνα Thiessen .....	6
2.5 Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) .....	9
Κεφάλαιο 3: Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου .....	14
3.1 Περιγραφή μοντέλου υδατικού ισοζυγίου .....	14
3.2 Βαθμονόμηση μοντέλου - Εκτίμηση παραμέτρων .....	17
3.3 Αποτελέσματα μοντέλου .....	17
3.4 Υπολογισμός ημερησίων παροχών των λεκανών με τα βαθμονομημένα μοντέλα.....	19
Κεφάλαιο 4: Επιλογή θέσης - Μίγμα στροβίλων.....	22
4.1 Επιλογή λεκάνης για την κατασκευή του έργου .....	22
4.2 Βελτιστοποίηση μίγματος στροβίλων .....	22
Κεφάλαιο 5: Στοιχεία κόστους του έργου .....	25
5.1 Αρχικό κόστος του έργου .....	25
5.2 Ετήσιο κόστος του έργου .....	25
5.3 Χρηματοοικονομικά στοιχεία .....	26
Κεφάλαιο 6: Τοπογραφικά διαγράμματα .....	27
Κεφάλαιο 7: Γενικές διατάξεις - Κατόψεις .....	29
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα.....	31
Κεφάλαιο 9: Κώδικας Βελτιστοποίησης .....	33
9.1 Μοντελοποίηση λειτουργίας στροβίλων – ΜΥΗΕ .....	33
9.2 Βελτιστοποίηση μοντέλου .....	35
Βιβλιογραφία .....	37

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1 Αντικείμενο μελέτης

Αντικείμενο της παρούσας προκαταρκτικής μελέτης αποτελεί η διερεύνηση του σχεδιασμού μικρού υδροηλεκτρικού έργου (ΜΥΗΕ) στην περιοχή των Κεντρικών Τζουμέρκων, στην Περιφέρεια Ηπείρου. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η χωροθέτηση, η διαστασιολόγηση και η οικονομική αποτίμηση νέου μικρού υδροηλεκτρικού έργου εκτροπής στα όρια του Δήμου Κεντρικών Τζουμέρκων.

### 1.2 Περιοχή μελέτης



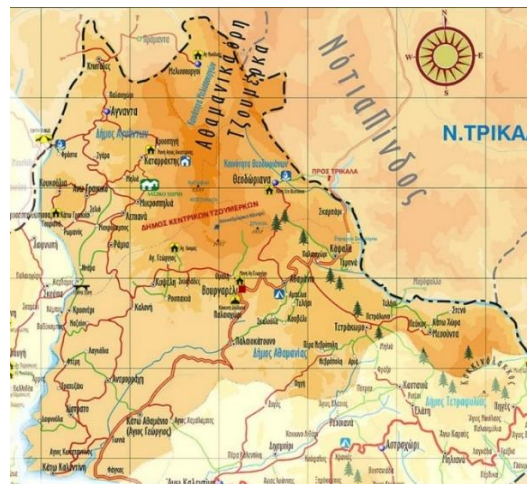
Ευρύτερη θέση Δήμου Κεντρικών Τζουμέρκων

Ο Δήμος Κεντρικών Τζουμέρκων είναι δήμος της Περιφέρειας Ηπείρου, ο οποίος συστάθηκε το 2011 από τη συνένωση των προϋπαρχόντων δήμων Αγνάντων, Αθαμανίας, και των κοινοτήτων Θεοδωριάνων και Μελισσουργών. Σύμφωνα με το Πρόγραμμα Καλλικράτης ο νέος Δήμος αποτελείται από τέσσερις Δημοτικές Ενότητες:

1. Δημοτική Ενότητα Αθαμανίας, με δώδεκα τοπικές κοινότητες
2. Δημοτική Ενότητα Αγνάντων, με οκτώ τοπικές κοινότητες
3. Δημοτική Ενότητα Θεοδωριάνων, με μία τοπική κοινότητα
4. Δημοτική Ενότητα Μελισσουργών, με μία τοπική κοινότητα

Ο Δήμος Κεντρικών Τζουμέρκων συνορεύει βόρεια-βορειοδυτικά με τον Δήμο Βορείων Τζουμέρκων, ανατολικά με τον Δήμο Πύλης και λίγο με τον Δήμο Αργιθέας, με τον Δήμο Αρταίων στα δυτικά, με τον Δήμο Νικολάου Σκουφά και τον Δήμο Γεωργίου Καραϊσκάκη στα νότια. Σύμφωνα με την απογραφή του 2021, ο πληθυσμός του Δήμου ανέρχεται σε 5.562 άτομα, ενώ η συνολική του έκταση είναι 515,9 km<sup>2</sup>.

Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, ο Δήμος Κεντρικών Τζουμέρκων τοποθετείται Β-ΒΔ του νομού Άρτας. Γεωφυσικά, η περιοχή του Δήμου ορίζεται από την κορυφογραμμή του όρους Κρυάκουρα στα βόρεια, από τον ποταμό Αχελώο στα ανατολικά, από τον ποταμό Άραχθο στα δυτικά και από την τεχνητή λίμνη Πουρναρίου στα νότια-νοτιοδυτικά.



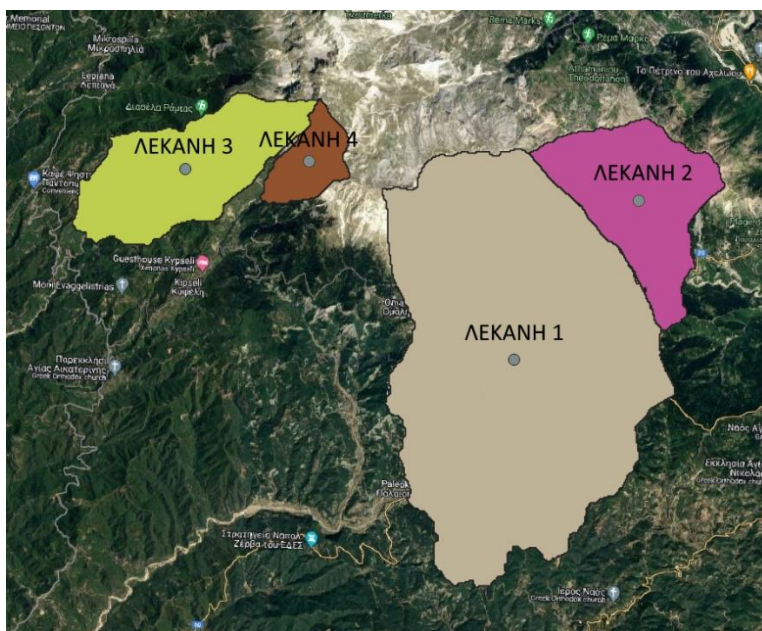
Γεωφυσικός χάρτης Δήμου Κεντρικών Τζουμέρκων

## Κεφάλαιο 2: Χωροθέτηση και υδρολογική μελέτη

### 2.1 Επιλογή πιθανών θέσεων

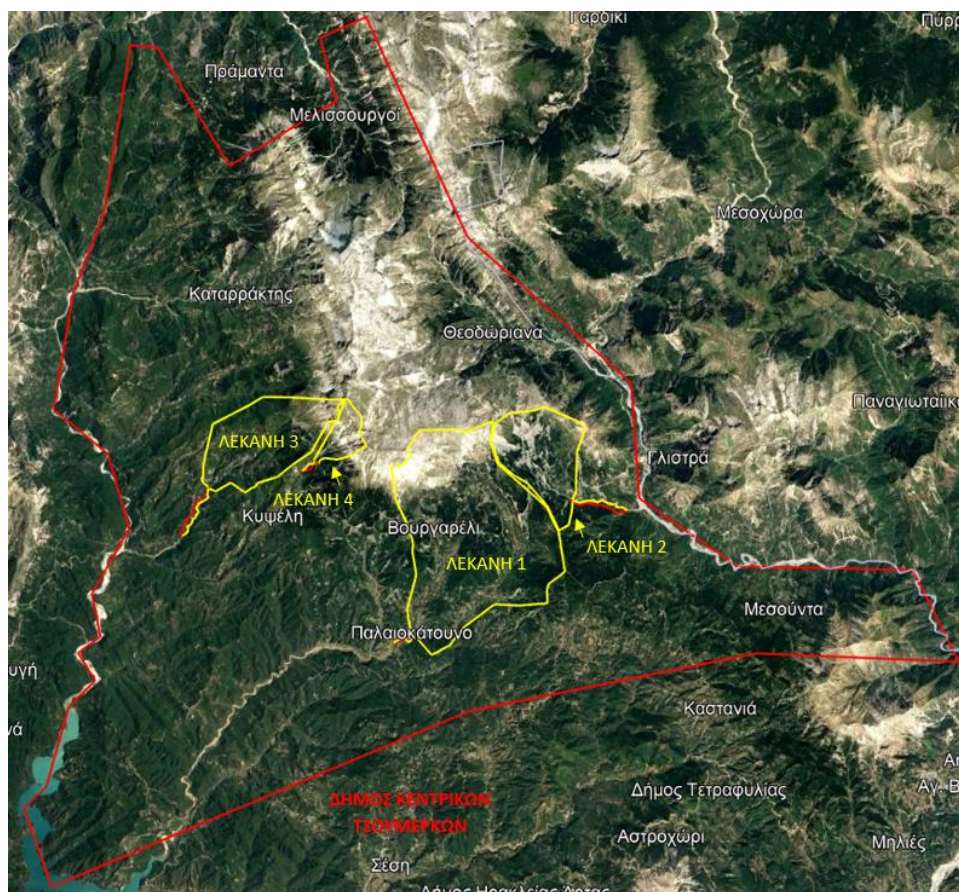
Η περιοχή μελέτης, ο Δήμος Κεντρικών Τζουμέρκων στην Ήπειρο, λόγω των ευνοϊκών γεωμορφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών που την χαρακτηρίζουν (υψηλά ύψη βροχής, μεγάλες και απότομες εναλλαγές υψομέτρου στο ορεινό ανάγλυφο) διαθέτει ήδη έναν σημαντικό αριθμό ΜΥΗΕ. Κατά την αρχική προσέγγιση του προβλήματος μέσω της επιλογής πιθανών θέσεων για το έργο, πρωταρχική σημασία δόθηκε στην κάλυψη του κριτηρίου ελάχιστης απόστασης μεταξύ της υδροληψίας του υπό σχεδιασμού ΜΥΗΕ και του σταθμού παραγωγής ανάντη υφιστάμενου ΜΥΗΕ. Αυτή ορίζεται από την Υπουργική Απόφαση 196978/2001 (ΦΕΚ 518B/5-4-2011: “Συμπλήρωση και εξειδίκευση τεχνικών και λοιπών λεπτομέρειών των κριτηρίων χωροθέτησης ΜΥΗΕ με την παρ. 5 του άρθρου 9 του Ν.3851/2010”) και είναι ίση με 1 km. Οι ακριβείς θέσεις των υφιστάμενων ΜΥΗΕ λήφθηκαν από την ιστοσελίδα του ΥΠΕΝ.

Βασικό κριτήριο κατά τον αρχικό προσδιορισμό πιθανών θέσεων για το έργο, πέραν του προαναφερθέντος περιορισμού, υπήρξε η ταυτόχρονη μεγιστοποίηση του ύψους πτώσης και της διαθέσιμης παροχής. Η τελευταία, στα πλαίσια μιας πρώτης αδρής προσέγγισης, θεωρήθηκε ανάλογη του εμβαδού της ανάντη λεκάνης απορροής, και συνεπώς η μεγιστοποίησή της συνεπάγεται την μεγιστοποίηση της προαναφερθείσας λεκάνης. Μετά από μελέτη που πραγματοποιήθηκε μέσω Google Earth και GIS, η ομάδα κατέληξε σε 4 πιθανές θέσεις, οι λεκάνες απορροής που αντιστοιχούν στις οποίες παρουσιάζονται στους ακόλουθους χάρτες (αποτυπωμένους σε περιβάλλοντα Google Earth και GIS).



Υποψήφιες λεκάνες απορροής (GIS)





Υποψήφιες λεκάνες απορροής (Google Earth)

Συγκεντρωτικά, τα τρία βασικά χαρακτηριστικά των 4 πιθανών θέσεων (μήκος σήραγγας εκτροπής, έκταση λεκάνης απορροής, υψομετρική διαφορά που αξιοποιείται) παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

	Μήκος Εκτροπής (km)	Λεκάνη (km <sup>2</sup> )	ΔΗ (m)
<b>Θέση 1</b>	0.79	43.75	27
<b>Θέση 2</b>	2.23	9.67	80
<b>Θέση 3</b>	2.47	9.96	113
<b>Θέση 4</b>	0.67	2.52	147

## 2.2 Βροχομετρικά δεδομένα (πρωτογενή δεδομένα)

Στην περιοχή μελέτης, λόγω του ιδιαίτερα πλούσιου υδρολογικού της υποβάθρου, εντοπίζεται σημαντικός αριθμός βροχομετρικών σταθμών. Οι σταθμοί αυτοί ανήκουν και λειτουργούν υπό την αιγίδα 2 κυρίως φορέων, της ΔΕΗ και του ΥΠΠΕΡ.

Σε πρώτο στάδιο, έπειτα από γενική επισκόπηση οριζοντιογραφικά της περιοχής μελέτης και λαμβάνοντας υπόψιν τις ακριβείς συντεταγμένες των 4 πιθανών θέσεων του έργου, καταρτίστηκε μια λίστα πιθανών βροχομετρικών σταθμών, με βασικό κριτήριο την εγγύτητα στις θέσεις. Η πρόσβαση στα

δεδομένα των σταθμών έγινε μέσω της ιστοσελίδας του Υδροσκοπίου (<http://www.hydroscope.gr/>). Στο επόμενο στάδιο, δεδομένου ότι βάσει νομοθεσίας κατά τον σχεδιασμό ΜΥΗΕ πρέπει να γίνεται επεξεργασία ημερήσιων βροχομετρικών δεδομένων τουλάχιστον 10 συναπών υδρολογικών ετών, έγινε αντιπαραβολή των διαστημάτων για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα από κάθε σταθμό. Η διαδικασία αυτή, όπως και η διόρθωση κάποιων σημειακών σφαλμάτων και συμπλήρωση μικρών κενών, πραγματοποιήθηκε μέσω της εφαρμογής «Υδρογνώμων». Τελικά, προσδιορίστηκαν οι ακόλουθοι 4 βροχομετρικοί σταθμοί, για τους οποίους παράχθηκε αδιάλειπτη χρονοσειρά ημερήσιων υψών βροχής για 22 υδρολογικά έτη (1987-1988 έως 2008-2009).

- I. Κυψέλη (ΥΠΠΕΡ)
- II. Άνω Καλεντίνη (ΔΕΗ)
- III. Θεοδώριανα (ΥΠΠΕΡ)
- IV. Φράξος (ΔΕΗ)

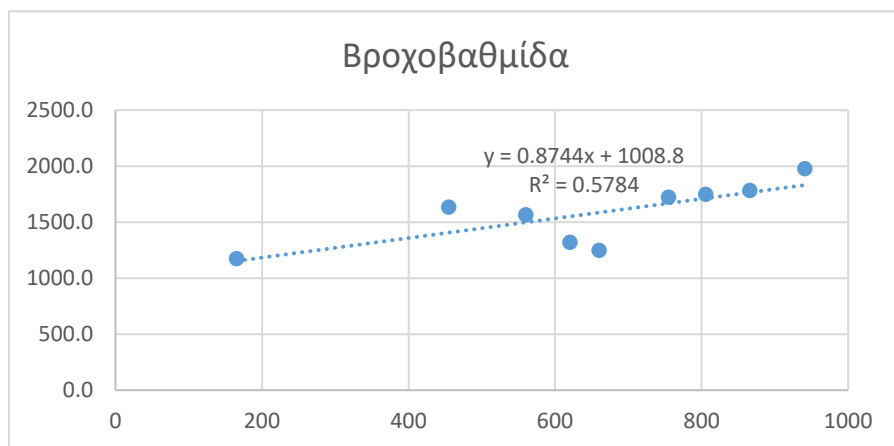
### 2.3 Βροχοβαθμίδα

Απαραίτητο βήμα προτού συνεχιστεί η υδρολογική επεξεργασία υπήρξε ο προσδιορισμός της βροχοβαθμίδας που εφαρμόζεται στην περιοχή μελέτης. Δεδομένου ότι η εκτίμηση της βροχοβαθμίδας βελτιώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των σταθμών των οποίων τα βροχομετρικά δεδομένα λαμβάνονται υπόψιν στον προσδιορισμό της, έγινε προσπάθεια να συμπεριληφθούν δεδομένα από κατά το δυνατόν περισσότερους σταθμούς της ευρύτερης περιοχής. Οι σταθμοί που επιλέχθηκαν, όλοι εκ των οποίων παρουσίασαν τουλάχιστον 7 κοινά επικαλυπτόμενα έτη στα δεδομένα τους, το υψόμετρό τους, και το μέσο υπερετήσιο ύψος βροχής τους παρουσιάζονται ακολούθως.

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΣΤΑΘΜΟΥ (m)	ΜΕΣΗ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ (mm)
ΚΥΨΕΛΗ	620.5	1319.7
ΑΝΩ ΚΑΛΕΝΤΙΝΗ	560	1566.9
ΘΕΟΔΩΡΙΑΝΑ (ΥΠΠΕΡ)	941	1977.3
ΦΡΑΞΟΣ (ΠΟΥΡΝ.)	754.9	1722.3
ΠΛΑΤΑΝΟΥΣΑ	454.7	1633.6
ΚΑΤΩ ΚΑΛΕΝΤΙΝΗ	165.2	1174.3
ΑΓΝΑΝΤΑ (ΥΠΠΕΡ)	660	1248.3
ΚΑΤΑΡΡΑΚΤΗΣ (Α.Ν.)	805.7	1749.4
ΠΡΑΜΑΝΤΑ (ΓΚΟΓΚ- ΚΑΛ)	865.7	1782.8

Η παραγόμενη βροχοβαθμίδα εκφρασμένη σε mm βροχής / m υψομέτρου, ο βαθμός συσχέτισης R και ο εμπειρικός ελεγχος  $2/n^{0.5}$  παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα και το αντίστοιχο διάγραμμα. Οι 3 ανωτέρω τιμές κρίνονται ικανοποιητικές και εντός των αναμενόμενων αποδεκτών ορίων, όπως αυτά έχουν οριστεί από τη θεωρία.

<b>ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ</b>	<b>0.87</b>
<b>ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ</b>	0.76
<b>Έλεγχος</b>	0.67



Διάγραμμα βροχοβαθμίδας

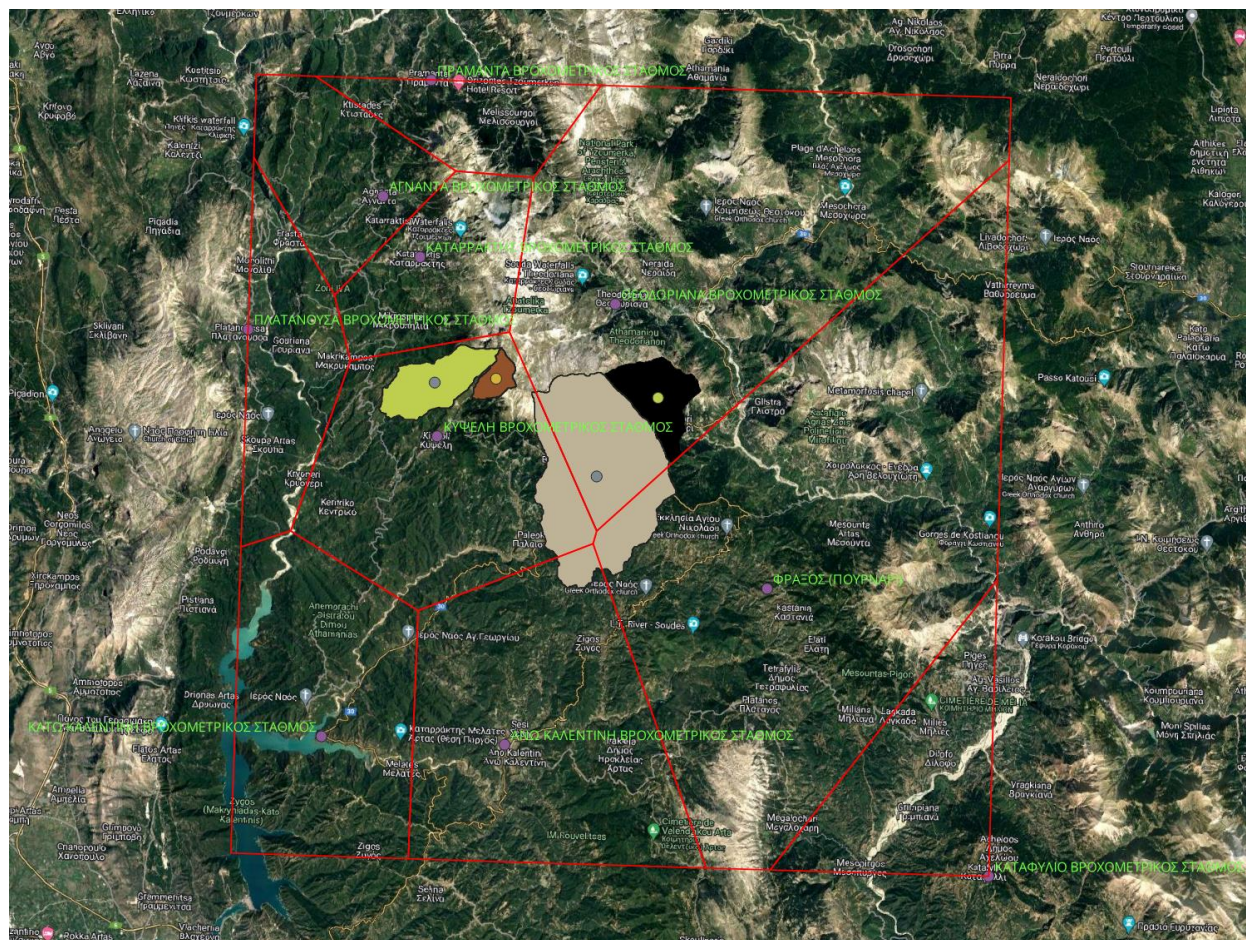
## 2.4 Πολύγωνα Thiessen

Έπειτα από το προπαρασκευαστικό στάδιο του προσδιορισμού της βροχοβαθμίδας, ακολούθησε ο υπολογισμός της ημερήσιας χρονοσειράς βροχόπτωσης στο κεντροειδές σημείο της κάθε μίας από τις 4 λεκάνες απορροής των πιθανών θέσεων. Εφαρμόστηκε η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen, και χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία οι συντεταγμένες και τα υψόμετρα των 4 θέσεων, καθώς και τα αντίστοιχα στοιχεία των 4 βροχομετρικών σταθμών που αναφέρονται στην ενότητα «Βροχομετρικά Δεδομένα». Συγκεντρωτικά, τα ανωτέρω στοιχεία, καθώς και το ποσοστό επίδρασης του κάθε σταθμού στην αντίστοιχη λεκάνη λόγω της γεωμετρίας των πολυγώνων, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα και ,γραφικά, στον επακόλουθο χάρτη.

ΛΕΚΑΝΗ	1	2	3	4
ΕΜΒΑΔΟ (km <sup>2</sup> )	43.75	9.67	9.96	2.52
ΚΥΨΕΛΗ (km <sup>2</sup> )	9.78	0.00	9.96	2.52
ΑΝΩ ΚΑΛΕΝΤΙΝΗ (km <sup>2</sup> )	2.75	0.00	0.00	0.00
ΘΕΟΔΩΡΙΑΝΑ (km <sup>2</sup> )	23.66	9.67	0.00	0.00
ΦΡΑΞΟΣ (km <sup>2</sup> )	7.56	0.00	0.00	0.00
ΚΥΨΕΛΗ (%)	22.35%	0.00%	100.00%	100.00%
ΑΝΩ ΚΑΛΕΝΤΙΝΗ (%)	6.30%	0.00%	0.00%	0.00%
ΘΕΟΔΩΡΙΑΝΑ (%)	54.07%	100.00%	0.00%	0.00%
ΦΡΑΞΟΣ (%)	17.28%	0.00%	0.00%	0.00%
ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ(m)	293.9	613.3	336.7	997.6
ΜΕΓΙΣΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	2076.0	1729.4	2179.0	2190.5
ΜΕΣΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	807.8	1019.4	929.6	1618.3



<b>ΔΙΑΜΕΣΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)</b>	723.2	993.3	886.7	1655.6
<b>ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΟΥΣ (m)</b>	760.9	877.1	793.7	1573.3
<b>ΤΕΤΜΗΜΕΝΗ ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΟΥΣ</b>	39.36	39.40	39.40	39.40
<b>ΤΕΤΑΓΜΕΝΗ ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΟΥΣ</b>	21.20	21.23	21.11	21.15



Πολύγωνα Thiessen, βροχομετρικοί σταθμοί και υποψήφιες λεκάνες

Σημειώνεται πως, όπως προκύπτει από την τοπογραφία, μόνο η Λεκάνη 1 επηρεάζεται και από τους 4 βροχομετρικούς σταθμούς. Η Λεκάνη 2 επηρεάζεται αποκλειστικά από τον σταθμό «Θεοδώριανα», ενώ οι Λεκάνες 3 και 4 κατά αποκλειστικότητα από τον σταθμό «Κυψέλη». Κατά τη διαδικασία των πολυγώνων Thiessen, πραγματοποιήθηκε υψομετρική αναγωγή με τη χρήση της βροχοβαθμίδας, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η υψομετρική διαφορά μεταξύ του υψομέτρου του κεντροειδούς κάθε



λεκάνης και το μέσο σταθμισμένο υψόμετρο των σταθμών για κάθε μία εξ' αυτών. Συγκεντρωτικά, τα ανωτέρω παρατίθενται στους πίνακες που ακολουθούν (όλες οι μονάδες m).

## Λεκάνη 1

Μέσο Υψόμετρο Σταθμών:	Μέσο Υψόμετρο Λεκάνης:	Διαφορά Μέσων Υψομέτρων:
792.6	807.8	15.2

## Λεκάνη 2

Μέσο Υψόμετρο Σταθμών:	Μέσο Υψόμετρο Λεκάνης:	Διαφορά Μέσων Υψομέτρων:
941.0	1019.4	78.4

## Λεκάνη 3

Μέσο Υψόμετρο Σταθμών:	Μέσο Υψόμετρο Λεκάνης:	Διαφορά Μέσων Υψομέτρων:
620.5	929.6	309.1

## Λεκάνη 4

Μέσο Υψόμετρο Σταθμών:	Μέσο Υψόμετρο Λεκάνης:	Διαφορά Μέσων Υψομέτρων:
620.5	1618.3	997.8

Τελικά, παρήχθησαν 4 (μία για κάθε πιθανή θέση του έργου) ημερήσιες χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης προσαρμοσμένης στο κεντροειδές της κάθε λεκάνης απορροής για 22 υδρολογικά έτη (1987-1988 έως 2008-2009).

## 2.5 Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET)

Για τον προσδιορισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στην περιοχή ενδιαφέροντος εφαρμόστηκε η μέθοδος Penman – Monteith. Όλοι οι τύποι και τα βήματα υπολογισμού που ακολουθούν, καθώς και οι βασικές παραδοχές, λήφθηκαν από το βιβλίο των Καθηγητών Δ. Κουτσογιάννη και Θ. Ξανθόπουλο «Τεχνική Υδρολογία» (Δ. Κουτσογιάννης, και Θ. Ξανθόπουλος, Τεχνική Υδρολογία, Εκδοση 3, 418 pages, doi:10.13140/RG.2.1.4856.0888, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.). Αξιοποιήθηκαν μηνιαία μετεωρολογικά δεδομένα από τις θέσεις Κρεμαστά – Καστράκι, δεδομένου ότι το κλίμα τους προσομοιάζει αυτό των Τζουμέρκων και των λεκανών Αχελώου / Αράχθου, τα οποία κάλυπταν το διάστημα Οκτωβρίου 1980 με Μάρτιο 1988. Πιο συγκεκριμένα, από το Καστράκι λήφθηκαν μηνιαίες τιμές ωρών ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου, ενώ από τα Κρεμαστά μηνιαίες τιμές σχετικής υγρασίας  $U$  και θερμοκρασίας.

Αναλυτικότερα, όσον αφορά τους επιμέρους υπολογισμούς και παραδοχές της μεθόδου, εφαρμόστηκαν τα παρακάτω.

- Για την ατμοσφαιρική πίεση χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:  $p = 1013.25(1 - 2.256 \times 10^{-5} \times z_m)^{5.256}$  όπου  $z_m$  είναι το μέσο υψόμετρο της λεκάνης .
- Για την πίεση κορεσμού των υδρατμών ο τύπος:  $e_s = 6.11e^{\left(\frac{17.27T_m}{T_m+237.3}\right)}$  όπου  $T_m$  είναι η μέση θερμοκρασία του μήνα .
- Για την κλίση καμπύλης κορεσμού έγινε ο υπολογισμός:  $\Delta = \frac{4098e_s}{(T_m+237.3)^2}$
- Για την λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσης:  $\lambda = 2501 - 2.361T_m$
- Για τον ψυχομετρικό συντελεστή:  $\gamma = \frac{c_p \times p}{\epsilon \times \lambda}$  όπου  $c_p = 1.013$  kJ/kg/K είναι η ειδική θερμότητα αέρα και  $\epsilon = 0.622$  είναι ο λόγος μοριακών βαρών νερού και ξηρού αέρα.
- Για την τροποποιημένη συνάρτηση ανέμου  $F(u)$  χρησιμοποιήθηκε η σχέση για καλλιέργεια αναφοράς κατά Penman - Monteith:  $F(u) = \frac{90u}{T_m+273}$  όπου  $u$  είναι η ταχύτητα ανέμου μετρημένη σε ύψος 2m από το έδαφος (m/s) .
- Για το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών:  $D = e_s - U \times e_s$  όπου  $U$  είναι το ποσοστό της υγρασίας το οποίο είναι δεδομένο.
- Η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία  $S_0$  προέκυψε από πίνακα στο βιβλίο των Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλου με γραμμική παλινδρόμηση για το γεωγραφικό πλάτος της κάθε λεκάνης.
- ΠΑΡΑΔΟΧΗ: Για όλους τους μήνες έχει ληφθεί μέση τιμή λευκαύγειας/albedo  $a = 0.25$  .
- Η μέση διάρκεια ημέρας  $N$  επίσης έχει ληφθεί από το βιβλίο των Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλου με γραμμική παλινδρόμηση για το γεωγραφικό πλάτος της κάθε λεκάνης.
- Για τον συντελεστή απορρόφησης της ατμόσφαιρας (Prescott):  $f_s = a_s + b_s \times \frac{n}{N}$  όπου  $\frac{n}{N}$  η σχετική ηλιοφάνεια, ενώ  $a_s = 0.25$  ,  $b_s = 0.50$  (τυπικές τιμές από το βιβλίο).
- Για την καθαρή ικανότητα εκπομπής  $\epsilon_n = 0.34 - 0.044\sqrt{U \times e_s}$  .
- Για τον συντελεστή επίδρασης νέφωσης:  $f_L = 0.1 + 0.9\frac{n}{N}$  .

- Για την καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων:  $L_n = \varepsilon_n f_L \sigma (T_m + 273)^4$ , όπου  $\sigma = 4.9 \times 10^{-6}$  kJ/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>d) είναι η Σταθερά Stefan-Boltzmann .
- Για την ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας:  $R_n = S_n - L_n$  όπου  $S_n = (1 - a)f_s S_0$  είναι η καθαρή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων .
- Για τον ειδικό συντελεστή  $\gamma' = \gamma(1 + 0.33u)$  όπου  $u$  είναι η ταχύτητα ανέμου στα 2m υψόμετρο από την επιφάνεια .

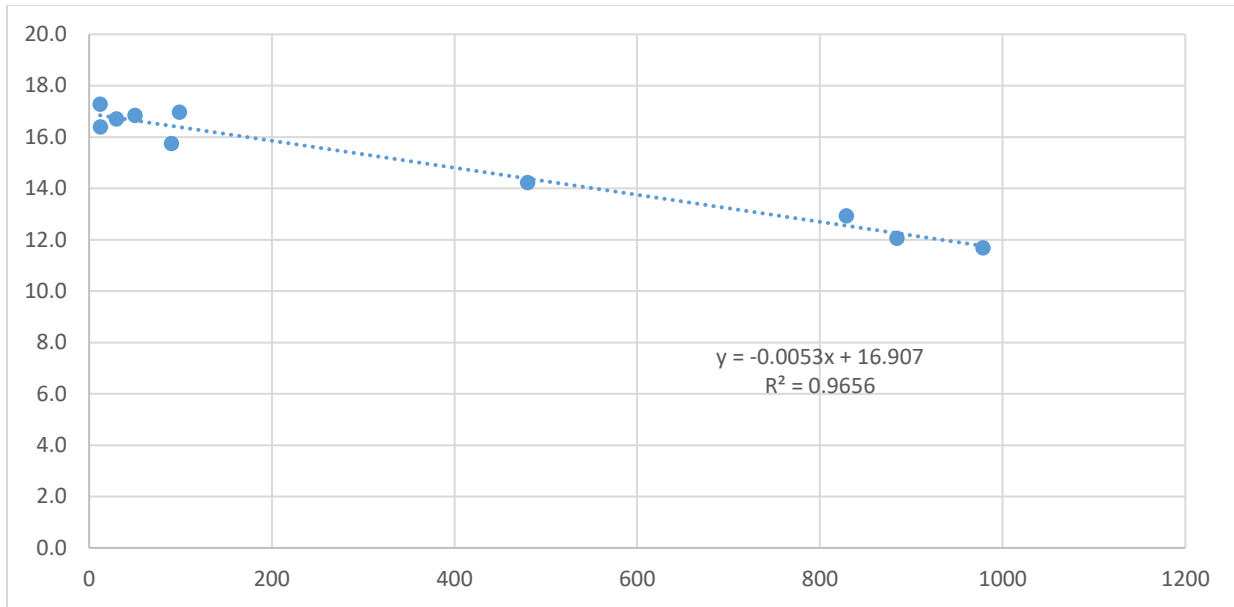
Σημειώνεται πως, στα πλαίσια εφαρμογής του μοντέλου, κατέστη απαραίτητος ο υπολογισμός της θερμοβαθμίδας που εφαρμόζεται στην περιοχή μελέτης. Για τον προσδιορισμό της έγινε επεξεργασία μέσω υπερετήσιων τιμών θερμοκρασίας για 21 κοινά επικαλυπτόμενα έτη (1981-2001) από σταθμούς της ευρύτερης γεωγραφικής περιοχής. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Κοινά επικαλυπτόμενα έτη:		<b>21</b>
<b>ΣΤΑΘΜΟΣ</b>	<b>ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΣΤΑΘΜΟΥ (m)</b>	<b>ΜΕΣΗ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (οC)</b>
ΑΕΤΟΣ	50.3	16.8
ΑΓΧΙΑΛΟΣ	12.4	16.4
ΑΡΤΑ	30	16.7
ΧΡΥΣΟΒΙΤΣΑ	828.9	12.9
ΦΡ. ΛΟΥΡΟΥ	99	17.0
ΙΩΑΝΝΙΝΑ	480	14.2
ΛΑΡΙΣΑ	90	15.8
ΠΡΕΒΕΖΑ	12	17.3
ΒΟΥΡΜΙΑΝΗ	884.1	12.1
ΒΩΒΟΥΣΑ	978.5	11.7

Η παραγόμενη θερμοβαθμίδα εκφρασμένη σε βαθμούς Κελσίου / m υψομέτρου, ο βαθμός συσχέτισης R και ο εμπειρικός ελεγχος 2/n0.5 παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα και το αντίστοιχο διάγραμμα. Οι 3 ανωτέρω τιμές κρίνονται ικανοποιητικές και εντός των αναμενόμενων αποδεκτών ορίων, όπως αυτά έχουν οριστεί από τη θεωρία.

<b>ΘΕΡΜΟΒΑΘΜΙΔΑ</b>	<b>-0.01</b>
<b>ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ</b>	<b>-0.98</b>
<b>Έλεγχος</b>	<b>0.63</b>





Διάγραμμα θερμοβαθμίδας

Τελικά, για τον προσδιορισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής εφαρμόστηκε ο ακόλουθος τύπος Penman-Monteith:

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma'} F(u)D$$

Από το μοντέλο παρήχθησαν μέσες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για κάθε μήνα, καθώς και οι αντίστοιχες ετήσιες μέσες τιμές. Τα αποτελέσματα για κάθε λεκάνη παρατίθενται ακολούθως.

ο **Λεκάνη 1**

Οκτώβριος	<b>51.25</b>	mm
Νοέμβριος	<b>23.81</b>	mm
Δεκέμβριος	<b>16.20</b>	mm
Ιανουάριος	<b>19.34</b>	mm
Φεβρουάριος	<b>24.59</b>	mm
Μάρτιος	<b>43.22</b>	mm
Απρίλιος	<b>67.48</b>	mm
Μάιος	<b>99.45</b>	mm
Ιούνιος	<b>126.29</b>	mm
Ιούλιος	<b>147.04</b>	mm
Αύγουστος	<b>129.92</b>	mm
Σεπτέμβριος	<b>91.19</b>	mm

Μέση ετήσια τιμή: **839 mm**

○ **Λεκάνη 2**

Οκτώβριος	<b>48.39</b>	mm
Νοέμβριος	<b>22.87</b>	mm
Δεκέμβριος	<b>15.47</b>	mm
Ιανουάριος	<b>18.45</b>	mm
Φεβρουάριος	<b>23.55</b>	mm
Μάρτιος	<b>41.57</b>	mm
Απρίλιος	<b>65.24</b>	mm
Μάιος	<b>96.61</b>	mm
Ιούνιος	<b>122.92</b>	mm
Ιούλιος	<b>143.11</b>	mm
Αύγουστος	<b>126.33</b>	mm
Σεπτέμβριος	<b>88.47</b>	mm

Μέση ετήσια τιμή: **812 mm**

○ **Λεκάνη 3**

Οκτώβριος	<b>49.09</b>	mm
Νοέμβριος	<b>23.26</b>	mm
Δεκέμβριος	<b>15.77</b>	mm
Ιανουάριος	<b>18.82</b>	mm
Φεβρουάριος	<b>23.99</b>	mm
Μάρτιος	<b>42.26</b>	mm
Απρίλιος	<b>66.18</b>	mm
Μάιος	<b>97.81</b>	mm
Ιούνιος	<b>124.34</b>	mm
Ιούλιος	<b>144.76</b>	mm
Αύγουστος	<b>127.84</b>	mm
Σεπτέμβριος	<b>89.61</b>	mm

Μέση ετήσια τιμή: **823 mm**

○ **Λεκάνη 4**

Οκτώβριος	<b>44.02</b>	mm
Νοέμβριος	<b>20.44</b>	mm
Δεκέμβριος	<b>13.60</b>	mm
Ιανουάριος	<b>16.17</b>	mm
Φεβρουάριος	<b>20.81</b>	mm
Μάρτιος	<b>37.21</b>	mm
Απρίλιος	<b>59.21</b>	mm
Μάιος	<b>88.95</b>	mm
Ιούνιος	<b>113.85</b>	mm
Ιούλιος	<b>132.57</b>	mm
Αύγουστος	<b>116.75</b>	mm
Σεπτέμβριος	<b>81.25</b>	mm

Μέση ετήσια τιμή: **744 mm**

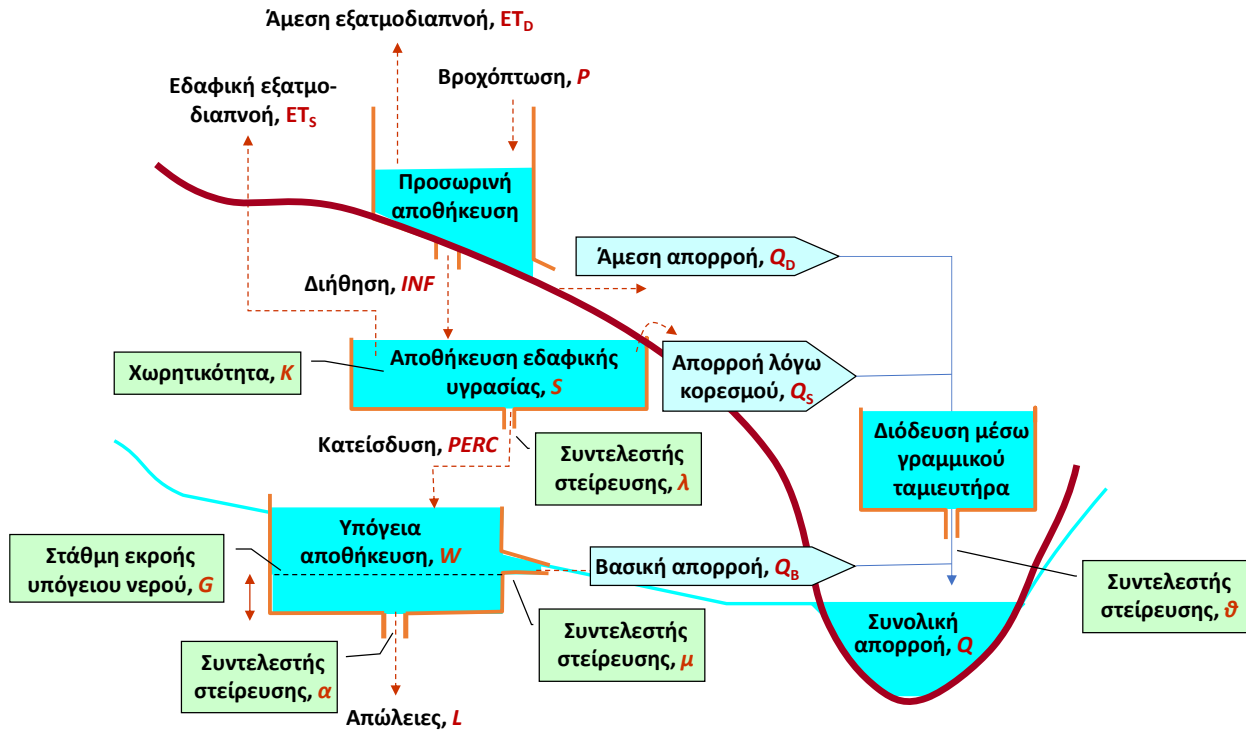
Οι ανωτέρω τιμές βρίσκονται εντός των αναμενόμενων ορίων για την συγκεκριμένη περιοχή, όπως αυτά προκύπτουν από προηγούμενες μελέτες και ευρύτερη βιβλιογραφική έρευνα, για αυτό και κρίθηκαν αποδεκτές.



## Κεφάλαιο 3: Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου

### 3.1 Περιγραφή μοντέλου υδατικού ισοζυγίου

Για τον προσδιορισμό των παροχών στην έξοδο των λεκανών απορροής χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του οποίου οι βασικές διεργασίες απεικονίζονται λεπτομερώς στο παρακάτω σχήμα.



Μοντέλο υδατικού ισοζυγίου

Δεδομένα εισόδου της προσομοίωσης είναι οι χρονοσειρές κατακρήμνισης,  $P$ , και δυνητικής εξατμοδιαπνοής,  $PET$ . Η λεκάνη χωρίζεται κατακόρυφα σε τρεις δεξαμενές, που αναπαριστούν τις διεργασίες προσωρινής αποθήκευσης νερού στο έδαφος, αποθήκευσης εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη εδαφική στρώση (ακόρεστη ζώνη) και αποθήκευσης υπόγειου νερού στον υδροφόρα. Οι όροι αποθήκευσης εκφράζονται σε μονάδες ισοδύναμου ύψους νερού (mm), ενώ οι ροές δίνονται σε μονάδες ύψους νερού ανά χρονική μονάδα,  $\Delta t$  (ημέρα). Για απλούστευση, ο δείκτης του χρονικού βήματος παραλείπεται στις εξισώσεις. Η προσπίπτουσα κατακρήμνιση αποθηκεύεται προσωρινά στην ανώτερη δεξαμενή, από την οποία υπολογίζονται οι απώλειες λόγω άμεσης εξατμισοδιαπνοής, μέσω της σχέσης:

$$ET_D = \min(PET, P) \quad (1)$$

Στη συνέχεια, γίνεται ο μετασχηματισμός της εναπομένουσας κατακρήμνισης σε άμεση (επιφανειακή) απορροή, μέσω της σχέσης:

$$Q_D = \nu (P - ET_D) \quad (2)$$

Η ποσότητα (ποσοστό)  $\nu$  δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από τις τρέχουσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας, και εκτιμάται με βάση τη σχέση της Soil Conservation Service, :

$$v = \frac{P - ET_D}{P - ET_D + K - S} \quad (3)$$

όπου ο όρος  $K - S$  εκφράζει την ποσότητα νερού που μπορεί να συγκρατήσει η ακόρεστη ζώνη. Η ζώνη αυτή αναπαρίσταται μέσω της ενδιάμεσης δεξαμενής, η χωρητικότητα της οποίας είναι ίση με  $K$ , ενώ το τρέχον απόθεμά της είναι ίσο με  $S$ . Η χωρητικότητα  $K$  είναι παράμετρος του μοντέλου, ενώ η ποσότητα  $S$  είναι μεταβλητή κατάσταση του μοντέλου. Ο υπολογισμός του  $S$  επαναλαμβάνεται συνεχώς μετά το τέλος κάθε διεργασίας (εισροής ή εκροής) που γίνεται στην ενδιάμεση δεξαμενή, καθώς επηρεάζεται από αυτές.

Η ποσότητα που διηθείται στο έδαφος, δίνεται από τη σχέση:

$$INF = P - Q_D - ET_D \quad (4)$$

Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται τριών ειδών εκροές από την ενδιάμεση δεξαμενή, ήτοι η εδαφική εξατμοδιαπνοή, η κατείσδυση προς την κατώτερη δεξαμενή και η υπερχειλίση λόγω κορεσμού του εδάφους.

Οι απώλειες λόγω εδαφικής εξατμισοδιαπνοής εξαρτώνται από το ποσοστό πλήρωσης της δεξαμενής και εκτιμώνται από την εμπειρική σχέση:

$$ET_S = \frac{S \left(2 - \frac{S}{K}\right) \tanh\left(\frac{PET - ET_D}{K}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{K}\right) \tanh\left(\frac{PET - ET_D}{K}\right)} \quad (5)$$

όπου  $S/K$  ο λόγος πλήρωσης της δεξαμενής, και  $PET - ET_D$  η εναπομένουσα ζήτηση για παραγωγή εξατμοδιαπνοής.

Συνεπώς, οι συνολικές απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής είναι:

$$ET = ET_D + ET_S \quad (6)$$

Η ποσότητα που κατείσδύει προς τον υδροφορέα (κατώτερη δεξαμενή) εκτιμάται ως ποσοστό της αποθηκευμένης υγρασίας, από την εξίσωση:

$$PERC = \lambda S \quad (7)$$

όπου  $\lambda$  συντελεστής στείρευσης, που είναι παράμετρος του μοντέλου.

Η ποσότητα που υπερχειλίζει, είναι:

$$Q_S = \max(0, S - K) \quad (8)$$

αναφέρεται ως απορροή λόγω κορεσμού, και μαζί με την άμεση απορροή αποτελούν την επιφανειακή απορροή.

Το τελικό ισοζύγιο της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας (ενδιάμεση) γράφεται:

$$\Delta S = INF - ET_S - PERC - Q_S \quad (9)$$

Η κατείδυση από την άνω δεξαμενή τροφοδοτεί την κάτω δεξαμενή, αυξάνοντας το αρχικό ης απόθεμα σε:

$$W = W_0 + PERC \quad (10)$$

Ο υπολογισμός του  $W$  επαναλαμβάνεται συνεχώς μετά το τέλος κάθε διεργασίας (εισορής ή εκροής) που γίνεται στην υπόγεια δεξαμενή, καθώς επηρεάζεται από αυτές.

Στην υπόγεια δεξαμενή, που δεν έχει όριο χωρητικότητας, εκτελούνται οι διεργασίες του υδροφορέα (κορεσμένη ζώνη). Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται δύο εκροές, μία οριζόντια και μία κατακόρυφη. Η πρώτη αναπαριστά την πηγαία (βασική) απορροή, με την μορφή εκροής από μια οριζόντια οπή, μέσω της σχέσης:

$$Q_B = \max[0, \mu (W - G)] \quad (11)$$

όπου  $G$  το ύψος νερού για την παραγωγή υπόγειας απορροής και  $\mu$  συντελεστής στέρειυσης, που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου.

Η δεύτερη (κατακόρυφη) εκροή αναπαριστά τις συνολικές απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών, που διοχετεύονται σε κατάντη υδροφόρα στρώματα, και εκτιμώνται από τη σχέση:

$$L = \alpha W \quad (12)$$

όπου  $\alpha$  συντελεστής στέρειυσης, που είναι παράμετρος του μοντέλου.

Το τελικό ισοζύγιο της δεξαμενής υπόγειου νερού γράφεται:

$$\Delta W = PERC - Q_B - L \quad (13)$$

Επειδή η υδρολογική προσομοίωση γίνεται σε λεπτότερη χρονική κλίμακα ( ημερήσια), η συνιστώσα της επιφανειακής απορροής, δηλαδή η ποσότητα  $Q_D + Q_S$ , η οποία παράγεται στην επιφάνεια της λεκάνης, φτάνει στην έξοδο με χρονική υστέρηση και εξομάλυνση, λόγω των διεργασιών διόδευσης. Οι διεργασίες της διόδευσης περιγράφονται μέσω ενός μοντέλου γραμμικού ταμιευτήρα, εισάγοντας μια αδιάστατη παράμετρο στέρειυσης  $\theta$ . Όσο μικρότερη είναι η τιμή του, τόσο μεγαλύτερη εξομάλυνση επιτυγχάνεται.

Συνοψίζοντας, το υδρολογικό μοντέλο έχει έξι παραμέτρους. Συγκεκριμένα:

- η χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας (ενδιάμεση) ,  $K$ , που εκφράζει την αποθηκευτική ικανότητα της ακόρεστης ζώνης του εδάφους.
- ο συντελεστής στέρειυσης για παραγωγή κατείδυσης,  $\lambda$ , που εκφράζει το ποσοστό του νερού που διακινείται από τη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας προς τη δεξαμενή υπόγειου νερού, δηλαδή το νερό που ρέει από την ακόρεστη προς την κορεσμένη ζώνη του εδάφους (κατείδυση).
- ο συντελεστής στέρειυσης για παραγωγή βασικής απορροής,  $\mu$ , που εκφράζει το ποσοστό του υπόγειου νερού πάνω από το κατώφλι  $G$ , το οποίο εκφορτίζεται μέσω του υπόγειου υδροφορέα στο ποτάμι.



- το κατώφλι παραγωγής πηγαίας απορροής,  $G$ , που εκφράζει την ποσότητα υπόγειου νερού που πρέπει να έχει αποθηκευτεί προκειμένου να παραχθεί βασική απορροή, μέσω της εκφόρτισης πηγών.
- ο συντελεστής στείρευσης για παραγωγή υπόγειων διαφυγών,  $\alpha$ , που εκφράζει το ποσοστό του υπόγειου νερού που απορρέει ως βασική απορροή στο υδρογραφικό δίκτυο.
- ο συντελεστής στείρευσης,  $\theta$ , του μοντέλου διόδευσης, που ελέγχει την εξομάλυνση της επιφανειακής απορροής κατά τη μεταφορά της διαμέσου της επιφάνειας του εδάφους και του υδρογραφικού δικτύου έως την έξοδο της λεκάνης.

Οι παράμετροι χωρητικότητας,  $K$  και  $G$ , εκφράζονται σε μονάδες ισοδύναμου ύψους νερού (mm), ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι (συντελεστές στείρευσης) είναι αδιάστατοι.

Εκτός των έξι παραμέτρων, το μοντέλο χρησιμοποιεί και δύο αρχικές συνθήκες που είναι αναγκαίες για την επίλυση της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου στο πρώτο χρονικό βήμα, ήτοι την στάθμη νερού στις δεξαμενές της ακόρεστη και κορεσμένης ζώνης. Επειδή η προσομοίωση ξεκινά στην αρχή της υδρολογικής περιόδου (τέλη Σεπτεμβρίου), αυτές θεωρήθηκαν ίσες με  $S_0 = 0$  και  $W_0 = G$ .

### 3.2 Βαθμονόμηση μοντέλου - Εκτίμηση παραμέτρων

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων του μοντέλου έγινε μέσω βαθμονόμησης, βάση πραγματικών μετρήσεων κατακρήμνισης, δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και απορροής. Συγκεκριμένα, για τις λεκάνες 1,3 και 4 χρησιμοποιήθηκαν οι ημερήσιες μετρήσεις από το φράγμα στο Πουρνάρι για το χρονικό διάστημα 30/9/1981 – 31/12/2000, ενώ για τη λεκάνη 2 οι ημερήσιες μετρήσεις από το φράγμα της Μεσοχώρας από 30/9/1980 – 31/12/2000. Ως μέτρο αξιολόγησης της βαθμονόμησης του μοντέλου ορίστηκε η αποτελεσματικότητα (efficiency), που στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως δείκτης NSE (Nash-Sutcliffe efficiency). Η τιμή του εκτιμάται μέσω της σχέσης:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - \mu_{obs})^2} \quad (14)$$

όπου  $n$  το μήκος του δείγματος παρατηρήσεων,  $\mu_{obs}$  η μέση τιμή των παρατηρημένων παροχών,  $Q_{obs,t}$  οι παροχές από μετρήσεις και  $Q_{sim,t}$  οι παροχές που προέκυψαν από την επίλυση του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου. Η τιμή του NSE κυμαίνεται από  $-\infty$  έως 1, όπου η μονάδα υποδηλώνει τέλεια προσαρμογή. Η διαδικασία της βαθμονόμησης επιλύθηκε μέσω του excel ως ένα πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης με σκοπό τη μεγιστοποίηση του δείκτη NSE. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης των μοντέλων για Πουρνάρι και Μεσοχώρα.

### 3.3 Αποτελέσματα μοντέλου

K	264.39	mm
$\lambda$	0.024	
$\mu$	0.011	
G	86.49	mm
$\alpha$	0.006	
$\theta$	0.534	

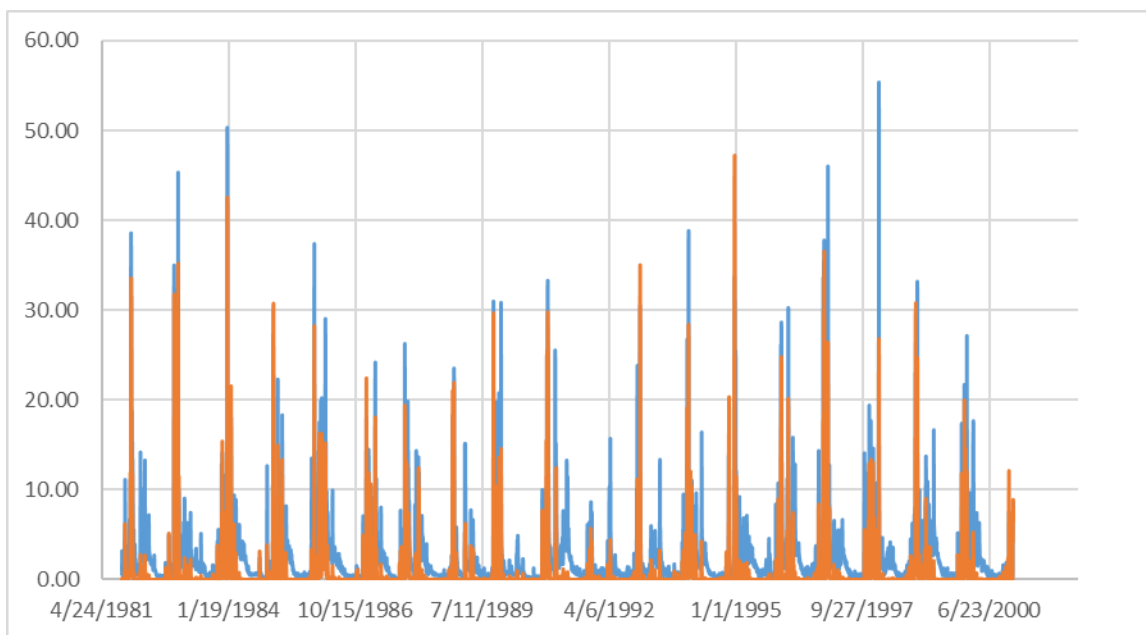
*Αποτελέσματα μοντέλου υδατικού ισοζυγίου με NSE = 0.80 για τη λεκάνη του Πουρναρίου*

Κ	358.15	mm
λ	0.054	
μ	0.007	
G	121.22	mm
α	0.009	
θ	0.621	

*Αποτελέσματα μοντέλου υδατικού ισοζυγίου με NSE = 0.80 για τη λεκάνη της Μεσοχώρας*

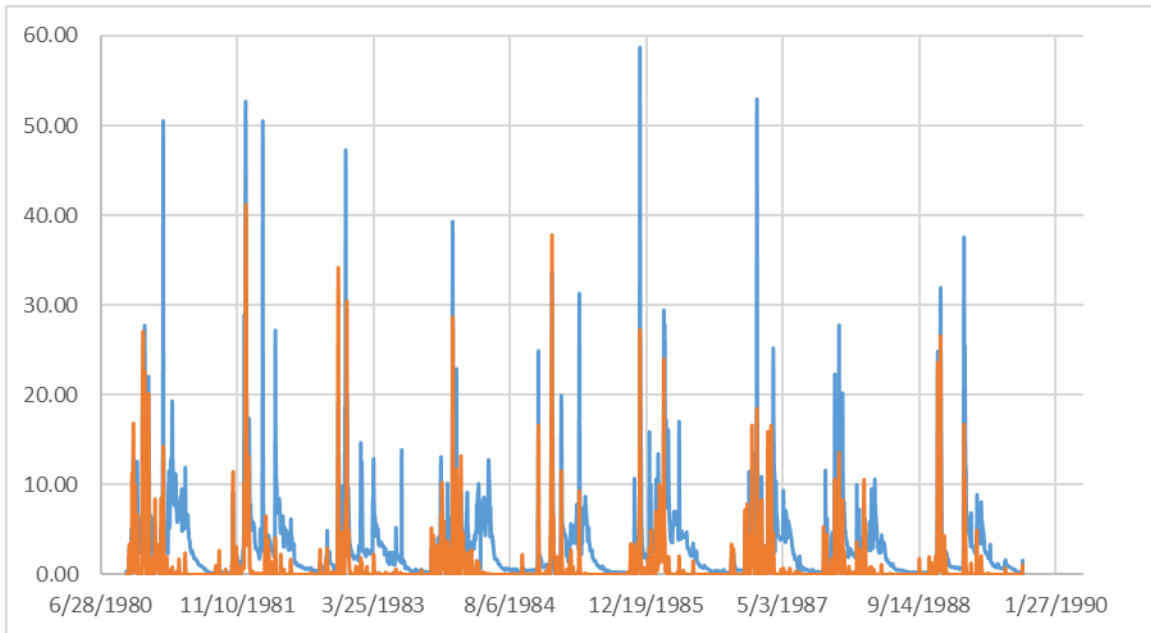
Οι τιμές των παραμέτρων είναι λογικές και αντίστοιχα οι δείκτες NSE είναι ικανοποιητικοί με αποτέλεσμα να έχουμε μια αρκετά καλή προσαρμογή του μοντέλου. Αυτό φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα, τα οποία συγκρίνουν τις τιμές παροχών που προέκυψαν από το μοντέλο με τις πραγματικές μετρήσεις.

### Πουρνάρι



*Διάγραμμα μοντέλου Πουρναρίου*

## Μεσοχώρα

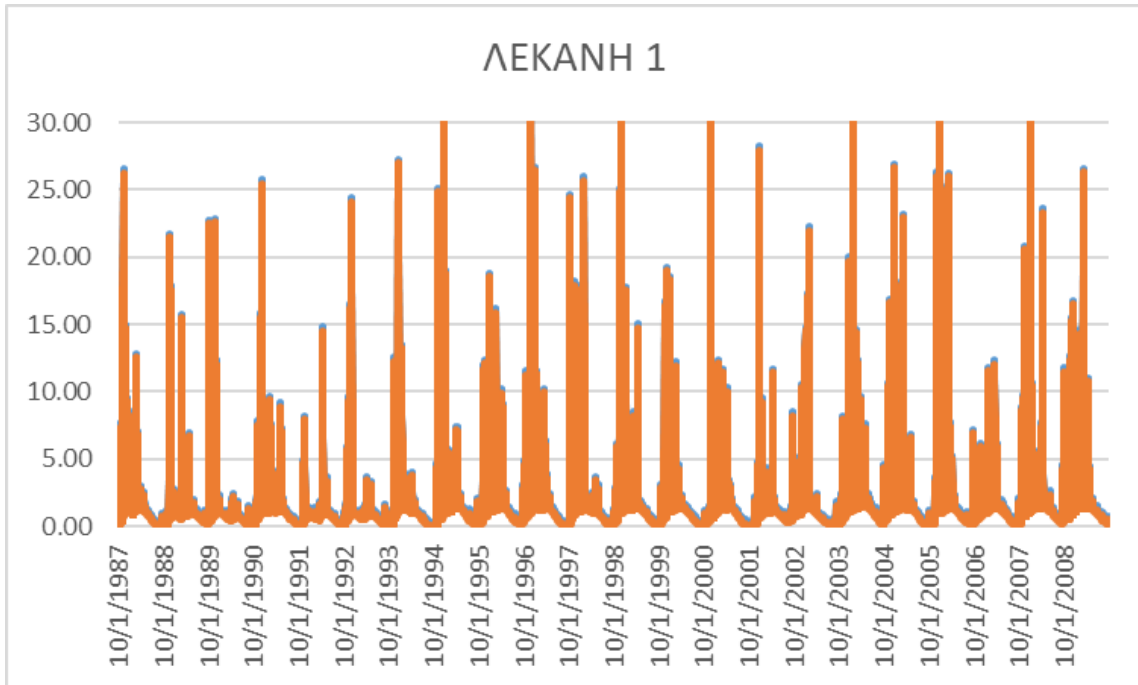


Διάγραμμα μοντέλου Μεσοχώρας

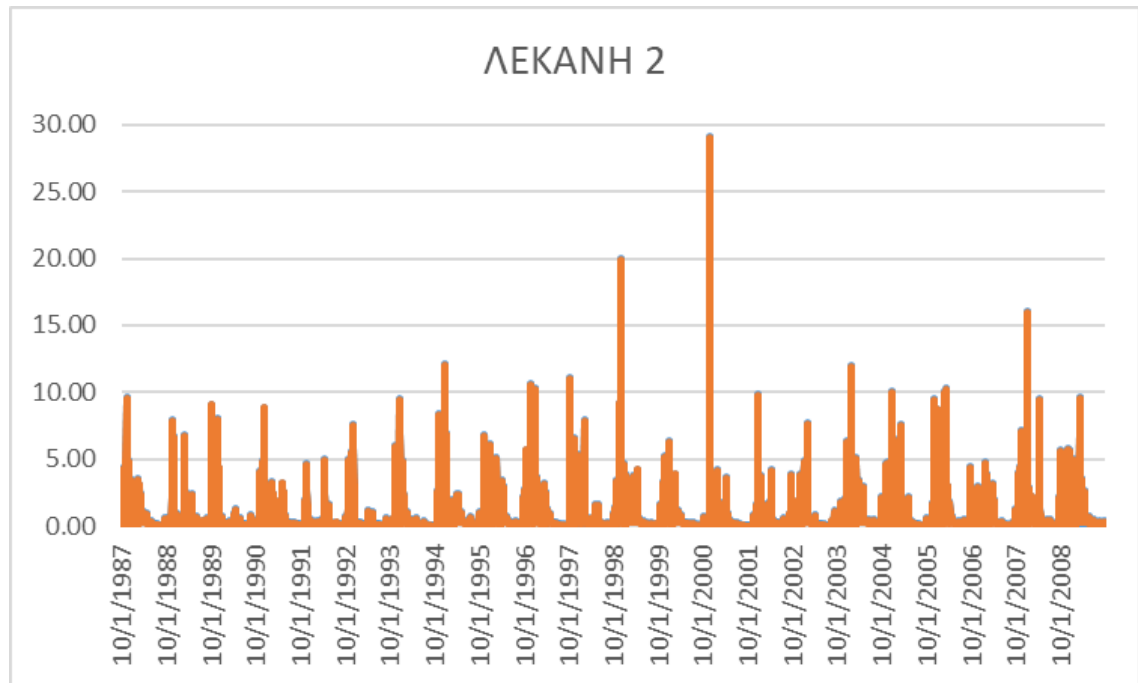
### 3.4 Υπολογισμός ημερησίων παροχών των λεκανών με τα βαθμονομημένα μοντέλα

Πρόέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τις 4 λεκάνες αφού έγινε ο υπολογισμός της απορροής από τα βροχομετρικά δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για κάθε μία (σε  $m^3/s$ ). Οι ημερήσιες αυτές χρονοσειρές παροχών αξιοποιήθηκαν έπειτα για τον σχεδιασμό του ΜΥΗΕ. Σημείωση: Με μπλε φαίνεται η πραγματική παροχή και με πορτοκαλί η εκμεταλλεύσιμη (χωρίς την οικολογική).

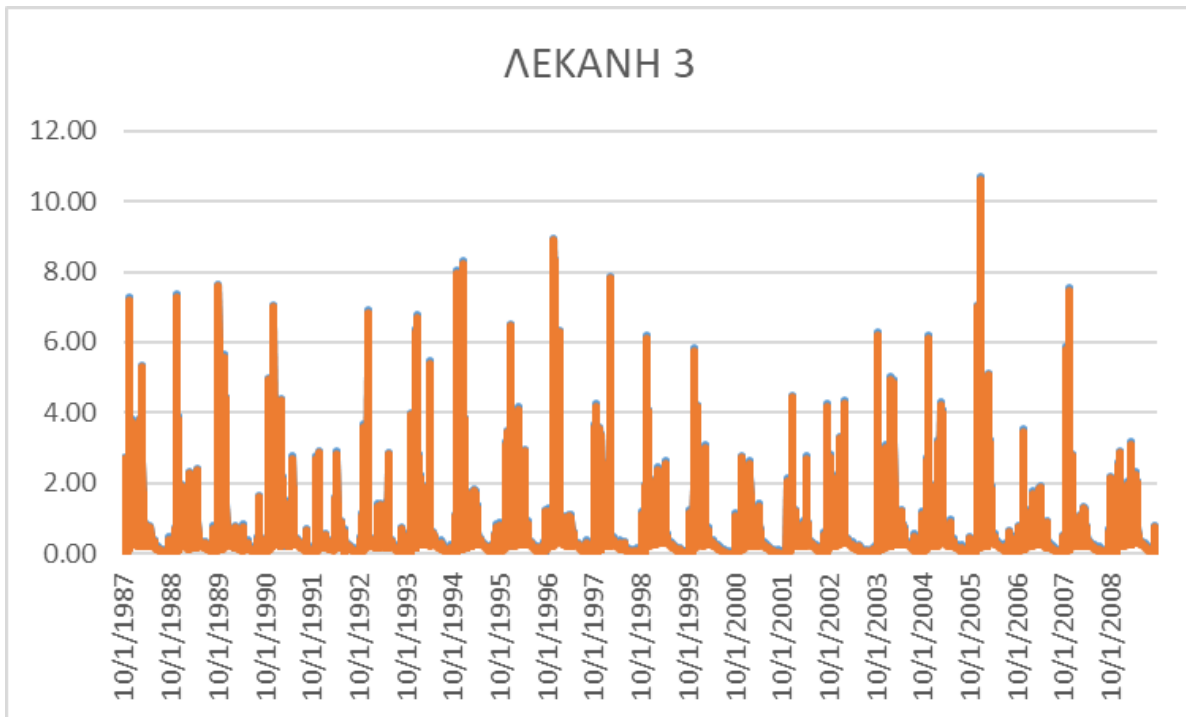




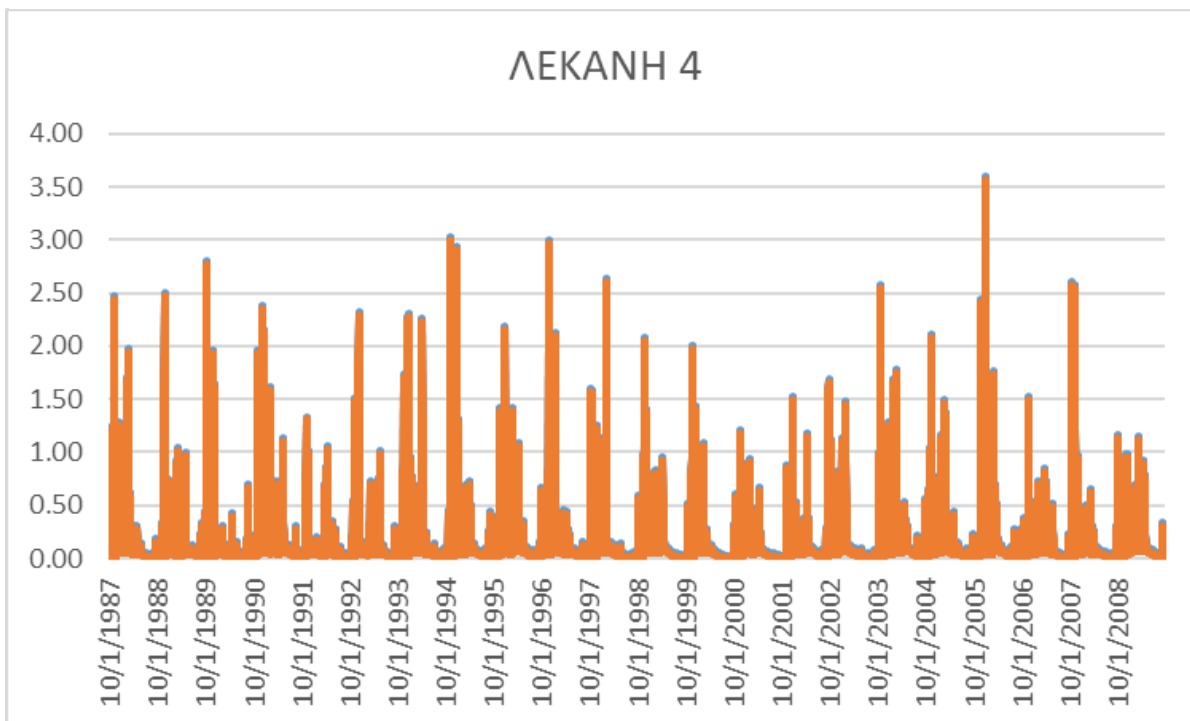
*Ημερήσιες παροχές λεκάνης 1*



*Ημερήσιες παροχές λεκάνης 2*



*Ημερήσιες παροχές λεκάνης 3*



*Ημερήσιες παροχές λεκάνης 4*

## Κεφάλαιο 4: Επιλογή θέσης - Μίγμα στροβίλων

### 4.1 Επιλογή λεκάνης για την κατασκευή του έργου

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, φαίνεται πως η καταλληλότερη λεκάνη για την κατασκευή του ΜΥΗΕ είναι η Λεκάνη 1, καθώς παρά το μικρό ύψος πτώσης (27 m) καταφέρνει να προσφέρει αρκετά μεγαλύτερες παροχές από τις άλλες λεκάνες, καθώς και μία σχετική βασική παροχή. Αφού επιλέγεται η λεκάνη 1 πρέπει να βρεθεί ένα μίγμα στροβίλων προκειμένου να γίνει η βέλτιστη εκμετάλλευση της κατανομής που των παροχών που φαίνεται παραπάνω.

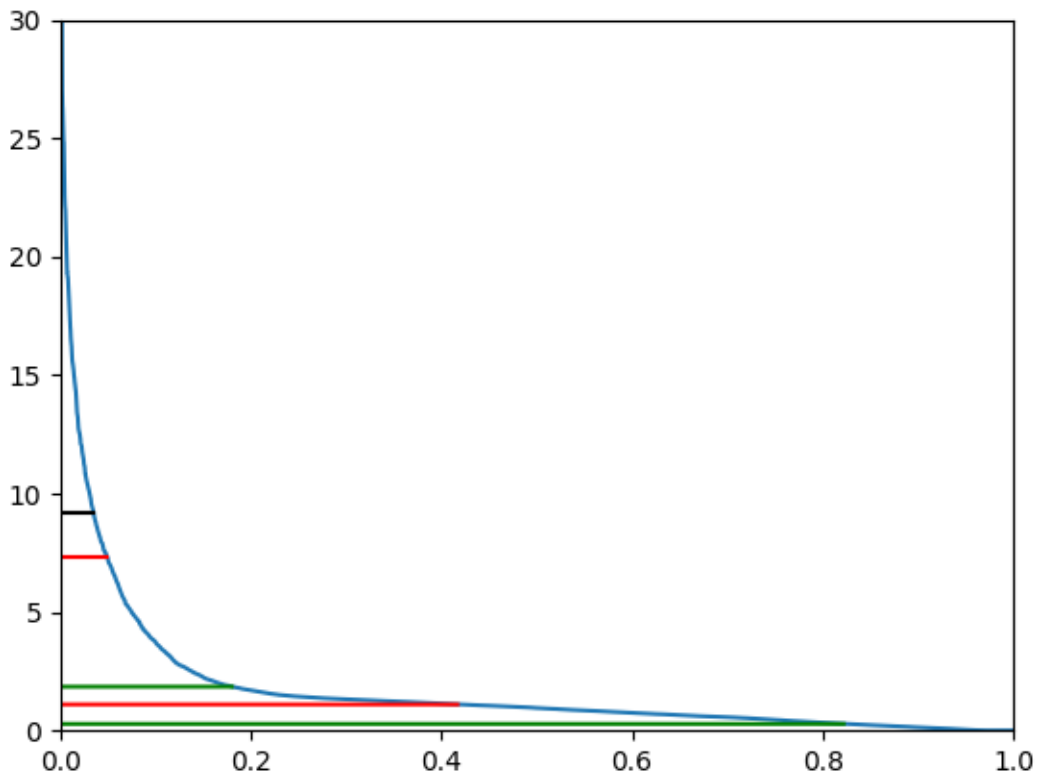
### 4.2 Βελτιστοποίηση μίγματος στροβίλων

Η βελτιστοποίηση του μίγματος στροβίλων επιλέχθηκε να γίνει μέσω της βιβλιοθήκης scipy της γλώσσας προγραμματισμού Python. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν ο μεταερευτικός αλγόριθμος Dual (Simulated) Annealing καθώς και ο εξελικτικός αλγόριθμος differential\_evolution και τελικά επιλέχθηκε η βέλτιστη λύση μεταξύ των δύο. Επίσης, θεωρήθηκε πως είναι δυνατό να υπάρχει «επιλογή» της σειράς των στροβίλων μέσα από τις οποίες θα διέρχεται η κάθε παροχή προκειμένου να μεγιστοποιείται η παραγωγή ενέργειας. Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης λήφθηκαν υπόψη και οι απώλειες του αγωγού πτώσης, ο οποίος επιλέχθηκε να έχει διάμετρο  $d = 1.8$  m και μήκος περίπου 785.6 m. Στόχος της βελτιστοποίησης ήταν η επίτευξη της μέγιστης καθαρής παρούσας αξίας του έργου για τα 22 υδρολογικά έτη για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα, με τη διατήρηση ταυτόχρονα ενός αξιοπρεπούς συντελεστή δυναμικότητας. Σημειώνεται πως η τιμή πώλησης της MWh λήφθηκε ίση με 90 € αν το έργο είχε συνολική ισχύ μικρότερη ή ίση των 3 MW και 87 € σε περίπτωση που είχε μεγαλύτερη, όπως άλλωστε ορίζεται και από την Ελληνική νομοθεσία. Για τον υπολογισμό του κόστους των στροβίλων χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι των Aggidis et al.:  $CAPEX = 1.64 \times 122000 \times \left(\frac{P}{\sqrt{H}}\right)^{0.07} \text{ €}$  ( $q_{max} < 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) και  $CAPEX = 1.64 \times 223000 \times \left(\frac{P}{\sqrt{H}}\right)^{0.11} \text{ €}$ , με το 1.64 να είναι διορθωτικός συντελεστής για τον πληθωρισμό αλλά και για μετατροπή από αγγλικές λύρες σε ευρώ. Προέκυψαν 2 βέλτιστες λύσεις, μία για μίγμα 2 στροβίλων καθώς και άλλη μία για μίγμα 3 στροβίλων. Και οι δύο λύσεις που προέκυψαν έχουν σχετικά χαμηλό συντελεστή δυναμικότητας CF, κάτι που είναι λογικό, δεδομένου πως υπάρχουν κυρίως πλημμυρικές παροχές στη λεκάνη. Όσον αφορά τις πολύ μεγάλες πλημμυρικές παροχές, θεωρήθηκε πως η μέγιστη παροχή κάθε έτους δε διέρχεται από τους στροβίλους αλλά προσπερνά πλήρως την εγκατάσταση, χωρίς να αξιοποιείται κανένα μέρος της για παραγωγή ενέργειας.

Οι λύσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

#### Λύση 1 (δύο στροβίλοι):

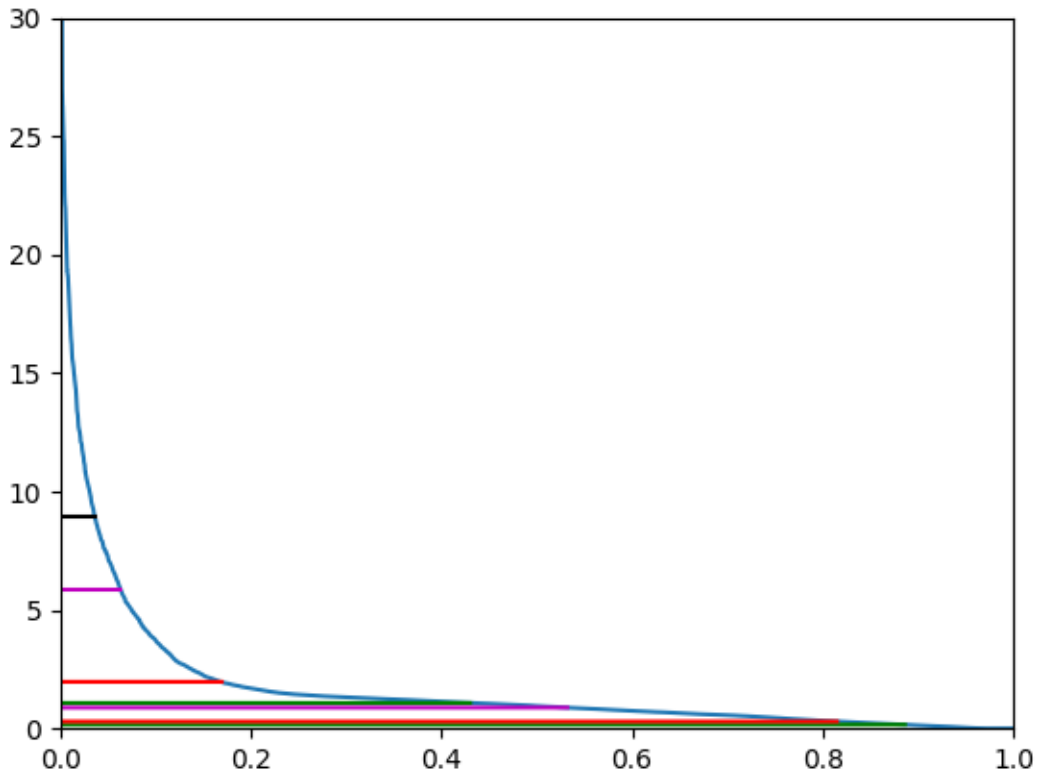
Επιλέγονται δύο στροβίλοι Francis με ισχύ 1805 kW και 455 kW, με συνολική ισχύ 2.26 MW και κόστος κεφαλαίου περίπου 970.000€. Μετά το πέρας των 22 υδρολογικών ετών για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα προκύπτει Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) για όλο το έργο ίση με -2.327.419 € και συντελεστή δυναμικότητας CF ~ 14.1%. Η ελάχιστη παροχή λειτουργίας είναι τα  $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$  και η μέγιστη παροχή τα  $9.17 \text{ m}^3/\text{s}$ . Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη παροχής διάρκειας αυτού του μίγματος στροβίλων.



Διάγραμμα διάρκειας – παροχής λύσης 1

### Λύση 2 (τρεις στρόβιλοι):

Επιλέγονται τρεις στρόβιλοι Francis με ισχύ 1445 kW, 485 kW και 265 kW, με συνολική ισχύ 2.195 MW και κόστος κεφαλαίου περίπου 1.217.500€. Μετά το πέρας των 22 υδρολογικών ετών για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα προκύπτει Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) για όλο το έργο ίση με - 2.424.556 € και συντελεστής δυναμικότητας CF ~ 15.3%. Η ελάχιστη παροχή λειτουργίας είναι τα 0.16  $m^3/s$  και η μέγιστη παροχή τα 8.91  $m^3/s$ . Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη παροχής διάρκειας αυτού του μίγματος στρόβιλων.



Διάγραμμα διάρκειας – παροχής λύσης 2

Η τελική οικονομική ανάλυση του έργου επιλέγεται να γίνει με το πρώτο μίγμα στρόβιλων (δύο στρόβιλοι), για τους οποίους προκύπτει και το καλύτερο οικονομικό αποτέλεσμα, παρά τον λίγο χειρότερο συντελεστή δυναμικότητας CF. Σε κάθε περίπτωση, φαίνεται πως η κατανομή των παροχών καθιστά αρκετά δύσκολη την αξιοποίησή τους, σε συνδυασμό πάντα με τους περιβαλλοντικούς νόμους που διέπουν τον σχεδιασμό των ΜΥΗΕ στην Ελλάδα. Συνεπώς, η μέση ετήσια ενέργεια που παράγεται είναι ίση με περίπου **2.8 GWh**, αναλογικά μικρή για ένα τέτοιο έργο.



## Κεφάλαιο 5: Στοιχεία κόστους του έργου

Η οικονομική ανάλυση του έργου συνοψίζεται στους παρακάτω πίνακες αρχικού κόστους, ετήσιου κόστους λειτουργίας και χρηματοοικονομικών στοιχείων.

### 5.1 Αρχικό κόστος του έργου

#### Το αρχικό κόστος του έργου

	Ποσό (€)	Σχετικό Κόστος (%)
<b>Αρχικό Κόστος</b>		<b>9%</b>
Μελέτη Σκοπιμότητας	360,000.00 €	7%
Ανάπτυξη	-	-
Μηχανολογικά	75,000.00 €	2%
<b>Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας</b>		<b>32%</b>
Υδροστρόβιλος	970,000.00 €	20%
Έργα οδοποιίας	55,000.00 €	1%
Γραμμή μεταφοράς ηλεκτρισμού	130,000.00 €	3%
Υποσταθμός	410,000.00 €	8%
<b>Ισοζύγιο συστήματος</b>		<b>18%</b>
Αγωγός Πτώσης	900,000.00 €	18%
<b>Άλλο</b>		<b>41%</b>
Άλλο	2,000,000.00 €	41%
<b>Συνολικά Αρχικά Κόστη</b>	<b>4,900,000.00 €</b>	<b>100%</b>

### 5.2 Ετήσιο κόστος του έργου

#### Τα ετήσια κόστη του έργου

	Ποσό (€)	Σχετικό Κόστος (%)
<b>Κόστος Λειτουργίας &amp; Συντήρησης ΜΥΗΣ</b>		<b>6,75%</b>
Ετήσιο Κόστος Αμοιβών	15.000,00 €	-
Συντελεστής Συντήρησης Η/Μ	-	2%
Συντελεστής Συντήρησης έργων Πολιτικού Μηχανικού	-	0,5%
Συντελεστής κόστους ασφάλισης Η/Μ	-	0,625%
Συντελεστής κόστους ασφάλισης έργων Πολιτικού Μηχανικού	-	0,625%
Γραμμή μεταφοράς ηλεκτρισμού (χρήση)	-	3%
<b>Τέλη &amp; Δημοτικοί Φόροι</b>		<b>3%</b>
Τέλη & Δημοτικοί Φόροι	-	3%
<b>Συνολικά Αρχικά Κόστη</b>	<b>15.000,00 €</b>	<b>0%</b>

Τα ετήσια κόστη του έργου, εκτός από τις αμοιβές προσωπικού, υπολογίζονται ως ποσοστό του ετήσιου κύκλου εργασιών.

### 5.3 Χρηματοοικονομικά στοιχεία

Τα χρηματοοικονομικά στοιχεία προέκυψαν στην βελτιστοποίηση επιλογής μείγματος στροβίλων και είναι τα παρακάτω:

<b>Χρηματοοικονομικά Στοιχεία</b>	
Επιτόκιο	6%
Απλός Συντελεστής Απόδοσης Κεφαλαίου (S.R.R.)	-47%
Καθαρή Παρούσα Αξία (N.P.V.) στα 22 έτη	-2,424,556. €

Με βάση την οικονομική ανάλυση, σε πρώτη φάση φαίνεται πως η κατασκευή του ΜΥΗΕ δε συμφέρει. Αυτό οφείλεται αρχικά στη φύση χειμάρρου που έχει το ρέμα που θα αξιοποιούταν από το ΜΥΗΕ. Σημαντικό ρόλο παίζει και η θέση που επιλέχθηκε για το έργο, προκειμένου να τηρούνται οι απαραίτητες αποστάσεις από άλλα έργα που ορίζονται από τον νόμο. Τέλος, περιοριστικό παράγοντα αποτέλεσε και η απαίτηση της Ελληνικής νομοθεσίας για αξιοποίηση του 75% της παροχής ενός ΜΥΗΕ που διέρχεται από την υδροληψία του, που συνέργησε με τις μεγάλες πλημμυρικές παροχές και τη μικρή βασική παροχή προκειμένου να προκύψει ένα οικονομικά μη βιώσιμο έργο. Αν ληφθεί υπόψιν πως ένα τέτοιο έργο μπορεί να λειτουργήσει για περιόδους μεγαλύτερες των 22 ετών όπως υπολογίστηκε παραπάνω, χωρίς ιδιαίτερα επιπλέον κόστη, είναι δυνατό η επένδυση τελικά να αποφέρει όφελος.

## Κεφάλαιο 6: Τοπογραφικά διαγράμματα

### Συνολικό Έργο



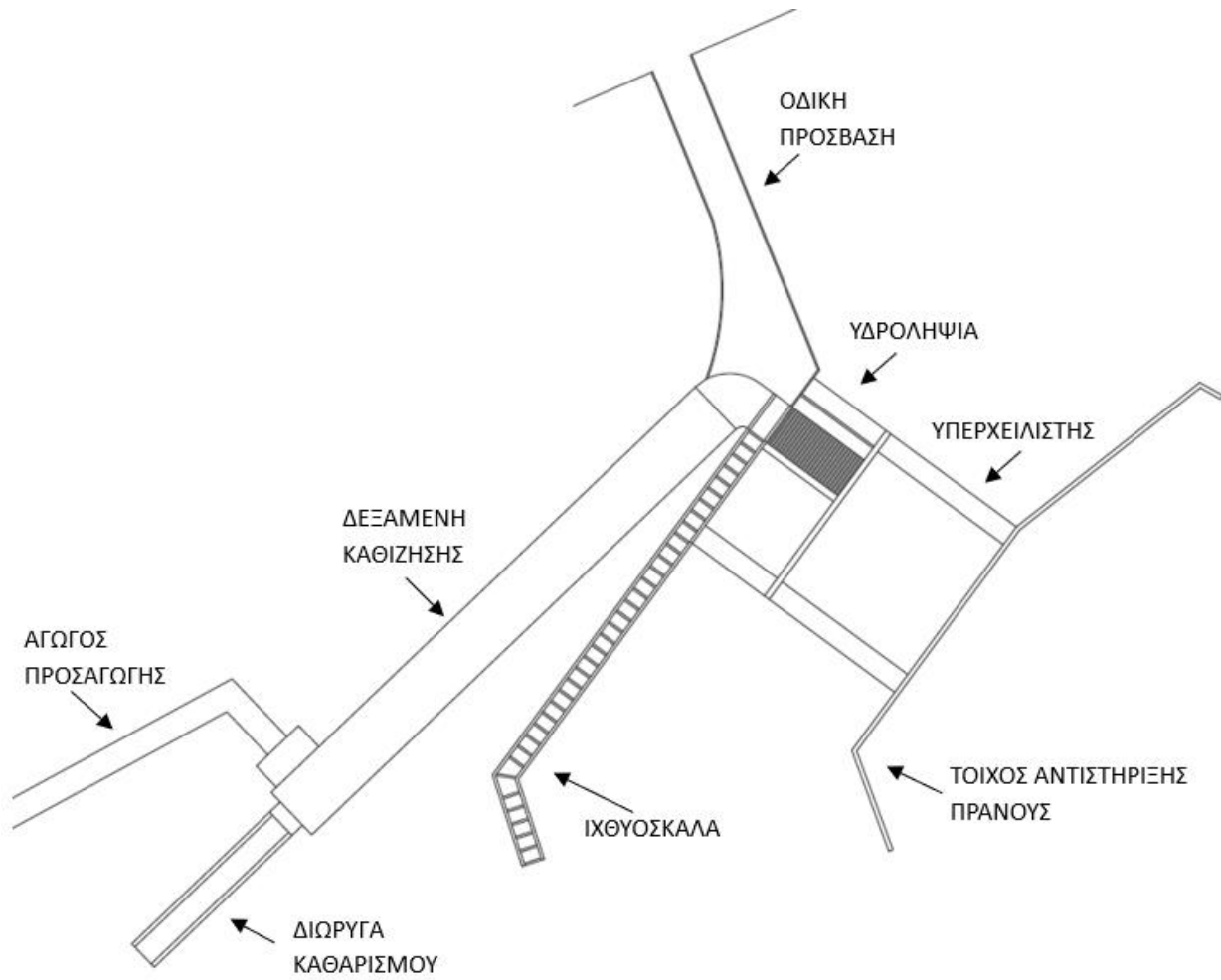
### Υδροληψία



Σταθμός παραγωγής

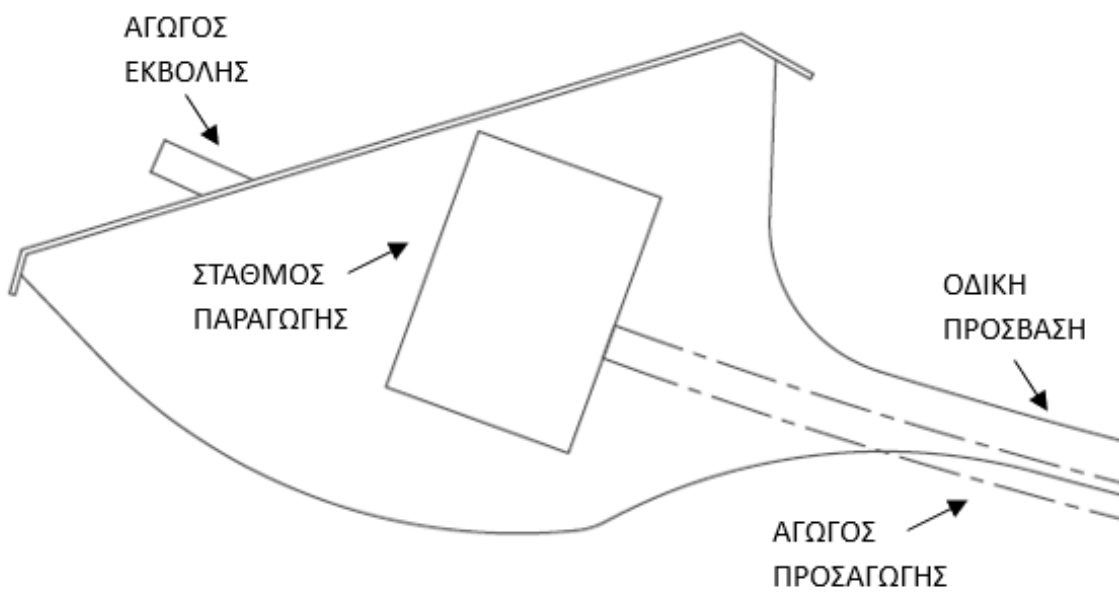


*Κάτοψη διάταξης υδροληψίας*





*Κάτοψη διάταξης σταθμού παραγωγής*



## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Ο Δήμος Κεντρικών Τζουμέρκων συγκαταλέγεται στις υδρολογικά πιο πλούσιες περιοχές της Ελλάδας, δεδομένων των ιδιαίτερα υψηλών ετήσιων υψών βροχής που καταγράφει. Αυτό γίνεται εμφανές, μεταξύ άλλων, και από το μεγάλο πλήθος ΜΥΗΕ που έχουν ήδη κατασκευαστεί και είναι σε λειτουργία. Τα τελευταία χρόνια η περιβαλλοντική νομοθεσία που διέπει την λειτουργία των ΜΥΗΕ έχει γίνει πιο αυστηρή, ειδικότερα όσον αφορά το ελάχιστο επιτρεπόμενο ποσοστό του εκτρεπόμενου νερού που τελικά χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας (75%).

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της περιοχής και η εύρεση πιθανών θέσεων κατάλληλων από όλες τις πλευρές (υδρολογική, νομοθετική, ενεργειακή, οικονομική, τεχνική) για την ανάπτυξη νέων ΜΥΗΕ. Μέσω ανάλυσης με τη χρήση των λογισμικών Google Earth και GIS, καταλήξαμε σε τέσσερις υποψήφιες θέσεις, οι οποίες ικανοποιούσαν τα βασικά υδρολογικά και νομοθετικά κριτήρια (ικανό υδροηλεκτρικό δυναμικό, ελάχιστη απόσταση από άλλα ΜΥΗΕ, εκτός προστατευόμενων περιοχών Natura).

Τελικά, προκρίθηκε από τις τέσσερις υποψήφιες θέσεις, η πρώτη, λόγω της σημαντικά μεγαλύτερης λεκάνης απορροής της, η οποία οδηγούσε σε μεγαλύτερες και πιο σταθερές παροχές συγκριτικά με τις υπόλοιπες θέσεις. Παρά το γεγονός ότι το ύψος πτώσης ΔΗ της συγκεκριμένης θέσης είναι μικρότερο από αυτό των άλλων, ο σταθερός χαρακτήρας της παροχής κατέχει μεγαλύτερη βαρύτητα στον σχεδιασμό των ΜΥΗΕ, ειδικά σε μια περιοχή όπως τα Κεντρικά Τζουμέρκα, όπου παρουσιάζονται κυρίως πλημμυρικές παροχές κατά τη διάρκεια του έτους. Πέραν αυτού, η πρώτη θέση αποτελεί με διαφορά την πιο βιώσιμη κατασκευαστικά επιλογή, δεδομένου ότι βρίσκεται πλησίον ήδη υπάρχοντος δρόμου.

Μετά την επιλογή του βέλτιστου μίγματος στροβίλων για τη θέση 1 προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό οικονομικό αποτέλεσμα και έχοντας υπόψη έναν ικανοποιητικό συντελεστή δυναμικότητας CF, με βάση την οικονομική ανάλυση του έργου καταλήξαμε στο συμπέρασμα πως ούτε η πρώτη θέση είναι βιώσιμη για ανάπτυξη ΜΥΗΕ. Για τα 22 χρόνια για τα οποία ήταν διαθέσιμα τα υδρολογικά δεδομένα και βάση εκτιμήσεων για τα κόστη προέκυψε ζημία ύψους σχεδόν 50% του αρχικού κεφαλαίου που επενδύθηκε.

Παρόλο το μεγάλο ύψος της ζημίας, λεπτομερέστερη οικονομική ανάλυση πιθανώς θα μειώσει τα κόστη, ειδικά στην συγκεκριμένη ανάλυση, όπου τα απροσδιόριστα κόστη καταλαμβάνουν περίπου το 40% του ύψους της αρχικής επένδυσης. Η διάρκεια ζωής του έργου θεωρείται 22 χρόνια, το οποίο όμως είναι αρκετά συντηρητικό καθώς το ΜΥΗΕ μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία του και μετά το πέρας αυτών των ετών χωρίς επιπλέον επενδύσεις στα έργα υποδομής του. Στο πέρας των 22 ετών θα πρέπει να αντικατασταθεί ο Η/Μ εξοπλισμός και για μια μακροπρόθεσμη ανάλυση πέραν των ετών που υπάρχουν τα υδρολογικά δεδομένα θα χρειαστούν στοχαστικά μοντέλα. Ακόμα, ο προσδιορισμός των επιτοκίων και του πληθωρισμού παίζει καθοριστικό ρόλο και η επενδυτική απόφαση λαμβάνεται κυρίως με τις εναλλακτικές που υπάρχουν στην αγορά. Το συγκεκριμένο έργο εμπίπτει στην κατηγορία ενεργειακών έργων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έργα τα οποία προωθούνται και συνήθως επιδοτούνται, επομένως πρέπει να διερευνηθεί και αυτή η επιλογή. Η τιμή πώλησης της ενέργειας ακόμα καθορίζει την βιωσιμότητα του έργου. Η συγκεκριμένη μελέτη έγινε με σταθερές τιμές πώλησης ενέργειας σε ΜΗΥΕ, αλλά οι εξελίξεις στον ενεργειακό τομέα είναι ραγδαίες και τα ΜΥΗΕ προτείνεται να

συμμετάσχουν στο χρηματιστήριο ενέργειας, επομένως θα πρέπει να ληφθεί άλλο μοντέλο υπολογισμού κερδών.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι το συγκεκριμένο έργο σε πρώτη φάση, αυτή την περίοδο δεν προσφέρεται ως ελκυστική επένδυση. Παρόλα αυτά με περεταίρω διερεύνηση και σε κατάλληλη χρονική περίοδο μπορεί να αποτελέσει μια πιθανή εναλλακτική επενδυτική πρόταση.

## Κεφάλαιο 9: Κώδικας Βελτιστοποίησης

### 9.1 Μοντελοποίηση λειτουργίας στροβίλων – ΜΥΗΕ

```
from math import sqrt, pi, log10
```

```
from copy import deepcopy
```

```
class turbine:
```

```
    def __init__(self, p, h, d):  
        self.p = p  
        self.h = h  
        self.d = d  
        [self.qmin, self.qmax] = self.qminmax()  
        self.capex = self.capex()
```

```
    def capex(self):  
        if self.qmax < 2.5:  
            capex = 1.64 * 122000 * ((self.p / sqrt(self.h)) ** 0.07)  
        else:  
            capex = 1.64 * 223000 * ((self.p / sqrt(self.h)) ** 0.11)  
        return capex
```

```
    def qminmax(self):  
        qmax = self.p / (9.81 * 0.93 * self.h)  
        qmin = 0.15 * qmax  
        return [qmin, qmax]
```

```
    def flow(self, q, h):  
        n = 0.95 * (0.33 + (1 - (1 - ((q / self.qmax - 0.15) / 0.85) ** 0.78) ** 3.11) * 0.6)  
        if (hn := self.losses(q)) < h:  
            e = n * 9.81 * q * (h - hn) * 24  
            v = q * 24 * 3600  
        else:  
            e = 0  
            v = q * 24 * 3600  
        return [e, v]
```

```
    def losses(self, q):  
        v = q * 4 / (pi * (self.d ** 2))  
        hl = 1.1 * (v ** 2) / (2 * 9.81)  
        f = 1  
        for i in range(10):  
            x = 1 / sqrt(f)  
            xa = -2 * log10(0.00015 / (3.74 * self.d) + 2.51 / (v * self.d / 0.00000114) * x)  
            f = (1 / xa) ** 2  
        hf = f * 785.6 * (v ** 2) / (self.d * 2 * 9.81)  
        hn = hl + hf  
        return hn
```

```

class heplant:
    def __init__(self, turbs, h):
        self.turbs = turbs
        self.h = h
        self.capex = sum([turb.capex for turb in self.turbs])
        self.p = sum([turb.p for turb in self.turbs])
        self.qmin = min([turb.qmin for turb in self.turbs])
        self.qmax = sum([turb.qmax for turb in self.turbs])

    def flow(self, ts):
        m = max(ts)
        tsn = [0 if x == m else x for x in ts]
        if len(self.turbs) == 2:
            combs = [(self.turbs[0], self.turbs[1]), (self.turbs[1], self.turbs[0])]
        else:
            combs = [(self.turbs[0], self.turbs[1], self.turbs[2]), (self.turbs[0], self.turbs[2], self.turbs[1]),
            (self.turbs[1], self.turbs[0], self.turbs[2]), (self.turbs[1], self.turbs[2], self.turbs[0]), (self.turbs[2],
            self.turbs[0], self.turbs[1]), (self.turbs[2], self.turbs[1], self.turbs[0])]
        ets = []
        vts = []
        for q in tsn:
            etmp = 0
            es = 0
            vs = 0
            for perm in combs:
                qtmp = deepcopy(q)
                ep = 0
                vp = 0
                # Επιλογή βέλτιστης ακολουθίας στροβίλων
                for turb in perm:
                    if qtmp < turb.qmin:
                        ep += 0
                        vp += 0
                    elif qtmp <= turb.qmax:
                        x = turb.flow(qtmp, self.h)
                        ep += x[0]
                        vp += x[1]
                        qtmp = 0
                    else:
                        qtmp -= turb.qmax
                        x = turb.flow(turb.qmax, self.h)
                        ep += x[0]
                        vp += x[1]
                if ep > etmp:
                    etmp = ep
                    es = ep
                    vs = vp
            ets.append(es)

```

```

vts.append(vs)

# Υπολογισμός κέρδους ανά MWh
if sum(turb.p for turb in self.turbs) <= 3000:
    gain = 90 * sum(ets) / 1000
else:
    gain = 87 * sum(ets) / 1000

if (sum(vts) < 0.75 * (sum(ts) * 24 * 3600)) or (ets.count(0) > 0.7 * len(ts)):
    ok = 0
    g = 0
else:
    g = 0.9 * gain
    ok = 1
# Επιστρέφονται το όφελος, αν πληρούνται ή όχι οι περιβαλλοντικοί νόμοι και ο συντελεστής
δυναμικότητας CF
return [g, ok, sum(ets) / (len(ts) * self.p * 24)]

```

## 9.2 Βελτιστοποίηση μοντέλου

```

from math import sqrt, pi, log10
import pandas as pd
from scipy.optimize import differential_evolution, dual_annealing

```

```

tss = []
for i in range(22):
    nm = 'Y' + str(i + 1)
    df = pd.read_excel('Quse.xlsx', sheet_name=nm, header=None)
    tss.append(df.iloc[:, 1].tolist())

```

```

bounds = [(20, 3000), (20, 3000)]

```

```

h = 27
d = 1.8

```

```

n = 22
def obj(x):
    CFs = []
    t1 = turbine(round(x[0] / 5) * 5, h, d)
    t2 = turbine(round(x[1] / 5) * 5, h, d)
    #t3 = turbine(round(x[2] / 5) * 5, h, d)
    hp = heplant([t1, t2], h)
    g = -hp.capex
    ok = 0
    for i in range(n):
        y = hp.flow(tss[i])
        g += y[0] / (1.06 ** (i + 1))
        ok += y[1]
    CFs.append(100 * y[2])

```



```
if ok < n:  
    res = -10000000  
    #res = -10000000  
else:  
    #res = g / hp.capex  
    res = sum(CFs) / len(CFs)  
return -res
```

```
sol1 = differential_evolution(obj, bounds=bounds)  
print(sol1.x, sol1.fun)  
sol2 = dual_annealing(obj, bounds=bounds)  
print(sol2.x, sol2.fun)
```

## Βιβλιογραφία

1. Aggidis, G. A., Luchinskaya, E., Rothschild, R., & Howard, D. (2010). The costs of small-scale hydro power production: Impact on the development of existing potential. *Renewable Energy*, 35(12), 2632–2638. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.008>
2. Ogayar, B., & Vidal, P. (2009). Cost determination of the electro-mechanical equipment of a small hydro-power plant. *Renewable Energy*, 34(1), 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.039>
3. Α. Π.: ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/30971/119 26/03/2020
4. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΠΑΠΑΝΤΩΝΗΣ, καθηγητής ΕΜΠ, «ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ», ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΣΟΤΡΑΣ: ΑΘΗΝΑ 2021.
5. Δήμος Κεντρικών Τζουμέρκων. Available at: <https://www.dhmosktzoumerkwn.gr/> (Accessed: February 28, 2023).
6. Σημειώσεις του μαθήματος «Ανανεώσιμη Ενέργεια και Υδροηλεκτρικά Έργα», διαθέσιμες στην πλατφόρμα helios.ntua.
7. ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟ. (n.d.). In *Energy Efficiency and Renewables - Supporting Policies in Local Level for Energy*. European Commission.
8. Υδροσκόπιο: Εθνική Τράπεζα υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας, Available at: <http://www.hydroscope.gr/> (Accessed: February 28, 2023).