



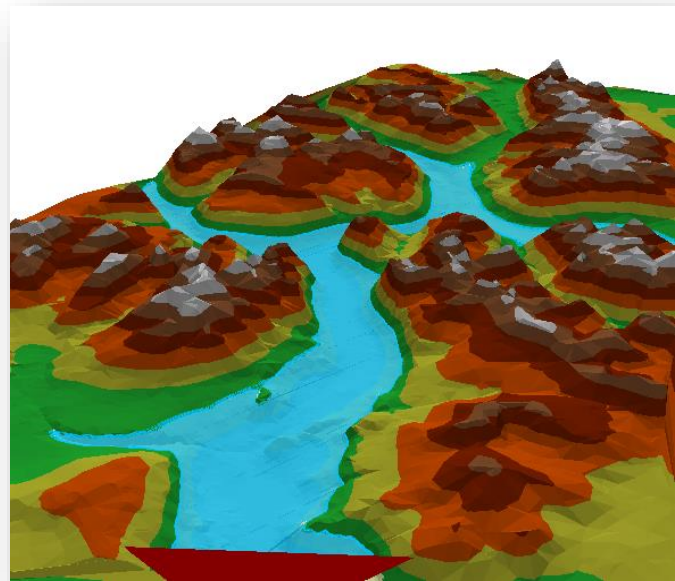
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Διπλωματική Εργασία**

Ο ρόλος της γεωμετρίας των ταμιευτήρων:  
Θεωρητική ανάλυση και εξαγωγή  
γενικευμένων σχέσεων στάθμης – επιφάνειας –  
αποθέματος



**Χριστίνα Καραϊσά**

Επιβλέπων: **Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Μάρτιος 2022



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

---

*Ο ρόλος της γεωμετρίας των ταμιευτήρων:  
Θεωρητική ανάλυση και εξαγωγή  
γενικευμένων σχέσεων στάθμης – επιφάνειας –  
αποθέματος*

**Χριστίνα Καραϊσά**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.**



# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Με την εκπόνηση και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, σηματοδοτείται και το τέλος της φοίτησής μου, στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ως εκ τούτου θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς όλους όσους βοήθησαν στην προσπάθειά μου αυτή.

Πρώτον απ' όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, Επίκ. Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου έδωσε αναθέτοντάς μου ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και που συνεχίζει να μου δείχνει, καθώς και για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα. Η αγάπη του για το αντικείμενο σε συνδυασμό με την αστείρευτη όρεξή του να το μεταδώσει στους φοιτητές και το ειλικρινές ενδιαφέρον απέναντί τους, τον καθιστούν όχι μόνο πρότυπο καθηγητή αλλά και ανθρώπου.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Υποψ. Δρ. Τζωρτζίνα Σακκή για τη βοήθειά της, για τις στοχευμένες και χρήσιμες συμβουλές της κατά τη διάρκεια της συγγραφής της εν λόγω διπλωματικής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένεια μου, τους γονείς και τις αδερφές μου για την στήριξή τους και την εμπιστοσύνη που μου έδειχναν από τα σχολικά μέχρι τα φοιτητικά μου χρόνια. Δε θα μπορούσα να μην αναφερθώ και στους αγαπημένους μου φίλους, που χωρίς αυτούς η φοίτησή μου στη σχολή δε θα ήταν τόσο όμορφη αλλά και για την συνεχή στήριξη και ενθάρρυνσή τους.

Χριστίνα Καραϊσά

Αθήνα, Μάρτιος 2022



# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Σε έναν ταμιευτήρα, οι σχέσεις στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας είναι αναγκαίες τόσο για τον σχεδιασμό όσο και κατά τη λειτουργία τους, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ο σημαντικός τους ρόλος στη διαχείριση των υδατικών πόρων, όπως η αντιπλημμυρική προστασία, η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, η ύδρευση και η άρδευση. Στο παρελθόν, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες προσδιορισμού της στάθμης συναρτήσει της επιφάνειας και της χωρητικότητας του ταμιευτήρα. Γενικά, για τον προσδιορισμό αυτών των μεγεθών χρησιμοποιούνται σχέσεις δύναμης, που αντικατοπτρίζουν με αρκετή ακρίβεια τη μεταξύ τους συσχέτιση, χρησιμοποιώντας δύο συντελεστές (κλίμακας και σχήματος) για κάθε ζευγάρι δεδομένων (στάθμη – αποθηκευτικότητα, στάθμη – επιφάνεια). Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξαχθούν γενικευμένες εξισώσεις στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας, στις οποίες ο συντελεστής σχήματος είναι σταθερός, ανάλογα με το τυπικό σχήμα του ταμιευτήρα. Ειδικότερα, δίνεται έμφαση στη σχέση στάθμης – αποθέματος, με σκοπό τη διερεύνηση των συντελεστών της εξίσωσης δύναμης ως συνάρτηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε, σε θεωρητικό επίπεδο, επεξεργασία των δεδομένων στάθμης – επιφάνειας – χωρητικότητας 6.824 φραγμάτων παγκοσμίως, που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων ReGeom (Global Reservoir Geometry Database). Στην επεξεργασία αυτή οι ταμιευτήρες διαχωρίζονται, σε τρία διαφορετικά σχήματα και εξάγονται οι γενικευμένες εξισώσεις.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν 38 νέοι εν δυνάμει ταμιευτήρες, με τη χρήση των λογισμικών Google Earth και ArcGIS, και έπειτα από επεξεργασία διαπιστώθηκε πως οι συντελεστές της σχέσης δύναμης στάθμης – αποθέματος, εξαρτώνται από το ανάγλυφο της περιοχής, δηλαδή από την κλίση των πρανών, την κλίση και το πλάτος του πυθμένα και το μέσο πλάτος του ταμιευτήρα. Με την ίδια λογική, έχοντας δεδομένα από 16 Ελληνικούς ταμιευτήρες, διαπιστώθηκε πως η αποθηκευτικότητα του ταμιευτήρα σε σχέση με την στάθμη του εξαρτάται από την κλίση των πρανών περιμετρικά της λεκάνης κατάκλυσης και από την κλίση του πυθμένα, που μπορεί εύκολα να υπολογιστεί. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκαν δύο στατιστικά μέτρα απόδοσης, η αποτελεσματικότητα (συντελεστής Nash-Sutcliffe, NSE και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, RMSE).

Τέλος, για την επικύρωση των προηγούμενων αποτελεσμάτων, οι εξαγόμενες σχέσεις των προηγούμενων κεφαλαίων εξετάστηκαν σε 7 νέους υφιστάμενους ταμιευτήρες, οι οποίοι προσομοιώθηκαν πριν και μετά την πλήρωσή τους για την ασφαλή αξιολόγησή τους.

# ABSTRACT

---

Depth – area – storage relationships are the most important factors for both the design and the function of reservoir in order to control the multiple purposes of water management including flood protection, hydropower energy and water supply and irrigation. Previous land surface modeling studies used simplified depth – area – storage relationships for reservoir modeling. Generally, the most widely used relationship for the estimation of the three characteristic geometrical variables of reservoirs are power law storage – area – depth relationships that use a shape factor and a scale factor for each pair (e.g. depth – storage power law, depth – area power law) and whose accuracy is very high. The aim of this study is to develop generalized elevation – area – storage power type relationships, with the shape parameter kept stable, and subsequently, emphasizing to the elevation – storage equation, to investigate how the two factors are dependent to the typical shape of the reservoir.

To begin with, the theoretical analysis was based on data originating from the Global Reservoir Geometry Database, which is a global-scale reservoir storage – area – depth dataset including 6.824 major reservoirs. For each reservoir, the storage-area-depth relationships were derived from an optimal geometric shape selected iteratively from, eventually, three possible regular geometric shapes and export the generalized equations.

In order to test this framework, 38 hypothetical reservoirs were created by using Google Earth and ArcGIS. After a long procedure, it was determined that the factors of the aforementioned relationship (i.e., scale and shape factor) depend on the surrounding landscape characteristics, such as the terrain slope, riverbed slope, the bed width and the mean width of the reservoir. Therefore, by using data from 16 Greek Dams, it was confirmed that the storage of a reservoir, as a function of its depth, depends on the surrounding terrain slope and the riverbed slope, which is easily-calculated. For the evaluation of the results, two statistical performance criteria, Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) and root-mean-square error (RMSE), were used to compare the simulated and real depth – storage curves.

Lastly, for validation purpose, the exported relationships that were described in the previous chapters, were tested in 7 new existing reservoirs, simulated before and after the filling for safe evaluation.

# Πίνακας περιεχομένων

---

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>3</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Εισαγωγή</b> .....	<b>9</b>
1.1 Αντικείμενο της Μελέτης.....	9
1.2 Διάρθρωση τεύχους .....	9
<b>2. Θεωρητικό Υπόβαθρο</b> .....	<b>11</b>
2.1 Σημασία των καμπυλών στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος.....	11
2.2 Επισκόπηση χρήσιμων μεθόδων προσδιορισμού σχέσεων στάθμης – επιφάνειας - αποθέματος.....	12
<b>3. Global Reservoir Geometry Database</b> .....	<b>15</b>
3.1 Εισαγωγή στη βάση δεδομένων ReGeom.....	15
3.2 Μεθοδολογία ανάπτυξης της Βάσης .....	16
3.3 Αποτελέσματα Έρευνας .....	22
3.3.1 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....	23
3.3.2 Επαλήθευση Έρευνας.....	24
<b>4.Επεξεργασία καμπυλών της βάσης ReGeom</b> .....	<b>25</b>
4.1 Προκαταρκτική επεξεργασία δείγματος ταμιευτήρων σε περιβάλλον Excel .....	25
4.2 Επεξεργασία 6.824 ταμιευτήρων σε περιβάλλον Octave – Στατιστικά χαρακτηριστικά παραμέτρων.....	30
<b>5. Διαμόρφωση υποθετικών ταμιευτήρων</b> .....	<b>33</b>
5.1 Κατανομή των θέσεων των υποψήφιων ταμιευτήρων .....	33
5.2 Δημιουργία Καμπυλών – Εισαγωγή στο ArcGIS .....	35
5.2.2 Εξαγωγή Δεδομένων Στάθμης – Επιφάνειας – Αποθηκευτικότητας.....	39
5.2.3 Μεθοδολογία συσχέτισης παραμέτρων σύμφωνα με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του κάθε ταμιευτήρα – Εξαγωγή τελικών σχέσεων .....	42

5.2.4: Εξαγωγή δεδομένων Στάθμης – Επιφάνειας – Αποθηκευτικότητας με μικρότερο βήμα.....	51
<b>5.3 Αξιολόγηση ταμιευτήρων με τις εξισώσεις προσδιορισμού της βιβλιογραφίας ....</b>	<b>54</b>
<b>5.4 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα Ανάλυσης .....</b>	<b>56</b>
<b>6. Επεξεργασία Ελληνικών ταμιευτήρων .....</b>	<b>65</b>
6.1 Γεωγραφική κατανομή Ελληνικών ταμιευτήρων.....	65
6.2 Δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (ΨΜΕ) .....	67
6.3 Μεθοδολογία συσχέτισης παραμέτρων σύμφωνα με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του κάθε ταμιευτήρα .....	68
6.3.1 1η Μέθοδος (Μέθοδος Βιβλιογραφίας).....	68
6.3.2 2 <sup>η</sup> Μέθοδος .....	69
6.4 Αξιολόγηση Ελληνικών ταμιευτήρων με τις εξισώσεις προσδιορισμού της βιβλιογραφίας.....	73
6.5 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα Ανάλυσης .....	74
<b>7. Επικύρωση Αποτελεσμάτων .....</b>	<b>79</b>
7.1 Γεωγραφική Κατανομή Νέων ταμιευτήρων .....	79
7.2 Επεξεργασία ταμιευτήρων πριν την πλήρωση .....	80
7.2.1 1η Μέθοδος.....	81
7.2.2 2η Μέθοδος.....	82
7.2.3 3η Μέθοδος (Μέθοδος Βιβλιογραφίας).....	85
7.3 Επεξεργασία ταμιευτήρων μετά την πλήρωση .....	85
7.3.1 1η Μέθοδος.....	86
7.3.2 Σύγκριση Μεθόδων.....	87
7.4 Συμπεράσματα Ανάλυσης .....	88
<b>8. Συμπεράσματα.....</b>	<b>89</b>
8.1 Συμπεράσματα ανάλυσης της βάσης ReGeom.....	89
8.2 Συμπεράσματα ανάλυσης των υποψήφιων ταμιευτήρων .....	90
8.3 Συμπεράσματα ανάλυσης των Ελληνικών ταμιευτήρων .....	91
8.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	91
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>93</b>

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>96</b>
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Τελικά υποψήφια σχήματα ταμειυτήρων .....	97
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Στατιστικά χαρακτηριστικά συντελεστών των σχέσεων στάθμης – επιφάνειας - αποθέματος.....	102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Υποψήφιος Θέσεις ταμειυτήρων.....	105
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Διαγράμματα Συσχέτισης των κύριων εξισώσεων .....	115
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Θέσεις Ταμειυτήρων υπό εξέταση – Ελβετία.....	129

# 1. Εισαγωγή

---

## 1.1 Αντικείμενο της Μελέτης

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην εξαγωγή κατάλληλων εξισώσεων που προσδιορίζουν τη σχέση στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας ενός ταμιευτήρα. Ειδικότερα, μελετάται η συσχέτιση των συντελεστών κλίμακας και σχήματος της εξίσωσης  $h = \lambda \times S^k$  με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης κατάκλυσης ενός ταμιευτήρα και το ευρύτερο ανάγλυφο της περιοχής.

Αρχικά, γίνεται μία πρώτη επεξεργασία με αριθμητικά δεδομένα για την εξαγωγή των καμπυλών στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας από τη βάση δεδομένων ReGeom, βασισμένη στη βάση δεδομένων GRanD με κάποιες πρόσθετες αναλύσεις. Στη συνέχεια, δημιουργούνται νέες θέσεις ταμιευτήρων με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS και με τη βοήθεια αυτού, προσδιορίζεται η σχέση που έχουν οι συντελεστές με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα.

Τελικός σκοπός της έρευνας είναι από την εξίσωση  $h = \lambda \times S^k$ , να προσδιοριστεί ο ένας εκ των δύο συντελεστής με κάποιο μοναδικό χαρακτηριστικό του ταμιευτήρα, όπως για παράδειγμα η κλίση των πρανών της γύρω περιοχής, ή η κλίση της λεκάνης και έτσι η παραπάνω εξίσωση να περιέχει μόνο έναν άγνωστο συντελεστή.

## 1.2 Διάρθρωση τεύχους

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιέχει 8 κεφάλαια, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Στο **πρώτο κεφάλαιο**, γίνεται μία εισαγωγή για το αντικείμενο και τον σκοπό της παρούσας έρευνας.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο**, παρουσιάζεται η σημασία του αντικειμένου της έρευνας για την καλύτερη εποπτεία της λειτουργίας των ταμιευτήρων και κατ'επέκταση την καλύτερη λειτουργία της χρήσης του νερού, όπου δεν υπάρχουν άλλα διαθέσιμα δεδομένα. Επίσης παρουσιάζονται περιληπτικά παλαιότερες μελέτες ενασχόλησης με το αντικείμενο, καθώς και κάποιες χρήσιμες εξισώσεις που έχουν εξαχθεί.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** γίνεται μία εισαγωγή στη Global Reservoir Geometry Database (ReGeom) και παρουσιάζονται οι διεργασίες που πραγματοποιήθηκαν ώστε να προσδιοριστεί η αλληλουχία στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας για κάθε ταμιευτήρα της βάσης GRanD.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** πραγματοποιείται η επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων για την εξαγωγή έξι (6) βασικών εξισώσεων που προσομοιώνουν τα τρία μεγέθη της στάθμης - επιφάνειας – αποθηκευτικότητας. Από τα 5 κυρίαρχα σχήματα ταμιευτήρων της βάσης, καταλήγουμε σε τρία κύρια σχήματα της εγκάρσιας διατομής τους, τα οποία θα αποτελέσουν τη βάση για περαιτέρω επεξεργασία.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο**, δημιουργούνται 38 νέοι ταμιευτήρες με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS, ώστε να γίνει επεξεργασία των ταμιευτήρων, πριν την πλήρωσή τους με νερό, έτσι ώστε να φανεί η συσχέτιση των συντελεστών κλίμακας  $\lambda$  και σχήματος  $\kappa$  της εξίσωσης  $h = \lambda \times S^\kappa$  με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής του ταμιευτήρα.

Στο **έκτο κεφάλαιο**, πραγματοποιείται επεξεργασία 16 υφιστάμενων Ελληνικών ταμιευτήρων και εξετάζεται η συσχέτιση των παραπάνω συντελεστών  $\lambda$  και  $\kappa$  με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής που μπορούν να υπολογιστούν, μετά την πλήρωση της λεκάνης.

Στο **έβδομο κεφάλαιο**, πραγματοποιείται επικύρωση των αποτελεσμάτων των δύο προηγούμενων κεφαλαίων, με 7 νέους ταμιευτήρες.

Στο **όγδοο κεφάλαιο**, συνοψίζονται τα συμπεράσματα της μελέτης και προτείνονται αντικείμενα μελλοντικής έρευνας.

## 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Σημασία των καμπυλών στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος

Η σημασία του κύκλου του νερού στον κύκλο ζωής είναι όχι απλά σημαντικό στοιχείο της αλλά από τα πιο βασικά. Το νερό, όντας ένα από τα κυρίαρχα στοιχεία του κόσμου, της δημιουργίας και της ζωής, υπήρξε πάντοτε στο επίκεντρο των επιστημονικών, θρησκευτικών, μυθολογικών και φιλοσοφικών αναζητήσεων του ανθρώπου. Δεν υπάρχει σχεδόν καμία ανθρώπινη δραστηριότητα, στην οποία να μην συμμετέχει έμμεσα ή άμεσα το νερό σε οποιαδήποτε μορφή του.

Ο συνολικός όγκος νερού που υπάρχει στη Γη εκτιμάται περίπου στα 1.360 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα. Η κατανομή του παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1

**Πίνακας 2.1:** Παγκόσμια κατανομή του νερού (Πηγή: *Bouwer, 1978*)

	Όγκος x 1000 km <sup>3</sup>	Ποσοστό (%)
<b>Νερό στην ατμόσφαιρα</b>	13	0,001
<b>Επιφανειακά νερά</b>		
Νερά στους ωκεανούς	1320000	97,2
Αλμυρό νερό σε λίμνες	104	0,008
Γλυκό νερό σε λίμνες	125	0,009
Γλυκό νερό σε ποταμούς	1,25	0,0001
Παγετώνες	29000	2,15
Νερό στη βιομάζα	50	0,004
<b>Υπόγεια νερά</b>		
Νερό στην ακόρεστη ζώνη	67	0,005
Υπόγεια νερά σε βάθος 800 m	4200	0,31
Υπόγεια νερά σε βάθος από 800 – 4000 m	4200	0,31
<b>Σύνολο</b>	<b>1360000</b>	<b>100</b>

Με την κατασκευή ενός φράγματος, διαμορφώνεται μία τεχνητή λίμνη (ταμιευτήρας), ως συνέπεια της φραγής της ροής ανάντη του φράγματος, όπου αποθηκεύεται το νερό. Η αποθήκευση του νερού πραγματοποιείται για την εξυπηρέτηση πολλαπλών χρήσεων όπως:

- Ύδρευση
- Άρδευση
- Υδροηλεκτρική Παραγωγή
- Αντιπλημμυρική προστασία
- Ιχθυοκαλλιέργεια
- Αναψυχή

Τα φράγματα και οι ταμιευτήρες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Αναμφίβολα, ο μετριασμός των πλημμυρών, η εξασφάλιση των αποθεμάτων νερού και η παροχή υδροηλεκτρικής ενέργειας έχουν ωφελήσει τις ανθρώπινες κοινωνίες με πολλούς τρόπους, επιτρέποντας τη βελτίωση της ανθρώπινης υγείας,



την επέκταση της παραγωγής τροφίμων και την οικονομική ανάπτυξη. Για παράδειγμα, τα μεγάλα φράγματα εκτιμάται ότι συμβάλλουν άμεσα στο 12-16% της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων (WCD 2000). Πρόσφατες προβλέψεις υποδηλώνουν ότι θα χρειαστεί 70% περισσότερη τροφή μέχρι το 2050 (σχεδόν 100% στις αναπτυσσόμενες χώρες) για να αντιμετωπιστεί η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού κατά 40% και να προσαρμοστούν οι αναμενόμενες αλλαγές στα παγκόσμια διατροφικά πρότυπα (Bruinsma 2009).

Αδιαμφισβήτητα, οι περισσότερες από αυτές τις χρήσεις είναι ζωτικής σημασίας για τον άνθρωπο και τα ζώα. Έτσι, με την κατατοπιστική γνώση της λειτουργίας και των χαρακτηριστικών των ταμιευτήρων (ελάχιστη στάθμη, μέγιστη στάθμη, χωρητικότητα, επιφάνεια κατάληψης) ελέγχονται και οι παραπάνω χρήσεις. Για το λόγο αυτό, ο προσδιορισμός της στάθμης, της επιφάνειας και της χωρητικότητας των ταμιευτήρων είναι καθοριστικής σημασίας.

## **2.2 Επισκόπηση χρήσιμων μεθόδων προσδιορισμού σχέσεων στάθμης – επιφάνειας - αποθέματος**

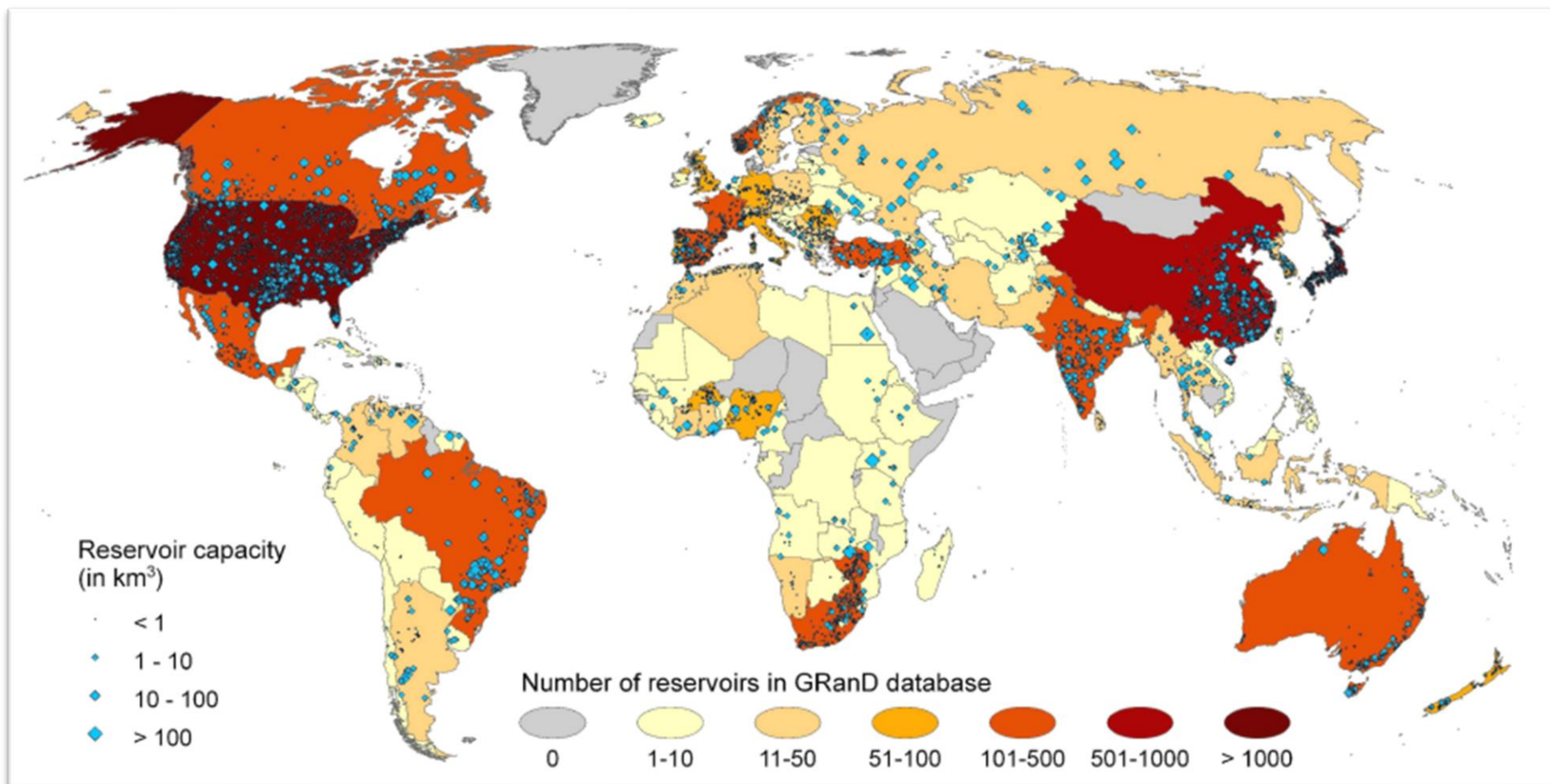
Στο παρελθόν, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες συσχέτισης των τριών χαρακτηριστικών μεγεθών. Κάποιες έχουν αρκετά απλοποιημένο υπόβαθρο, επομένως δεν παρέχουν υψηλή ακρίβεια, ενώ άλλες χρησιμοποιούν πιο περίπλοκους αλγορίθμους και το αποτέλεσμα είναι πιο ρεαλιστικό. Ωστόσο, όλες οι μέθοδοι χρησιμοποιούν δύο παραμέτρους για τον προσδιορισμό της αλληλεπίδρασης μεταξύ στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος ανά ζεύγη. Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά μερικές από τις μεθόδους της βιβλιογραφίας.

Αρχικά, ο *Neumann (1959)* πρότεινε μία προσέγγιση όπου η επιφάνεια του ταμιευτήρα χαρακτηρίζεται από ένα ελλειπτικό σχήμα, ενώ η διατομή του είναι ημιτονοειδής. Η παραμετροποίηση αυτή, προήλθε από μία επεξεργασία 107 λιμνών. Επακόλουθες μελέτες (*Anderson, 1961 & Lehman 1975*), ωστόσο, υποστηρίζουν πως η προσέγγιση αυτή αντικατοπτρίζει με σχετική ακρίβεια μόνο τις υπό μελέτη λίμνες.

Ο *Lehman (1975)* διατήρησε την επιφάνεια του ταμιευτήρα ως έλλειψη, αλλά η διατομή του, εκτός από ημιτονοειδής, μπορούσε να έχει παραβολικό, ελλειπτικό ή κυλινδρικό σχήμα. Ωστόσο και στις δύο αυτές υποθέσεις, υιοθετείται η θεώρηση πως οι ταμιευτήρες έχουν μέγιστο βάθος στο κέντρο τους, ενώ έχουν μηδενικό βάθος στην περιφέρεια.

Μία διαφορετική προσέγγιση (*Johansson et al., 2007*) προσδιορίζει τον όγκο ενός ταμιευτήρα, χρησιμοποιώντας το μέγιστο βάθος και την επιφάνειά του, επεξεργάζοντας δεδομένα από 105 λίμνες στη Σκανδιναβία.

Σημαντικό επίτευγμα ήταν η ανάπτυξη της βάσης δεδομένων Global Reservoir and Dam (*Lehner et al., 2011*), όπου παρέχονται δεδομένα για πάνω από 6.500 φράγματα παγκοσμίως, καθώς έως τότε τα παγκόσμια σύνολα δεδομένων που περιέγραφαν τα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων ήταν σε μεγάλο βαθμό ελλιπή. Τα δεδομένα χαρακτηριστικών του GRanD περιλαμβάνουν (στις περισσότερες περιπτώσεις) το όνομα του φράγματος, τις χωρικές συντεταγμένες, το έτος κατασκευής του φράγματος, τα πολύγωνα επιφάνειας, την χωρητικότητα αποθήκευσης, το ύψος φράγματος και την κύρια χρήση του.



Εικόνα 2.1: Παγκόσμια κατανομή (ανά χώρα) μεγάλων ταμιευτήρων που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων GRanD, πηγή: *Lehner et al., 2011*

Στη συγκεκριμένη έρευνα, εξήχθησαν δύο σχέσεις υπολογισμού του όγκου του ταμιευτήρα. Στην πρώτη ως ορίσματα εισόδου, υπεισέρχονται η επιφάνεια και η στάθμη του ταμιευτήρα, με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0,92$  και στη δεύτερη ο όγκος υπολογίζεται μόνο από την επιφάνειά του, με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0,80$ .

$$V = 0,678 \times (Ah)^{0,9229} \quad (2.1)$$

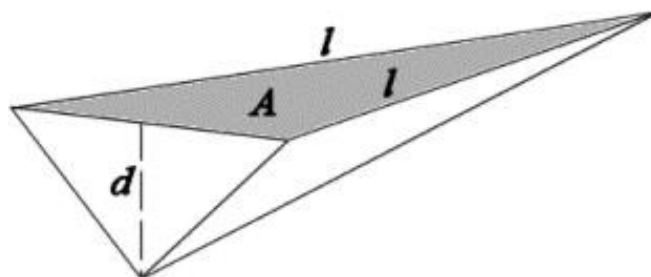
$$V = 30,684 \times A^{0,9578} \quad (2.2)$$

όπου  $V$  = όγκος του ταμιευτήρα ( $10^6 \text{ m}^3$ ),

$A$  = επιφάνεια του ταμιευτήρα ( $\text{km}^2$ )

$h$  = στάθμη του ταμιευτήρα (m)

Τέλος, μία άλλη ερευνητική προσέγγιση (Liebe *et al.*, 2009) αφορά σε μικρούς ταμιευτήρες χωρητικότητας έως  $186 \text{ hm}^3$ , και προσδιορίζει τον όγκο από την επιφάνεια του ταμιευτήρα. Η περιοχή μελέτης είναι μια ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Γκάνας και περιέχει ένα δείγμα 154 ταμιευτήρων. Βασική υπόθεση της προσέγγισης είναι πως ο ταμιευτήρας έχει σχήμα πυραμίδας με τετραγωνική βάση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2.



**Εικόνα 2.2:** Μοντέλο ταμιευτήρα, πηγή: Liebe *et al.*, 2009

Έπειτα από κάποιες επεξεργασίες, η τελική σχέση που συσχετίζει τον όγκο του ταμιευτήρα με την επιφάνεια αυτού είναι:

$$V = 0,00857 \times A^{1,4367} \quad (2.3)$$

όπου ο τελικός όγκος  $V$  αναφέρεται σε  $\text{m}^3$ .

Στα επόμενα κεφάλαια, θα αξιολογηθούν οι σχέσεις (2.1), (2.2), (2.3) στους υπό μελέτη ταμιευτήρες του 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου και στους Ελληνικούς ταμιευτήρες του 6<sup>ου</sup> κεφαλαίου.

## 3. Global Reservoir Geometry Database

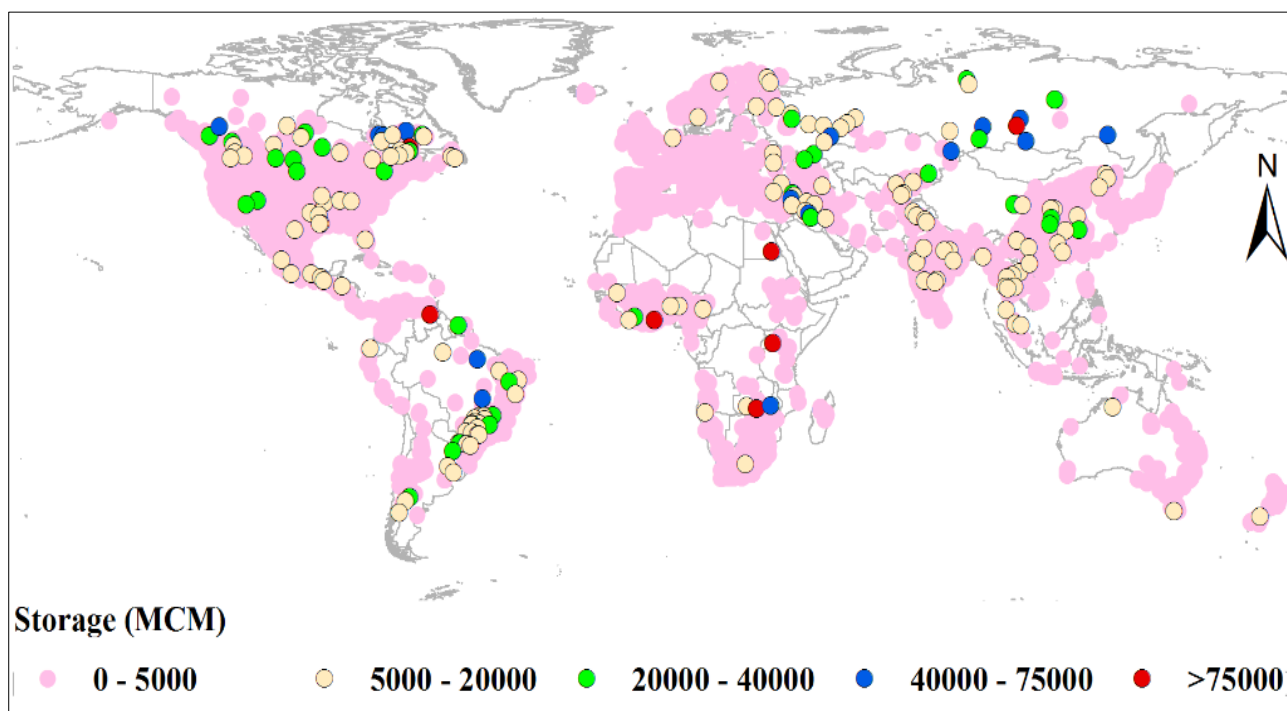
### 3.1 Εισαγωγή στη βάση δεδομένων ReGeom

Η βάση αυτή έχει ως στόχο να προσομοιώσει την αλληλουχία βάθους – επιφάνειας – χωρητικότητας κάθε φράγματος μέσω της γεωμετρίας του κάθε ταμιευτήρα, με γνώμονα παλαιότερες υποθέσεις και έρευνες, όπως αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της βάσης προέρχονται ως επί το πλείστον από τη βάση δεδομένων GRanD (Lehner et al., 2011), όπου περιέχονται πληροφορίες για 6.824 ταμιευτήρες, των οποίων η αποθηκευτικότητα υπερβαίνει το 1 hm<sup>3</sup>, όπως:

- η γεωγραφική θέση του ταμιευτήρα,
- το ύψος κάθε φράγματος και το μέσο βάθος αυτού,
- τα πολύγωνα επιφάνειας (από δεδομένα τηλεπισκόπησης),
- η χωρητικότητα και η μέγιστη επιφάνεια κάθε ταμιευτήρα

Όσον αφορά στα πολύγωνα επιφάνειας, ενδέχεται να μην αντιπροσωπεύουν τον ταμιευτήρα με απόλυτη συνέπεια, καθώς αυτά συλλέχθηκαν στην πλειονότητά τους από μία παρατήρηση στο χρόνο. Ως γνωστό, η στάθμη κάθε φράγματος αλλάζει με τον χρόνο, συνεπώς και η επιφάνειά του. Για τις ανάγκες της έρευνας θεωρείται πως η επιφάνεια αυτή αντιπροσωπεύει τον ταμιευτήρα όταν το βάθος του είναι το μέγιστο, άρα και η αποθηκευτικότητά του λαμβάνει την μέγιστη τιμή.



Εικόνα 3.1: Κατανομή των ταμιευτήρων της βάσης GRanD σύμφωνα με την αποθηκευτικότητά τους (Lehner et al., 2011)

Μία νέα βάση δεδομένων που ονομάζεται HydroLAKES (Messenger et al., 2016) παρέχει πιο ενημερωμένες πληροφορίες για 70 ταμιευτήρες, οι οποίες ενσωματώθηκαν στη βάση GRanD. Συμπληρωματικά, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δύο άλλες βάσεις για λόγους σύγκρισης, την “Global Lake and Wetland Database” με 4.627 ταμιευτήρες (Lehner & Döll, 2004) και την “Dams, Lakes and Reservoirs Database for the World Water Development Report II” με 668 ταμιευτήρες (Vörösmarty et al., 1997, 2003).

Τα αποτελέσματα της έρευνας, επικυρώθηκαν από δεδομένα που προήλθαν από δύο ξεχωριστές πηγές. Η πρώτη αποτελείται από σχέσεις βάθους – επιφάνειας – χωρητικότητας από δύο μελέτες που βασίζονται σε δεδομένα τηλεπισκόπησης για 52 ταμιευτήρες σε όλον τον κόσμο (Gao et al., 2012 και Zhang et al., 2014). Τα δεδομένα αυτά έχουν προέλθει από αναλύσεις μετρήσεων εύρους 20 χρόνων, που σημαίνει ότι αντιπροσωπεύουν καλύτερα την επιφάνεια του κάθε ταμιευτήρα. Η δεύτερη πηγή αποτελείται μόνο από σχέσεις βάθους – χωρητικότητας που μετρήθηκαν για 34 ταμιευτήρες, 28 από το US Geological Survey, τρεις από το Texas Water Development Board (<https://waterdatafortexas.org/reservoirs>) και τρεις από την Κίνα (Cao, 2014 και Shang & Bin, 2014).

### 3.2 Μεθοδολογία ανάπτυξης της Βάσης

Αρχικά, εντοπίστηκαν τα κατάλληλα σχήματα για τη γεωμετρική αναπαράσταση του κάθε ταμιευτήρα. Στη συνέχεια, έχοντας ως γνώμονα τα δεδομένα που παρέχονται από τη βάση δεδομένων GRanD, δηλαδή το ύψος του φράγματος, το μέσο βάθος του ταμιευτήρα και την επιφάνειά του, υπολογίστηκαν μεγέθη όπως το μήκος, το πλάτος και το μέγιστο βάθος αυτού. Με τον υπολογισμό αυτών των μεγεθών, επόμενο βήμα της μεθοδολογίας είναι να επιλεγεί το κατάλληλο σχήμα για κάθε ταμιευτήρα ξεχωριστά, διατηρώντας κατά το δυνατότερο τα γνωστά μεγέθη που προαναφέρθηκαν.

Σε αυτό το σημείο ενσωματώθηκαν οι τιμές της επιφάνειας και της χωρητικότητας του κάθε ταμιευτήρα, που είναι επίσης γνωστές, ώστε τα σχήματα που θα επιλεγθούν ως βέλτιστα να ελαχιστοποιούν το σφάλμα μεταξύ των εκτιμώμενων τιμών, για την επιφάνεια και τον όγκο του κάθε ταμιευτήρα, και των πραγματικών τιμών.

Τέλος, εξάγονται οι σχέσεις τύπου δύναμης για το βάθος, την επιφάνεια και τη χωρητικότητα για 6.824 φράγματα παγκοσμίως. Οι σχέσεις αυτές είναι προσβάσιμες μέσω της διεύθυνσης <https://wowuoh.wixsite.com/home/models-data>.

Παρακάτω ακολουθεί ένα διάγραμμα ροής των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν και κατόπιν αναλυτικά τα βήματα για την εξαγωγή, τελικά, των τιμών στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος για όλους τους ταμιευτήρες της βάσης.

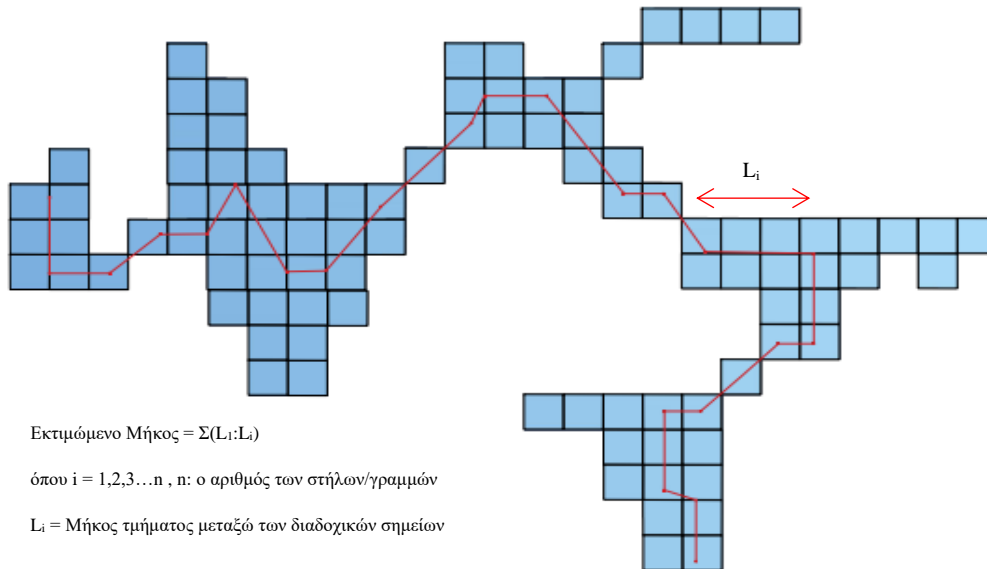


➤ **Βήμα 1°**

Αρχικά, επιλέχθηκαν 12 υποψήφια σχήματα για να προσομοιώσουν, κατά το βέλτιστο, τον κάθε ταμειυτήρα ξεχωριστά. Η κεντρική ιδέα ήταν να χρησιμοποιηθεί ένα γεωμετρικό σχήμα για την επιφάνεια του ταμειυτήρα, όπως i) τριγωνικό (*Triangular*), ii) παραβολικό (*Parabolic*), iii) ελλειψοειδές (*Elliptical*) και iv) ορθογώνιο (*Rectangular*) και ένα για την εγκάρσια διατομή του ταμειυτήρα, όπως i) τριγωνικό ή σφηνοειδές (*Wedge*), ii) ημικυκλικό (*Bowl*), iii) ορθογωνικό ή πρισματικό (*Prism*). Τα σχήματα αυτά επιλέχθηκαν σύμφωνα με παλαιότερες προσεγγίσεις, ενώ αποφεύχθηκαν πιο σύνθετα σχήματα με περισσότερες παραμέτρους.

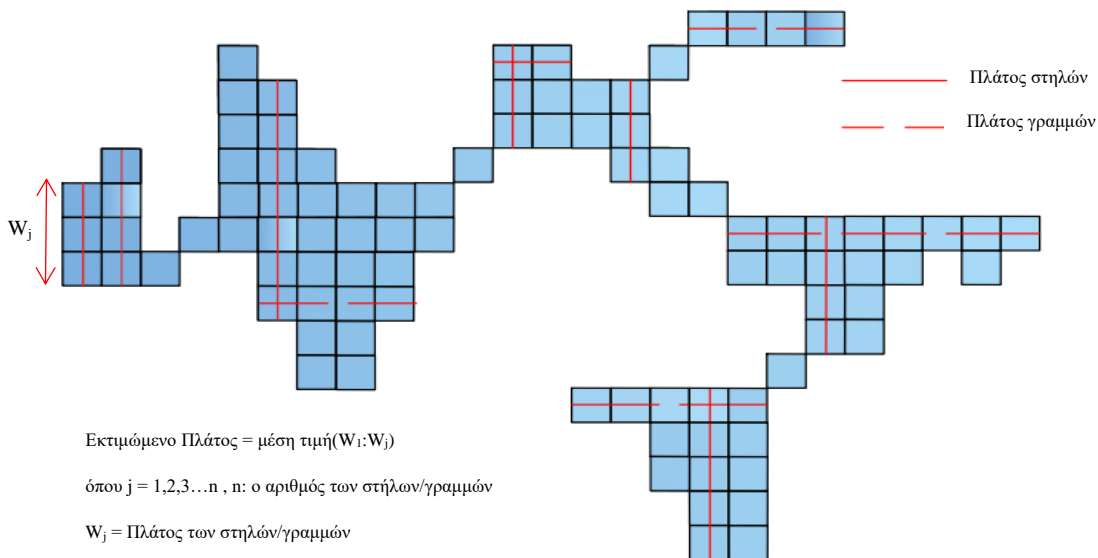
➤ **Βήμα 2°**

Εφ' όσον έχουν καθοριστεί τα υποψήφια γεωμετρικά σχήματα, μένει να εκτιμηθούν το μήκος, το πλάτος και το μέγιστο βάθος του ταμειυτήρα. Το μήκος και το πλάτος εκτιμώνται από τα πολύγωνα επιφάνειας που είναι διαθέσιμα στη βάση GRanD, τα οποία είναι σε μορφή raster κι έχουν ακρίβεια  $90 \times 90 \text{ m}^2$ . Για να εκτιμηθεί το μήκος του ταμειυτήρα, δημιουργείται μία διαδομή από επιμέρους τμήματα τα οποία αποτελούν το μέσο μήκος των διαδοχικών κελιών που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό στο πολύγωνο. Το συνολικό μήκος είναι το άθροισμα αυτών των μικρότερων μηκών.



**Εικόνα 3.2:** Εκτίμηση του συνολικού μήκους του ταμιευτήρα από τα πολύγωνα

Όσον αφορά στην εκτίμηση του πλάτους, αυτό υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των πλατών των γραμμών/στηλών, υποθέτοντας πως ο προσανατολισμός των κελιών είναι ορθογώνιος. Επίσης, το πλάτος εκτιμήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι το δυνατότερον κάθετο στο εκτιμώμενο μήκος.



**Εικόνα 3.3:** Εκτίμηση του συνολικού πλάτους του ταμιευτήρα από τα πολύγωνα

Τέλος, το μέγιστο βάθος του ταμιευτήρα μπορεί να προκύψει είτε από το μέσο βάθος είτε από το ύψος του φράγματος που είναι διαθέσιμα στη βάση GRanD. Όμως, το μέσο βάθος δεν έχει προέλθει από μετρήσεις αλλά από τον λόγο του όγκου του ταμιευτήρα προς την επιφάνειά του, και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της αποθηκευτικότητας του ταμιευτήρα. Έτσι ως δεδομένο λαμβάνεται το ύψος του φράγματος, και πιο συγκεκριμένα το 95% του ύψους, καθώς είναι εύλογο να θεωρηθεί πως σε όλα τα φράγματα αφήνεται ένα ελεύθερο περιθώριο της τάξης του 5% του ύψους από την μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα ως τη στέψη του.

➤ **Βήμα 3<sup>ο</sup>**

Μετά την εκτίμηση των παραπάνω μεγεθών, γίνεται η επιλογή του κατάλληλου σχήματος για κάθε ταμιευτήρα. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται οι σχέσεις της επιφάνειας και του όγκου του ταμιευτήρα συναρτήσει του μήκους, πλάτους και μέγιστου βάθους. Ο πίνακας αφορά στα 5 τελικά σχήματα που κυριάρχησαν, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

**Πίνακας 3.1:** Υπολογισμός Επιφάνειας και όγκου ανάλογα με το μήκος, το πλάτος και το μέγιστο βάθος κάθε υποψήφιου σχήματος

Σχήμα	Υπολογισμός Επιφάνειας	Υπολογισμός Όγκου
Rectangular Prism	$L \times W \times \left[1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right]$	$V_{Z_i} = 0.5 \times (A_i + A_{i-1}) \times \Delta Z_i$ ή $V_{max} - 0.5 \times (A_{sur} + A_{Z_i}) \times Z_i$ <i>Z μετρούμενο από την επιφάνεια</i>
Rectangular Bowl	$L \times W \times \left[1 - \left(\frac{Z_i^2}{D}\right)\right] \times \left(1 - \frac{Z_i}{D}\right)^{0.5}$	
Rectangular Wedge	$L \times W \times \left[1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)\right]^2 \times \left(1 - \frac{Z_i}{D}\right)$	
Parabolic Wedge	$\frac{2}{3} \times L \times W \times \left[1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right] \times \left(1 - \frac{Z_i}{D}\right)$	
Elliptical Bowl	$\frac{1}{4} \times \pi \times L \times W \times \left[1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right] \times \left(1 - \frac{Z_i}{D}\right)^{0.5}$	

Η γεωμετρία των σχημάτων φαίνεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α. Επίσης, για κάθε σχήμα υιοθετήθηκε ένας συντελεστής βαθμονόμησης  $C_{vol}$  και  $C_{Ar}$ , για τον υπολογισμό του όγκου και της επιφάνειας αντίστοιχα, μέσω του οποίου υπολογίζονται οι τελικές τιμές τους.

$$V_{sim} = C_{vol} \times V_{Z_i} \quad (3.1)$$

$$A_{sim} = C_{Ar} \times A_{surf} \quad (3.2)$$

Η επιλογή του καταλληλότερου σχήματος για κάθε ταμιευτήρα γίνεται ως εξής. Σύμφωνα με τους τύπους του Πίνακα 3.1 υπολογίζεται η συνολική αποθηκευτικότητα και η μέγιστη επιφάνεια του ταμιευτήρα. Στη συνέχεια υπολογίζεται το σχετικό σφάλμα:

$$\varepsilon_{stor} = \frac{V_{GRAND} - V_{sim}}{V_{GRAND}} \times 100\% \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_{Ar} = \frac{A_{GRAND} - A_{sim}}{A_{GRAND}} \times 100\% \quad (3.4)$$



όπου  $V_{sim}$ ,  $A_{sim}$  : Εκτιμώμενες τιμές όγκου και επιφάνειας αντίστοιχα

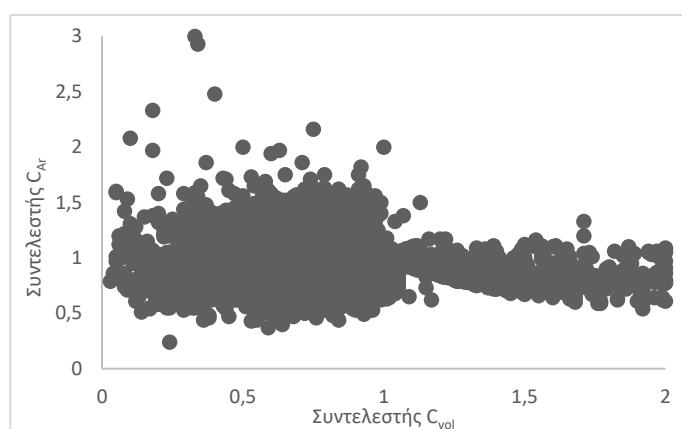
$V_{GRanD}$ ,  $A_{GRanD}$  : Πραγματικές τιμές της βάσης GRanD

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται δώδεκα (12) φορές, μία φορά για κάθε υποψήφιο σχήμα, και για κάθε ταμειυτήρα επιλέγεται το σχήμα που θα δώσει το μικρότερο σφάλμα.

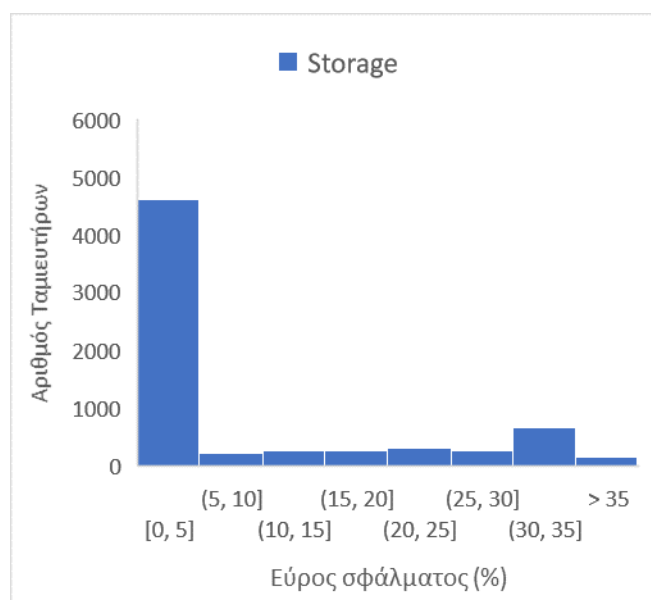
**Πίνακας 3.2:** Στατιστικά χαρακτηριστικά  $C_{vol}$ ,  $C_{Ar}$

	Συντελεστής $C_{vol}$	Συντελεστής $C_{Ar}$
<b>Μέση Τιμή</b>	1,09	0,925
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	3,47	0,24
<b>Μέγιστη Τιμή</b>	199,75	8,57
<b>Ελάχιστη Τιμή</b>	0,03	0,24

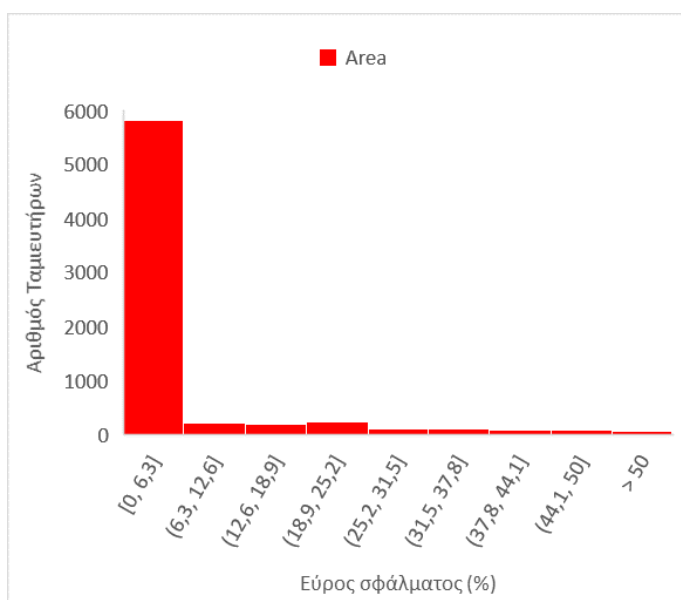
**Εικόνα 3.4:** Σχέση μεταξύ συντελεστών  $C_{vol}$ ,  $C_{Ar}$



Είναι σαφές πως είναι δύσκολο να ελαχιστοποιούνται τα δύο σφάλματα ταυτόχρονα, για αυτό το λόγο δίνεται προτεραιότητα στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος της αποθηκευτικότητας  $\epsilon_{stor}$ , αφού κρίνεται πιο σημαντική η γνώση του όγκου απ'ότι της επιφάνειας.

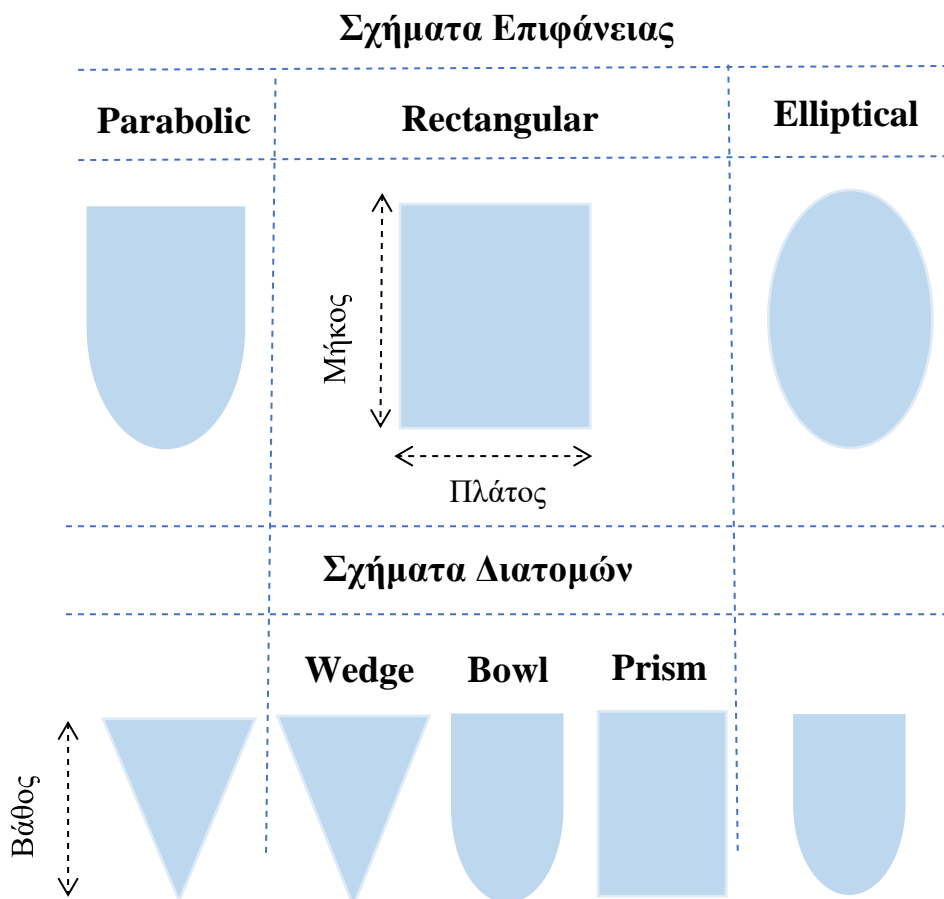


**Εικόνα 3.5:** Σχετικό σφάλμα (%) εκτιμώμενου όγκου



**Εικόνα 3.6:** Σχετικό σφάλμα (%) εκτιμώμενης επιφάνειας

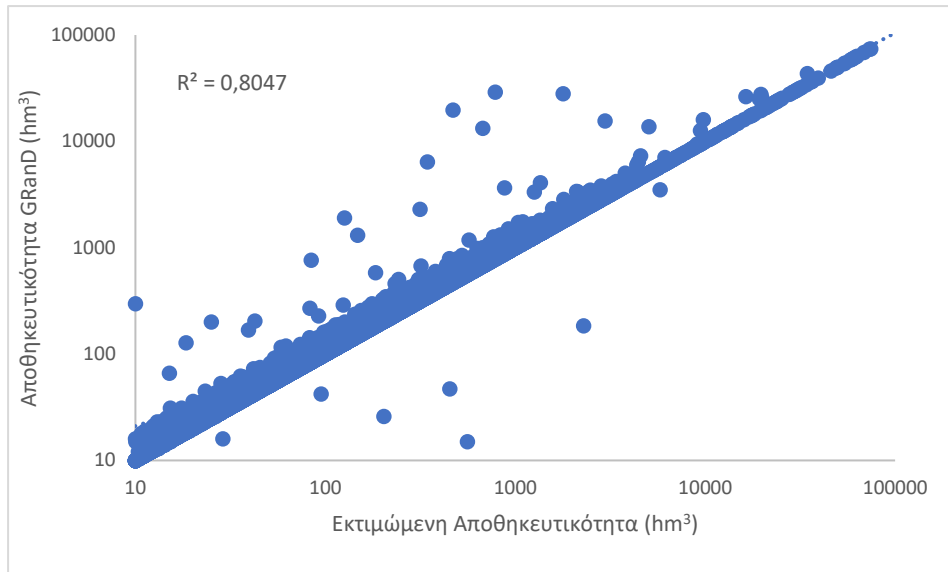
Έπειτα από την αρχική βαθμονόμηση, από τα αρχικά 12 γεωμετρικά σχήματα κυριάρχησαν τα 5 από αυτά, τα οποία παρατίθενται στην Εικόνα 3.7. Για απλουστευτικούς λόγους, αλλά και για να αποφευχθεί η «υπερ-προσαρμογή», πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία έχοντας μόνο τα πέντε αυτά σχήματα ως υποψήφια.



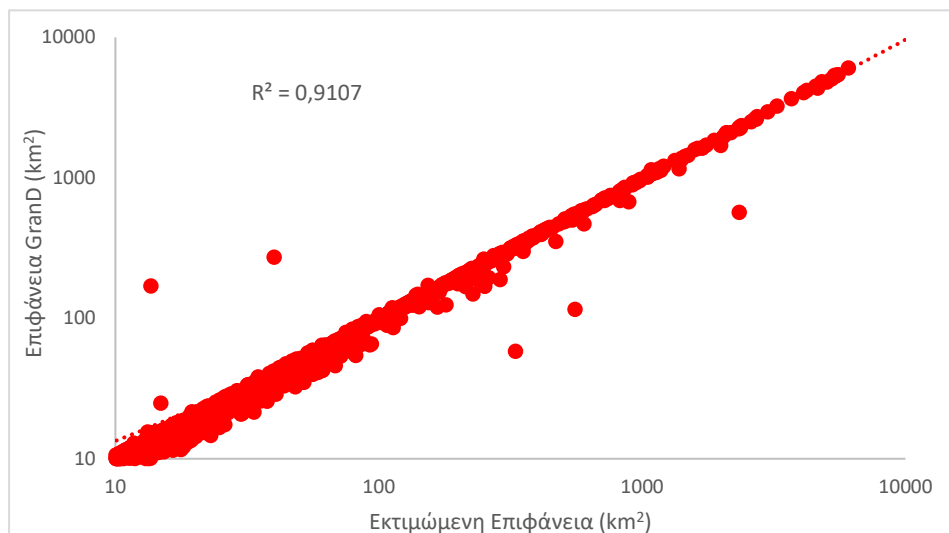
**Εικόνα 3.7:** Τελικά γεωμετρικά σχήματα α) επιφάνειας και β) εγκάρσιας διατομής

➤ **Βήμα 4°**

Τελευταίο βήμα είναι η εξαγωγή των καμπυλών στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας για όλο το εύρος των ταμιευτήρων υπό μελέτη, χρησιμοποιώντας το μήκος, το πλάτος και το μέγιστο βάθος του κάθε ταμιευτήρα σε συνδυασμό με το τυπολόγιο του Πίνακα 3.1.



**Εικόνα 3.8:** Συσχέτιση εκτιμώμενης αποθηκευτικότητας και δεδομένων της βάσης GRanD



**Εικόνα 3.9:** Συσχέτιση εκτιμώμενης επιφάνειας και δεδομένων της βάσης GRanD

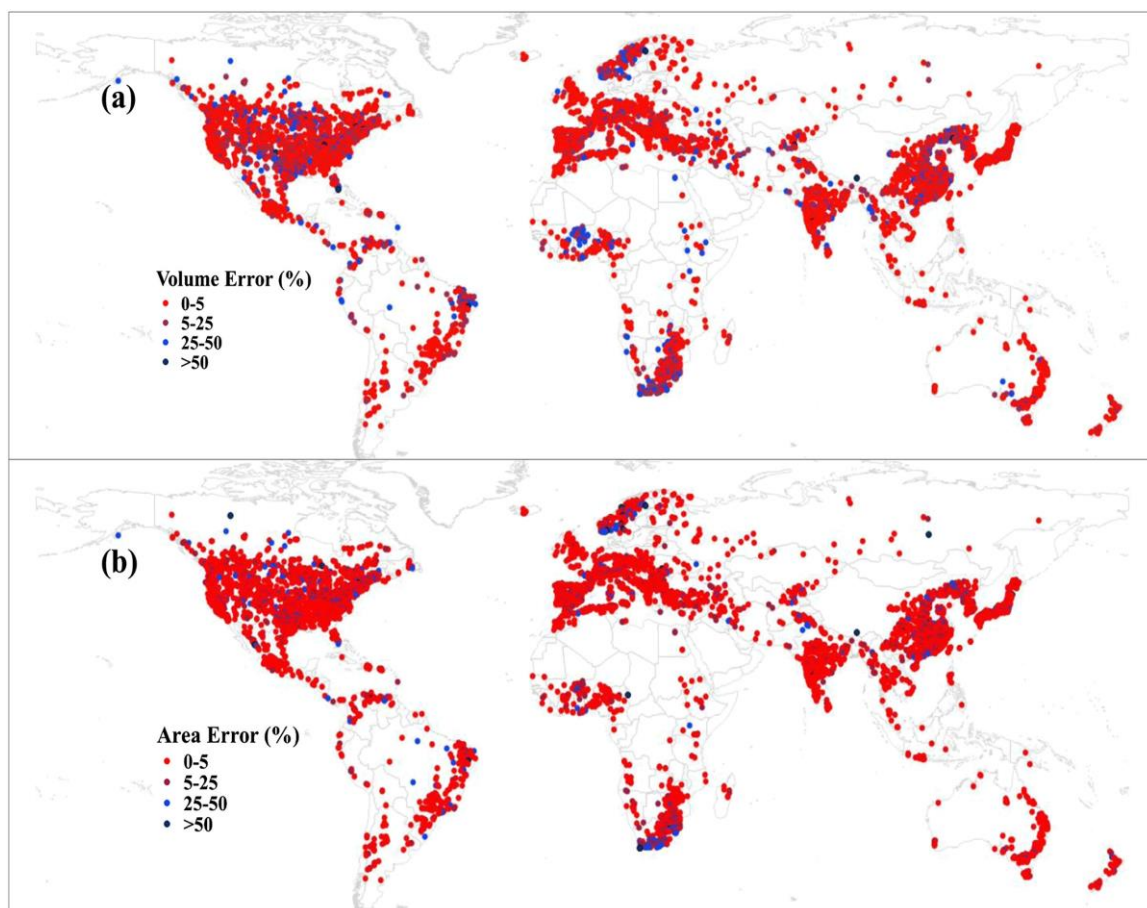
### 3.3 Αποτελέσματα Έρευνας

Η διαδικασία που περιγράφηκε πραγματοποιήθηκε για τους 6.824 ταμειυτήρες της βάσης GRanD, θεωρώντας 5 υποψήφια γεωμετρικά σχήματα που μπορούν να αντικατοπτρίσουν έναν ταμειυτήρα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται επαλήθευση των αποτελεσμάτων της έρευνας, συγκρίνοντάς τα με πραγματικές μετρήσεις βάρους – χωρητικότητας (*Gao et al., 2012 & Zhang et al., 2014*).

### 3.3.1 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Το σχετικό σφάλμα μεταξύ των δεδομένων της βάσης GRanD και των εκτιμήσεων για την αποθηκευτικότητα των ταμιευτήρων δεν ξεπερνά το 5% για 4.516 ταμιευτήρες (66% του συνόλου) και 50% για 6.757 ταμιευτήρες (99% του συνόλου). Όσον αφορά στο σχετικό σφάλμα μεταξύ των δεδομένων και των εκτιμήσεων για την επιφάνεια κάθε ταμιευτήρα, είναι ελαφρώς μεγαλύτερο αφού δόθηκε προτεραιότητα στην ελαχιστοποίηση του  $\epsilon_{stor}$ . Ωστόσο δεν υπερβαίνει το 10% για 6.000 ταμιευτήρες, δηλαδή 88% του συνόλου.

Η λογική για τους συντελεστές βαθμονόμησης για την επιλογή του βέλτιστου σχήματος κάθε ταμιευτήρα είναι να βρίσκονται κατά το δυνατόν κοντά στη μονάδα, το οποίο επιτυγχάνεται για το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών. Πιο συγκεκριμένα, για τον συντελεστή  $C_{vol}$ , το 85% του συνόλου περιέχεται στο εύρος  $0,50 \leq C_{vol} \leq 1,50$  και για τον συντελεστή  $C_{Ar}$  μόνο 12 ταμιευτήρες έχουν τιμές μεγαλύτερες του 2. Αυτό σημαίνει πως είναι εύλογη η γεωμετρική αναπαράσταση ενός ταμιευτήρα με ένα από τα υποψήφια σχήματα που αναλύονται στη συγκεκριμένη ερευνητική προσπάθεια.



**Εικόνα 3.10:** Κατανομή σε παγκόσμιο επίπεδο των σχετικών σφαλμάτων α) αποθήκευσης και β) επιφάνειας (Yigzaw, et al., 2018).

### 3.3.2 Επαλήθευση Έρευνας

Οι εκτιμώμενες τιμές επιφάνειας και αποθηκευτικότητας επαληθεύονται με δεδομένα μετρήσεων, λαμβάνοντας υπόψη τρία στατιστικά μέτρα απόδοσης.

- **Συντελεστής Προσδιορισμού  $R^2$  (coefficient of determination)**

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{sim} - \overline{V_{ob}})^2}{\sum_{i=1}^n (V_{ob} - \overline{V_{ob}})^2}$$

όπου  $V_{sim}$ ,  $V_{ob}$  : οι εκτιμώμενες και πραγματικές τιμές αποθηκευτικότητας

$\overline{V_{ob}}$  : η μέση τιμή των πραγματικών παρατηρήσεων

για  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , όπου  $n$ : ο αριθμός των ταμιευτήρων

- **Μεροληψία (Bias)**

$$Bias (mcm) = (\overline{V_{sim}} - \overline{V_{ob}})$$

- **Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (%) (Root Mean Square Error)**

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{sim} - V_{ob})^2}{n}}}{\overline{V_{ob}}} \times 100\%$$

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των τριών μέτρων απόδοσης.

**Πίνακας 3.3:** Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή των τριών στατιστικών μέτρων

	<b><math>R^2</math></b>	<b>Bias (mcm)</b>	<b>RMSE (%)</b>
<b>Μέση Τιμή</b>	0,85	0,03	16,92
<b>Μέγιστη Τιμή</b>	0,99	419,00	72,00
<b>Ελάχιστη Τιμή</b>	0,52	-348,00	0,00

Σε αυτό το στάδιο της έρευνας, οι ταμιευτήρες που επιλέχθηκαν για επικύρωση είναι δύο τύπων γεωμετρικών σχημάτων που αφορούν την εγκάρσια διατομή του ταμιευτήρα, δηλαδή είναι τύπου “Bowl” και “Wedge”.

## 4. Επεξεργασία δεδομένων στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας της βάσης ReGeom

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας 6.824 ταμιευτήρων της βάσης ReGeom με σκοπό τη διερεύνηση των συντελεστών των αντίστοιχων σχέσεων.

### 4.1 Προκαταρκτική επεξεργασία δείγματος ταμιευτήρων σε περιβάλλον Excel

Αρχικά, επιλέχθηκαν μερικοί αντιπροσωπευτικοί ταμιευτήρες από κάθε σχήμα ώστε να γίνει μια πρώτη επεξεργασία των συντελεστών.

**Πίνακας 4.1:** Κατανομή των ταμιευτήρων ενός πρώτου δείγματος ανάλογα με το γεωμετρικό τους σχήμα

Γεωμετρικό Σχήμα	Αριθμός Ταμιευτήρων
Rectangular Prism	38
Rectangular Bowl	17
Rectangular Wedge	23
Parabolic Wedge	11
Elliptical Bowl	22

Στόχος είναι να εξαχθούν σχέσεις βάθους – επιφάνειας – χωρητικότητας σε κάθε κατηγορία για κάθε ταμιευτήρα. Δοκιμάστηκαν διάφορες σχέσεις όπως λογαριθμικές, πολυωνυμικές και σχέσεις δύναμης, οι οποίες αντικατοπτρίζουν καλύτερα την πραγματικότητα στο σύνολο των σχημάτων. Οι ζητούμενες σχέσεις είναι της μορφής:

$$h = \lambda \times S^k \quad (4.1)$$

$$S = \alpha \times h^b \quad (4.2)$$

$$S = c \times A^d \quad (4.3)$$

$$A = c_1 \times S^{d_1} \quad (4.4)$$

$$A = t \times h^v \quad (4.5)$$

Τέλος, δοκιμάζεται η κατάρτιση μίας σχέσης παρόμοιας μορφής της εξίσωσης (2.1).

$$S = l_1 \times (Ah)^{k_1} \quad (4.6)$$

Υπολογίζονται ξεχωριστές τιμές παραμέτρων, δηλαδή μία «τοπική» για κάθε ταμιευτήρα, και στη συνέχεια ορίζονται αντιπροσωπευτικές (γενικευμένες) τιμές για κάθε τύπο σχήματος.

Για την αξιολόγηση και των σχέσεων και την σύγκριση των τοπικών (*local*) και γενικευμένων (*global*) παραμέτρων, χρησιμοποιούνται δύο στατιστικά κριτήρια απόδοσης:

- **Δείκτης αποτελεσματικότητας NSE (Nash & Sutcliffe, 1970)**

Ο δείκτης αποτελεσματικότητας (αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία και ως δείκτης Nash-Sutcliffe efficiency, NSE) ορίζεται ως εξής:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

όπου  $n$ : ο αριθμός των παρατηρήσεων,  $\hat{y}_i$ : οι εκτιμημένες τιμές της μεταβλητής,  $\bar{y}$ : η μέση τιμή της μεταβλητής και  $y_i$ : οι πραγματικές τιμές της μεταβλητής.

Το εύρος των τιμών που μπορεί να λάβει ο συντελεστής είναι

$$-\infty < NSE \leq 1$$

Οι τιμές στο εύρος  $0 \leq NSE \leq 1$  θεωρούνται αποδεκτές, ενώ το μοντέλο θεωρείται ικανοποιητικό αν ο συντελεστής λαμβάνει τιμές από 0.70 και πάνω.

- **Ρίζα Μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE (Root Mean Squared Error)**

Η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) το οποίο υπολογίζει την απόκλιση του σφάλματος υψωμένο στο τετράγωνο για όλο το σύνολο των εκτιμώμενων τιμών. Ωστόσο, χρησιμοποιείται η ρίζα αυτού καθώς βρίσκεται στην ίδια κλίμακα με τα δεδομένα, άρα είναι πιο εύχρηστο.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

όπου αντίστοιχα οι μεταβλητές είναι ίδιες με αυτές του συντελεστή προσδιορισμού.

Το σφάλμα αυτό υπολογίζεται και για τις δύο κλίμακες, ήτοι *local* – *global*. Σε αυτή τη φάση της έρευνας, θα χρησιμοποιηθεί το RMSE ως το μόνο μέτρο απόδοσης.

Όσον αφορά στη δημιουργία καμπυλών στάθμης – αποθέματος, το απόθεμα συνδέεται με τη στάθμη με μία γενική σχέση της μορφής  $Q = a \times h^b$ , συνεπώς και οι λογάριθμοι των  $Q$  και  $h$ , συνδέονται με μία γραμμική σχέση. Η σχέση αυτή θα υπολογιστεί με γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των λογαρίθμων της παροχής ( $y$ ) και της στάθμης ( $x$ ), που δίνει τελικά την εξίσωση της μορφής:

$$Q = a \times h^b \Rightarrow \ln Q = \ln a + b \times \ln h \Rightarrow y = a + b \times x$$

Όπου  $b$ : η κλίση της ευθείας (slope) και  $a$ : η σταθερά (intercept)

Έτσι προκύπτει η τελική καμπύλη της μορφής (4.1)

- **Rectangular Prism**

Σε αυτή την κατηγορία, έπειτα από βελτιστοποίηση στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος  $RMSE_{global}$ , παρατηρήθηκε πως ο συντελεστής σχήματος  $\kappa$ , παρέμενε σχεδόν σταθερός για όλους τους ταμειυτήρες της κατηγορίας. Το ίδιο συνέβη και στις ακόλουθες σχέσεις που συνδέουν επιφάνεια – αποθηκευτικότητα. Οι σχέσεις είναι της μορφής:

$$h = \lambda \times S^{0,55} \quad (4.1.1)$$

$$S = \alpha \times h^{1,67} \quad (4.2.1)$$

$$S = c \times A^{3,62} \quad (4.3.1)$$

$$A = c_1 \times S^{0,40} \quad (4.4.1)$$

$$A = t \times h^{0,64} \quad (4.5.1)$$

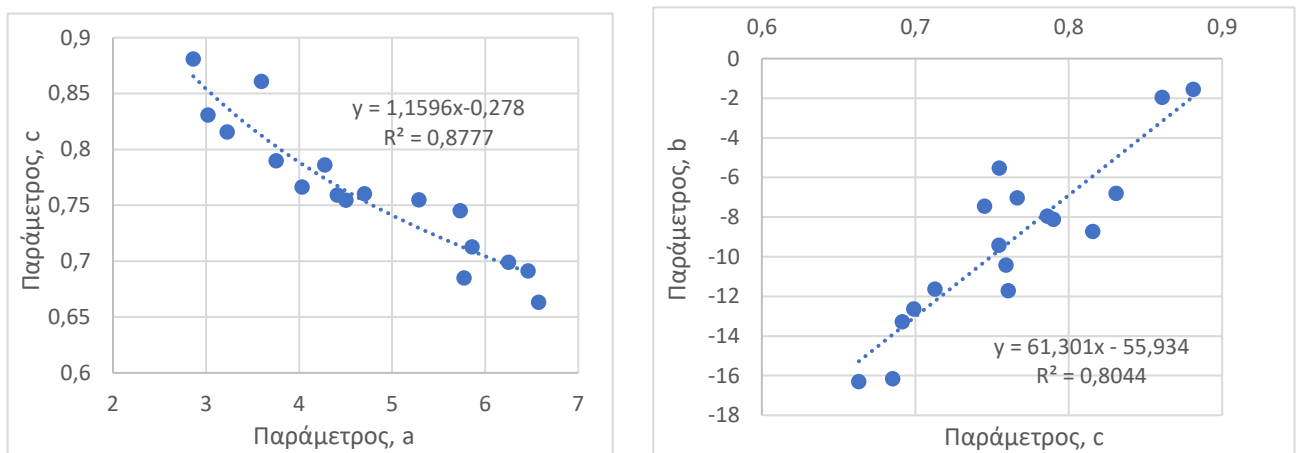
$$S = l_1 \times (Ah)^{1,18} \quad (4.6.1)$$

- **Rectangular Bowl**

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ίδια, με διαφορά πως για την καμπύλη αποθέματος – στάθμης ( $S - h$ ), δοκιμάστηκε μία επιπλέον σχέση με τρεις (3) όμως παραμέτρους, δίνοντας ωστόσο όπως αναμένεται μικρότερο σφάλμα. Η σχέση αυτή είναι της μορφής:

$$S = e^{(a \times \ln h + b)^c} \quad (4.7)$$

Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα οι παράμετροι της σχέσεις συσχετίζονται μεταξύ τους, οπότε τελικά θα προκύψει μία σχέση με δύο άγνωστες παραμέτρους. Στην παρούσα εργασία όμως μας ενδιαφέρει να εξάγουμε σχέσεις με όσο το δυνατόν λιγότερες άγνωστες παραμέτρους.



**Σχήμα 4.1:** Διαγράμματα συσχέτισης των παραμέτρων της εξίσωσης (4.7)

Οι τελικές σχέσεις δύναμης για αυτή την κατηγορία είναι οι εξής:



$$h = \lambda \times S^{0,45} \quad (4.1.2)$$

$$S = \alpha \times h^{2,12} \quad (4.2.2)$$

$$S = c \times A^{2,46} \quad (4.3.2)$$

$$A = c_1 \times S^{0,46} \quad (4.4.2)$$

$$A = t \times h^{1,11} \quad (4.5.2)$$

$$S = l_1 \times (Ah)^{1,14} \quad (4.6.2)$$

#### ▪ **Rectangular Wedge**

Η ιδιαιτερότητα σε αυτή την κατηγορία είναι πως δοκιμάστηκε μια πολυωνυμική σχέση για την καμπύλη ( $S - A$ ) της μορφής:

$$S = a \times \ln A^2 + b \times \ln A + c \quad (4.8)$$

Όπου έπειτα από βελτιστοποίηση ο συντελεστής  $a$  ισούται με  $a = 0,21$ . Αυτό σημαίνει πως η εξίσωση αυτή υπολογίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την επιφάνεια, αλλά παραμένουν άγνωστοι δύο (2) συντελεστές.

Οι τελικές σχέσεις δύναμης είναι οι εξής:

$$h = \lambda \times S^{0,37} \quad (4.1.3)$$

$$S = \alpha \times h^{2,58} \quad (4.2.3)$$

$$S = c \times A^{1,94} \quad (4.3.3)$$

$$A = c_1 \times S^{0,54} \quad (4.4.3)$$

$$A = t \times h^{1,44} \quad (4.5.3)$$

$$S = l_1 \times (Ah)^{1,11} \quad (4.6.3)$$

#### ▪ **Parabolic Wedge**

Αντίστοιχα με την προηγούμενη κατηγορία (αναμένεται να έχουν παρόμοια συμπεριφορά καθώς και οι δύο είναι *σφηνοειδείς*) η πολυωνυμική σχέση της παρακάτω μορφής της καμπύλης ( $S - A$ ) είναι η εξής:

$$S = a_1 \times \ln A^2 + b_1 \times \ln A + c_1 \quad (4.9)$$

Όπου ο συντελεστής  $a_1$  ισούται με  $a_1 = 0,23$ . Οι τελικές σχέσεις δύναμης είναι οι εξής:

$$h = \lambda \times S^{0,37} \quad (4.1.4)$$

$$S = \alpha \times h^{2,60} \quad (4.2.4)$$

$$S = c \times A^{1,95} \quad (4.3.4)$$

$$A = c_1 \times S^{0,55} \quad (4.4.4)$$

$$A = t \times h^{1,46} \quad (4.5.4)$$

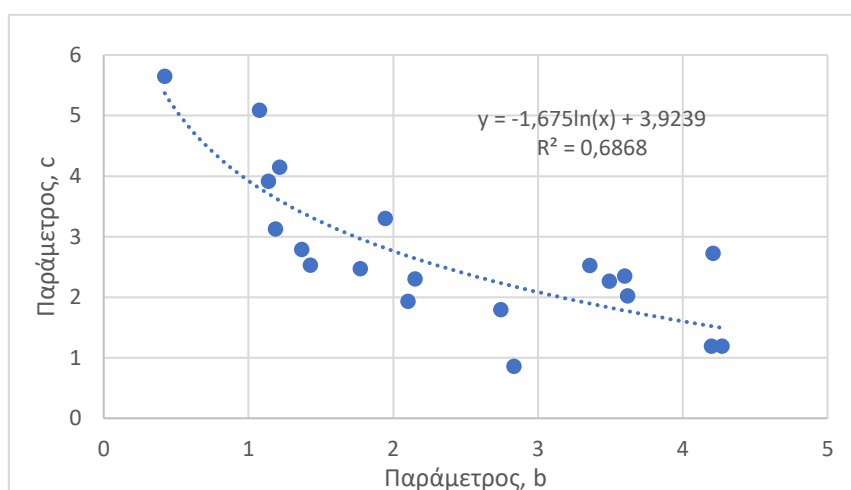
$$S = l_1 \times (Ah)^{1,19} \quad (4.6.4)$$

Όπως φαίνεται οι δύο κατηγορίες έχουν παρόμοια συμπεριφορά (όπως αναμενόταν), οπότε στη συνέχεια θα επεξεργαστούν σαν μία γενική κατηγορία σχήματος Wedge.

#### ▪ Elliptical Bowl

Στην τελευταία αυτή κατηγορία, δοκιμάστηκε η πολυωνυμική σχέση της μορφής

$$S = a_2 \times \ln A^2 + b_2 \times \ln A + c_2 \quad (4.10)$$



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα συσχέτισης των συντελεστών της εξίσωσης (4.10)

Όπου ο συντελεστής  $a_2$  είναι σταθερός και ισούται με  $a_2 = 0,19$  και οι οι δύο άλλες παράμετροι συσχετίζονται όπως φαίνεται παρακάτω.

Όμως, αν ως άγνωστος συντελεστής παραμείνει μόνο μία παράμετρος, η εξίσωση που προκύπτει δεν είναι τόσο ακριβής όσο είναι η σχέση δύναμης με άγνωστη μία παράμετρο. Για αυτό οι σχέσεις που προκύπτουν είναι οι εξής:

$$h = \lambda \times S^{0,45} \quad (4.1.5)$$

$$S = \alpha \times h^{2,12} \quad (4.2.5)$$

$$S = c \times A^{2,43} \quad (4.3.5)$$

$$A = c_1 \times S^{0,46} \quad (4.4.5)$$

$$A = t \times h^{1,03} \quad (4.5.5)$$

$$S = l_1 \times (Ah)^{0,90} \quad (4.6.5)$$

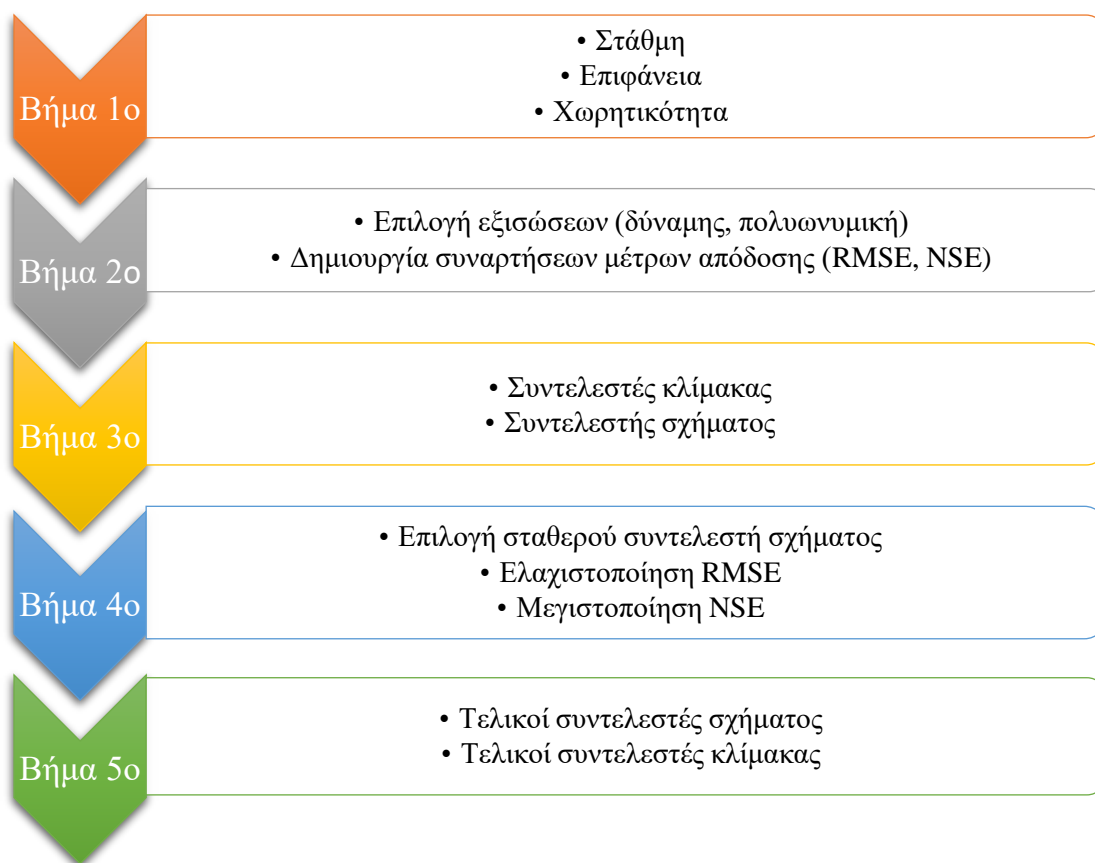
Αντίστοιχα με την περίπτωση των δύο προηγούμενων κατηγοριών, η συμπεριφορά αυτής με την κατηγορία του *Rectangular Bowl* φαίνεται πως είναι παρόμοια, για αυτό θα αντιμετωπιστούν σαν μία κατηγορία στην επόμενη επεξεργασία.

## 4.2 Επεξεργασία 6.824 ταμειυτήρων σε περιβάλλον Octave – Στατιστικά χαρακτηριστικά παραμέτρων

Η προκαταρκτική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε έδωσε μία πρώτη εικόνα των συντελεστών και της συσχέτισης μεταξύ τους. Σε αυτό το στάδιο της έρευνας, θα πραγματοποιηθεί επεξεργασία στο σύνολο των ταμειυτήρων για τρεις (3) γενικές κατηγορίες:

- I. Prism
- II. Bowl
- III. Wedge

Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι σχετικά απλή και απεικονίζεται παρακάτω.



Σκοπός της επεξεργασίας είναι να εξαχθούν οι βελτιστοποιημένες σχέσεις των παραπάνω μορφών για τα τρία (3) σχήματα για όλο το εύρος της βάσης δεδομένων. Στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιηθούν μόνο οι σχέσεις τύπου δύναμης, θεωρώντας ότι είναι οι πλέον βέλτιστες για να προσομοιώσουν έναν ταμειυτήρα.

**Πίνακας 4.2:** Τελικές σχέσεις τύπου δύναμης στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας

<b>Prism</b>		<b>Bowl</b>		<b>Wedge</b>	
<i>Εξίσωση</i>	<i>NSE</i>	<i>Εξίσωση</i>	<i>NSE</i>	<i>Εξίσωση</i>	<i>NSE</i>
$h = \lambda S^{0,55}$	0,998	$h = \lambda S^{0,44}$	0,999	$h = \lambda S^{0,36}$	0,999
$S = a h^{1,83}$	0,997	$S = a h^{2,31}$	0,997	$S = a h^{2,79}$	0,998
$S = c A^{2,55}$	0,944	$S = c A^{1,91}$	0,982	$S = c A^{1,64}$	0,993
$A = c_1 S^{0,39}$	0,97	$A = c_1 S^{0,52}$	0,99	$A = c_1 S^{0,61}$	0,995
$A = t h^{0,70}$	0,959	$A = t h^{1,20}$	0,974	$A = t h^{1,70}$	0,973
$S = I_1 (Ah)^{1,07}$	0,996	$S = I_1 (Ah)^{1,05}$	0,998	$S = I_1 (Ah)^{1,03}$	0,998

Ειδικότερα, για την τελευταία σχέση κάθε κατηγορίας η επεξεργασία επεκτάθηκε ώστε να σταθεροποιηθεί και ο συντελεστής  $I_1$  σε μία σταθερή τιμή, ώστε να δημιουργηθεί μία σχέση της μορφής (2.1).

$$\text{Prism} \quad S = 0,4 \times (Ah)^{1,05} \quad (4.6.6)$$

$$\text{Bowl} \quad S = 0,28 \times (Ah)^{1,05} \quad (4.6.7)$$

$$\text{Wedge} \quad S = 0,23 \times (Ah)^{1,02} \quad (4.6.8)$$

Παρακάτω, παρουσιάζεται ο Πίνακας 4.3 που απεικονίζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά του συντελεστή κλίμακας  $\lambda$  για την καμπύλη στάθμης – αποθέματος. Οι πίνακες για τις υπόλοιπες σχέσεις βρίσκονται στο Παράρτημα Β.

**Πίνακας 4.3:** Στατιστικά χαρακτηριστικά συντελεστών κλίμακας  $\lambda$ , στάθμης - αποθέματος

	<b>Prism</b>		<b>Bowl</b>		<b>Wedge</b>	
	$\kappa = 0,55$		$\kappa = 0,44$		$\kappa = 0,36$	
	Local $\lambda$	Global $\lambda^*$	Local $\lambda$	Global $\lambda^*$	Local $\lambda$	Global $\lambda^*$
Ελάχιστη Τιμή	0,028	0,029	0,126	0,129	0,271	0,276
Μέγιστη Τιμή	54,016	54,567	58,997	59,358	55,337	53,869
Μέση Τιμή	4,161	4,176	7,435	7,481	9,76	9,724
Τυπική Απόκλιση	4,404	4,428	6,402	6,425	7,149	7,142
Ασυμμετρία	2,701	2,711	2,123	2,105	1,682	1,668
Διάμεσος	2,696	2,702	5,63	5,665	8,109	8,08

Στη συνέχεια, δοκιμάστηκε μία καινούρια σχέση της μορφής (2.1) που θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει καλύτερα το απόθεμα του εκάστοτε ταμιευτήρα συναρτήσει της στάθμης και της επιφάνειάς του. Η σχέση αυτή είναι η εξής:

$$S = 0,38 \times (Ah) \quad (4.11)$$

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι καμπύλες στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας εξήχθησαν χρησιμοποιώντας δεδομένα από τη βάση GRanD. Επομένως, το 54,7% των ταμιευτήρων αντιπροσωπεύεται καλύτερα από την εξίσωση (2.1). Πιο αναλυτικά:

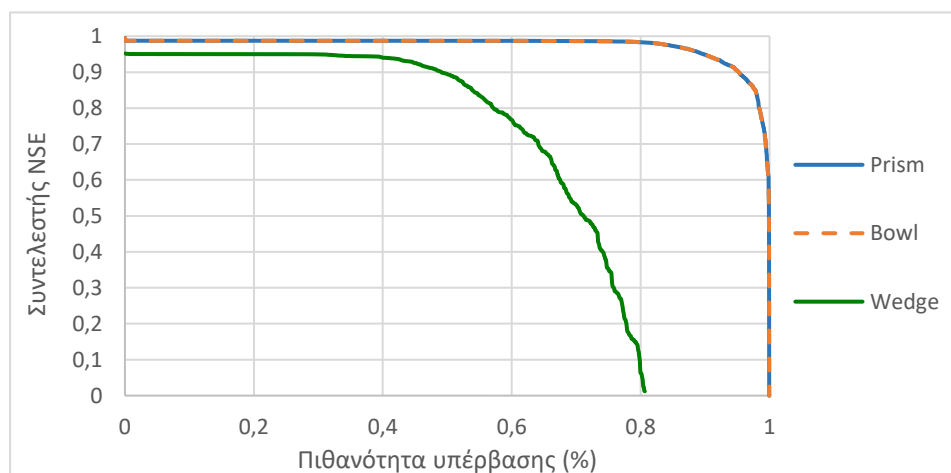
- Για τους πρισματικούς (Prism) ταμιευτήρες, το 73% αυτών αντιπροσωπεύεται καλύτερα από την εξίσωση (2.1), με μέσο NSE = 0,81 για το 89% αυτών.
- Για τους ημικυκλικούς (Bowl) ταμιευτήρες, το 72% αυτών αντιπροσωπεύεται καλύτερα από την εξίσωση (4.11), με μέσο NSE = 0,86 για το 83% αυτών.
- Για τους σφηνοειδείς (Wedge) ταμιευτήρες, το 66% αυτών αντιπροσωπεύεται καλύτερα από την εξίσωση (4.11), με μέσο NSE = 0,72 για το 69% αυτών

Καμία από τις δύο εξισώσεις που εξετάζονται δεν δίνουν μεγάλη ακρίβεια, για αυτό αν είναι γνωστό το σχήμα του ταμιευτήρα είναι πιο εύλογο να χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (4.6.6), (4.6.7) και (4.6.8).

Τέλος, δοκιμάστηκε μία γενική σχέση στάθμης – αποθέματος με σταθερό τον συντελεστή σχήματος  $\kappa$ . Έπειτα από δοκιμές, η βέλτιστη τιμή του ισούται με  $\kappa = 0,49$  και είναι της μορφής:

$$h = \lambda \times S^{0,49} \quad (4.12)$$

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, για τις δύο πρώτες κατηγορίες η σχέση έχει υψηλό δείκτη NSE (οι καμπύλες του παρακάτω σχήματος πρακτικά ταυτίζονται), ενώ για την τρίτη δεν δίνει τόσο μεγάλη ακρίβεια. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού για τους σφηνοειδείς ταμιευτήρες, ο συντελεστής  $\kappa$  ισούται με  $\kappa = 0,36$  ο οποίος απέχει σχετικά πολύ από την τιμή  $\kappa = 0,49$ .



**Σχήμα 4.4:** Διάγραμμα που απεικονίζει τον συντελεστή NSE και την πιθανότητα υπέρβασης (%) των τριών σχημάτων της εξίσωσης (4.12)

## 5. Διαμόρφωση υποθετικών ταμιευτήρων

Στόχος του κεφαλαίου είναι η δημιουργία ενός ικανοποιητικού αριθμού λεκανών κατάκλυσης, πριν την πλήρωσή τους, έτσι ώστε να γίνει μια επεξεργασία των σχέσεων στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας (με έμφαση στις καμπύλες στάθμης – αποθηκευτικότητας) σύμφωνα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε λεκάνης.

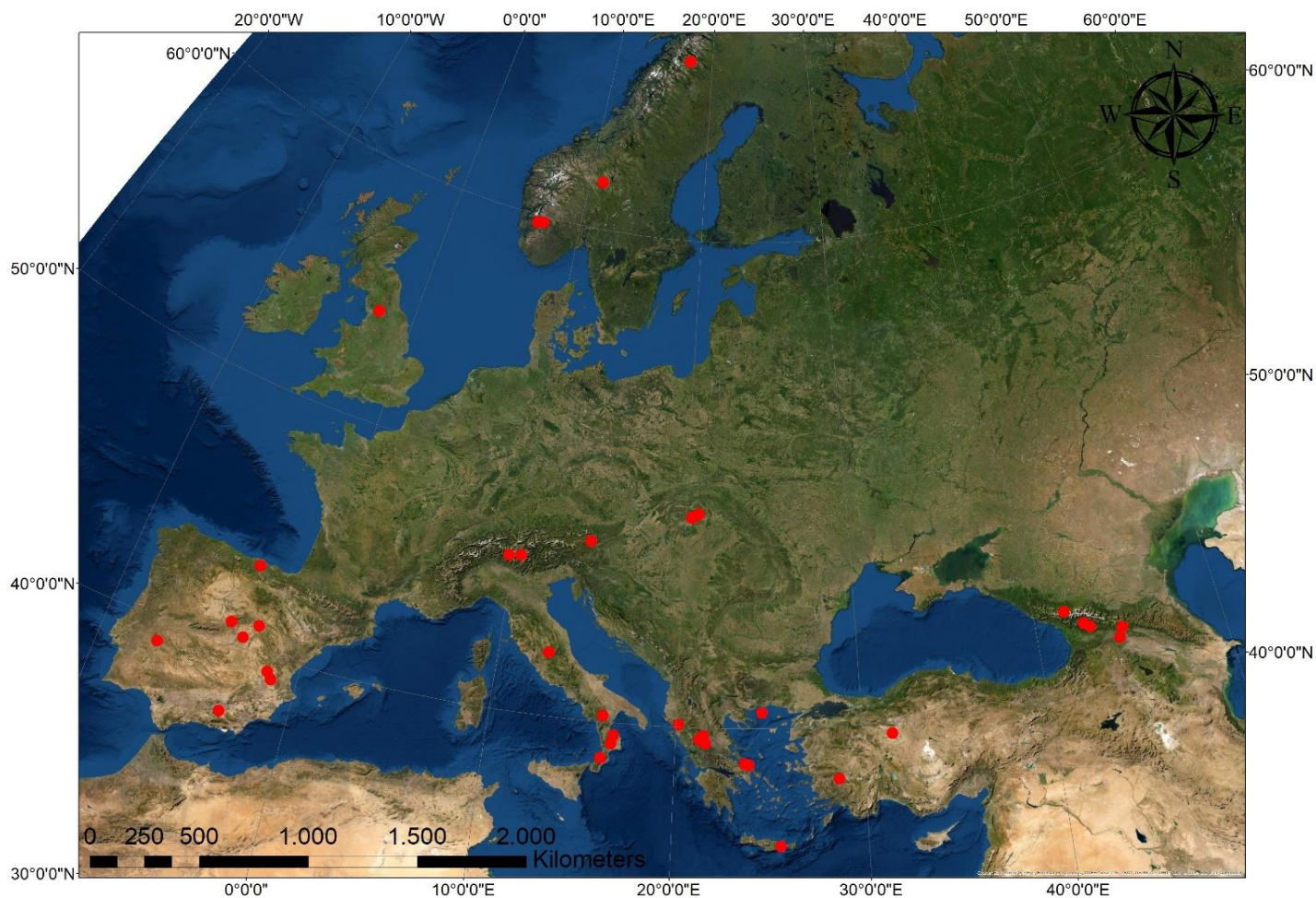
### 5.1 Κατανομή των θέσεων των υποψήφιων ταμιευτήρων

Οι εν δυνάμει ταμιευτήρες υπό επεξεργασία βρίσκονται κύριως εντός της Ευρωπαϊκής Ζώνης, με εξαίρεση 7 θέσεις που βρίσκονται σε χώρες της Ασίας. Η επιλογή των θέσεων πραγματοποιήθηκε με μοναδικό κριτήριο το ανάγλυφο και τη γεωμετρία της περιοχής, ενώ δεν εξετάστηκε το έδαφος της περιοχής, τα πετρώματα, ούτε οι χρήσεις γης ή αν υπάρχουν οικισμοί εντός της λεκάνης. Παρακάτω, φαίνονται πιο αναλυτικά οι θέσεις των ταμιευτήρων.

**Πίνακας 5.1:** Υποψήφιες θέσεις ανά χώρα

Χώρα	Αριθμός Ταμιευτήρων
Ελλάδα	7
Αλβανία	1
Ιταλία	7
Ισπανία	7
Πορτογαλία	1
Σλοβακία	2
Αυστρία	1
Αγγλία	1
Νορβηγία	3
Σουηδία	1
Τουρκία	2
Ρωσία	1
Γεωργία	4
<b>Σύνολο</b>	<b>38</b>

Παρακάτω φαίνονται οι ακριβείς θέσεις των ταμιευτήρων, σε σύστημα συντεταγμένων με επίπεδο αναφοράς σε WGS 84. Το *Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα (WGS)* αποτελεί πρότυπο για χρήση στη χαρτογραφία, τη γεωδαισία και την πλοήγηση, συμπεριλαμβανομένου του GPS. Περιλαμβάνει ένα τυποποιημένο σύστημα συντεταγμένων για τη Γη, μια τυπική επιφάνεια σφαιροειδούς αναφοράς (το ελλειψοειδές αναφοράς ή αναφοράς) για δεδομένα ακατέργαστου υψομέτρου και μια επιφάνεια εξισορροπίας βαρύτητας (geoid) που καθορίζει την ονομαστική στάθμη της θάλασσας. Οι συντεταγμένες των ταμιευτήρων δίνονται στον Πίνακα 5.2.



**Εικόνα 5.1:** Χάρτης γεωγραφικής κατανομής των θέσεων που εξετάζονται με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS

**Πίνακας 5.2:** Γεωγραφικές συντεταγμένες σε επίπεδο αναφοράς WGS 84 των θέσεων

	Συντεταγμένες (WGS 84)		Συντεταγμένες (WGS 84)		
Θέση 1	40°37' B	24°38' E	Θέση 20	39°12' B	1°14' Δ
Θέση 2	35°07' B	25°34' E	Θέση 21	39°26' B	1°32' Δ
Θέση 3	39°28' B	21°18' E	Θέση 22	37°27' B	3°10' Δ
Θέση 4	38°29' B	23°41' E	Θέση 23	39°11' B	7°11' Δ
Θέση 5	38°27' B	23°54' E	Θέση 24	59°41' B	6°36' E
Θέση 6	39°23' B	21°37' E	Θέση 25	59°40' B	6°57' E
Θέση 7	38°31' B	16°04' E	Θέση 26	61°47' B	11°08' E
Θέση 8	39°08' B	16°36' E	Θέση 27	67°09' B	18°06' E
Θέση 9	39°30' B	16°44' E	Θέση 28	39°40' B	21°31' E
Θέση 10	40°15' B	16°06' E	Θέση 29	39°53' B	20°20' E

Θέση 11	42°33' B	12°43' E	Θέση 30	48°46' B	20°47' E
Θέση 12	46°20' B	10°21' E	Θέση 31	48°33' B	20°24' E
Θέση 13	46°14' B	9°38' E	Θέση 32	39°32' B	31°43' E
Θέση 14	47°18' B	14°23' E	Θέση 33	37°50' B	28°05' E
Θέση 15	54°17' B	2°31' Δ	Θέση 34	43°32' B	41°47' E
Θέση 16	40°51' B	4°05' Δ	Θέση 35	42°47' B	42°42' E
Θέση 17	40°25' B	3°20' Δ	Θέση 36	42°36' B	42°58' E
Θέση 18	41°00' B	2°40' Δ	Θέση 37	41°51' B	44°33' E
Θέση 19	43°15' B	3°36' Δ	Θέση 38	42°14' B	44°40' E

## 5.2 Δημιουργία Καμπυλών – Εισαγωγή στο ArcGIS

Το ArcGIS Desktop είναι από τα κύρια πλαίσια λειτουργίας του ArcGIS και αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύνολο εργαλείων που παρέχουν στον χρήστη πρόσβαση σε γεωγραφικές οντότητες και δυνατότητες εκτέλεσης χωρικών διεργασιών. Απαρτίζεται από εξειδικευμένα υποσυστήματα με αντικείμενο την επισκόπηση, επεξεργασία, ανάλυση και απόδοση χωρικών δεδομένων και συμπληρώνεται από εξειδικευμένες επεκτάσεις (extensions). Οι εφαρμογές αυτές είναι:

- ArcCatalog
- ArcToolbox
- ArcMap

Επιπλέον, διατίθενται και υποσυστήματα που είναι γνωστά ως επεκτάσεις και ενεργοποιούνται από τον χρήστη κατά περίπτωση. Ορισμένες από αυτές είναι:

- 3D Analyst.
- Data Interoperability.
- Geostatistical Analyst.
- Network Analyst.
- Publisher.
- Schematics.
- Spatial Analyst.
- Statistical Analyst.
- Tracking Analyst.
- Production Manager.

Στην προκειμένη έρευνα, οι επεκτάσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι “3D Analyst” και “Spatial Analyst”. Το τρισδιάστατο επίπεδο απεικονίζεται μέσω του ArcScene ενώ το κύριο περιβάλλον της ανάλυσης γίνεται στο ArcMap, όπου εκτελούνται οι περισσότερες εντολές σε δισδιάστατο επίπεδο.



### 5.2.1 Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ) – Εποπτεία 3D Ανάλυσης

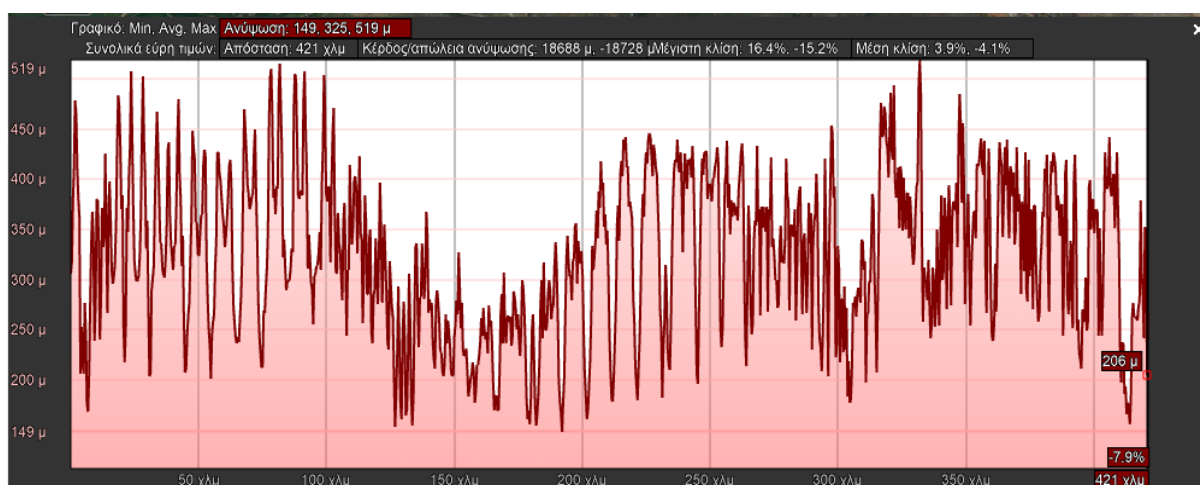
Αρχικά, η ιστοσελίδα <http://www.diva-gis.org/gdata> παρέχει δωρεάν δεδομένα ψηφιακών μοντέλων εδάφους, ποταμών, λιμνών και άλλων για όλες τις χώρες παγκοσμίως. Για τον Ελλαδικό χώρο που πραγματοποιήθηκε μία μικρή επεξεργασία, η ανάλυση των δεδομένων δεν παρέχει επαρκή αξιοπιστία. Συγκεκριμένα, η «ταυτότητα» του αρχείου του ΨΜΕ της Ελλάδας έχει τις εξής πληροφορίες.

**Πίνακας 5.3:** Ιδιότητες ΨΜΕ της Ελλάδας από τη βάση DIVA-GIS, πηγή ArcMap

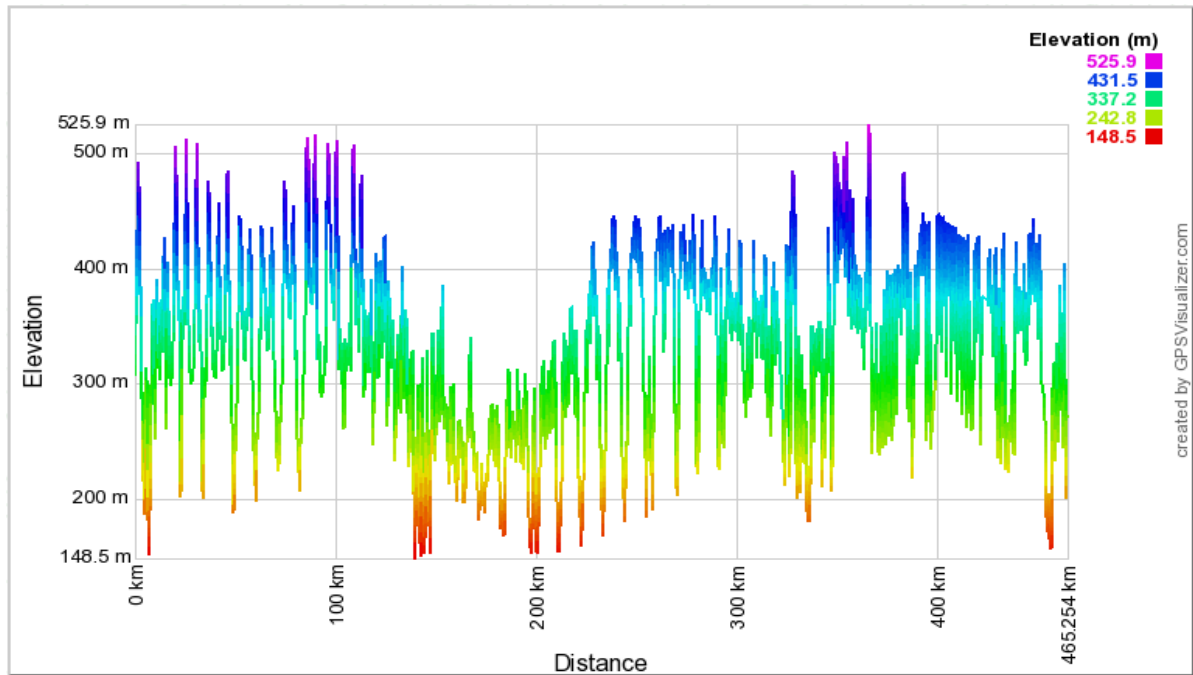
<i>Property</i>	<i>Value</i>
<b>Raster Information</b>	
Columns and Rows	1260, 852
Number of Bands	1
Cell Size (X, Y)	0,008333, 0,008333
<b>Spatial Reference</b>	<Undefined>
XY Coordinate System	Unknown

Επειδή η ανάλυση των δεδομένων (Cell Size) είναι πολύ μεγάλη, άρα δεν παρέχει αξιόπιστα δεδομένα και το σύστημα συντεταγμένων δεν μπορεί να μετασχηματιστεί, κρίνεται αναγκαίο τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν στην έρευνα να προέλθουν από αλλού. Επομένως, τα δεδομένα θα προέλθουν μέσω του Google Earth και θα μετατραπούν σε αρχείο που μπορεί να «διαβάσει» το λογισμικό ArcGIS. Βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ευκολία δημιουργίας δεδομένων σε παγκόσμια κλίμακα, σε όποιο σημείο του παγκόσμιου χάρτη επιθυμεί ο χρήστης. Αντίθετα, ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως η ακρίβεια των δεδομένων δεν είναι πολύ υψηλή, ωστόσο για τον σκοπό της εργασίας κρίνεται ικανοποιητική για το μεγαλύτερο μέρος των ταμειωτήρων.

Η μετατροπή γίνεται μέσω του <https://www.gpsvisualizer.com/elevation> με τη διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω. Δίνεται ένα παράδειγμα αποτύπωσης του αναγλύφου της περιοχής α) στο Google Earth και β) στη πλαφόρμα μετατροπής GPSVisualizer για μια περιοχή της Αττικής.



**Εικόνα 5.2:** Προφίλ ανύψωσης της περιοχής, (Πηγή: Google Earth)



**Εικόνα 5.3:** Προφίλ ανύψωσης (επιλογή elevation profile) της περιοχής, (Πηγή: GPSVisualizer)

Το δεύτερο διάγραμμα έχει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή υψομέτρου (526 m έναντι 519 m) και μεγαλύτερη τιμή της απόστασης του  $X$  άξονα (465,3 km έναντι 421 km), ωστόσο για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, η ακρίβεια της μετατροπής θεωρείται ικανοποιητική.

Για να εξαχθούν δεδομένα στάθμης – επιφάνειας – χωρητικότητας πρέπει να γίνουν κάποιες προεργασίες.

➤ Βήμα 1<sup>ο</sup>:

Επιλογή θέσης ταμειυτήρα με μοναδικό κριτήριο τη γεωμετρία της περιοχής (δεν εξετάζεται το γεωλογικό υπόβαθρο της κάθε θέσης, ούτε αν υπάρχουν οικισμοί στην περιοχή όπως αναφέρθηκε πιο πάνω). Η επιλογή γίνεται από το Google Earth, μαρκάρεται η περιοχή από τα σημεία που απαρτίζουν τον ταμειυτήρα και τη γύρω περιοχή και στη συνέχεια εισάγεται στο ArcMap. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) ή Digital Elevation Model (DEM). Τέλος, δημιουργείται ένα επίπεδο TIN (Triangular irregular networks) όπου αναπαριστά το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης.

Για καλύτερη κατανόηση, παρουσιάζεται ως παράδειγμα μία περιοχή στο νησί της Θάσου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η περιοχή που δημιουργήθηκε είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη λεκάνη ενδιαφέροντος για καλύτερη εποπτεία του αναγλύφου της περιοχής. Στις υπόλοιπες θέσεις ωστόσο η λεκάνη που δημιουργείται είναι μικρότερη αλλά παραμένει αρκετά μεγάλη ώστε οι υπολογισμοί να είναι ακριβείς.



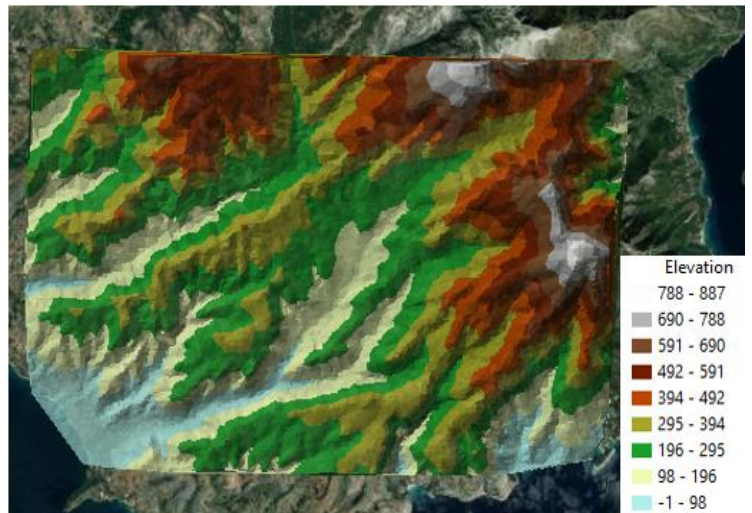
**Εικόνα 5.4:** Κάτοψη ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Google Earth)



**Εικόνα 5.5:** Εντοπισμός θέσης ταμειντήρα (Πηγή: Google Earth)



**Εικόνα 5.6:** Δημιουργία σημείων των υψομέτρων της περιοχής, μέσω του ArcMap



**Εικόνα 5.7:** Δημιουργία επιπέδου TIN, μέσω του ArcMap



## 5.2.2 Εξαγωγή Δεδομένων Στάθμης – Επιφάνειας – Αποθηκευτικότητας

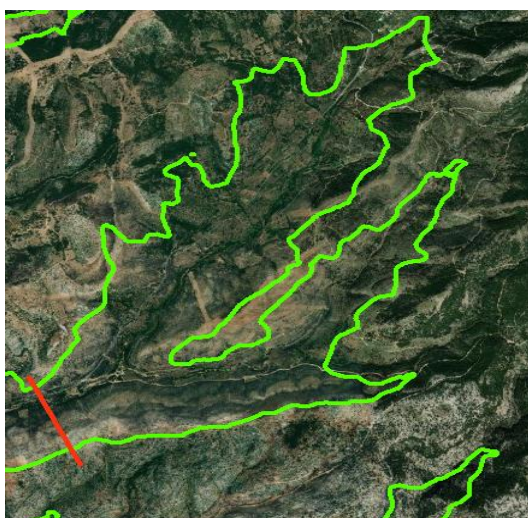
Εφ'όσον έχει δημιουργηθεί το επίπεδο που αναπαριστά το ανάγλυφο της περιοχής, πρέπει να προσδιοριστεί η θέση του φράγματος και στη συνέχεια η λεκάνη κατάκλισης. Όμως, πριν από οποιαδήποτε διεργασία, πρέπει τα σημεία που έχουν δημιουργήσει το ΨΜΕ να μετασχηματιστούν στο σύστημα συντεταγμένων της χώρας μας. Αυτό πραγματοποιείται με την εντολή Project (Data Management) και επιλέγοντας στο Coordinate System → Greek Grid.

### ➤ Βήμα 2°:

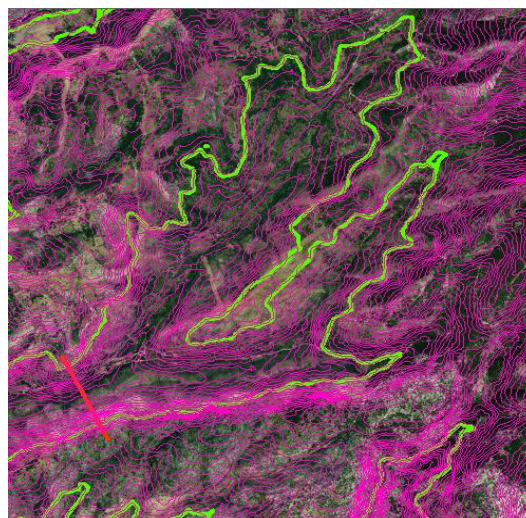
Προσδιορίζεται ο άξονας του φράγματος. Δημιουργείται ένα καινούριο αρχείο *shapefile* όπου ονομάζεται “*dam axis*” και με την εντολή editor → start editing → επιλογή του αρχείου “*dam axis*” → create features → Construction Tools → Επιλογή *line*. Ο άξονας σχεδιάζεται όσο το δυνατόν κάθετα στη ροή του νερού και σε σημείο όπου τα πρανή έχουν μεγαλύτερη κλίση.

### ➤ Βήμα 3°:

Δημιουργία της μέγιστης χωροσταθμικής καμπύλης. Αυτό πραγματοποιείται με την εντολή Surface Contour (3D Analyst). Στην επιλογή Contour Interval επιλέγεται μία μεγάλη τιμή, στην προκειμένη περίπτωση 3000, καθώς επιλέγεται ανά πόσα μέτρα θέλουμε να επαναλαμβάνεται η χωροσταθμική καμπύλη που δημιουργείται. Στην επιλογή Base Contour επιλέγεται η ισοϋψής που θέλουμε, εδώ επιλέγεται η ισοϋψής 210.



**Εικόνα 5.8:** Μέγιστη Χωροσταθμική καμπύλη (εντολή Surface Contour), μέσω του *ArcMap*

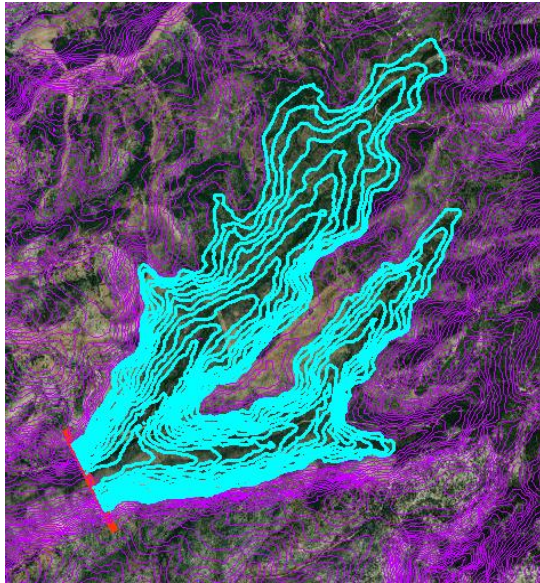


**Εικόνα 5.9:** Δημιουργία ισοϋψών (contour with barriers), μέσω του *ArcMap*

### ➤ Βήμα 4°:

Δημιουργία μίας «μάσκας» που περιλαμβάνει τα όρια της λεκάνης κατάκλισης. Αρχικά χρησιμοποιείται η εντολή contour with barriers (3D Analyst), όπου δημιουργούνται οι ισοϋψείς που απαρτίζουν την περιοχή της λεκάνης. Στη συνέχεια με τη βοήθεια του editor ενώνονται οι ισοϋψείς μεταξύ τους στα άκρα ώστε να σχηματιστεί ένα πολύγωνο, το οποίο δημιουργείται με την εντολή feature to polygon.

Τέλος, εξάγεται η «μάσκα» της λεκάνης με την εντολή *extract by mask*, όπου αποτελεί επίπεδο raster.



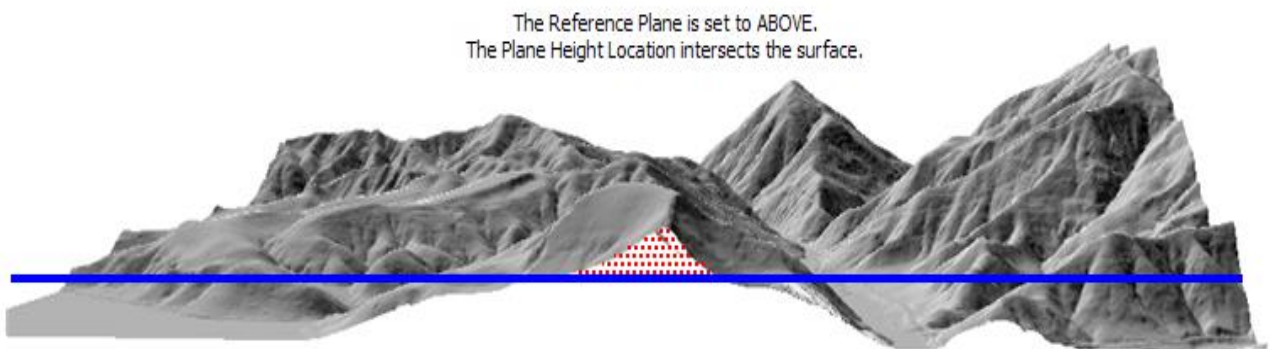
**Εικόνα 5.10:** Δημιουργία λεκάνης κατάκλυσης από τις ισοϋψείς της περιοχής στο περιβάλλον του *ArcMap*



**Εικόνα 5.11:** Δημιουργία «μάσκας» λεκάνης κατάκλυσης (*extract by mask*) στο περιβάλλον του *ArcMap*

➤ Βήμα 5<sup>ο</sup>:

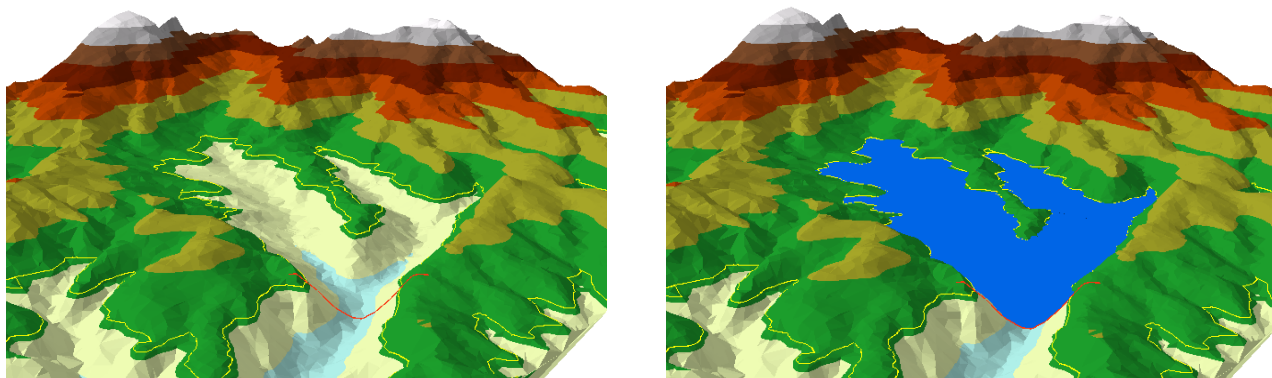
Τελευταίο βήμα είναι η εξαγωγή των δεδομένων. Με την εντολή *Surface Volume* παρέχεται η δυνατότητα υπολογισμού του όγκου και της επιφάνειας κάτω από ένα συγκεκριμένο ύψος.



**Εικόνα 5.12:** Χρησιμότητα εντολής *Surface Volume*. Έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει τον όγκο και την επιφάνεια πάνω από ένα συγκεκριμένο ύψος (με την επιλογή *above* → εάν θέλουμε τον όγκο ενός βουνού) και κάτω από αυτή (με την επιλογή *below* → όπως η περίπτωση μας), πηγή: *ArcGIS Manual*

Εδώ, επιλέγεται (αυθαίρετα) το ύψος του φράγματος να ισούται με 140 m, που είναι συγκρίσιμο με τα μεγαλύτερα φράγματα της Ελλάδας (Θησαυρός: 170 m, Κρεμαστά: 160 m).

Για την υψομετρική ανάλυση και την εξαγωγή των δεδομένων επιλέγεται βήμα 10 m. Από την εντολή ωστόσο δίνεται η δυνατότητα να επιλεγεί οποιοδήποτε βήμα, ακόμα και 0,5 m. Έτσι παρέχονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα που χρειάζονται.



**Εικόνα 5.13:** Τρισδιάστατη απεικόνιση του ταμιευτήρα α) Πριν την πλήρωσή του (αριστερά) και β) Μετά την πλήρωσή του έως τη στάθμη ενδιαφέροντος (δεξιά), στο περιβάλλον του ArcScene

Η ακρίβεια των λεκανών κατάκλυσης μέσω αυτής της μεθόδου δημιουργίας ΨΜΕ φαίνεται στον Πίνακα 5.4.

**Πίνακας 5.4:** Ακρίβεια Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους

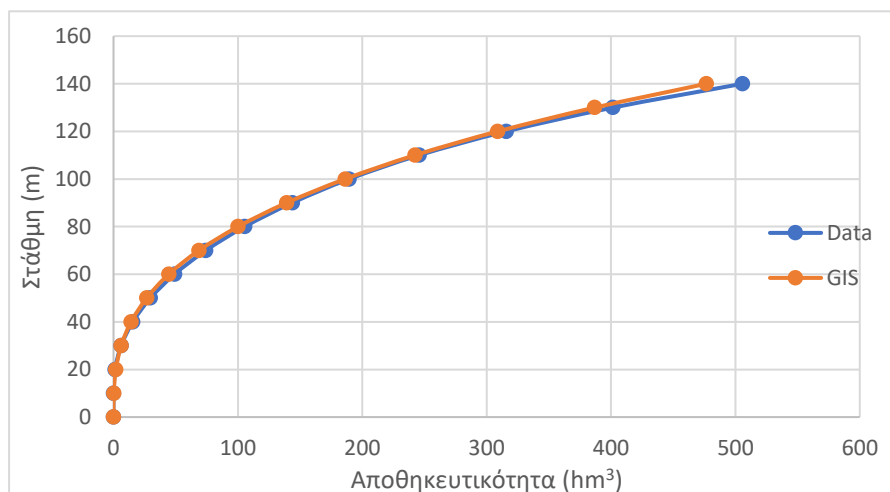
Θέση	Μέγεθος κελιών	Θέση	Μέγεθος κελιών
Θέση 1	36×36	Θέση 20	20×20
Θέση 2	22×22	Θέση 21	18×18
Θέση 3	20×20	Θέση 22	25×25
Θέση 4	46×46	Θέση 23	35×35
Θέση 5	31×31	Θέση 24	9×9
Θέση 6	16×16	Θέση 25	50×50
Θέση 7	22×22	Θέση 26	69×69
Θέση 8	17×17	Θέση 27	200×200
Θέση 9	46×46	Θέση 28	26×26
Θέση 10	22×22	Θέση 29	145×145
Θέση 11	18×18	Θέση 30	17×17
Θέση 12	15×15	Θέση 31	60×60
Θέση 13	26×26	Θέση 32	45×45
Θέση 14	29×29	Θέση 33	200×200
Θέση 15	28×28	Θέση 34	80×80
Θέση 16	16×16	Θέση 35	30×30
Θέση 17	8×8	Θέση 36	14×14
Θέση 18	21×21	Θέση 37	47×47
Θέση 19	31×31	Θέση 38	31×31



Σε τρεις θέσεις το μέγεθος των κελιών ξεπερνά το 100×100 m, δηλαδή η ακρίβεια δεν είναι μεγάλη, ωστόσο δεν δημιουργεί πρόβλημα για τους σκοπούς της εργασίας.

Η θέση 3 του Πίνακα 5.2 αντιστοιχεί στο φράγμα της Μεσοχώρας, ωστόσο μπορεί να θεωρηθεί ως υποψήφια θέση αφού δεν έχει τεθεί ακόμα σε λειτουργία. Για να επαληθευτεί πως η μέθοδος που αναφέρθηκε παρέχει ακριβή δεδομένα, παρακάτω θα συγκριθεί η καμπύλη στάθμης – αποθέματος που εξάγεται με την παραπάνω μέθοδο με την πραγματική καμπύλη στάθμης – αποθέματος της Μεσοχώρας.

Το ΨΜΕ που έχει δημιουργηθεί έχει ακρίβεια 20×20 m όπως αναφέρεται και στον Πίνακα 5.4 και ως μέγιστη χωροσταθμική καμπύλη επιλέγεται η ισοϋψής των 790 m.



**Εικόνα 5.14:** Σύγκριση των δύο καμπυλών στάθμης – αποθέματος α) πραγματικών δεδομένων και β) στοιχείων που προκύπτουν από το λογισμικό ArcGIS

Ο συντελεστής συσχέτισης των δύο δειγμάτων ισούται με  $r = 0,999$  και ο δείκτης καλής προσαρμογής είναι ίσος με  $NSE = 0,997$ . Αυτό σημαίνει πως η μέθοδος αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, τα οποία ωστόσο εξαρτούνται και σε κάποιο βαθμό από την ακρίβεια των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους.

### 5.2.3 Μεθοδολογία συσχέτισης παραμέτρων σύμφωνα με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του κάθε ταμιευτήρα – Εξαγωγή τελικών σχέσεων

Για τους 38 ταμιευτήρες έγινε ανάλυση και υπολογίστηκαν οι συντελεστές κλίμακας,  $\lambda$  και οι συντελεστές σχήματος,  $\kappa$ . Τα μέτρα απόδοσης έχουν ως εξής:

- ✓  $RMSE = 28,64$
- ✓  $NSE = 0,999$

#### **5.2.3.1: 1<sup>η</sup> Μέθοδος**

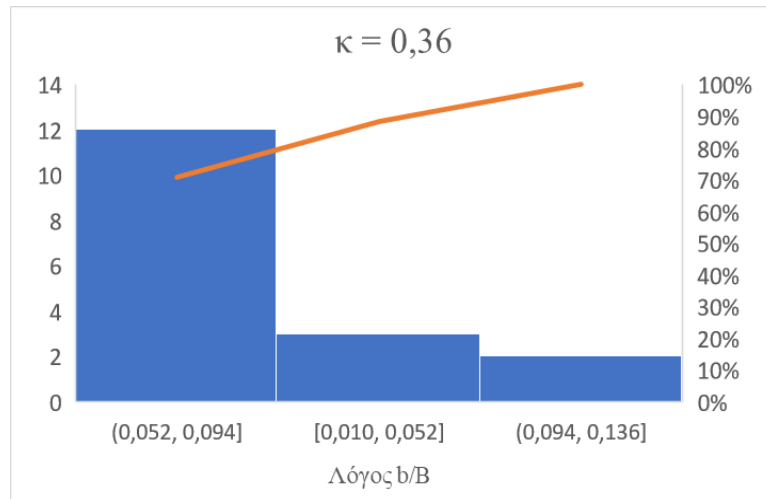
Έχοντας βρει τους συντελεστές, θα γίνει κατηγοριοποίηση των ταμιευτήρων σε τρία σχήματα, όπως έγινε και στο προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας. Η κατηγοριοποίηση θα πραγματοποιηθεί για αρχή «αυθαίρετα», ανάλογα με πόσο «κοντά» είναι η παράμετρος  $\kappa$  σε μία από τις 3 τιμές.

**Πίνακας 5.5:** Αριθμητικές «μέσες» τιμές των τριών βασικών σχημάτων ταμιευτήρων

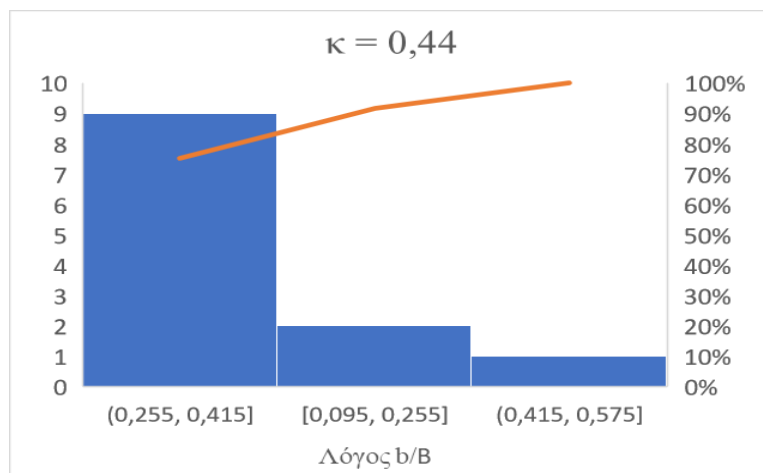
Σχήμα	Τιμή
Prism	0,55
Bowl	0,44
Wedge	0,36

Έτσι, από το σύνολο των ταμιευτήρων, οι 18 έχουν σφηνοειδές σχήμα, οι 12 έχουν ημικυκλικό και οι 8 έχουν πρισματικό.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται μέσω του GIS το πλάτος του πυθμένα του ταμιευτήρα,  $b$  και το μέσο πλάτος του  $B$ , και κατόπιν υπολογίζεται ο λόγος  $\frac{b}{B}$ . Αυτό γίνεται καθώς ο συντελεστής  $\kappa$  φαίνεται πως επηρεάζεται άμεσα από αυτό το λόγο. Πράγματι, παρακάτω φαίνονται τα ιστογράμματα για τις 3 κατηγορίες.

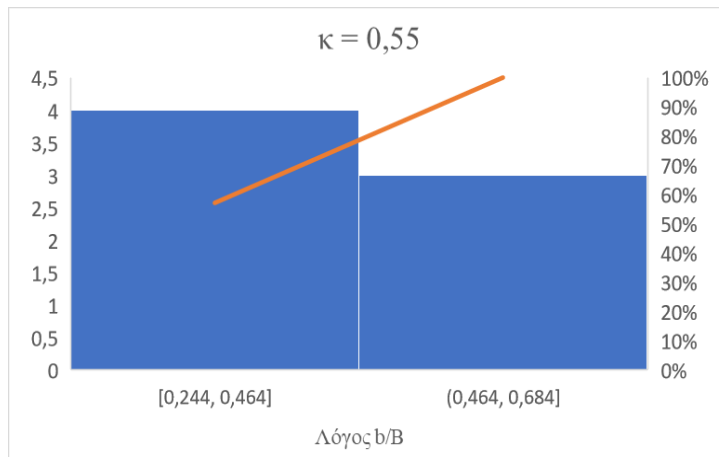


**Εικόνα 5.15:** Ιστόγραμμα λόγου πλάτους πυθμένα προς μέσου πλάτους για ταμιευτήρες τύπου Wedge



**Εικόνα 5.16:** Ιστόγραμμα λόγου πλάτους πυθμένα προς μέσου πλάτους για ταμιευτήρες τύπου Bowl





**Εικόνα 5.17:** Ιστόγραμμα λόγου πλάτους πυθμένα προς μέσου πλάτους για ταμειυτήρες τύπου Prism

Έτσι, γίνεται μία νέα κατηγοριοποίηση που έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

**Πίνακας 5.6:** Εύρος διακύμανσης του λόγου b/B για τις τρεις κατηγορίες ταμειυτήρων

Συντελεστής, κ	b/B	
	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
0,36	0	0,091
0,44	0,092	0,278
0,55	0,279	0,54

Με τη νέα αυτή θεώρηση, μόνο σε έναν ταμειυτήρα αλλάζει ο συντελεστής κ ενώ στους υπόλοιπους παραμένει σταθερός με την προηγούμενη «αυθαίρετη» κατηγοριοποίηση. Οι αλλαγές φαίνονται στον συντελεστή NSE που μειώνεται ελαφρώς σε αυτόν τον ταμειυτήρα.

Η νέα αυτή προσέγγιση μπορεί να μειώσει ελαφρώς τον συνολικό δείκτη καλής προσαρμογής NSE (από  $NSE = 0,995$  μειώθηκε στο  $NSE = 0,992$ ) αλλά παραμένει μία ακριβής προσέγγιση, υπολογίζοντας τον έναν συντελεστή σε σχέση με ένα γεωμετρικό χαρακτηριστικό του ταμειυτήρα. Ο συντελεστής λ παραμένει σε αυτή τη μέθοδο ανεξάρτητος.

### 5.2.3.2: 2η Μέθοδος

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο απλή και έχει σαν λογική να διατηρήσει τον έναν από τους δύο συντελεστές σταθερό.

- Συντελεστής κ

Σε αυτήν την κατηγορία διατηρείται σταθερός ο συντελεστής σχήματος, και ο συντελεστής κλίμακας είναι ανεξάρτητος. Έπειτα από βελτιστοποίηση επιλέγεται σαν βέλτιστη η τιμή  $\kappa = 0,40$ . Έτσι, ισχύει:

- ✓  $RMSE = 119$
- ✓  $NSE = 0,979$

- Συντελεστής λ

Σε αυτήν την κατηγορία διατηρείται σταθερός ο συντελεστής κλίμακας, ενώ ο συντελεστής σχήματος είναι ανεξάρτητος. Έπειτα από βελτιστοποίηση επιλέγεται σαν βέλτιστη η τιμή  $\lambda = 13,64$ . Έτσι, ισχύει:

- ✓  $RMSE = 218,08$
- ✓  $NSE = 0,92$

Επομένως, από τα παραπάνω, στη μέθοδο αυτή διατηρείται σταθερός ο συντελεστής  $\kappa$ , ενώ ο συντελεστής  $\lambda$  προκύπτει από βελτιστοποίηση.

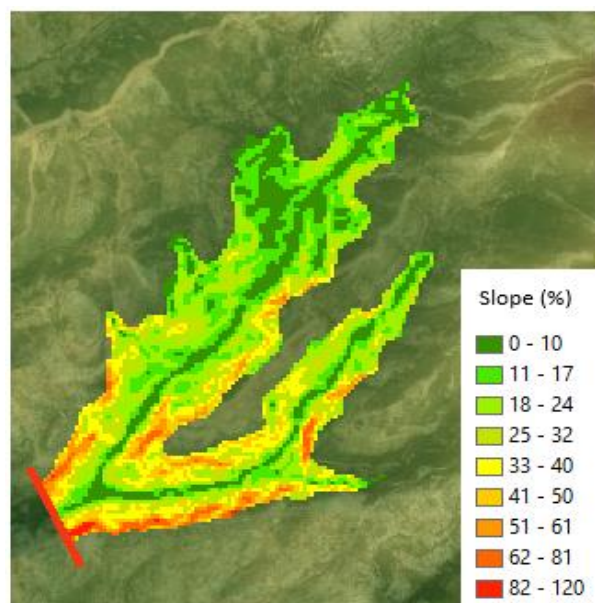
Στο εξής, οι βελτιστοποιημένοι συντελεστές  $\lambda$  από την 1<sup>η</sup> μέθοδο (τη μέθοδο κατηγοριοποίησης βάσει του λόγου b/B) θα συμβολίζονται ως  $\lambda^*$  και οι βελτιστοποιημένοι συντελεστές  $\lambda$  αυτής της μεθόδου (μέθοδος σταθερού συντελεστή  $\kappa$ ) θα συμβολίζονται ως  $\lambda^{**}$ .

### 5.2.3.3: 3η Μέθοδος

Επόμενο βήμα της εργασίας, είναι ο συντελεστής  $\lambda$  να συσχετιστεί με κάποιες παραμέτρους που αφορούν στη γεωμετρία του ταμειυτήρα, διατηρώντας τον συντελεστή  $\kappa$  σταθερό. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- Κλίση των πρανών, *slope* (%)
- Κλίση της λεκάνης, *J*
- Πλάτος πυθμένα, *b* (m)

Η κλίση των πρανών (θα συμβολίζεται ως “slope”) υπολογίζεται από το GIS με την εντολή slope (Spatial Analyst). Σαν “input” εισέρχεται το επίπεδο της «μάσκας» (mask) που έχει υπολογιστεί και επιλέγεται ο τρόπος μέτρησης να είναι επί τοις εκατό (%).



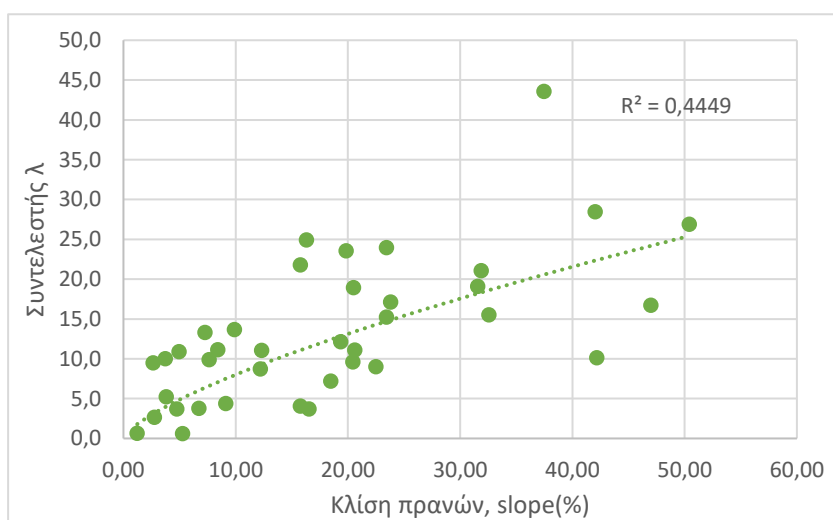
**Εικόνα 5.18:** Κλίση των πρανών της λεκάνης κατάκλυσης με την εντολή slope, πηγή: ArcMap

Ως κλίση πυθμένα ορίζεται ο λόγος της υψομετρικής διαφοράς ανάμεσα στην κατώτερη και την ανώτερη ισοϋψή που περικλείεται στον ταμιευτήρα προς το μήκος του κύριου υδατορεύματος. Σε περίπτωση που υπάρχουν δύο ή περισσότερα υδατορεύματα, οι τιμές τους αθροίζονται. Η σχέση υπολογισμού είναι:

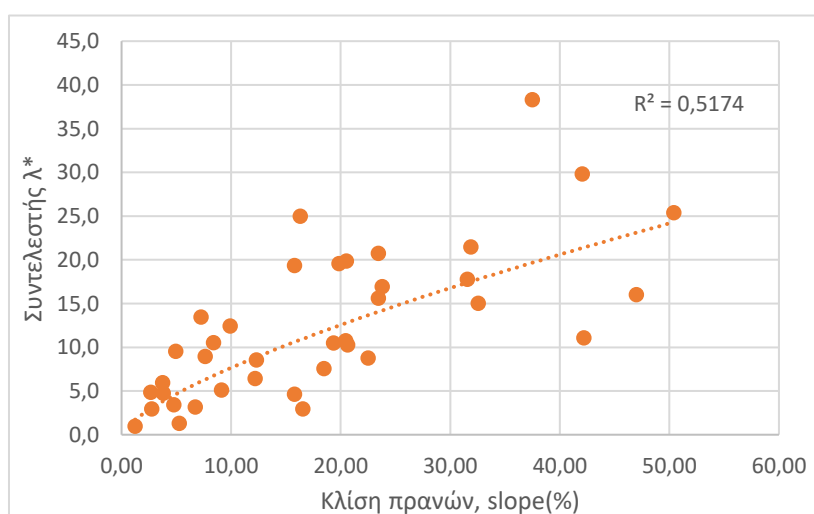
$$J = \frac{\Delta H}{L}$$

Το πλάτος του πυθμένα έχει ήδη υπολογιστεί για τους σκοπούς κατηγοριοποίησης των ταμιευτήρων ανάλογα με το σχήμα τους.

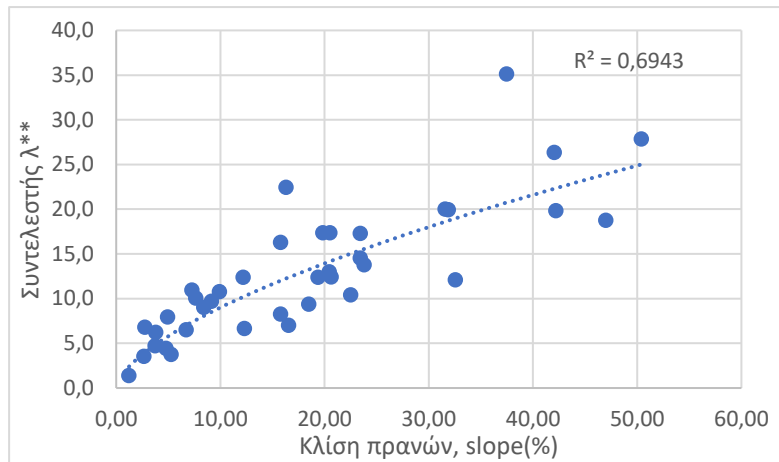
Σκοπός είναι να συσχετιστεί η παράμετρος  $\lambda^{**}$  του κάθε ταμιευτήρα με τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά. Από τα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται πως όσο βελτιστοποιείται το «σύστημα», άρα όσο βελτιστοποιείται η παράμετρος  $\lambda$ , τόσο περισσότερο επηρεάζεται από την κλίση των πρανών, τον πυθμένα και από το πλάτος του.



**Εικόνα 5.19:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ συντελεστή  $\lambda$  – κλίσης πρανών

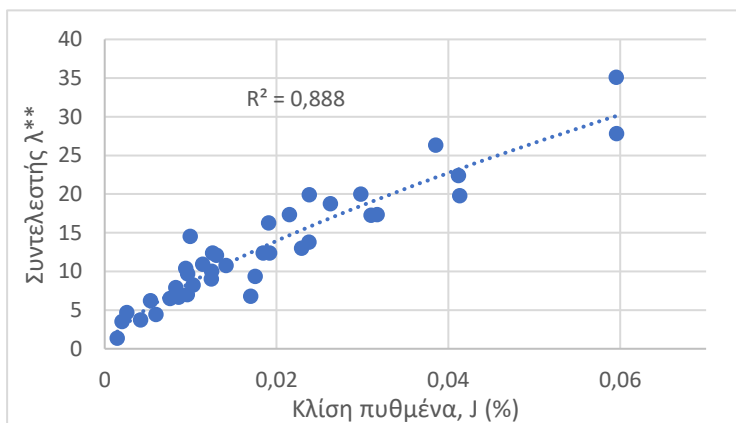


**Εικόνα 5.20:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ συντελεστή  $\lambda^*$  – κλίσης πρανών

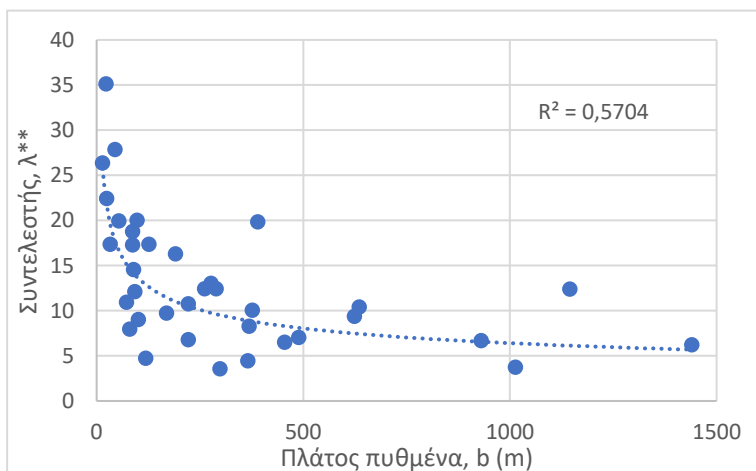


**Εικόνα 5.21:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ συντελεστή  $\lambda^{**}$  – κλίσης πρανών

Το ίδιο παρατηρείται και με τα δύο άλλα χαρακτηριστικά, δηλαδή η παράμετρος  $\lambda^{**}$  έχει καλύτερο συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ . Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα συσχέτισης του  $\lambda^{**}$  με την κλίση  $J$  και το πλάτος  $b$ .



**Εικόνα 5.22:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ συντελεστή  $\lambda^{**}$  – κλίσης πυθμένα  $J$



**Εικόνα 5.23:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ συντελεστή  $\lambda^{**}$  – πλάτους πυθμένα  $b$

Επομένως, είναι ορθό να υποθέσουμε πως ο συντελεστής κλίμακας  $\lambda^{**}$  συσχετίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα.

Αρχικά, θα εξαχθούν δύο σχέσεις, μία αθροιστική και μία πολλαπλασιαστική, του συντελεστή  $\lambda^{**}$  συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν παραπάνω και στη συνέχεια θα βελτιστοποιηθεί ο συντελεστής  $\kappa$ , έτσι ώστε να δημιουργηθούν καμπύλες στάθμης – αποθέματος με έναν άγνωστο συντελεστή αντί για δύο.

#### ▪ Αθροιστική Σχέση

Η σχέση αυτή εξάγεται για λόγους πληρότητας. Στην πραγματικότητα χρησιμοποιείται η πολλαπλασιαστική σχέση που υπολογίζεται παρακάτω.

**Πίνακας 5.7:** Στατιστικά χαρακτηριστικά και τιμές συντελεστών που προέκυψαν μετά από πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση του συντελεστή  $\lambda^{**}$  με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων.

Στατιστικά παλινδρόμησης		Συντελεστές	
Πολλαπλό R	0,955	<b>Σταθερά</b>	3,91
R Τετράγωνο	0,912	<b>slope</b>	0,12
<b>Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο</b>	<b>0,904</b>	<b>J</b>	372,42
Τυπικό σφάλμα	2,273	<b>b</b>	-0,001
Μέγεθος δείγματος	38		

Στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, πιο αξιόπιστος θεωρείται ο προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού  $R_{adj}^2$ , καθώς λαμβάνονται υπόψη και οι βαθμοί ελευθερίας του δείγματος. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει μικρή διαφορά από τον απλό συντελεστή  $R^2$ .

Ύστερα από βελτιστοποίηση του «συστήματος» προκύπτει τελικά η σχέση:

$$\lambda = 5,01 + 0,04 \times S + 455 \times J \quad (5.1)$$

όπου S: η κλίση των πρανών (%)

J: η κλίση της λεκάνης

και με ανεξάρτητο συντελεστή σχήματος  $\kappa$ .

#### ▪ Πολλαπλασιαστική Σχέση

Η συσχέτιση (correlation) κάθε χαρακτηριστικού μεγέθους με τον συντελεστή  $\lambda^{**}$  δίνεται παρακάτω.

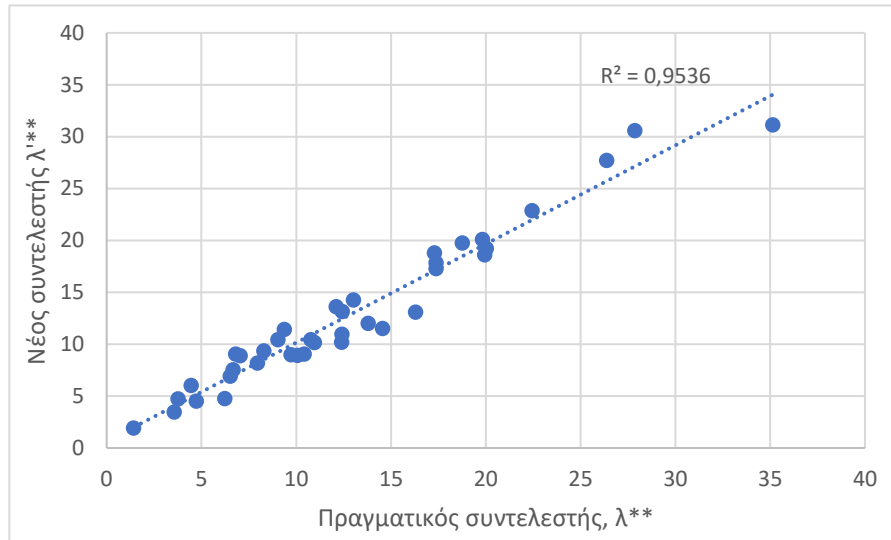
**Πίνακας 5.8:** Συσχέτιση γεωμετρικών χαρακτηριστικών με τον συντελεστή  $\lambda^{**}$

Μέγεθος	Συσχέτιση
Κλίση πρανών, S (%)	0,828
Κλίση πυθμένα, J	0,938
Πλάτος πυθμένα, b (m)	-0,386

Υστερα από βελτιστοποίηση προέκυψε η παρακάτω σχέση:

$$\lambda = \frac{78 \times S^{0,17} \times J^{0,43}}{b^{0,1}} \quad (5.2)$$

διατηρώντας τον συντελεστή  $\kappa$  ανεξάρτητο.



**Εικόνα 5.24:** Συσχέτιση μεταξύ του πραγματικού  $\lambda^{**}$  και του προσομοιωμένου  $\lambda'^{**}$

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια ανάλυση ευασθησίας, στην περίπτωση που οι παράμετροι του μοντέλου υποστούν μεταβολή της τάξης του  $\pm 20\%$ , για τα δύο μέτρα απόδοσης, τον συντελεστή NSE και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE.

**Πίνακας 5.9:** Τελικές τιμές NSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 3<sup>η</sup> Μέθοδο.

	Συντελεστής NSE				
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	NSE	-20%	NSE
Κλίση πρανών (%)	18,28	21,936	0,9730	14,624	0,9719
Κλίση πυθμένα, J	0,019	0,0228	0,9728	0,0152	0,9699
Πλάτος πυθμένα, b (m)	506,36	607,632	0,9724	405,088	0,9730

**Πίνακας 5.10:** Τελικές τιμές RMSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 3<sup>η</sup> Μέθοδο.

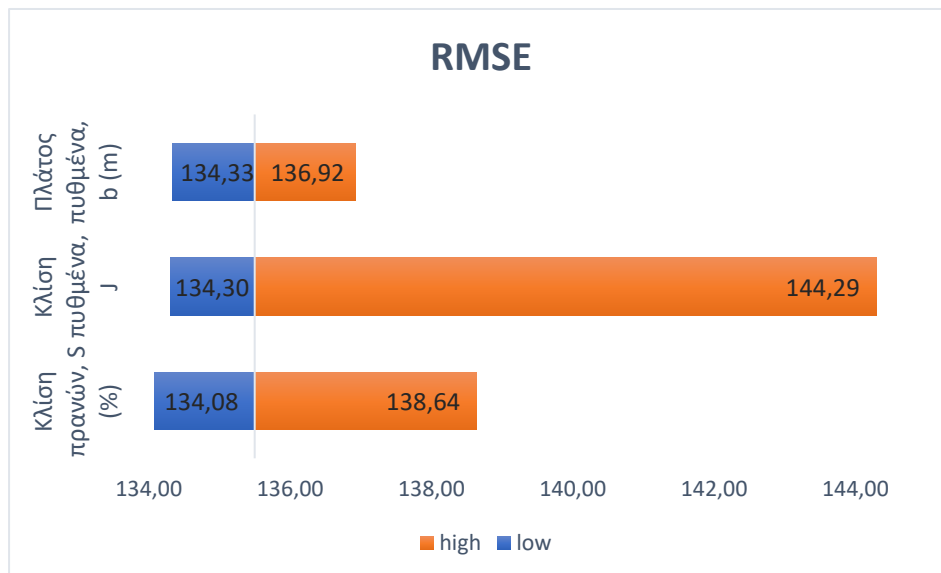
Τετραγωνικό σφάλμα RMSE	
-------------------------	--

	Αρχική Μέση Τιμή	20%	RMSE	-20%	RMSE
Κλίση πρανών (%)	18,28	21,936	134,08	14,624	138,64
Κλίση πυθμένα, J	0,019	0,0228	134,30	0,0152	144,29
Πλάτος πυθμένα, b (m)	506,36	607,632	136,92	405,088	134,33

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα ανάλυσης ευαισθησίας.



**Εικόνα 5.25:** Διάγραμμα Tornado του συντελεστή NSE για την 3<sup>η</sup> Μέθοδο.



**Εικόνα 5.26:** Διάγραμμα Tornado του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE για την 3<sup>η</sup> Μέθοδο.

Οι τιμές διακύμανσης των μέτρων NSE και RMSE δεν επηρεάζονται πρακτικά από την αύξηση ή μείωση κατά 20% των τιμών των παραμέτρων.

#### 5.2.4: Εξαγωγή δεδομένων Στάθμης – Επιφάνειας – Αποθηκευτικότητας με μικρότερο βήμα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την θέση 1 το βήμα είναι της τάξης των 10 m για φράγμα ύψους 140 m. Μια τέτοια αναλογία χρησιμοποιείται και για τις υπόλοιπες θέσεις, ωστόσο τίθεται το ερώτημα κατά πόσο εξαρτάται το βήμα που επιλέγεται με την ακρίβεια των σχέσεων που εξάγονται. Έτσι, επιλέγονται δύο θέσεις, η θέση 30 και η θέση 37, όπου η διαφορά ανάμεσα στην ελάχιστη και τη μέγιστη στάθμη που εξετάζονται είναι  $\Delta H = 43$  m και  $\Delta H = 56$  m αντίστοιχα, όπου θα υπολογιστούν οι συντελεστές  $\lambda$  και  $\kappa$  με βήμα 0,5 m.

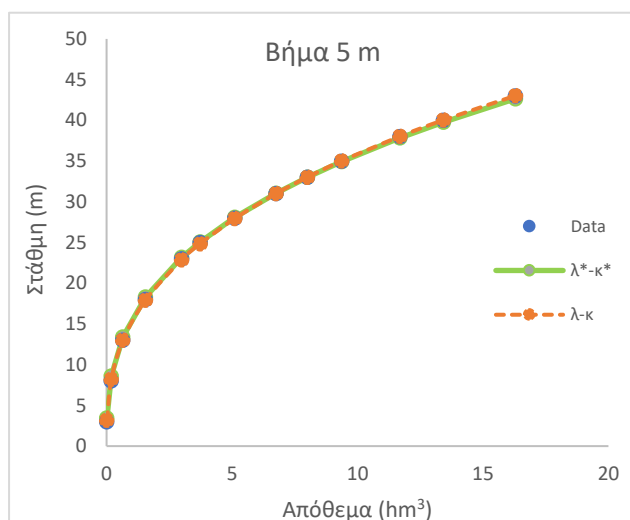
##### ▪ Θέση 30

Στην αρχική επεξεργασία, το βήμα ισούται με  $\Delta H = 5$  m. Οι αντίστοιχοι συντελεστές είναι:

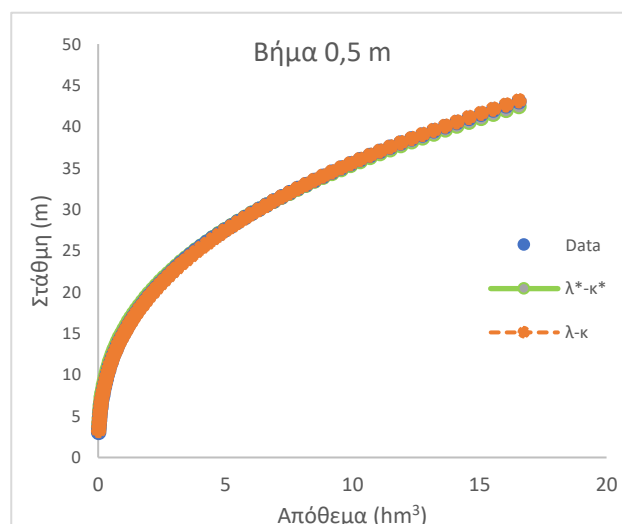
**Πίνακας 5.11:** Διαφορά συντελεστών  $\lambda$  και  $\kappa$  με α) βήμα 5 m και β) βήμα 0,5 m για τη θέση 30

	Συντελεστής $\lambda$	Συντελεστής $\kappa$	Συντελεστής $\lambda^*$	Συντελεστής $\kappa^*$
Βήμα 5 (m)	15,22	0,372	15,62	0,36
Βήμα 0,5 (m)	14,94	0,377	15,45	0,36

Παρατηρείται μία μείωση 1,8% του συντελεστή  $\lambda$ , μία αύξηση 1,4% του συντελεστή  $\kappa$  και μία μείωση 1,1% του συντελεστή  $\lambda^*$ , ενώ σύμφωνα με όσα έχουν ειπωθεί στο υποκεφάλαιο 5.2.3 ο συντελεστής  $\kappa^*$  παραμένει σταθερός.



**Εικόνα 5.27:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ των δεδομένων και των δύο προσομοιώσεων για βήμα  $d=5$  m για τη θέση 30



**Εικόνα 5.28:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ των δεδομένων και των δύο προσομοιώσεων για βήμα  $d=0,5$  m για τη θέση 30

Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, η διαφορά των συντελεστών θεωρείται αμελητέα.

##### ▪ Θέση 37

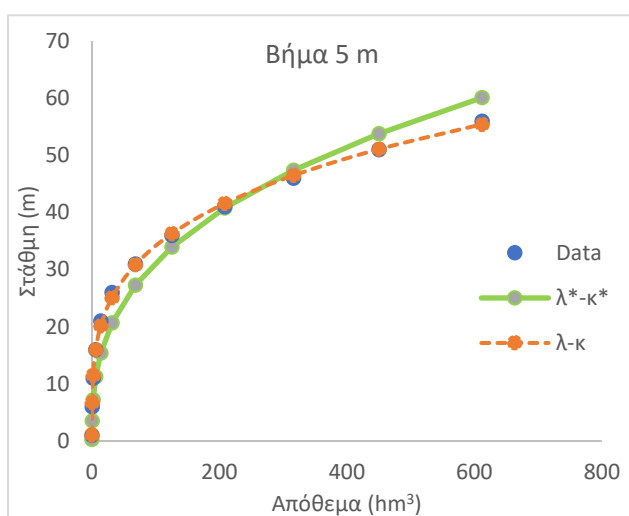
Στην αρχική επεξεργασία το βήμα ισούται με  $\Delta H = 5$  m. Οι αντίστοιχοι συντελεστές είναι:



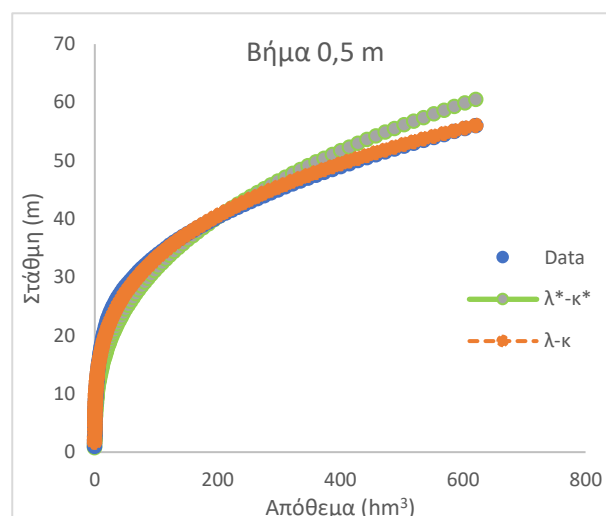
**Πίνακας 5.12:** Διαφορά συντελεστών  $\lambda$  και  $\kappa$  με α) βήμα 5 m και β) βήμα 0,5 m για τη θέση 37

	Συντελεστής $\lambda$	Συντελεστής $\kappa$	Συντελεστής $\lambda^*$	Συντελεστής $\kappa^*$
Βήμα 5 (m)	9,98	0,27	5,96	0,36
Βήμα 0,5 (m)	8,90	0,29	5,98	0,36

Παρατηρείται μία μείωση 10,8% του συντελεστή  $\lambda$ , μία αύξηση 7,4% του συντελεστή  $\kappa$  και μία μείωση 0,33% του συντελεστή  $\lambda^*$ , ενώ σύμφωνα με όσα έχουν ειπωθεί στο υποκεφάλαιο 5.2.3 ο συντελεστής  $\kappa^*$  παραμένει σταθερός. Η μεταβολή των «τοπικών» συντελεστών είναι μεγαλύτερη από την μεταβολή της προηγούμενης θέσης, ενώ η μεταβολή του συντελεστή  $\lambda^*$ , η οποία έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την παρούσα έρευνα, έχει αμελητέα μεταβολή.



**Εικόνα 5.29:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ των δεδομένων και των δύο προσομοιώσεων για βήμα  $d=5$  m για τη θέση 37



**Εικόνα 5.30:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ των δεδομένων και των δύο προσομοιώσεων για βήμα  $d=0,5$  m για τη θέση 37

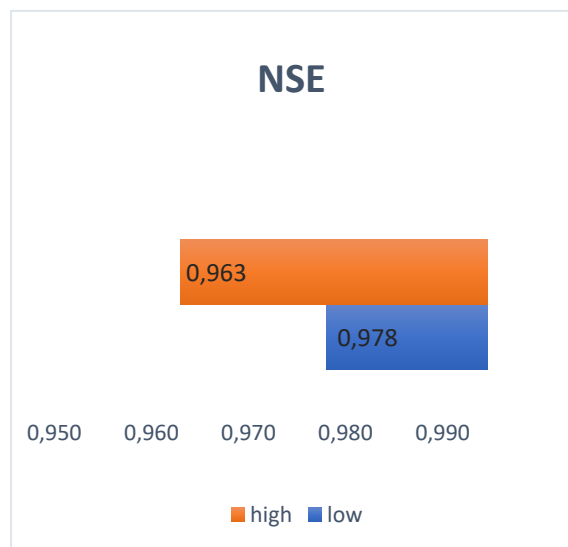
Ως προς το δυσμενέστερο σενάριο, πραγματοποιείται μία μικρή ανάλυση ευαισθησίας με α) ταυτόχρονη μεταβολή του συντελεστή  $\lambda$  κατά 10,8% και του συντελεστή  $\kappa$  κατά 7,4% και β) με μεταβολή του συντελεστή  $\lambda^*$  κατά 1,1% ως προς το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE και τον δείκτη καλής προσαρμογής NSE.

**Πίνακας 5.13:** Μεταβολή δείκτη NSE με ταυτόχρονη μεταβολή των συντελεστών  $\lambda$ ,  $\kappa$  για το δυσμενέστερο σενάριο

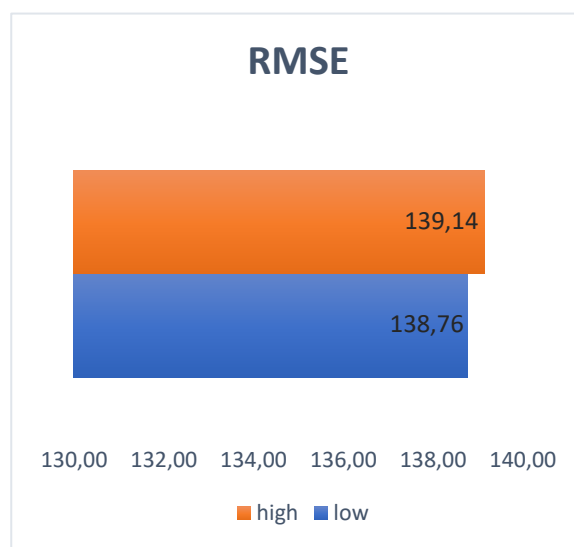
	Αρχική Μέση Τιμή	$\lambda$ : +10,8% $\kappa$ : -7,4%	NSE	$\lambda$ : -10,8% $\kappa$ : +7,4%	NSE
Συντελεστής $\lambda$	13,23	14,66	0,963	11,80	0,978
Συντελεστής $\kappa$	0,41	0,38		0,44	

**Πίνακας 5.14:** Μεταβολή μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE με ταυτόχρονη μεταβολή των συντελεστών  $\lambda$ ,  $\kappa$  για το δυσμενέστερο σενάριο

	Αρχική Μέση Τιμή	$\lambda$ : +10,8% $\kappa$ : -7,4%	RMSE	$\lambda$ : -10,8% $\kappa$ : +7,4%	RMSE
Συντελεστής $\lambda$	13,23	14,66	138,76	11,80	139,14
Συντελεστής $\kappa$	0,41	0,38		0,44	



**Εικόνα 5.31:** Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη NSE για μεταβολή των συντελεστών  $\lambda$ - $\kappa$  για το δυσμενέστερο σενάριο



**Εικόνα 5.32:** Διάγραμμα μεταβολής του σφάλματος RMSE για μεταβολή των συντελεστών  $\lambda$ - $\kappa$  για το δυσμενέστερο σενάριο

Η αρχική τιμή των μεγεθών που εξετάζονται χωρίς καμία μεταβολή είναι:

- ✓ NSE = 0,999
- ✓ RMSE = 28,64

**Πίνακας 5.15:** Μεταβολή του δείκτη NSE με μεταβολή του συντελεστή  $\lambda^*$  για το δυσμενέστερο σενάριο

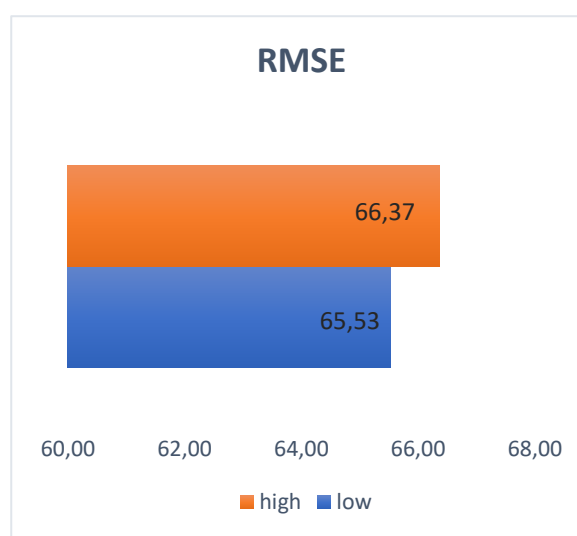
	Αρχική Μέση Τιμή	$\lambda^*$ : +1,1%	NSE	$\lambda^*$ : -1,1%	NSE
Συντελεστής $\lambda^*$	12,36	12,48	0,994	12,24	0,994

**Πίνακας 5.15:** Μεταβολή μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE με μεταβολή του συντελεστή  $\lambda^*$  για το δυσμενέστερο σενάριο

	Αρχική Μέση Τιμή	$\lambda^*$ : +1,1%	RMSE	$\lambda^*$ : -1,1%	RMSE
Συντελεστής $\lambda^*$	12,36	12,48	66,38	12,24	65,53



**Εικόνα 5.33:** Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη NSE για μεταβολή του συντελεστή  $\lambda^*$  για το δυσμενέστερο σενάριο



**Εικόνα 5.34:** Διάγραμμα μεταβολής του σφάλματος RMSE για μεταβολή του συντελεστή  $\lambda^*$  για το δυσμενέστερο σενάριο

Η αρχική τιμή των μεγεθών που εξετάζονται χωρίς καμία μεταβολή είναι:

- ✓ NSE = 0,995
- ✓ RMSE = 60,65

Επιβεβαιώνεται μέσα από αυτήν την ανάλυση πως το βήμα που επιλέγεται για την εξαγωγή των καμπυλών δεν θεωρείται καθοριστικός παράγοντας, για τους στόχους της εργασίας, επομένως τα δεδομένα από την διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα.

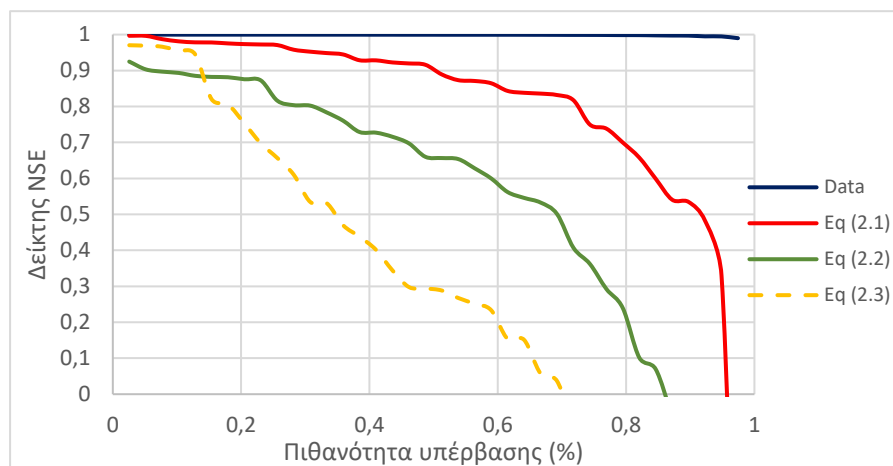
### 5.3 Αξιολόγηση ταμειυτήρων με τις εξισώσεις προσδιορισμού της βιβλιογραφίας

Όπως αναφέρθηκε και στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, θα αξιολογηθούν οι υπό μελέτη ταμειυτήρες από τις εξισώσεις (2.1), (2.2), (2.3). Ο συντελεστής καλής προσαρμογής NSE για κάθε θέση παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.17.

Πίνακας 5.17: Αξιολόγηση δείκτη NSE των ταμειυτήρων από τις σχέσεις τις βιβλιογραφίας

Ταμειυτήρας	$V = 0,678 (Ah)^{0,9229}$ (2.1)	$V = 30,684 A^{0,9578}$ (2.2)	$V = 0,00857 A^{1,4357}$ (2.3)
<i>NSE</i>			
Θέση 1	0,9525	0,7605	0,4015
Θέση 2	0,8320	0,5459	-0,2038
Θέση 3	0,9283	0,8038	0,6102
Θέση 4	0,9708	0,9249	0,9663
Θέση 5	0,6998	0,5012	0,2335
Θέση 6	0,8359	0,8725	-0,4419
Θέση 7	0,9486	0,7158	0,8057
Θέση 8	0,4824	0,2927	0,5347
Θέση 9	0,9967	0,8758	0,4380
Θέση 10	0,9781	0,6602	0,2675
Θέση 11	0,7497	0,5330	0,2515
Θέση 12	0,9579	0,6001	0,0367
Θέση 13	0,9448	0,3623	-0,7946
Θέση 14	0,8433	0,8854	0,2980
Θέση 15	0,8647	0,6281	0,4698
Θέση 16	0,5408	0,8162	0,0577
Θέση 17	0,9286	-0,9971	0,8207
Θέση 18	0,9160	0,6567	0,3442
Θέση 19	0,9813	0,7290	-0,2926
Θέση 20	0,8732	0,7273	-0,0891
Θέση 21	0,6581	-0,0598	0,2941
Θέση 22	0,7385	0,0696	0,9556
Θέση 23	0,8710	-0,4249	0,9455
Θέση 24	-0,8917	0,4072	0,1511
Θέση 25	0,9755	0,5622	-0,2054
Θέση 26	0,3302	0,2395	0,7528
Θέση 27	0,9873	0,6538	0,9691
Θέση 28	0,9965	0,7836	0,1535
Θέση 29	0,9735	0,8823	-2,9064
Θέση 30	0,5990	-3,1383	0,5312
Θέση 31	0,9785	0,9033	0,6974
Θέση 32	0,8176	0,1020	0,9704
Θέση 33	0,5346	0,6975	-18,1736
Θέση 34	0,9198	0,8970	0,6568
Θέση 35	0,9226	0,8934	-0,2064
Θέση 36	0,8891	0,8025	-0,5527
Θέση 37	0,8382	-0,1783	-2,4890
Θέση 38	0,9725	0,8814	0,2883
<b>Διάμεσος</b>	0,9026	0,6584	0,2912

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται γραφικά ο δείκτης NSE και αποτυπώνεται και η καμπύλη των δεδομένων, για λόγους σύγκρισης. Δηλαδή, όσο πιο κοντά βρίσκεται η καμπύλη της εκάστοτε σχέσης στην καμπύλη των δεδομένων, τόσο καλύτερα προσαρμόζεται η σχέση στους ταμειυτήρες. Ο δείκτης NSE μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές, ωστόσο για καλύτερη κατανόηση στο διάγραμμα απεικονίζονται μόνο οι μη αρνητικές του τιμές.



**Εικόνα 5.35:** Διαγραμματική απεικόνιση του δείκτη NSE για κάθε σχέση της βιβλιογραφίας, συγκριτικά με την καμπύλη των δεδομένων

Όπως αναμένεται, η εξίσωση (2.1) είναι πιο κοντά στην καμπύλη των δεδομένων, άρα προσαρμόζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια στα δεδομένα. Όσον αφορά στις δύο άλλες εξισώσεις, φαίνεται πως για το 15% περίπου των ταμειυτήρων η εξίσωση (2.3) δίνει καλύτερα αποτελέσματα, αλλά συνολικά η εξίσωση (2.2) είναι ακριβέστερη. Ωστόσο από αυτήν την επεξεργασία, φαίνεται πως μία εξίσωση δυσκολεύεται να δώσει υψηλό δείκτη NSE για κάθε είδους ταμειυτήρα. Τέλος, έχει υπολογιστεί και η διάμεσος του δείκτη NSE κάθε εξίσωσης, καθώς φαίνεται πιο αξιόπιστο μέτρο από την μέση τιμή που επηρεάζεται από ακραίες τιμές (ειδικά στην εξίσωση (2.3) κάποιοι ταμειυτήρες έχουν αρκετά χαμηλό δείκτη NSE (<0) όπου δεν μας ενδιαφέρει η ακριβής τιμή του).

#### 5.4 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα Ανάλυσης

Οι σχέσεις (5.1) και (5.2) της 3<sup>ης</sup> μεθόδου, δημιουργήθηκαν ουσιαστικά από τους συντελεστές  $\lambda^{**}$  που προέκυψαν από την 2<sup>η</sup> μέθοδο.

Σε αυτό το σημείο, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των μεθόδων και θα καταρτιστούν οι τελικές σχέσεις του συντελεστή  $\lambda^{**}$ , ανάλογα με τον αριθμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που θα είναι διαθέσιμα σε κάθε περίπτωση.

**Πίνακας 5.18:** Μέτρα απόδοσης των μεθόδων που υλοποιήθηκαν

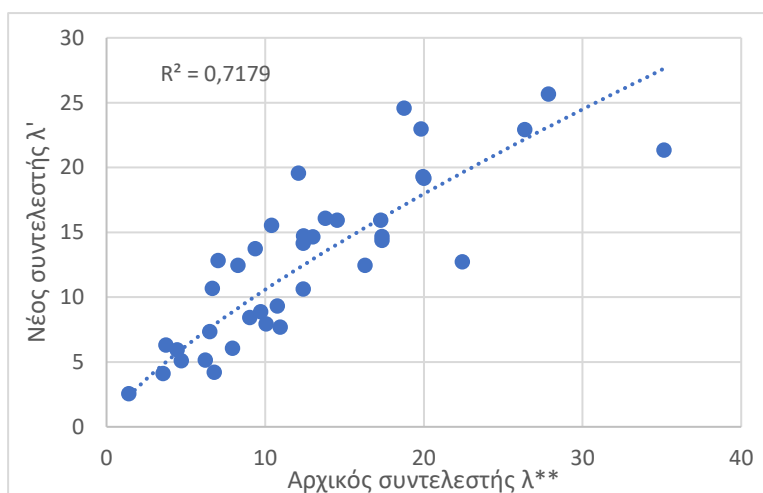
	1 <sup>η</sup> Μέθοδος	2 <sup>η</sup> Μέθοδος	3 <sup>η</sup> Μέθοδος
NSE	0,992	0,979	0,973
RMSE	65,9	119,0	135,5

- Διευρεύνηση 3<sup>ης</sup> Μεθόδου

➤ Εάν είναι γνωστή μόνο η κλίση των πρανών, *slope* (%)

Θα υπολογιστεί ο συντελεστής  $\lambda$  συναρτήσει της κλίσης των πρανών, με ανεξάρτητο συντελεστή  $\kappa$ .

$$\lambda = 2,24 \times S^{0,62} \quad (5.3)$$



**Εικόνα 5.36:** Σχέση νέου συντελεστή  $\lambda$  συγκριτικά με τον αρχικό, συναρτήσει της κλίσης των πρανών του ταμειυτήρα

Τα μέτρα απόδοσης είναι τα εξής:

- ✓ NSE = 0,953
- ✓ RMSE = 171,7

Με μία προσαύξηση της τάξης του  $\pm 20\%$  οι τιμές των παραπάνω μέτρων είναι:

**Πίνακας 5.19:** Τελικές τιμές συντελεστή NSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 1<sup>η</sup> υποπερίπτωση.

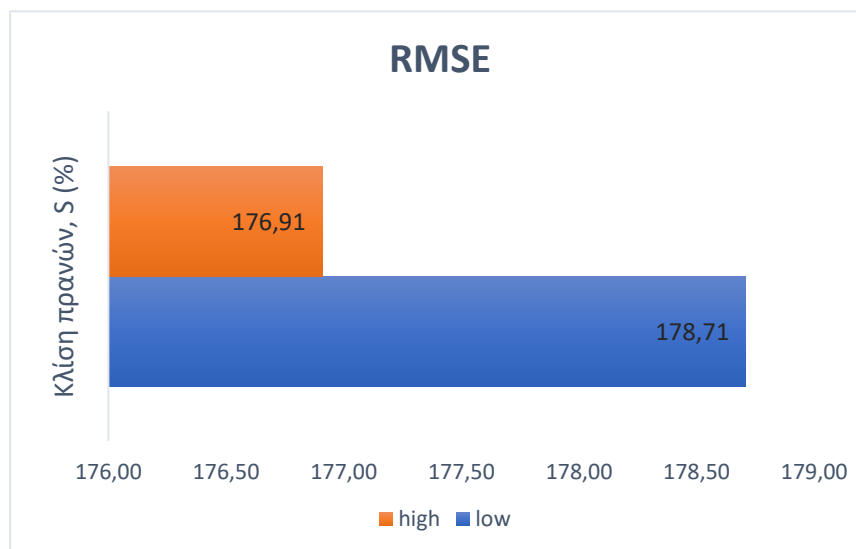
Συντελεστής NSE					
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	NSE	-20%	NSE
Κλίση πρανών (%)	18,28	21,936	0,9538	14,624	0,9486



**Εικόνα 5.37:** Διάγραμμα Tornado του συντελεστή NSE για την 1<sup>η</sup> υποπερίπτωση.

**Πίνακας 5.20:** Τελικές τιμές τετραγωνικού σφάλματος RMSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 1<sup>η</sup> υποπερίπτωση.

Τετραγωνικό σφάλμα RMSE					
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	RMSE	-20%	RMSE
Κλίση πρανών (%)	18,28	21,94	176,908	14,624	178,71



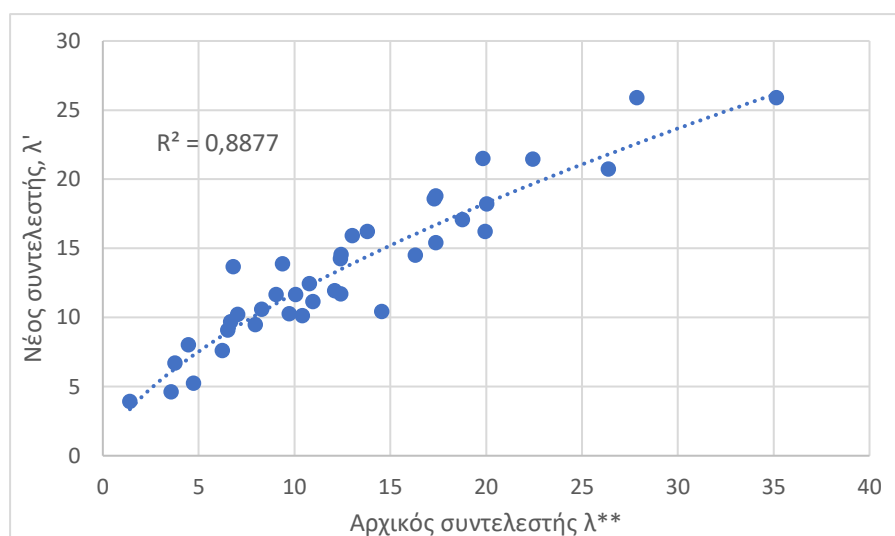
**Εικόνα 5.38:** Διάγραμμα Tornado του τετραγωνικού σφάλματος RMSE για την 1<sup>η</sup> υποπερίπτωση.

Οι τιμές διακύμανσης των μέτρων NSE και RMSE δεν επηρεάζονται πρακτικά από την αύξηση ή μείωση κατά 20% των παραμέτρων.

➤ Εάν είναι γνωστή μόνο η κλίση του πυθμένα του ταμιευτήρα,  $J$

Θα υπολογιστεί ο συντελεστής  $\lambda$  συναρτήσει της κλίσης του πυθμένα, με ανεξάρτητο συντελεστή  $\kappa$ .

$$\lambda = 109,1 \times \sqrt{J} \quad (5.4)$$



**Εικόνα 5.39:** Σχέση νέου συντελεστή  $\lambda$  συγκριτικά με τον αρχικό, συναρτήσει της κλίσης του πυθμένα του ταμιευτήρα.

Τα μέτρα απόδοσης είναι:

- ✓ NSE = 0,961
- ✓ RMSE = 156,05

Με μία προσαύξηση της τάξης του  $\pm 20\%$  οι τιμές των παραπάνω μέτρων είναι:

**Πίνακας 5.20:** Τελικές τιμές συντελεστή NSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 2<sup>η</sup> υποπερίπτωση.

	Συντελεστής NSE				
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	NSE	-20%	NSE
Κλίση πυθμένα, $J$	0,019	0,0228	0,960	0,0152	0,959

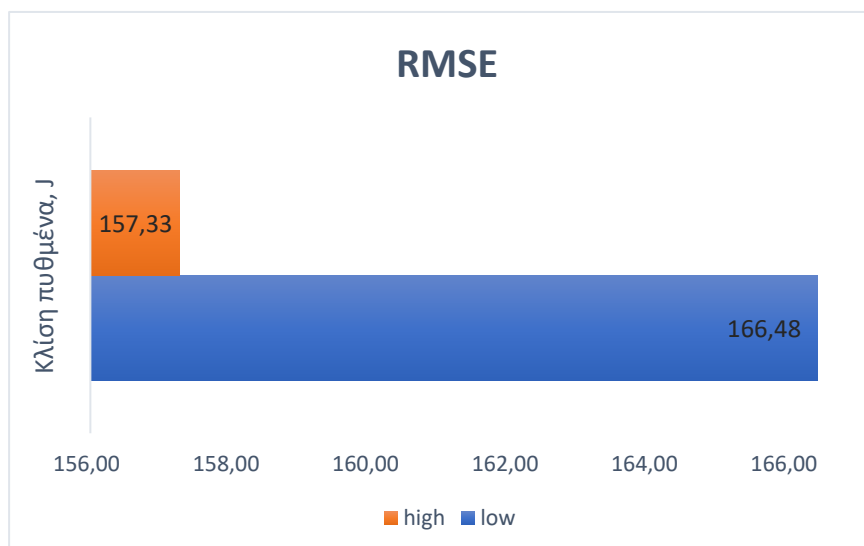




**Εικόνα 5.40:** Διάγραμμα Tornado του συντελεστή NSE για την 2<sup>η</sup> υποπερίπτωση

**Πίνακας 5.21:** Τελικές τιμές συντελεστή NSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 2<sup>η</sup> υποπερίπτωση

Τετραγωνικό σφάλμα RMSE					
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	RMSE	-20%	RMSE
Κλίση πυθμένα, J	0,019	0,0228	157,33	0,0152	166,48

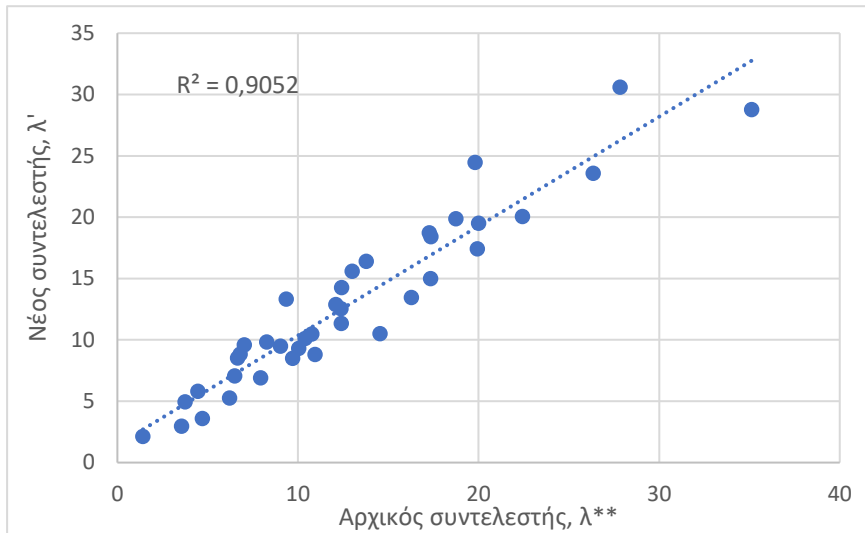


**Εικόνα 5.41:** Διάγραμμα Tornado του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE για την 2<sup>η</sup> υποπερίπτωση.

- Εάν είναι γνωστή η κλίση των πρανών, slope (%) και η κλίση του πυθμένα του ταμειυτήρα, J

Όπως και προηγουμένως, θα εξαχθεί ο συντελεστής  $\lambda$  συναρτήσει των μεγεθών  $S$  και  $J$ .

$$\lambda = 57,2 \times S^{0,21} \times \sqrt{J} \quad (5.5)$$



**Εικόνα 5.42:** Σχέση νέου συντελεστή  $\lambda$  συγκριτικά με τον αρχικό, συναρτήσει της κλίσης των πρανών και του πυθμένα του ταμειυτήρα

Τα μέτρα απόδοσης είναι τα εξής:

- ✓ NSE = 0,964
- ✓ RMSE = 152,8

Με μια προσαύξηση της τάξης του  $\pm 20\%$  οι τιμές των παραπάνω μέτρων είναι:

**Πίνακας 5.22:** Τελικές τιμές συντελεστή NSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 2<sup>η</sup> υποπερίπτωση.

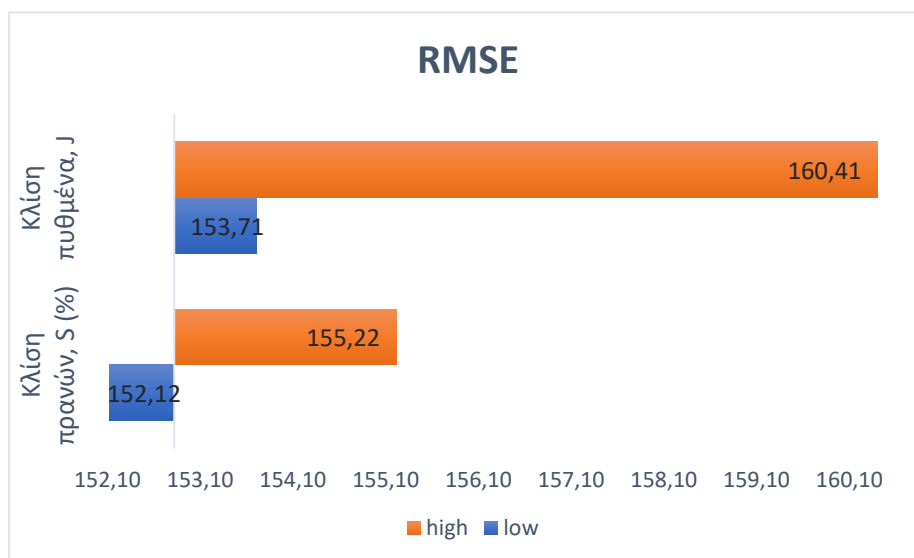
	Συντελεστής NSE				
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	NSE	-20%	NSE
Κλίση πρανών (%)	18,28	21,936	0,9650	14,624	0,9637
Κλίση πυθμένα, J	0,019	0,0228	0,9646	0,0152	0,9611



**Εικόνα 5.43:** Διάγραμμα Tornado του συντελεστή NSE για την 2<sup>η</sup> υποπερίπτωση.

**Πίνακας 5.23:** Τελικές τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 2<sup>η</sup> υποπερίπτωση.

Τετραγωνικό σφάλμα RMSE					
	Αρχική Μέση Τιμή	20% RMSE		-20% RMSE	
Κλίση πρανών (%)	18,28	21,936	152,12	14,624	155,22
Κλίση πυθμένα, J	0,019	0,0228	153,71	0,0152	160,41



**Εικόνα 5.44:** Διάγραμμα Tornado του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE για την 2<sup>η</sup> υποπερίπτωση.

- Εάν είναι γνωστή η κλίση των πρανών,  $slope$  (%), η κλίση του πυθμένα του ταμειυτήρα,  $J$  και το πλάτος του πυθμένα,  $b$  (m)

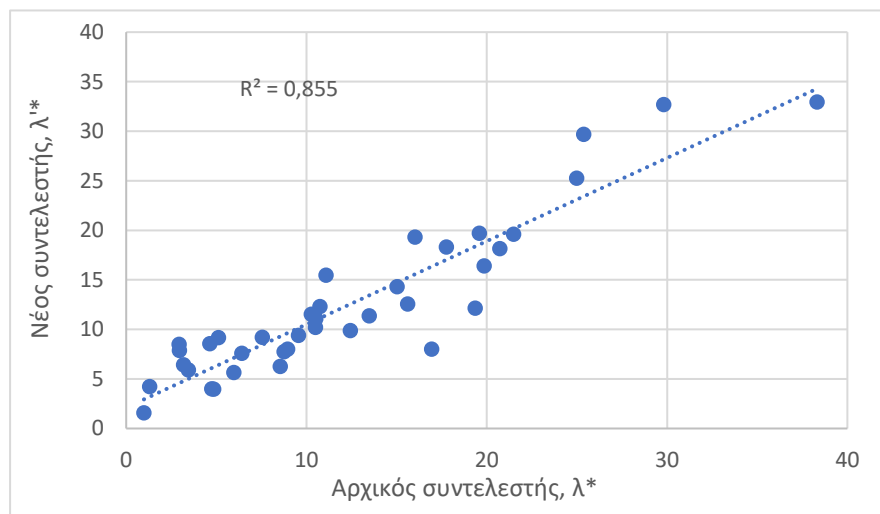
Ο συντελεστής  $\lambda$  υπολογίζεται από την σχέση (5.2) και τα μέτρα απόδοσης αναφέρονται στον Πίνακα 5.18. Πράγματι, έχοντας ως δεδομένα και τα τρία γεωμετρικά μεγέθη, μεγιστοποιείται ο δείκτης NSE και ελαχιστοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE.

Από την άλλη μεριά, η 1<sup>η</sup> Μέθοδος φαίνεται πως είναι η πιο αξιόπιστη, αν επιλεγθεί ο συντελεστής σχήματος  $\kappa$  να συσχετιστεί με το πλάτος του πυθμένα  $b$  (m) και το μέσο πλάτος του ταμειυτήρα,  $B$  (m).

Τέλος, θα ελεγχθεί ένας συνδυασμός της 1<sup>ης</sup> και της 3<sup>ης</sup> Μεθόδου, δηλαδή θα κατηγοριοποιηθεί ο συντελεστής  $\kappa$  σύμφωνα με την υποερότητα 5.2.3.1 και θα συσχετιστεί ο συντελεστής  $\lambda$  με τα τρία γεωμετρικά μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω, με μία σχέση παρόμοια της (5.2)

Σύμφωνα με την Εικόνα 5.20, ο συντελεστής  $\lambda^*$  έχει χαμηλότερο  $R^2$  από τον συντελεστή  $\lambda^{**}$  (Εικόνα 5.21) σε σχέση με την κλίση των πρανών, επομένως αναμένεται πως η σχέση του νέου συντελεστή  $\lambda^{**}$  θα έχει χαμηλότερη ακρίβεια από την σχέση (5.2).

$$\lambda = \frac{94 \times S^{0,16} \times J^{0,32}}{b^{0,2}} \quad (5.6)$$



**Εικόνα 5.45:** Σχέση νέου συντελεστή  $\lambda^{**}$  συγκριτικά με τον αρχικό, συναρτήσει της κλίσης των πρανών, της κλίσης του πυθμένα και του πλάτους του πυθμένα του ταμειυτήρα

Ο συντελεστής  $\lambda$  υπολογίζεται από την σχέση (5.5) και ο συντελεστής  $\kappa$  από το σχήμα του ταμειυτήρα. Από τους 38 ταμειυτήρες, οι 8 με την προσέγγιση αυτή δίνουν αρνητικό δείκτη NSE, οπότε τα αποτελέσματα εξάγονται από τους υπόλοιπους 30 (ποσοστό 79% του συνόλου). Τα μέτρα απόδοσης είναι:

- ✓ NSE = 0,86
- ✓ RMSE = 289,8

Όπως ήταν αναμενόμενο, όταν κανείς από τους δύο συντελεστές δεν θεωρείται ανεξάρτητος η ακρίβεια δεν είναι ικανοποιητική. Ωστόσο, ενδεχομένως σε κάποιες περιπτώσεις η προσέγγιση αυτή να δώσει μια πρώτη εικόνα για τις καμπύλες του ταμειυτήρα, εάν δεν υπάρχει κανένα άλλο δεδομένο, αφού και στην συγκεκριμένη περίπτωση 11/30 ταμειυτήρες έχουν δείκτη NSE > 0,95 και 4/11 έχουν NSE > 0,99.

Για αυτήν την περίπτωση, δεν πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας, αφού είναι προφανές πως το μοντέλο είναι ήδη πολύ ευαίσθητο, άρα με την προσαύξηση των παραμέτρων η ακρίβειά του θα είναι αρκετά μικρή.

## 6. Επεξεργασία Ελληνικών ταμιευτήρων

### 6.1 Γεωγραφική κατανομή Ελληνικών ταμιευτήρων

Οι Ελληνικοί ταμιευτήρες που υπόκεινται σε επεξεργασία είναι 16 και αποτελούν τους μεγαλύτερους εν λειτουργία μέχρι στιγμής. Στον παρακάτω χάρτη παρουσιάζονται οι θέσεις τους, καθώς και η χρησιμότητά τους.



Εικόνα 6.1: Γεωγραφική κατανομή Ελληνικών Ταμιευτήρων

Όπως φαίνεται από τον χάρτη της Εικόνας 6.1, οι περισσότεροι ταμιευτήρες αποσκοπούν σε πολλαπλές χρήσεις. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι συντεταγμένες των θέσεων των φραγμάτων, η επιφάνεια και η χωρητικότητά τους, καθώς και η χρησιμότητά τους.

**Πίνακας 6.1:** Γεωγραφική θέση ταμιευτήρων, χαρακτηριστικά ταμιευτήρα καθώς και σκοπιμότητα (Ύδρ: Ύδρευση, Υ/Η: Υδροηλεκτρική Παραγωγή, Άρδ: Άρδευση, Αντιπλ. Προστ: Αντιπλημμυρική Προστασία, Πηγή: *Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, «Τα Φράγματα Της Ελλάδας»*)

Φράγμα	Θέση		Χαρακτηριστικά Ταμιευτήρα		Σκοπός
	Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος	Χωρητικότητα ( $\times 10^3 \text{ m}^3$ )	Επιφάνεια ( $\times 10^3 \text{ m}^2$ )	
Αποσελέμης	35°14'56.69" N	25°24'00.91" E	36.200	1.600	Ύδρ
Γαδουράς	36°09'58.20" N	28°00'00.11" E	67.000	4.380	Ύδρ
Εύηνος	38°40'17.65" N	21°50'16.32" E	138.000	3.600	Υ/Η, Ύδρ
Θησαυρός	41°35'45.00" N	24°36'70.00" E	705.000	20.000	Υ/Η, Άρδ, Αντιπλ. Προσ.
Ιλαρίωνας	40°05.51.20" N	21°48'24.60" E	520.000	18.000	Υ/Η, Ύδρ, Άρδ
Καστράκι	38°45'00.77" N	21°22'28.01" E	165.000	24.200	Υ/Η, Ύδρ, Άρδ
Κρεμαστά	38°53'09.16" N	21°29'48.05" E	4.750.000	80.600	Υ/Η, Αντιπλ. Προσ.
Μαραθόνας	38°10'01.99" N	23°54'20.64" E	41.000	2.450	Ύδρ
Μόρνος	38°31'29.03" N	22°07'17.39" E	764.000	19.900	Ύδρ, Άρδ.
Πλαστήρας	39°14'19.18" N	21°44'41.84" E	400.000	25.200	Υ/Η, Ύδρ, Άρδ, Αναψ
Πλατανόβρυση	41°20'11.31" N	24°27'50.95" E	57.000	3.300	Υ/Η, Άρδ
Πολύφυτο	40°18'08.38" N	22°06'01.44" E	2.244.000	74.000	Υ/Η, Ύδρ, Άρδ, Αντιπλ. Προσ.
Πουρνάρι	39°11'16.98" N	21°01'48.45" E	730.000	20.600	Υ/Η, Αντιπλ. Προσ.
Σμόκοβο	39°08'49.48" N	22°03'45.94" E	240.000	8.400	Άρδ, Αντιπλ. Προσ.
Στράτος	38°40'36.09" N	21°20'05.17" E	14.900	8.400	Υ/Η, Άρδ
Σφηκιά	40°23'50.10" N	22°11'26.71" E	99.000	4.300	Υ/Η

Οι Ελληνικοί ταμιευτήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επαληθεύσουν την εξάρτηση των συντελεστών  $\lambda$  και  $\kappa$  από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε ταμιευτήρα. Όμως, δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός των κλίσεων των πρανών κάτω από τη στάθμη του ταμιευτήρα, αλλά ούτε και ο υπολογισμός του πλάτους πυθμένα,  $b$ .

Προηγούμενες έρευνες δείχνουν πως η βαθυμετρία του ταμιευτήρα επηρεάζεται από την κλίση των πρανών σε κοντινή απόσταση από το ίχνος του. Αρχικά, φαίνεται πως κρίσιμη είναι η



μέγιστη κλίση σε απόσταση 50 μέτρων από την ακτογραμμή (Sobek *et al.*, 2011), ενώ αργότερα στο ίδιο μοτίβο αναπτύχθηκε η λογική ότι το βάθος των ταμιευτήρων αντικατοπτρίζεται καλύτερα από την κλίση των πρανών σε απόσταση 100 μέτρων από την ακτογραμμή (Messenger, *et al.*, 2016).

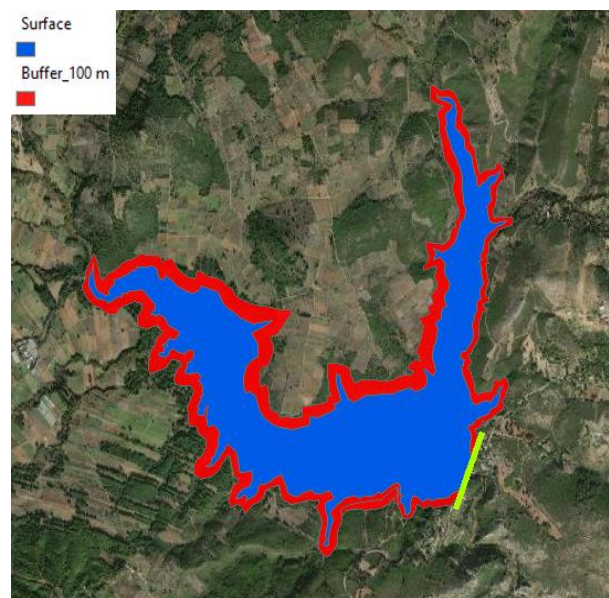
Επομένως, θα δημιουργηθεί ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους με τον τρόπο που περιγράφεται στην ενότητα 5.2.1, στο οποίο θα αναπαρίσταται η επιφάνεια του ταμιευτήρα και η κλίση των πρανών σε απόσταση περίπου 100 μέτρων γύρω από αυτή.

## 6.2 Δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (ΨΜΕ)

Ως μεθοδολογία είναι ίδια όπως στην προηγούμενη ενότητα με τη διαφορά ότι μαρκάρεται η περιοχή της επιφάνειας κατάκλυσης και η γύρω περιοχή απόστασης 100 μέτρων (προσεγγιστικά). Ως παράδειγμα για καλύτερη κατανόηση και εποπτεία παρουσιάζεται η λίμνη του Μαραθώνα.



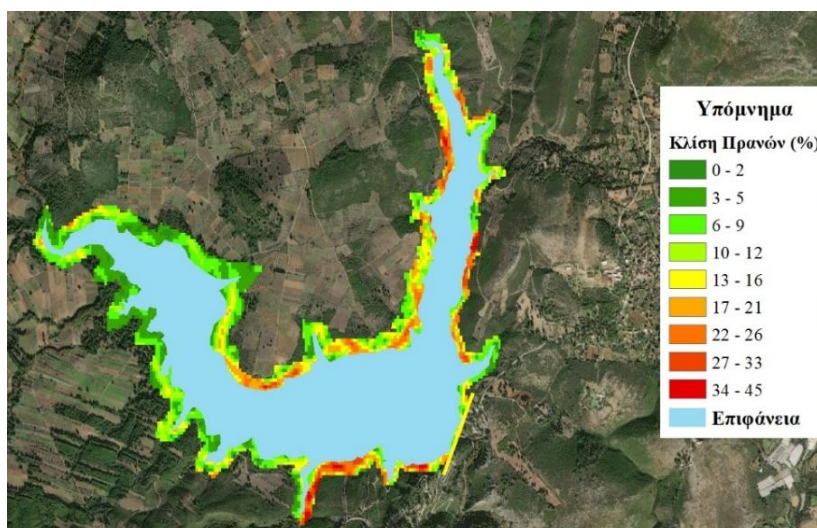
Εικόνα 6.2: Κάτοψη λίμνης Μαραθώνα, στο ArcMap



Εικόνα 6.3: Επιφάνεια λίμνης με μπλε χρώμα (Surface) και η περιμετρική απόσταση 100 m από την ακτογραμμή με κόκκινο χρώμα (Buffer\_100 m), στο ArcMap

Τα σημεία που θα αποτελέσουν το DEM βρίσκονται εντός της κόκκινης περιοχής, δηλαδή μιας νοητής επιφάνειας που περικλείει την επιφάνεια της λίμνης και την κλίση των πρανών του εδάφους εντός των 100 μέτρων. Σε αυτήν την περίπτωση, τα σημεία που έχουν δημιουργηθεί από το Google Earth, μετατρέπονται σε μορφή raster μέσω της εντολής IDW (Spatial Analyst), το οποίο θα αποτελεί και το ΨΜΕ. Στη συνέχεια, κατά τα γνωστά, δημιουργείται ένα επίπεδο κλίσεων (slope) το οποίο είναι επίσης μορφής raster. Για να υπολογιστεί η κλίση του εδάφους όσο γίνεται πιο κοντά στην πραγματική της τιμή, εξαιρούνται τα σημεία που δεν βρίσκονται εντός της υπό μελέτη περιοχής. Αυτό είναι εύκολο, καθώς πρόκειται για τις πιο χαμηλές τιμές της κλίσης εφόσον η στάθμη του ταμιευτήρα προσεγγίζεται ως σταθερή.





**Εικόνα 6.4:** Κλίση των πρανών (%) σε απόσταση 100 m περιμετρικά του ταμιευτήρα

Με αυτόν τον τρόπο, βρίσκονται προσεγγιστικά οι κλίσεις των πρανών όλων των ταμιευτήρων.

### 6.3 Μεθοδολογία συσχέτισης παραμέτρων σύμφωνα με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του κάθε ταμιευτήρα

Τελευταίο βήμα για την επεξεργασία είναι να βρεθεί η συσχέτιση που υπάρχει στις ήδη γνωστές παραμέτρους  $\lambda$  και  $\kappa$  μεταξύ τους ή με την κλίση του εδάφους (*slope*). Τα μέτρα απόδοσης της επεξεργασίας που έγινε των τοπικών (*local*) συντελεστών  $\lambda$  και  $\kappa$  έχουν ως εξής:

- ✓ RMSE = 18,11
- ✓ NSE = 0,998

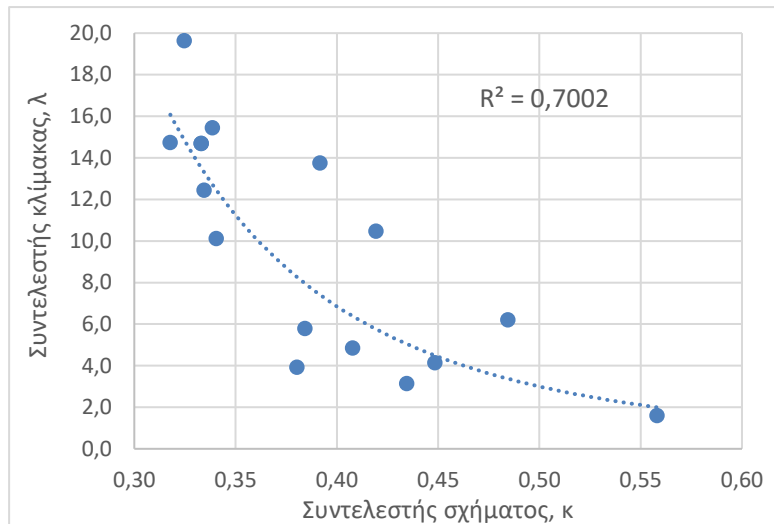
#### 6.3.1 1η Μέθοδος (Μέθοδος Βιβλιογραφίας)

Σε αυτή τη μέθοδο παρατηρείται πως υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στις 2 παραμέτρους, οπότε η παράμετρος  $\lambda$  υπολογίζεται μέσω της παραμέτρου  $\kappa$  (*Efstratiadis et al., 2021*) από τη σχέση:

$$\lambda = 0,0386 \times (\kappa - 0,25)^{-2,574} \quad (6.1)$$

Οι συνολικοί ταμιευτήρες της παραπάνω μελέτης είναι 20, για την παρούσα έρευνα όμως χρησιμοποιούνται οι 16 από τους 20, καθώς οι υπόλοιποι 4 δεν είναι σε λειτουργία, άρα δεν έχει προέλθει η πλήρωσή τους. Για την επεξεργασία αυτών των ταμιευτήρων, τα μέτρα απόδοσης είναι:

- ✓ RMSE = 36,96
- ✓ NSE = 0,981



Εικόνα 6.5: Διάγραμμα διασποράς μεταξύ συντελεστών της 1<sup>ης</sup> Μεθόδου

### 6.3.2 2<sup>η</sup> Μέθοδος

Σε αυτή τη μέθοδο, όπως αντίστοιχα και στη μέθοδο της ενότητας 5.2.3.1, ο συντελεστής  $\kappa$  λαμβάνει τις κατάλληλες τιμές ανάλογα με το σχήμα του ταμιευτήρα. Σε αυτήν την περίπτωση δεν μπορεί να υπολογιστεί το πλάτος του πυθμένα,  $b$  από τα γνωστά εργαλεία, επομένως το κριτήριο για την κατηγοριοποίηση θα είναι η τιμή του «τοπικού» συντελεστή  $\kappa$ . Σκοπός της μεθόδου είναι να υπολογιστεί ο συντελεστής  $\lambda^*$  των ταμιευτήρων και να διερευνηθεί εάν εξαρτάται από τα (υπολογίσιμα ή γνωστά) γεωμετρικά του χαρακτηριστικά.

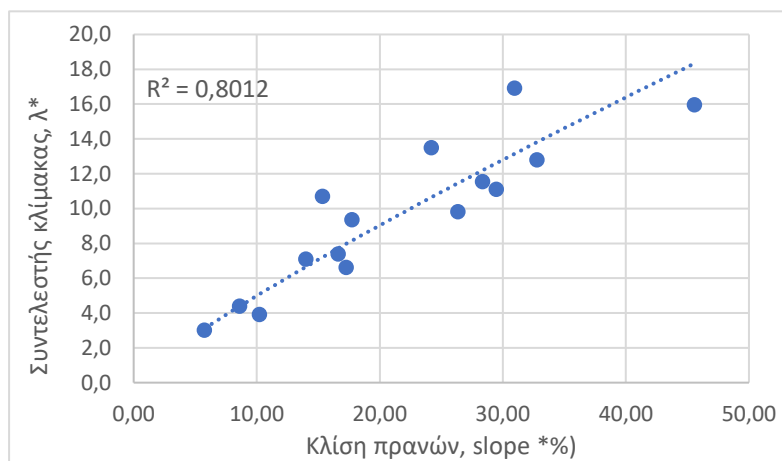
Πίνακας 6.2: Κατηγορία σχήματος ταμιευτήρα ανάλογα με τον «τοπικό» συντελεστή  $\kappa$ .

Ταμιευτήρας	$\kappa$	Σχήμα (Shape)	$\kappa^*$
Αποσελέμης	0,419	Ημικυκλικό (Bowl)	0,44
Εύηνος	0,392	Σφηνοειδές (Wedge)	0,36
Γαδουράς	0,341	Σφηνοειδές (Wedge)	0,36
Ιλαρίωνας	0,318	Σφηνοειδές (Wedge)	0,36
Καστράκι	0,408	Σφηνοειδές (Wedge)	0,36
Κρεμαστά	0,434	Ημικυκλικό (Bowl)	0,44
Μαραθώνας	0,484	Ημικυκλικό (Bowl)	0,44
Μόρνος	0,334	Σφηνοειδές (Wedge)	0,36
Πλαστήρας	0,380	Σφηνοειδές (Wedge)	0,36
Πλατανόβρυση	0,325	Σφηνοειδές (Wedge)	0,36
Πολύφυτο	0,384	Ημικυκλικό (Bowl)	0,44
Πουρνάρι	0,448	Σφηνοειδές (Wedge)	0,36

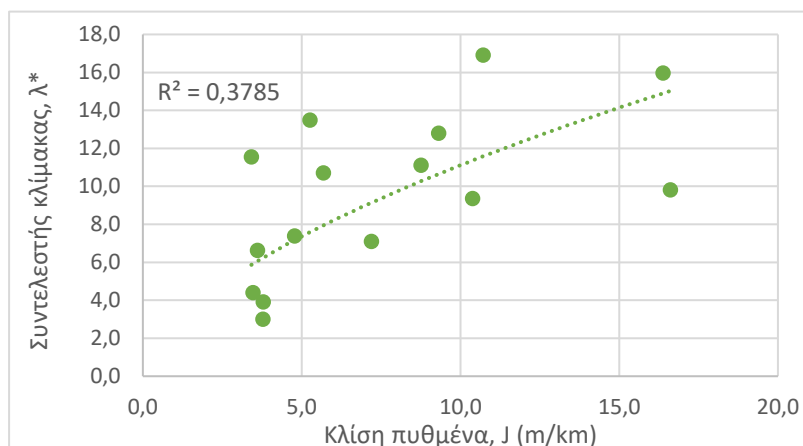
<b>Σφηκιά</b>	0,457	Ημικυκλικό (Bowl)	0,44
<b>Σμόκοβο</b>	0,333	Σφηγοειδές (Wedge)	0,36
<b>Στράτος</b>	0,558	Πρισματικό (Prism)	0,55
<b>Θησαυρός</b>	0,339	Σφηγοειδές (Wedge)	0,36

Παρατηρούμε ότι πρισματικό σχήμα έχει μόνο το φράγμα του Στράτου. Για τις επόμενες επεξεργασίες δε θα ληφθεί υπόψη διότι ενδέχεται να μην δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Όντας γνωστός ο συντελεστής  $\kappa^*$  και βελτιστοποιώντας το μοντέλο προκύπτει ο συντελεστής  $\lambda^*$ , ο οποίος φαίνεται πως εξαρτάται από την «περιμετρική» κλίση των πρανών. Η κλίση του πυθμένα,  $J$  μπορεί να υπολογιστεί από τα διαθέσιμα εργαλεία, αφού είναι γνωστή η υψομετρική διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης στάθμης και μπορεί να βρεθεί μέσω του λογισμικού ArcGIS (ή πιο απλά και από το Google Earth) το μήκος του κύριου υδατορεύματος. Συσχετίζοντας τον νέο συντελεστή  $\lambda^*$  με την κλίση του πυθμένα, φαίνεται πως έχουν μια μικρή εξάρτηση.

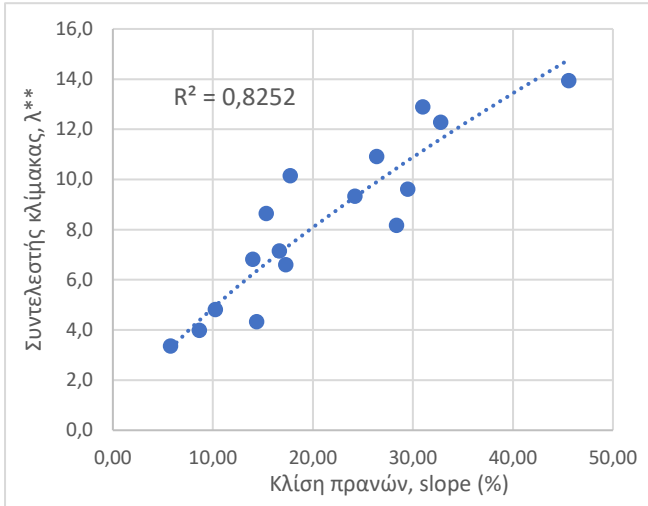


**Εικόνα 6.6:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ της κλίσης των πρανών (%) και του νέου συντελεστή  $\lambda^*$ .

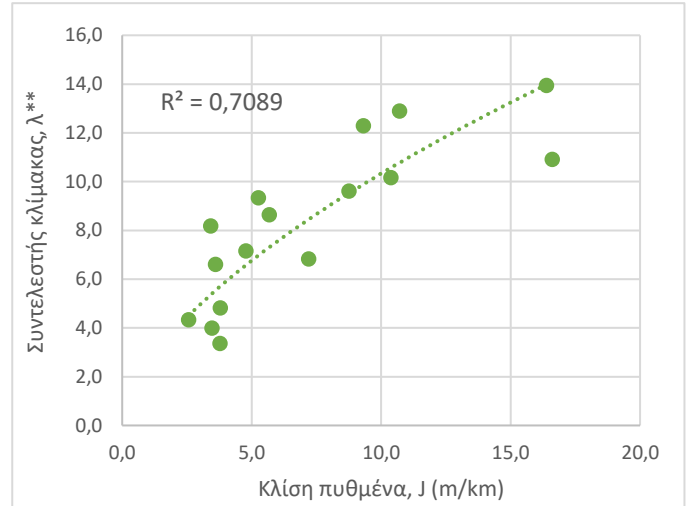


**Εικόνα 6.7:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ της κλίσης του πυθμένα,  $J$  (m/km) και του νέου συντελεστή  $\lambda^*$ .

Επόμενο βήμα είναι να δημιουργηθεί ένας νέος συντελεστής κλίμακας  $\lambda^{**}$ , διατηρώντας σταθερό τον συντελεστή σχήματος με την τιμή  $\kappa = 0,40$ , και να διερευνηθεί η εξάρτησή του τόσο από την κλίση των πρανών που αναφέρεται παραπάνω, όσο και από την κλίση του πυθμένα,  $J$ .



**Εικόνα 6.8:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ της κλίσης των πρανών (%) και του νέου συντελεστή  $\lambda^{**}$

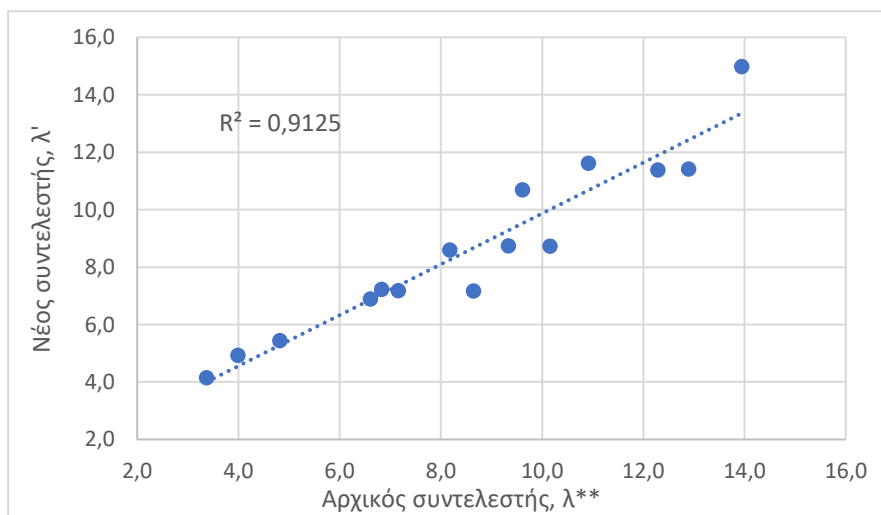


**Εικόνα 6.9:** Διάγραμμα διασποράς μεταξύ της κλίσης των πρανών (%) και του νέου συντελεστή  $\lambda^{**}$

Επιλέγεται η δεύτερη προσέγγιση, δηλαδή ο υπολογισμός του  $\lambda^{**}$  και ύστερα από βελτιστοποίηση προκύπτει η σχέση:

$$\lambda = 5,92 \times S^{0,47} \times J^{0,21} \quad (6.2)$$

διατηρώντας τον συντελεστή  $\kappa$  ανεξάρτητο.



**Εικόνα 6.10:** Σύσχεση μεταξύ του πραγματικού  $\lambda^{**}$  και του προσομοιωμένου  $\lambda^{**}$  της 2<sup>ης</sup> μεθόδου.

Είναι προφανές ότι η εξίσωση (6.2) διαφέρει, ως προς τους συντελεστές της, από την εξίσωση (5.2) αφού η κλίση γύρω από την περιοχή της λεκάνης κατάκλυσης είναι μεγαλύτερη από την κλίση της λεκάνης, το οποίο αποδεικνύεται και από την μέση τιμή της κλίσης των πρανών στην επεξεργασία του προηγούμενου κεφαλαίου που ισούται με 18,28% ενώ στους Ελληνικούς ταμειυτήρες ισούται με 21,1%.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μία ανάλυση ευαισθησίας, στην περίπτωση που οι παράμετροι του μοντέλου υποστούν μεταβολή της τάξης του  $\pm 20\%$ , για τα δύο μέτρα απόδοσης, τον συντελεστή NSE και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE.

**Πίνακας 6.3:** Τελικές τιμές συντελεστή NSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 2<sup>η</sup> Μέθοδο.

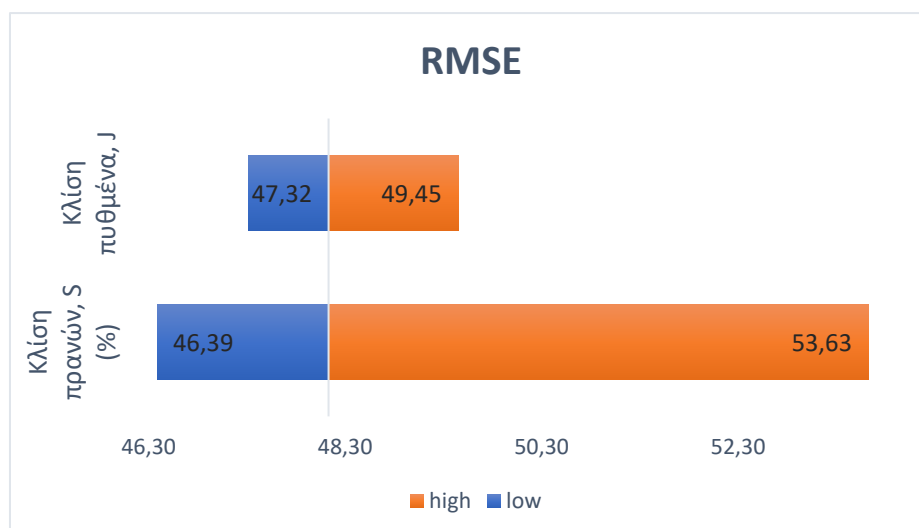
	Συντελεστής NSE				
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	NSE	-20%	NSE
Κλίση πρανών (%)	21,10	25,32	0,981	16,88	0,964
Κλίση πυθμένα, J	0,007	0,0084	0,979	0,0056	0,976

**Πίνακας 6.4:** Τελικές τιμές τετραγωνικού σφάλματος RMSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 2<sup>η</sup> Μέθοδο.

	Τετραγωνικό σφάλμα RMSE				
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	RMSE	-20%	RMSE
Κλίση πρανών (%)	21,10	25,32	46,39	16,88	53,63
Κλίση πυθμένα, J	0,01	0,0084	47,32	0,0056	49,45



**Εικόνα 6.11:** Διάγραμμα Tornado του συντελεστή NSE για την 2<sup>η</sup> Μέθοδο.



**Εικόνα 6.11:** Διάγραμμα Tornado του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE για την 2<sup>η</sup> Μέθοδο.

#### 6.4 Αξιολόγηση Ελληνικών ταμιευτήρων με τις εξισώσεις προσδιορισμού της βιβλιογραφίας

Όπως αναφέρθηκε και στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, και υλοποιήθηκε στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο, θα αξιολογηθούν οι υπό μελέτη ταμιευτήρες από τις εξισώσεις (2.1), (2.2), (2.3) και για τους 20 Ελληνικούς ταμιευτήρες. Οι συντελεστές NSE για κάθε θέση παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5.

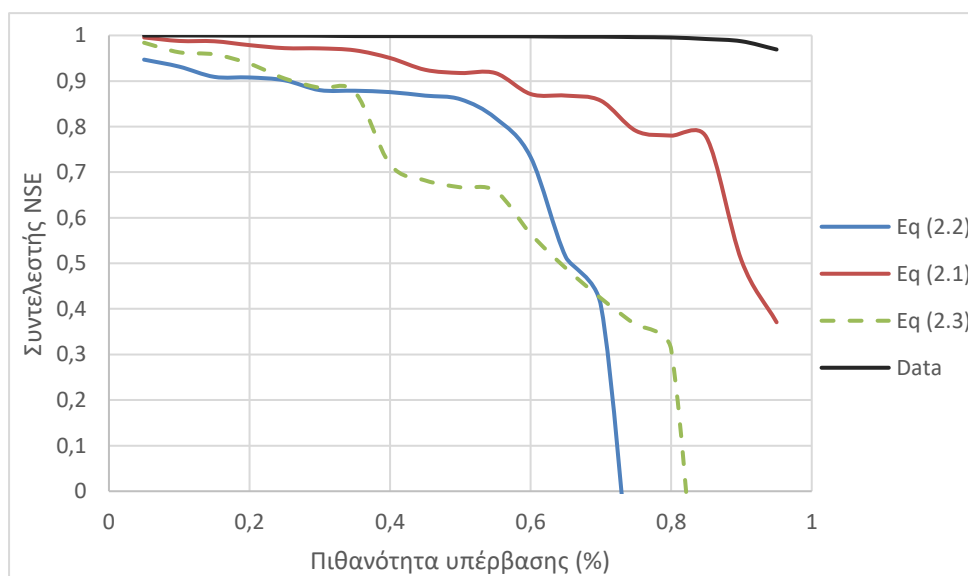
**Πίνακας 6.5:** Αξιολόγηση δείκτη NSE των Ελληνικών ταμιευτήρων από τις σχέσεις της βιβλιογραφίας.

Ταμιευτήρας	$V = 0,678 (Ah)^{0,9229}$ (2.1)	$V = 30,684 A^{0,9578}$ (2.2)	$V = 0,00857 A^{1,4357}$ (2.3)
<i>NSE</i>			
Αποσελέμης	0,918	-0,320	0,717
Εύηνος	0,988	0,860	0,311
Γαδουράς	0,871	-0,848	0,984
Ιλαρίονας	0,371	0,876	-0,631
Καστράκι	0,925	0,908	0,963
Κρεμαστά	0,791	0,407	0,885
Μαραθώνας	0,987	-3,047	0,876
Μόρνος	0,967	0,902	0,958
Μεσοχώρα	0,972	0,733	0,489
Μουζάκι	0,979	0,514	0,423
Πλαστήρας	0,506	-5,007	-8,160
Πλατανόβρυση	0,780	0,932	0,659
Πολύφυτο	0,996	0,909	0,667
Πύλη	0,972	0,868	0,364

Σφηκιά	0,857	0,879	0,565
Σμόκοβο	0,868	0,947	0,905
Στράτος	0,917	-10,049	-2,074
Συκιά	0,950	0,819	0,682
Θησαυρός	0,777	0,880	0,938
<b>Διάμεσος</b>	<b>0,918</b>	<b>0,860</b>	<b>0,667</b>

Επιβεβαιώνεται, πως η σχέση (2.1) έχει καλύτερη προσαρμογή στους ταμιευτήρες σε σχέση με τις άλλες δύο, με διάμεσο σχεδόν ίση με τη διάμεσο που προέκυψε στην ενότητα 5.3 (0,918 εδώ έναντι 0,903 από τον Πίνακα 5.17), τιμή η οποία πλησιάζει την τιμή του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0,92$  που υποδηλώνεται στη βάση GRanD. Επίσης, και οι υπόλοιπες σχέσεις φαίνεται πως προσαρμόζονται καλύτερα στους Ελληνικούς ταμιευτήρες, με την εξίσωση (2.2) να υπερτερεί και πάλι της εξίσωσης (2.3).

Παρακάτω, απεικονίζονται διαγραμματικά οι συντελεστές NSE σε σχέση με την πιθανότητα υπέρβασης του, αντίστοιχα με το 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Πάλι, όσο πιο κοντά βρίσκεται μία εκ των τριών καμπυλών στην καμπύλη των δεδομένων, τόσο καλύτερη προσαρμογή (δηλαδή υψηλότερο συντελεστή NSE) διαθέτει.



**Εικόνα 6.12:** Διαγραμματική απεικόνιση του δείκτη NSE για κάθε σχέση της βιβλιογραφίας, συγκριτικά με την καμπύλη των δεδομένων για τους Ελληνικούς ταμιευτήρες.

## 6.5 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα Ανάλυσης

Στον Πίνακα 6.6 φαίνονται οι τιμές των μέτρων απόδοσης των δύο μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος (μέθοδος βιβλιογραφίας) συσχετίζει τους δύο συντελεστές της σχέσης δύναμης στάθμης – αποθέματος και η δεύτερη μέθοδος συσχετίζει τον συντελεστή  $\lambda$  με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα.

**Πίνακας 6.6:** Μέτρα απόδοσης των δύο μεθόδων

	1 <sup>η</sup> Μέθοδος	2 <sup>η</sup> Μέθοδος
NSE	0,981	0,978
RMSE	36,96	48,13

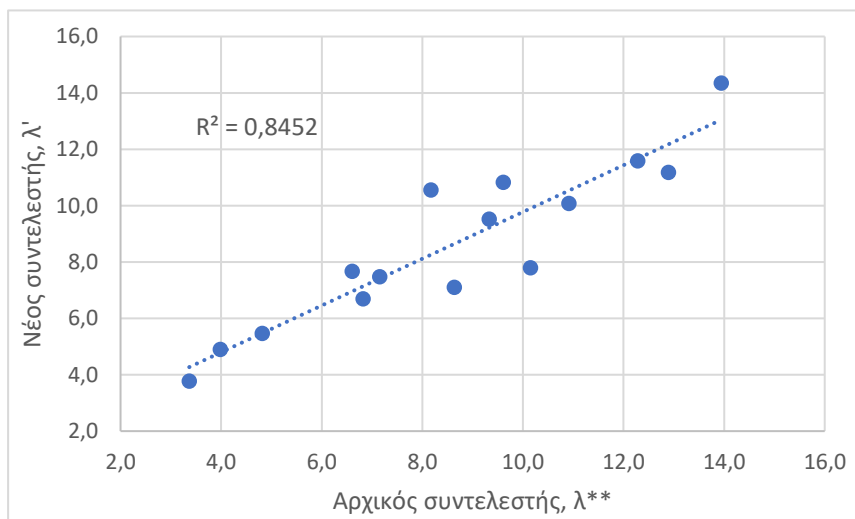
Θα πραγματοποιηθεί μία διερεύνηση της 2<sup>ης</sup> μεθόδου ανάλογα με το πόσα γεωμετρικά χαρακτηριστικά θα είναι γνωστά σε μία ανάλυση, η οποία ακολουθείται και με μια ανάλυση ευαισθησίας.

- **Διερεύνηση 2<sup>ης</sup> Μεθόδου**

➤ Εάν είναι γνωστή μόνο η κλίση των πρανών, *slope* (%)

Θα υπολογιστεί ο συντελεστής  $\lambda$  συναρτήσει της κλίσης των πρανών, με ανεξάρτητο συντελεστή  $\kappa$ .

$$\lambda = 1,22 \times S^{0,65} \quad (6.3)$$



**Εικόνα 6.13:** Σχέση νέου συντελεστή  $\lambda$  συγκριτικά με τον αρχικό, συναρτήσει μόνο της κλίσης των πρανών των Ελληνικών Ταμιευτήρων.

Τα μέτρα απόδοσης είναι τα εξής:

- ✓ NSE = 0,98
- ✓ RMSE = 45,56

Με μια προσάξηση της τάξης του  $\pm 20\%$  οι τιμές των παραπάνω μέτρων είναι:



**Πίνακας 6.7:** Τελικές τιμές συντελεστή NSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  της κλίσης των πρανών (%) για την 1η υποπερίπτωση.

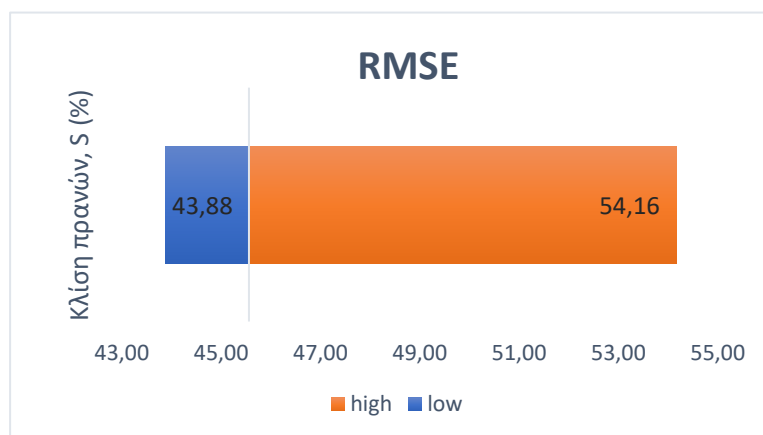
Συντελεστής NSE					
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	NSE	-20%	NSE
Κλίση πρανών (%)	21,10	25,32	0,983	16,88	0,971



**Εικόνα 6.14:** Διάγραμμα Tornado του συντελεστή NSE για την 1<sup>η</sup> υποπερίπτωση

**Πίνακας 6.8:** Τελικές τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  της κλίσης των πρανών (%) για την 1η υποπερίπτωση.

Τετραγωνικό σφάλμα RMSE					
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	RMSE	-20%	RMSE
Κλίση πρανών (%)	21,10	25,32	43,88	16,88	54,16



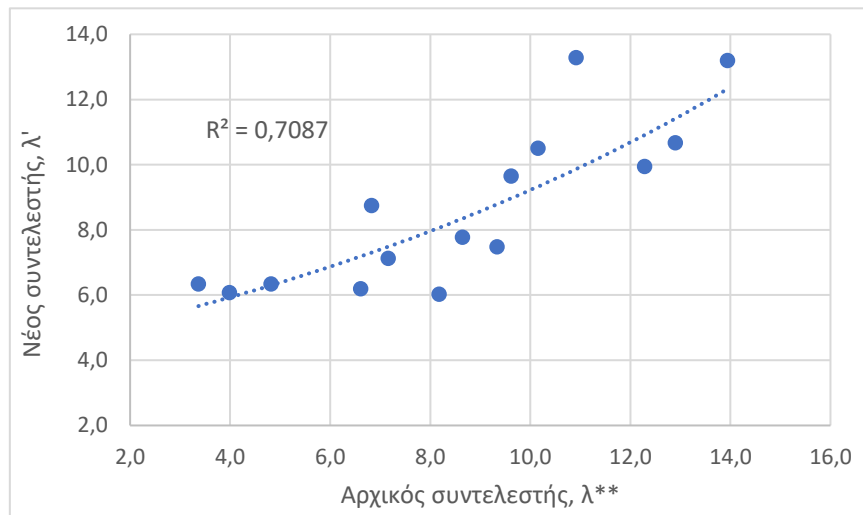
**Εικόνα 6.15:** Διάγραμμα Tornado του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE για την 1<sup>η</sup> υποπερίπτωση

Φαίνεται πως μια μεταβολή  $\pm 20\%$  πρακτικά δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια του μοντέλου.

➤ Εάν είναι γνωστή μόνο η κλίση του πυθμένα, J

Εκτιμάται ο συντελεστής  $\lambda$  συναρτήσει της κλίσης του πυθμένα, με ανεξάρτητο συντελεστή κ.

$$\lambda = 103 \times \sqrt{J} \quad (6.4)$$



**Εικόνα 6.16:** Σχέση νέου συντελεστή  $\lambda$  συγκριτικά με τον αρχικό, συναρτήσει της κλίσης του πυθμένα των Ελληνικών Ταμειυτήρων.

Τα μέτρα απόδοσης είναι τα εξής:

- ✓ NSE = 0,964
- ✓ RMSE = 60,23

Παρά το γεγονός ότι ο συντελεστής  $R^2$  της Εικόνας 6.16 είναι χαμηλότερος από αυτόν της Εικόνας 6.13 και αρκετά χαμηλότερος της Εικόνας 6.10 ( $R^2 = 0,845$  και  $R^2 = 0,913$  αντίστοιχα) η απόδοση του μοντέλου δεν είναι χαμηλή.

Με μεταβολή της τάξης του  $\pm 20\%$  οι τιμές των παραπάνω μέτρων είναι:

**Πίνακας 6.9:** Τελικές τιμές συντελεστή NSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  της κλίσης του πυθμένα για την 2η υποπερίπτωση.

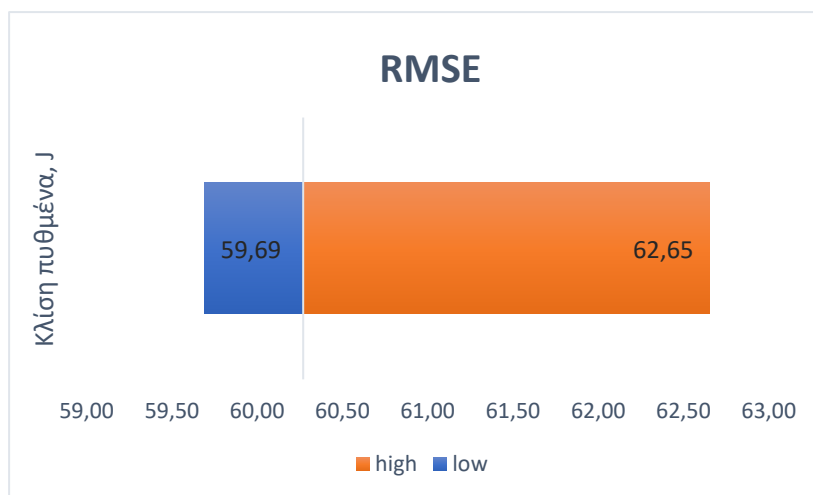
	Συντελεστής NSE				
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	NSE	-20%	NSE
Κλίση πυθμένα, J	0,007	0,0084	0,966	0,0056	0,960



**Εικόνα 6.17:** Διάγραμμα Tornado του συντελεστή NSE για την 2<sup>η</sup> υποπερίπτωση

**Πίνακας 6.10:** Τελικές τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  της κλίσης του πυθμένα για την 2<sup>η</sup> υποπερίπτωση.

Τετραγωνικό σφάλμα RMSE					
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	RMSE	-20%	RMSE
Κλίση πυθμένα, J	0,007	0,0084	59,69	0,0056	62,65



**Εικόνα 6.18:** Διάγραμμα Tornado του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE για την 2<sup>η</sup> υποπερίπτωση

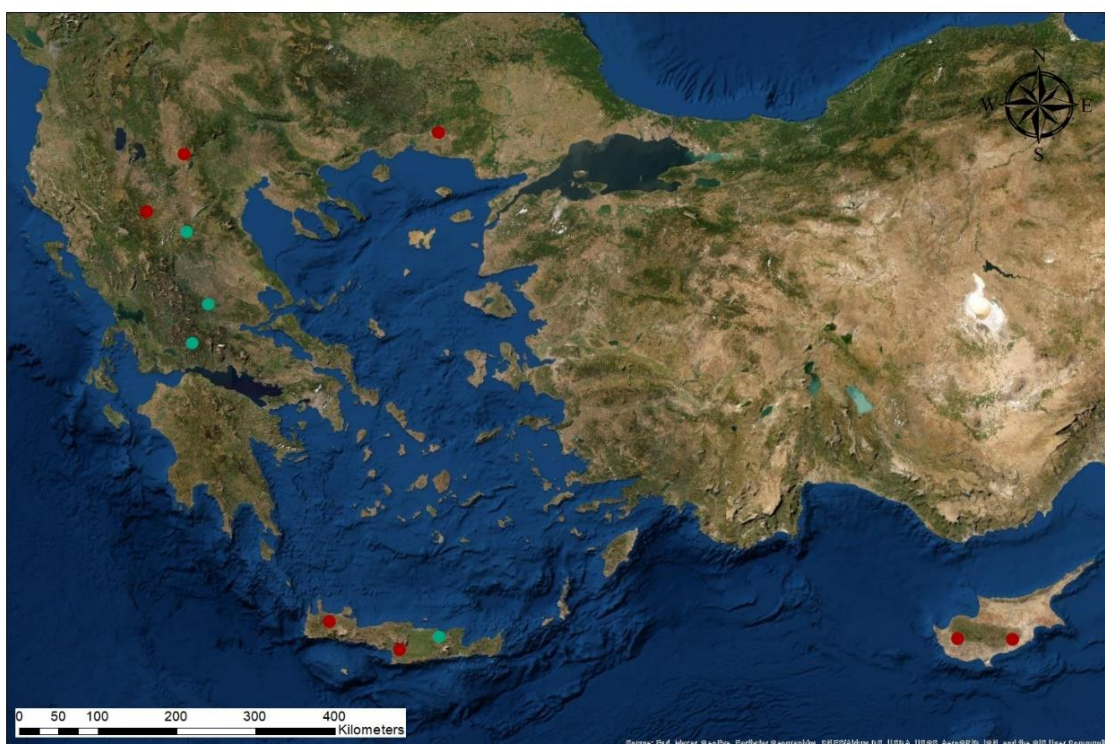
Είναι προφανές πως μεγαλύτερη ακρίβεια δίνει η εξίσωση (6.2) με παραμέτρους και τις δύο κλίσεις, ωστόσο εάν είναι γνωστή μόνο η μία εκ των δυο κλίσεων μπορεί να προσεγγιστεί με σχετική ακρίβεια ο συντελεστής κλίμακας  $\lambda$ .

## 7. Επικύρωση Αποτελεσμάτων

### 7.1 Γεωγραφική Κατανομή Νέων ταμιευτήρων

Για να θεωρηθούν αξιόπιστα τα αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων, κρίνεται σκόπιμο να επαληθευτούν και σε διαφορετικούς ταμιευτήρες. Για τον σκοπό αυτό, δημιουργούνται 7 νέοι ταμιευτήρες, οι πέντε βρίσκονται στην Ελλάδα και οι δύο στην Κύπρο. Οι ταμιευτήρες αυτοί προσομοιώνονται με την μέθοδο που περιγράφηκε στην ενότητα 5.2.1 και επιλέχθηκαν με βάση το έτος κατασκευής τους. Το Google Earth παρέχει δεδομένα συντεταγμένων από το 1984 και σε κάποιες περιπτώσεις από μεταγενέστερη χρονολογία, επομένως σε όσα φράγματα έχουν κατασκευαστεί τα τελευταία χρόνια, τα υψόμετρα του εδάφους της λεκάνης τους μπορούν να βρεθούν από το Google Earth. Αυτό σημαίνει πως και κάποιοι ταμιευτήρες του 6<sup>ου</sup> κεφαλαίου (οι πιο πρόσφατοι) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επικυρώσουν τα αποτελέσματα του 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου, όπως θα αναλυθεί στην ενότητα 7.2, δηλαδή στην επεξεργασία πριν την πλήρωση των ταμιευτήρων. Οι ταμιευτήρες είναι:

- Αποσελέμης
- Εύηνος
- Ιλαρίονας
- Σμόκοβο



Εικόνα 7.1: Γεωγραφική Κατανομή ταμιευτήρων

Στο χάρτη της Εικόνας 7.1, με γαλάζιο χρώμα σημειώνονται οι παραπάνω ταμιευτήρες ενώ με κόκκινο χρώμα οι νέοι ταμιευτήρες.

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των ταμιευτήρων, δηλαδή η θέση τους, η χωρητικότητα και η επιφάνειά τους, καθώς και η σκοπιμότητά τους.

**Πίνακας 7.1:** Γεωγραφική θέση ταμιευτήρων, χαρακτηριστικά ταμιευτήρα καθώς και σκοπιμότητα (Ύδρ: Ύδρευση, Υ/Η: Υδροηλεκτρική Παραγωγή, Άρδ: Άρδευση, Βιομ: Βιομηχανική Χρήση (εδώ: ψύξη ΑΗΣ Μελίτης), (\*): Δεν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία), πηγή: *Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, «Τα Φράγματα Της Ελλάδας» & Λευκωσία: Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, «Φράγματα της Κύπρου».*

Φράγμα	Θέση		Χαρακτηριστικά Ταμιευτήρα		Σκοπός
	Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος	Χωρητικότητα ( $\times 10^3 \text{ m}^3$ )	Επιφάνεια ( $\times 10^3 \text{ m}^2$ )	
Βαλσαμιώτη	35°26'30.06" N	23°53'08,97" E	6.000	*	*
Γρατινής	41°09'23.53" N	25°31'30.19" E	12.800	982	Ύδρ
Διπόταμου (Κύπρος)	34°85'48.67" N	33°35'78.04" E	15.500	1.000	Ύδρ, Άρδ
Κανναβιού (Κύπρος)	34°55'43.24" B	32°35'27.55" E	18.000	9.260	Ύδρ, Άρδ
Παπαδιάς	40°53'04.57" N	21°41'30.31" E	14.000	598	Υ/Η, Βιομ, Άρδ
Πραμόριτσας	40°12'29.57" N	21°09'00.13" E	5.586	109	Υ/Η, Ύδρ
Φανερωμένης Μεσσαράς	35°05'37.61" N	24°51'07.83" E	19.679	1.000	Άρδ

## 7.2 Επεξεργασία ταμιευτήρων πριν την πλήρωση

Σε αυτήν την ενότητα, θα επικυρωθούν τα αποτελέσματα του 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου με τους νέους ταμιευτήρες. Σε αυτούς θα προστεθούν και οι 4 ταμιευτήρες που αναφέρθηκαν στην ενότητα 7.1, καθώς μπορεί να υπολογιστεί τόσο η κλίση των πρανών της λεκάνης κατάκλυσης, όσο και το πλάτος του πυθμένα των ταμιευτήρων.

Η ακρίβεια των ΨΜΕ των ταμιευτήρων είναι σχετικά καλή, ειδικά για τους νέους ταμιευτήρες, οι οποίοι βέβαια είναι μικρότερης επιφάνειας.

**Πίνακας 7.2:** Ακρίβεια ταμιευτήρων επικύρωσης

Φράγμα	Μέγεθος κελιών
Βαλσαμιώτη	4×4
Γρατινής	10×10

Διπόταμου	10×10
Κανναβιού	7×7
Παπαδιάς	7×7
Πραμόριτσας	7×7
Φανερωμένης Μεσσαράς	10×10
Αποσελέμης	6×6
Εύηνος	11×11
Ιλαρίωνας	40×40
Σμόκοβο	24×24

Για τους 7 ταμειυτήρες έγινε ανάλυση και υπολογίστηκαν οι τοπικοί συντελεστές κλίμακας,  $\lambda$  και οι συντελεστές σχήματος,  $\kappa$  (για τους υπόλοιπους 4 οι συντελεστές έχουν συμπεριληφθεί σε ανάλυση προηγούμενου κεφαλαίου). Τα μέτρα απόδοσης έχουν ως εξής:

- ✓ NSE = 0,999
- ✓ RMSE = 3,44

### 7.2.1 1η Μέθοδος

Εφ' όσον μπορεί να υπολογιστεί το πλάτος του πυθμένα  $b$  από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, και το μέσο πλάτος  $B$  του ταμειυτήρα, θα γίνει κατηγοριοποίηση του συντελεστή σχήματος  $\kappa$  αντίστοιχη με αυτήν της ενότητας 5.2.3.1. Αρχικά συμπληρώνεται στην 3<sup>η</sup> στήλη του Πίνακα 7.3 ο συντελεστής  $\kappa^*$  (global) που προκύπτει από τον συντελεστή  $\kappa$  (local) της 2<sup>ης</sup> στήλης, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν κάποιο γεωμετρικό χαρακτηριστικό του ταμειυτήρα. Στις επόμενες στήλες υπολογίζεται ο λόγος  $b/B$ , το εύρος των τιμών για κάθε κατηγορία (βλ. Πίνακα 5.6) και τέλος εάν «συμφωνεί» η τιμή της 3<sup>ης</sup> στήλης με την τιμή του συντελεστή  $\kappa$  που προκύπτει από τον παραπάνω λόγο.

**Πίνακας 7.3:** Κατηγοριοποίηση συντελεστή  $\kappa^*$  σχετικά με τον λόγο του πλάτους του πυθμένα,  $b$  προς το μέσο πλάτος του Ταμειυτήρα,  $B$ .

Φράγμα	Συντελεστής $\kappa$ (local)	Συντελεστής $\kappa^*$ (global)	$b/B$	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	
Βαλσαμιώτη	0,460	0,44	0,1809	$\geq 0,092$	$\leq 0,278$	✓
Γρατινής	0,358	0,36	0,0839	$\geq 0$	$\leq 0,091$	✓
Διπόταμου	0,405	0,44	0,0998	$\geq 0,092$	$\leq 0,278$	✓
Κανναβιού	0,421	0,44	0,1076	$\geq 0,092$	$\leq 0,278$	✓
Παπαδιάς	0,436	0,44	0,2413	$\geq 0,092$	$\leq 0,278$	✓

Πραμόριτσας	0,405	0,44	0,1023	$\geq 0,092$	$\leq 0,278$	✓
Φανερωμένης Μεσσαράς	0,337	0,36	0,0905	$\geq 0$	$\leq 0,091$	✓
Αποσελέμης	0,419	0,44	0,1924	$\geq 0,092$	$\leq 0,278$	✓
Εύηνος	0,392	0,36	0,0842	$\geq 0$	$\leq 0,091$	✓
Ιλαρίωνας	0,318	0,36	0,0246	$\geq 0$	$\leq 0,091$	✓
Σμόκοβο	0,333	0,36	0,0902	$\geq 0$	$\leq 0,091$	✓

Από τον παραπάνω πίνακα το εύρος των τιμών του λόγου  $b/B$  για τα τρία διαφορετικά σχήματα των ταμιευτήρων (στην προκειμένη ανάλυση δεν έχει κάποιος ταμιευτήρας πρισματικό σχήμα, επομένως εξετάζεται η επικύρωση του εύρους των τιμών του λόγου των δύο εκ των τριών σχημάτων) επαληθεύεται για όλους τους ταμιευτήρες, οπότε μέσω αυτής της μεθόδου φαίνεται πως μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Διατηρώντας τις τιμές της 3<sup>ης</sup> στήλης του Πίνακα 7.2 ως τιμές του συντελεστή  $\kappa^*$  και βελτιστοποιώντας τον συντελεστή  $\lambda$  (ο οποίος παραμένει ανεξάρτητος) προκύπτει:

- ✓ NSE = 0,998
- ✓ RMSE = 3,44

Ο συντελεστής NSE μειώθηκε κατά 0,1% (από 0,999 σε 0,998) ενώ το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι το ίδιο. Αυτό υποδηλώνει πως η ακρίβεια της μεθόδου είναι αρκετά μεγάλη.

### 7.2.2 2η Μέθοδος

Σε αυτήν την μέθοδο συσχετίζεται ο συντελεστής  $\lambda$  με τα τρία γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα (κλίση πρανών  $slope$  (%), κλίση πυθμένα  $J$ , πλάτος πυθμένα  $b$  (m)) διατηρώντας τον συντελεστή  $\kappa$  ανεξάρτητο.

- Εάν είναι γνωστή η κλίση των πρανών,  $slope$  (%), η κλίση του πυθμένα του ταμιευτήρα,  $J$  και το πλάτος του πυθμένα,  $b$  (m)

Με εφαρμογή της εξίσωσης (5.2) προκύπτουν τα παρακάτω (λαμβάνοντας και τους 11 ταμιευτήρες στην ανάλυση):

- ✓ NSE = 0,988
- ✓ RMSE = 17,00

Στο Παράρτημα Δ βρίσκονται αναλυτικά τα διαγράμματα διασποράς των ταμιευτήρων του παρόντος κεφαλαίου (αλλά και των προηγούμενων).

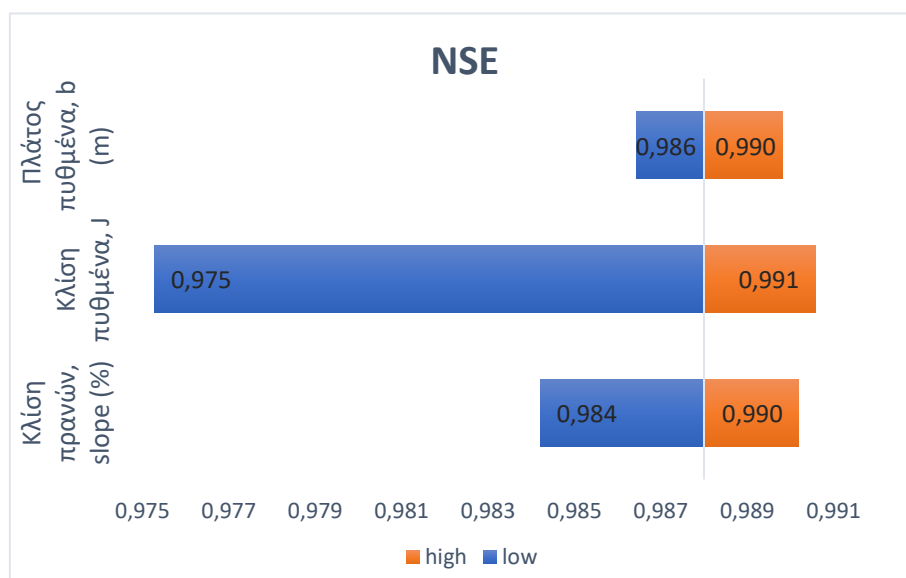
Θα πραγματοποιηθεί μία ανάλυση ευαισθησίας, αντίστοιχη με αυτή των προηγούμενων κεφαλαίων, για μεταβολή  $\pm 20\%$  των τριών γεωμετρικών μεγεθών.

**Πίνακας 7.4:** Τελικές τιμές συντελεστή NSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 2η Μέθοδο της επικύρωσης των αποτελεσμάτων.

	Συντελεστής NSE				
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	NSE	-20%	NSE
Κλίση πρανών, slope (%)	15,789	18,9468	0,990	12,6312	0,984
Κλίση πυθμένα, J (%)	0,017	0,0204	0,991	0,0136	0,975
Πλάτος πυθμένα b (m)	57,29	68,748	0,986	45,832	0,990

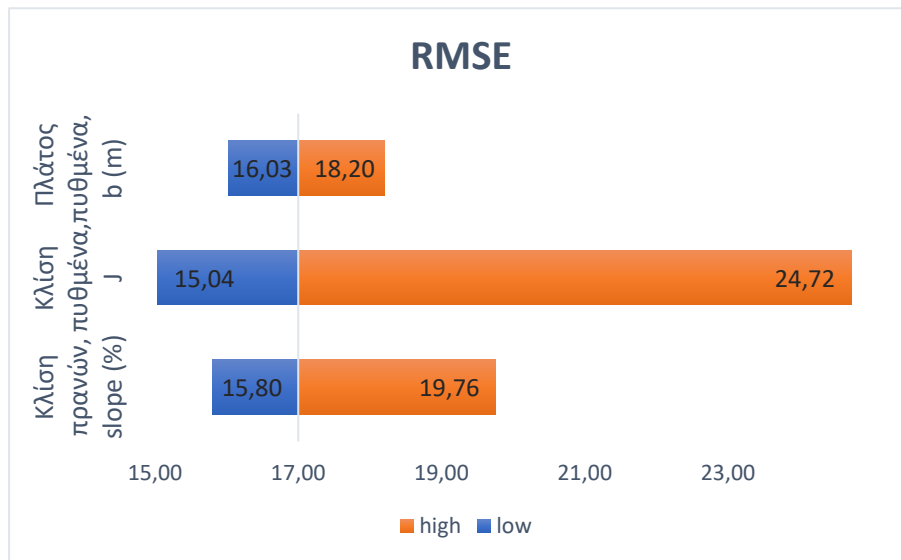
**Πίνακας 7.5:** Τελικές τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των παραμέτρων για την 2η Μέθοδο της επικύρωσης των αποτελεσμάτων.

	Τετραγωνικό Σφάλμα RMSE				
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	RMSE	-20%	RMSE
Κλίση πρανών, slope (%)	15,789	18,9468	15,800	12,6312	19,757
Κλίση πυθμένα, J (%)	0,017	0,0204	15,041	0,0136	24,722
Πλάτος πυθμένα b (m)	57,29	68,748	18,199	45,832	16,025



**Εικόνα 7.2:** Διάγραμμα Tornado συντελεστή NSE για την 2η Μέθοδο επικύρωσης των αποτελεσμάτων.





**Εικόνα 7.3:** Διάγραμμα Tornado μέσω τετραγωνικού σφάλματος RMSE για την 2<sup>η</sup> Μέθοδο επικύρωσης των αποτελεσμάτων.

Αντίστοιχα με την ανάλυση ευαισθησίας του της ενότητας 5.2.3.3 με την αύξηση της κλίσης των πρηνών και της κλίσης του πυθμένα (ξεχωριστά), ο συντελεστής NSE αυξάνεται και το μέτρο τετραγωνικό σφάλμα RMSE μειώνεται. Ωστόσο, η διαφορά δεν είναι μεγάλη και το εύρος διακύμανσης των μέτρων απόδοσης δεν μεταβάλλεται σε σημαντικό βαθμό.

Για λόγους πληρότητας, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.6 τα αποτελέσματα για τις υπόλοιπες περιπτώσεις αυτής της μεθόδου, δηλαδή όταν είναι γνωστά μόνο κάποια από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα.

**Πίνακας 7.6:** Τιμές των μέτρων απόδοσης για τις 3 υποπεριπτώσεις της εξίσωσης (5.2)

Γνωστά μεγέθη	Εξίσωση	NSE	RMSE
Κλίση πρηνών, S (%)	$\lambda = 2,24 \times S^{0,62}$	0,956	24,139
Κλίση ταμιευτήρα, J	$\lambda = 109,1 \times \sqrt{J}$	0,969	27,088
Κλίση πρηνών, S (%) + Κλίση ταμιευτήρα, J	$\lambda = 57,2 \times S^{0,21} \times \sqrt{J}$	0,965	28,022

Επιβεβαιώνεται πως η κλίση του πυθμένα J έχει μεγαλύτερη συσχέτιση με τον συντελεστή  $\lambda$  σχετικά με την κλίση των πρηνών, ενώ η εξίσωση που περιλαμβάνει και τις δύο παραμέτρους δίνει ελαφρώς χειρότερα αποτελέσματα, το οποίο ενδεχομένως συμβαίνει λόγω του μικρού αριθμού του δείγματος.

Τέλος, θα ελεγχθεί ένας συνδυασμός της 1<sup>ης</sup> και της 3<sup>ης</sup> μεθόδου, όπως στην ενότητα 5.4, δηλαδή θα συσχετιστεί ο συντελεστής  $\lambda$  με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων σύμφωνα με την εξίσωση (5.6) και ο συντελεστής  $\kappa^*$  θα λάβει τις αντίστοιχες τιμές της 1<sup>ης</sup> μεθόδου, ανάλογα με το σχήμα τους. Τα μέτρα απόδοσης είναι:

- ✓ NSE = 0,914
- ✓ RMSE = 48,03

Είναι προφανές πως και σε αυτήν την περίπτωση, όταν δεν διατηρείται ανεξάρτητος ο ένας εκ των δύο συντελεστών η ακρίβεια είναι χαμηλή και τα αποτελέσματα όχι αρκετά αξιόπιστα. Ωστόσο, ο δείκτης NSE εμφανίζεται αυξημένος συγκριτικά με τον αντίστοιχο δείκτη της ενότητας 5.4 (NSE = 0,914 έναντι 0,86) και μάλιστα 5 από τους 11 ταμιευτήρες έχουν NSE > 0,95 ενώ οι δύο εξ αυτών έχουν NSE > 0,99. Αυτό επιβεβαιώνει πως είναι η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει μία πρώτη εικόνα της σχέσης στάθμης - αποθέματος, όταν δεν απαιτείται υψηλή ακρίβεια.

### 7.2.3 3η Μέθοδος (Μέθοδος Βιβλιογραφίας)

Για λόγους σύγκρισης, θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν με εφαρμογή της εξίσωσης (6.1) (Efstratiadis et al., 2021) στους υπό μελέτη ταμιευτήρες. Υπενθυμίζεται πως η σχέση αυτή έχει προκύψει από 20 ταμιευτήρες, στους οποίους συμπεριλαμβάνονται και οι 4 που αναφέρθηκαν στην ενότητα 7.1 (Αποσελέμης, Εύηνος, Ιλαρίωνας, Σμόκοβο) οι οποίοι θα εξεταστούν και στην παρούσα επεξεργασία.

Στον Πίνακα 7.7 φαίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου της βιβλιογραφίας με τα αποτελέσματα της 2<sup>ης</sup> μεθόδου, δηλαδή της εξίσωσης (5.2), η οποία δίνει τον υψηλότερο δείκτη καλής προσαρμογής NSE σε συνδυασμό με το χαμηλότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE.

**Πίνακας 7.7:** Σύγκριση μέτρων απόδοσης των δύο μεθόδων

Εξίσωση	NSE	RMSE
$\lambda = 0,0386 \times (\kappa - 0,25)^{-2,574}$	0,986	17,73
$\lambda = \frac{78 \times S^{0,17} \times J^{0,43}}{b^{0,1}}$	0,988	17,00

### 7.3 Επεξεργασία ταμιευτήρων μετά την πλήρωση

Σε αυτήν την ενότητα, θα επικυρωθούν τα αποτελέσματα του 6<sup>ου</sup> κεφαλαίου με τους νέους ταμιευτήρες. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται για υφιστάμενους ταμιευτήρες, όπου η εύρεση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών είναι δυσχερέστερη, επομένως αναμένεται η ακρίβεια των

αποτελεσμάτων να είναι χαμηλότερη από την ανάλυση που πραγματοποιείται πριν την πλήρωση του ταμιευτήρα.

Επίσης, οι «περιμετρικές» κλίσεις είναι μεγαλύτερες από τις κλίσεις των πρανών της λεκάνης κατάκλυσης, το οποίο επιβεβαιώνει πως οι εξισώσεις (5.5) και (6.2) δεν μπορούν να έχουν ίδιους συντελεστές.

### 7.3.1 1η Μέθοδος

Με εφαρμογή της εξίσωσης (6.2) προκύπτουν τα παρακάτω (λαμβάνοντας τους 7 νέους ταμιευτήρες στην ανάλυση):

- ✓ NSE = 0,931
- ✓ RMSE = 18,25

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια ανάλυση ευαισθησίας με μεταβολή  $\pm 20\%$  των δύο κλίσεων.

**Πίνακας 7.8:** Τελικές τιμές συντελεστή NSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των δύο κλίσεων για την 1<sup>η</sup> Μέθοδο μετά την πλήρωση.

	Συντελεστής NSE				
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	NSE	-20%	NSE
«Περιμετρική» κλίση, slope (%)	37,404	44,88	0,957	29,92	0,890
Κλίση πυθμένα, J (%)	0,022	0,03	0,944	0,018	0,914

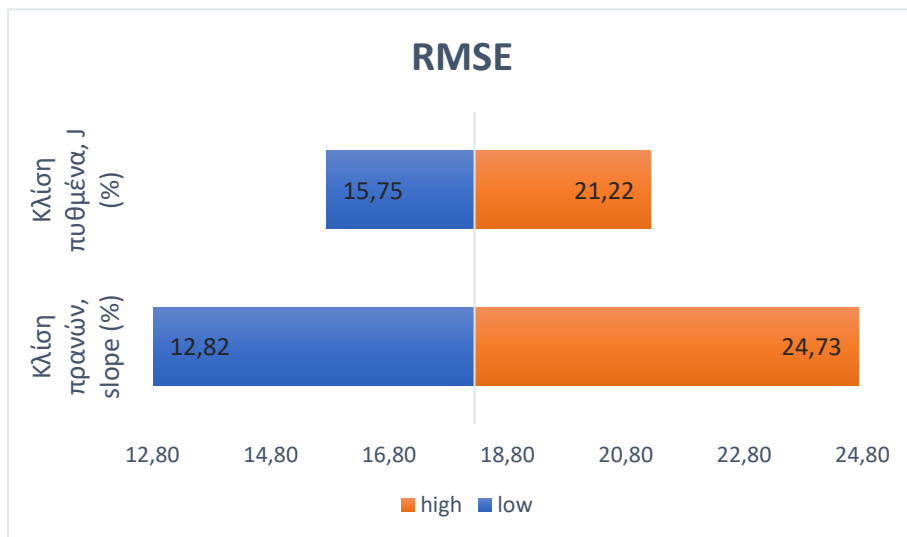
**Πίνακας 7.9:** Τελικές τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE με μεταβολή κατά  $\pm 20\%$  των δύο κλίσεων για την 1<sup>η</sup> Μέθοδο μετά την πλήρωση.

	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE				
	Αρχική Μέση Τιμή	20%	RMSE	-20%	RMSE
«Περιμετρική» κλίση, slope (%)	37,404	44,88	12,819	29,92	24,728
Κλίση πυθμένα, J (%)	0,022	0,03	15,745	0,018	21,224

Όπως φαίνεται, το εύρος διακύμανσης των μέτρων απόδοσης είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με προηγούμενες αναλύσεις, δηλαδή το μοντέλο έχει μεγαλύτερη ευαισθησία. Πάλι, παρατηρείται πως με μεταβολή κατά 20% της «περιμετρικής» κλίσης και της κλίσης του πυθμένα, υπάρχει καλύτερη προσαρμογή.



**Εικόνα 7.4:** Διάγραμμα Tornado συντελεστή NSE για την 1<sup>η</sup> Μέθοδο μετά την πλήρωση.



**Εικόνα 7.5:** Διάγραμμα Tornado μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE για την 1<sup>η</sup> Μέθοδο μετά την πλήρωση.

### 7.3.2 Σύγκριση Μεθόδων

Τα παραπάνω αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μέθοδο της βιβλιογραφίας, καθώς και με τις εξισώσεις που προκύπτουν έπειτα από διερεύνηση της σχέσης (6.2) (βλ. Ενότητα 6.5).

**Πίνακας 7.9:** Σύγκριση μέτρων απόδοσης των μεθόδων μετά την πλήρωση.

Γνωστά μεγέθη	Εξίσωση	NSE	RMSE
-	$\lambda = 0,0386 \times (\kappa - 0,25)^{-2,574}$	0,985	9,81
«Περιμετρική» κλίση, slope (%) & Κλίση πυθμένα, J	$\lambda = 5,92 \times S^{0,47} \times J^{0,21}$	0,931	18,25
«Περιμετρική» κλίση, slope (%)	$\lambda = 1,22 \times S^{0,65}$	0,784	31,91
Κλίση πυθμένα, J	$\lambda = 103 \times \sqrt{J}$	0,953	16,64

Η εξίσωση (6.1) φαίνεται πως αντιπροσωπεύει καλύτερα τους ταμιευτήρες μετά την πλήρωσή τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η κλίση του πυθμένα συσχετίζεται καλύτερα με τον συντελεστή κλίμακας  $\lambda$  συγκριτικά με την «περιμετρική» κλίση, η οποία δυσχεραίνει και την προσαρμογή της δεύτερης εξίσωσης (6.2). Υπενθυμίζεται, πως στην ανάλυση του 6<sup>ου</sup> κεφαλαίου η εξίσωση που περιέχει μόνο την «περιμετρική» κλίση προσαρμόζεται καλύτερα από αυτήν που περιέχει μόνο την κλίση του πυθμένα.

#### 7.4 Συμπεράσματα Ανάλυσης

Σύμφωνα με τα παραπάνω όταν είναι διαθέσιμα όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός ταμιευτήρα (κλίση πρανών, κλίση πυθμένα, πλάτος πυθμένα, μέσο πλάτος ταμιευτήρα), είναι εύλογο να συσχετιστεί ο ένας εκ των δύο συντελεστών με αυτά, διατηρώντας τον άλλον ανεξάρτητο ύστερα από βελτιστοποίηση. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει τον υψηλότερο συντελεστή καλής προσαρμογής με το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Ωστόσο, η συσχέτιση των δύο συντελεστών, που δεν προαπαιτεί την γνώση κάποιας άλλης παραμέτρου, φαίνεται να αποδίδει υψηλή ακρίβεια.

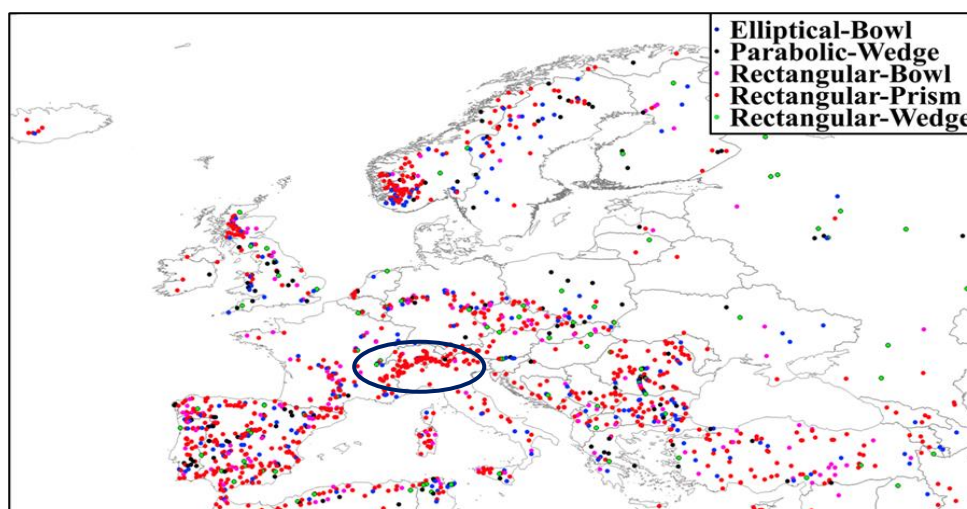
## 8. Συμπεράσματα

Σκοπός της έρευνας ήταν η εξαγωγή εξισώσεων που υπολογίζουν τις καμπύλες στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευτικότητας, με έμφαση στις δεύτερες, συσχετίζοντας τους συντελεστές της σχέσης  $h = \lambda \times S^k$  με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Πράγματι, οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από κάποια γεωμετρικά μεγέθη, όπως η κλίση του πυθμένα, η κλίση των πρανών, το πλάτος του πυθμένα. Παρακάτω συνοψίζονται τα συμπεράσματα των αναλύσεων των προηγούμενων κεφαλαίων με κάποια συμπληρωματικά σχόλια.

### 8.1 Συμπεράσματα ανάλυσης της βάσης ReGeom

Με την επεξεργασία των 6.824 ταμιευτήρων της βάσης δεδομένων Global Reservoir Geometry (ReGeom) δημιουργήθηκαν κάποιες εξισώσεις (βλ. Πίνακα 4.2) όπου οι συντελεστές σχήματος, λαμβάνουν μια σταθερή τιμή, ανάλογα με το σχήμα του ταμιευτήρα. Πιο συγκεκριμένα, για την εξίσωση δύναμης που περιγράφει την σχέση στάθμης – αποθέματος, με τα υπάρχοντα δεδομένα της βάσης προέκυψε μία μέση τιμή του συντελεστή σχήματος ίση με  $\kappa = 0,49$ . Ωστόσο επόμενες αναλύσεις έδειξαν ότι μια μέση τιμή που περιγράφει καλύτερα τους υπό μελέτη ταμιευτήρες είναι ίση με  $\kappa = 0,40$ . Η διαφορά αυτή, οφείλεται στο γεγονός πως στη βάση ReGeom οι ταμιευτήρες με το πρισματικό σχήμα φαίνεται πως υπερεκτιμούνται. Ο ισχυρισμός αυτός προκύπτει από τα παρακάτω επιχειρήματα.

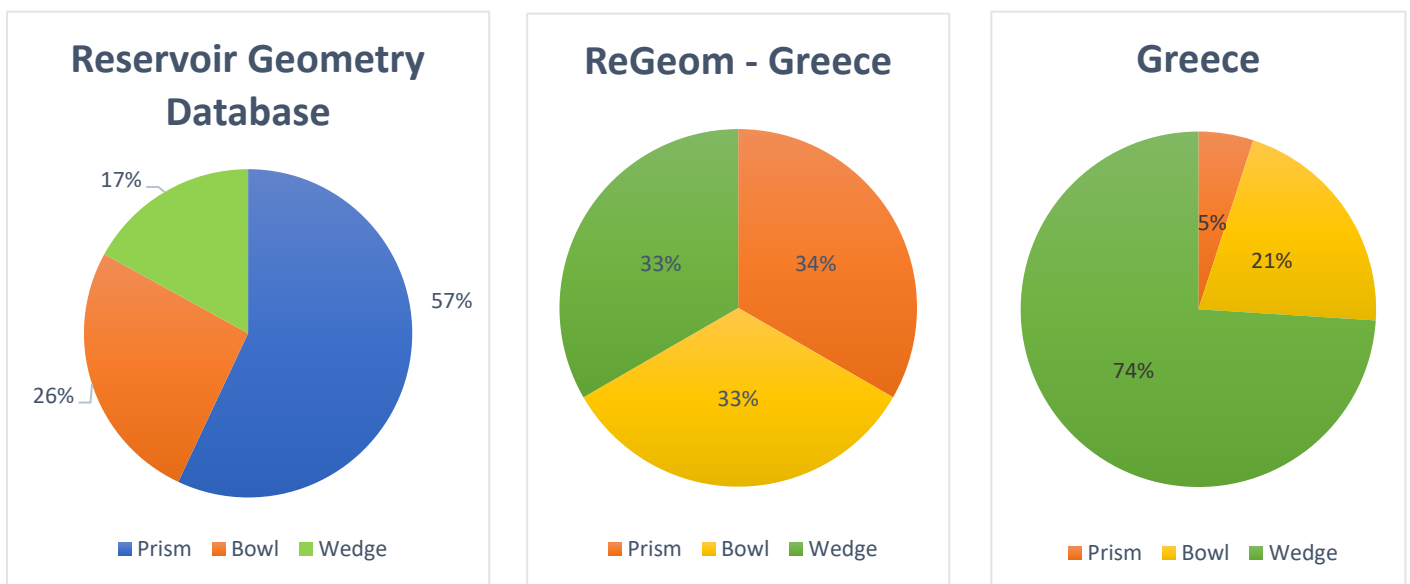
- Στο τρίτο κεφάλαιο του παρόντος τεύχους αναφέρεται πως για την επικύρωση των αποτελεσμάτων της έρευνας (Wondmagegn, et al., 2018) επιλέχθηκαν ταμιευτήρες σχήματος “Bowl” & “Wedge”. Πράγματι, οι ταμιευτήρες αυτοί έδωσαν αποτελέσματα καλής εφαρμογής του αλγορίθμου που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο, ωστόσο για τους ταμιευτήρες τύπου “Prism” δεν υπήρξε κάποια επικύρωση, επομένως τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν με ασφάλεια είναι αυτά που αφορούν ταμιευτήρες αυτών των σχημάτων.
- Από την συγκεκριμένη έρευνα, μεταξύ άλλων, προκύπτει ο ακόλουθος χάρτης.



Εικόνα 8.1: Κατανομή των πέντε σχημάτων ταμιευτήρων στην Ευρώπη, (Πηγή: Yigzaw, et al., 2018)

Παρατηρείται πως στην περιοχή που είναι μαρκαρισμένη, δηλαδή στην Ελβετία που το ανάγλυφο είναι ορεινό, οι περισσότεροι ταμιευτήρες έχουν προσομοιωθεί ως πρισματικοί. Αυτό σε κάποιους ταμιευτήρες μπορεί να εξηγηθεί από την κλίση των πρανών περιμετρικά της λεκάνης κατάκλυσης, όπου είναι πολύ μεγάλη (σχεδόν κατακόρυφη), άρα πράγματι μπορούν να προσομοιωθούν με το σχήμα “Prism”. Όμως αυτό δεν μπορεί να συμβεί στην πλειοψηφία των ταμιευτήρων. Ενδεικτικά έγιναν συνολικά τέσσερις προσομοιώσεις σε κάποιες υποψήφιες θέσεις φραγμάτων, τρεις εκ των τεσσάρων έχουν παρόμοιο ανάγλυφο με 3 ταμιευτήρες που στην βάση ReGeom έχουν προσομοιωθεί ως “Prism”, των οποίων οι θέσεις και οι υπολογισμοί φαίνονται στο Παράρτημα Ε. Το συμπέρασμα είναι πως για κανέναν ταμιευτήρα δεν προέκυψε συντελεστής σχήματος  $\kappa = 0,55$  άρα φαίνεται πως έχει γίνει υπερεκτίμηση των πρισματικών ταμιευτήρων και υποεκτίμηση των άλλων δύο σχημάτων.

- Στην συγκεκριμένη βάση δεδομένων, οι ταμιευτήρες με πρισματικό σχήμα καταλαμβάνουν το 57% των συνολικών ταμιευτήρων, ενώ στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο μόνο το φράγμα του Στράτου έχει πρισματικό σχήμα, με το σφηνοειδές σχήμα να υπερτερεί.

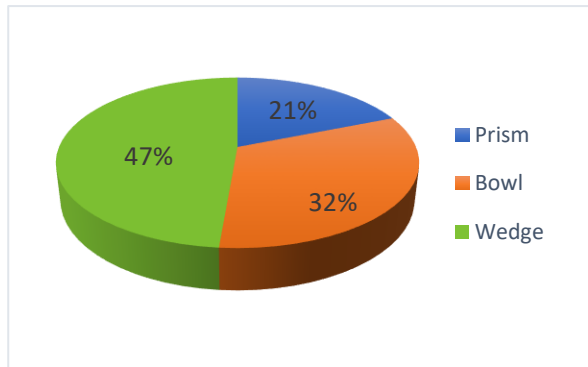


**Εικόνα 8.2:** Κατανομή των τριών σχημάτων α) Στη βάση δεδομένων ReGeom παγκροσμίως, b) Στη βάση δεδομένων ReGeom στην Ελλάδα, c) Στους Ελληνικούς Ταμιευτήρες του 6<sup>ου</sup> κεφαλαίου.

## 8.2 Συμπεράσματα ανάλυσης των υποψήφιων ταμιευτήρων

Από την ανάλυση του 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου προέκυψαν κάποιες εξισώσεις συσχέτισης του συντελεστή  $\lambda$  με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Στην εξίσωση (5.2) όπως έχει αναφερθεί ο μέσος συντελεστής καλής προσαρμογής είναι ίσος με  $NSE = 0,973$ . Από τα διαγράμματα του παραρτήματος Δ προκύπτει ότι:

- 1) 4/8 ταμειυτήρες σχήματος “Prism” έχουν  $NSE < 0,955$
- 2) 3/18 ταμειυτήρες σχήματος “Wedge” έχουν  $NSE < 0,955$
- 3) Όλοι οι ταμειυτήρες τύπου “Bowl” έχουν  $NSE > 0,98$



**Εικόνα 8.3:** Κατανομή σχημάτων υπογήφριων ταμειυτήρων.

Αρχικά, από την Εικόνα 8.3 επιβεβαιώνεται ο ισχυρισμός της ενότητας 8.1 περί υπερεκτίμησης των πρισματικών ταμειυτήρων. Επίσης φαίνεται πως οι ταμειυτήρες τύπου “Prism” έχουν αυξημένη πιθανότητα να παρουσιάσουν χαμηλότερο NSE συγκριτικά με τους υπόλοιπους. Ωστόσο, η σχέση (5.2) και όσες προκύπτουν από την διερεύνηση αυτής δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

### 8.3 Συμπεράσματα ανάλυσης των Ελληνικών ταμειυτήρων

Η ανάλυση των Ελληνικών ταμειυτήρων σηματοδοτεί την ανάλυση των ταμειυτήρων μετά την πλήρωσή τους με νερό. Αυτό σημαίνει πως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που μπορούν να υπολογιστούν είναι πιο περιορισμένα, άρα και η εξάρτηση των συντελεστών της καμπύλης στάθμης – αποθέματος πιο δύσκολη. Παρ’ όλα αυτά η προσαρμογή της σχέσης (6.2) φαίνεται πως είναι καλή στα δεδομένα, με εξαίρεση το φράγμα του Ιλαρίωνα ( $NSE = 0,91$ ) και τα φράγματα Βαλσαμιώτη ( $NSE = 0,73$ ) και Μεσσάρας ( $NSE = 0,91$ ).

### 8.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά κατά κύριο λόγο στην εξάρτηση των συντελεστών κλίμακας και σχήματος της σχέσης δύναμης στάθμης – αποθέματος με τη γεωμετρία του ταμειυτήρα. Ωστόσο κάποια σημεία που χρήζουν περαιτέρω έρευνας είναι:

- Ο έλεγχος της προσαρμογής σχέσεων άλλου είδους (από εξίσωση δύναμης) που αντικατοπτρίζει καλύτερα την αλληλουχία στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος με αφετηρία την επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε στο τέταρτο κεφάλαιο του τεύχους.
- Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για την σχέση στάθμης – αποθέματος να επεκταθεί και στις υπόλοιπες σχέσεις (στάθμης – επιφάνειας, αποθέματος – επιφάνειας) και να διερευνηθεί η όποια εξάρτηση των συντελεστών των εξισώσεων με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμειυτήρα.



- Η δημιουργία περισσότερων υποψήφιας ταμειυτήρων και η συλλογή περισσότερων δεδομένων από υφιστάμενους ταμειυτήρες ώστε να επαληθευτούν οι εξαγόμενες σχέσεις και η ενδεχόμενη βελτίωσή τους.
- Ο έλεγχος της αξιοπιστίας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους με την μέθοδο που παρουσιάζεται στο παρόν τεύχος, μέσω του Google Earth, συγκρίνοντάς τα με πραγματικές μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί και η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης των πρώτων σε στάδιο προκαταρκτικής μελέτης.
- Η διερεύνηση άντλησης πληροφοριών από το γεωμετρικό σχήμα της κάτοψης των ταμειυτήρων και η εύκολη ένταξή τους σε κάποια κατηγορία, γεωμετρικού χαρακτήρα, ώστε να εξαχθούν γρήγορα συμπεράσματα και να εντοπιστούν οι γενικευμένες σχέσεις που αντιστοιχούν σε αυτούς.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

## Ελληνική Βιβλιογραφία

- Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, 2013. «*Τα φράγματα της Ελλάδας*». Διαθέσιμο στο: [http://www.eeft.gr/Fragmata\\_Elladas\\_201311.pdf](http://www.eeft.gr/Fragmata_Elladas_201311.pdf)
- Ευστρατιάδης, Α., Παπανικολάου, Π., και Μίχας, Σ., «*Εισαγωγικά στοιχεία φραγμάτων και συνοδών έργων*». Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα. Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ακαδημαϊκό έτος 2020-21.
- Μιμίκου, Μ., και Μπαλάτς, Ε., «*Τεχνική Υδρολογία*». Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2018.
- Μπαλάρας, Κ., Αργυρίου, Α., και Καραγιάννης, Φ., «*Συμβατικές & Ήπιες Μορφές Ενέργειας*». Εκδόσεις ΤεκΔΟΤΙΚΗ, Αθήνα, 2006.
- Μυρωνίδης, Δ., «*Δημιουργία Διαγράμματος Στάθμης – Χωρητικότητας και Οριοθέτηση της Κατώτατης Στάθμης Υδροληψίας Ταμειυτήρα*». Εργαστήριο Διευθετήσεως Ορεινών Υδάτων, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2015.
- Τσούλος, Λ., Σκοπελίτη, Α., Στάμου, Λ. 2015. «*Χαρτογραφική σύνθεση και απόδοση σε ψηφιακό περιβάλλον*». Αθήνα: Κάλλιπος, Ανεικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. κεφ 15. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2504>
- Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, 2009. «*Τα φράγματα της Κύπρου*». Διαθέσιμο στο: [https://web.archive.org/web/20190310232250/http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/wdd.nsf/All/5D3901C9FEF1181CC22581FE0022CE7F/\\$file/7\\_Page1\\_113.pdf?OpenElement](https://web.archive.org/web/20190310232250/http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/wdd.nsf/All/5D3901C9FEF1181CC22581FE0022CE7F/$file/7_Page1_113.pdf?OpenElement)

## Ξένη Βιβλιογραφία

- Anderson, D. V. (1961). A note on the morphology of the basins of the Great Lakes. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, **18**(2), 273–277. <https://doi.org/10.1139/f61-019>
- Bouwer, H. (1978) *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill Book, New York, 480.
- Cao, G. (2014). Research on optimal operation of three gorges reservoir, China (doctoral dissertation). Tianjing, China, Tianjin University. (In mandarin).

- Efstratiadis, A., Tsoukalas, I., Koutsoyiannis, D., (2021): Generalized storage-reliability-yield framework for hydroelectric reservoirs, *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1886299>
- Fekete, B. M., Wisser, D., Kroeze, C., Mayorga, E., Bouwman, L., Wollheim, W. M., & Vörösmarty, C. (2010). Millennium ecosystem assessment scenario drivers (1970–2050): Climate and hydrological alterations. *Global Biogeochemical Cycles*, **24**, GB0A12. <https://doi.org/10.1029/2009GB003593>
- Gao, H., Birkett, C., & Lettenmaier, D. P. (2012). Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resources Research*, **48**, W09504. <https://doi.org/10.1029/2012WR012063>
- Johansson, H., Brolin, A. A., & Håkanson, L. (2007). New approaches to the modelling of lake basin morphometry. *Environmental Modeling and Assessment*, **12**(3), 213–228. <https://doi.org/10.1007/s10666-006-9069-z>
- Lehman, J. T. (1975). Reconstructing the rate of accumulation of lake sediment: The effect of sediment focusing. *Quaternary Research*, **5**(04), 541–550. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(75\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(75)90015-0)
- Lehner, B., & Döll, P. (2004). Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, **296**(1–4), 1–22.
- Lehner, B., Liermann, C. R., Revenga, C., Vörösmarty, C., Fekete, B., Crouzet, P., & Nilsson, C. (2011). High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **9**(9), 494–502. <https://doi.org/10.1890/100125>
- Liebe, J., Van de Giessen, N., Andreini, M., (2005). Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment: A case study in the Upper East Region of Ghana. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **30** (6-7), 448-454. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.06.011>
- Messenger, M. L., Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I., & Schmitt, O. (2016). Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*, **7**, 13603. <https://doi.org/10.1038/ncomms13603>

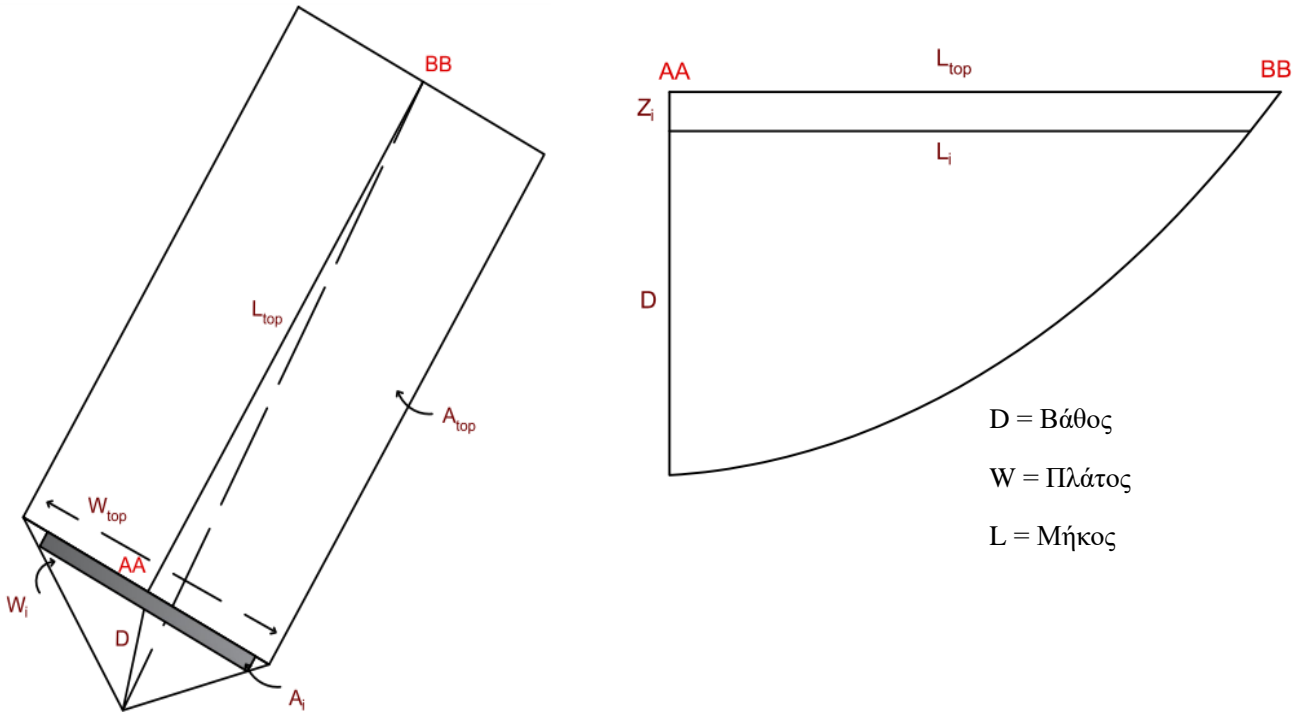
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282 – 290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Shang, X., & Bin, L. (2014). Calculation and fitting of the water level-capacity. *Jilin Water resources*, 10, 31–33. (In mandarin)
- Vörösmarty, C. J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., & Syvitski, J. P. (2003). Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 169–190. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00023-7)
- Yashon, O., (2016). Evaluation of Multiresolution Digital Elevation Model (DEM) from Real-Time Kinematic GPS and Ancillary Data for Reservoir Storage Capacity Estimation. *Department of Civil and Structural Engineering, Moi University, Kenya*, 3 (2), 16. <https://doi.org/10.3390/hydrology3020016>
- Yigzaw, W., Li, H.-Y., Demissie, Y., Hejazi, M. I., Leung, L. R., Voisin, N., & Payn, R. (2018). A new global storage-area-depth data set for modeling reservoirs in land surface and Earth system models. *Water Resources Research*, 54, 10,372– 10,386. <https://doi.org/10.1029/2017WR022040>

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

---

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Τελικά υποψήφια σχήματα ταμιευτήρων

### Rectangular Wedge



$$L_i = L_{top} - L_{top} \times \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2 = L_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right)$$

$$W_i = W_{top} \times \left(1 - \frac{Z_i}{D}\right)$$

$$A_{top} = L_{top} \times W_{top}$$

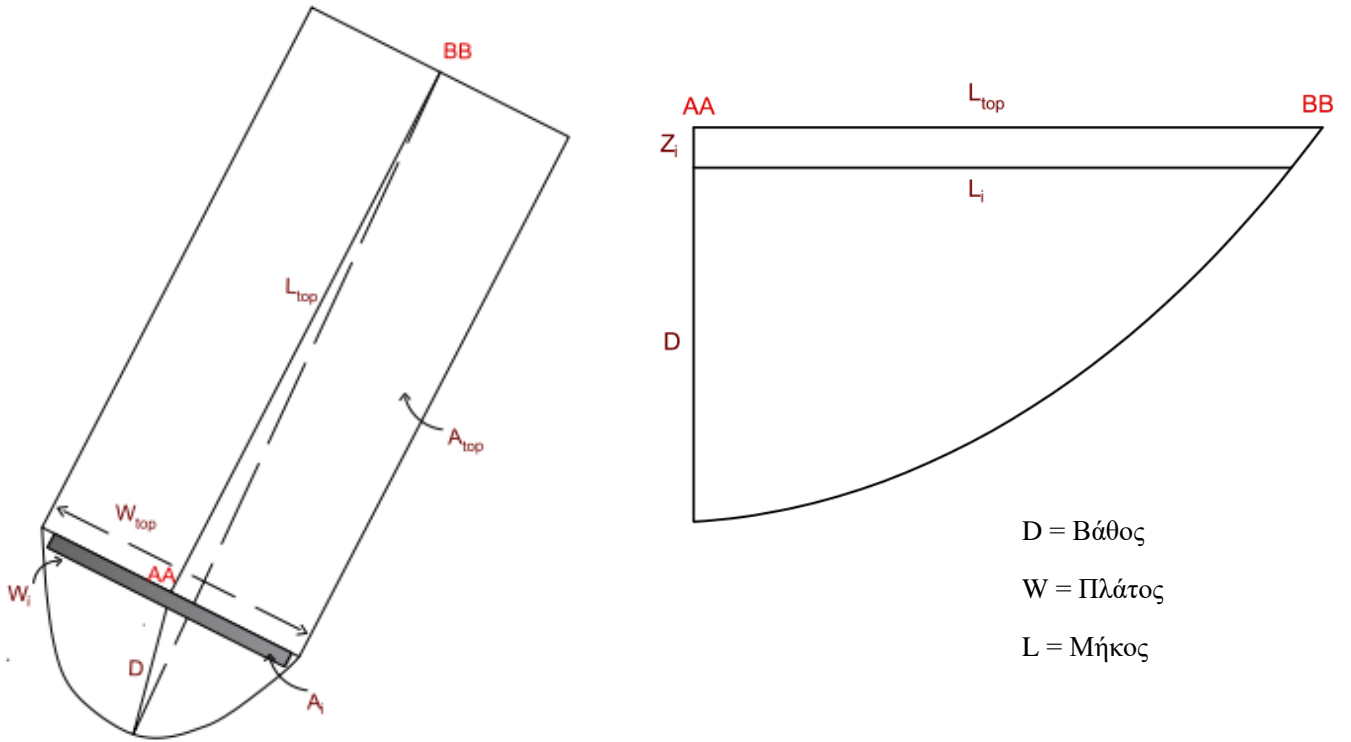
$$A_i = L_i \times W_i = L_{top} \times W_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right) \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)\right)$$

$$V_i = \frac{1}{2} \times (A_i + A_{i-1}) \times (Z_i - Z_{i-1}) = \frac{1}{2} \times (A_i + A_{i-1}) \times \Delta Z$$

$$\text{Surface Area, } A_T = C_{Ar} \times A_{top}$$

$$\text{Total Volume, } V_T = C_{vol} \times \Sigma V_i$$

## Rectangular Bowl



$$L_i = L_{top} - L_{top} \times \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2 = L_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right)$$

$$W_i = W_{top} \times \left(1 - \frac{Z_i}{D}\right)^{0.5}$$

$$A_{top} = L_{top} \times W_{top}$$

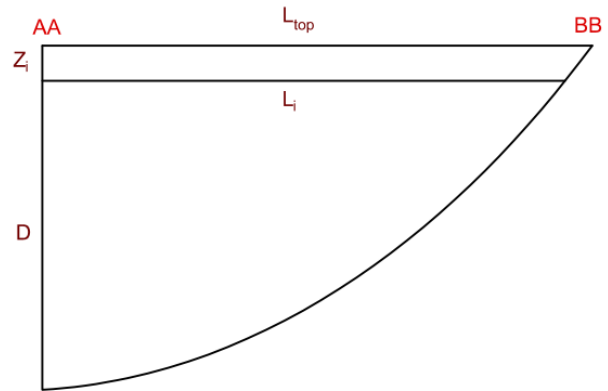
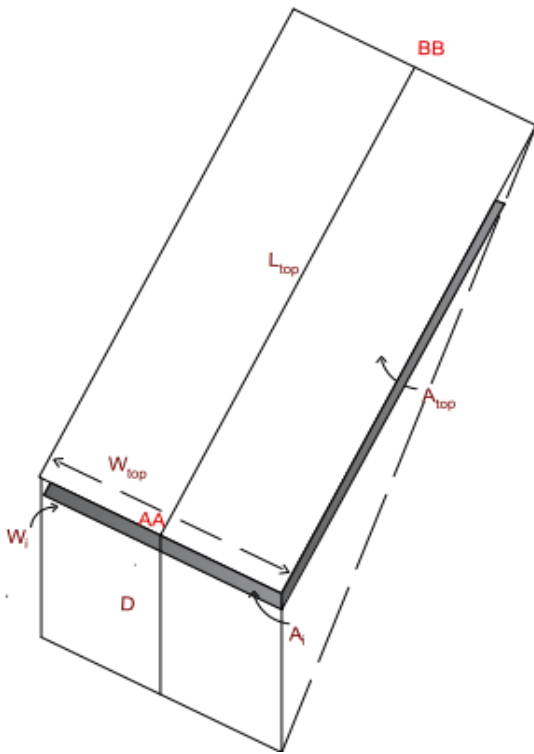
$$A_i = L_i \times W_i = L_{top} \times W_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right) \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)\right)^{0.5}$$

$$V_i = \frac{1}{2} \times (A_i + A_{i-1}) \times (Z_i - Z_{i-1}) = \frac{1}{2} \times (A_i + A_{i-1}) \times \Delta Z$$

$$\text{Surface Area, } A_T = C_{Ar} \times A_{top}$$

$$\text{Total Volume, } V_T = C_{vol} \times \Sigma V_i$$

## Rectangular Prism



D = Βάθος

W = Πλάτος

L = Μήκος

$$L_i = L_{top} - L_{top} \times \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2 = L_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right)$$

$$W_i = W_{top}$$

$$A_{top} = L_{top} \times W_{top}$$

$$A_i = L_i \times W_i = L_{top} \times W_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right)$$

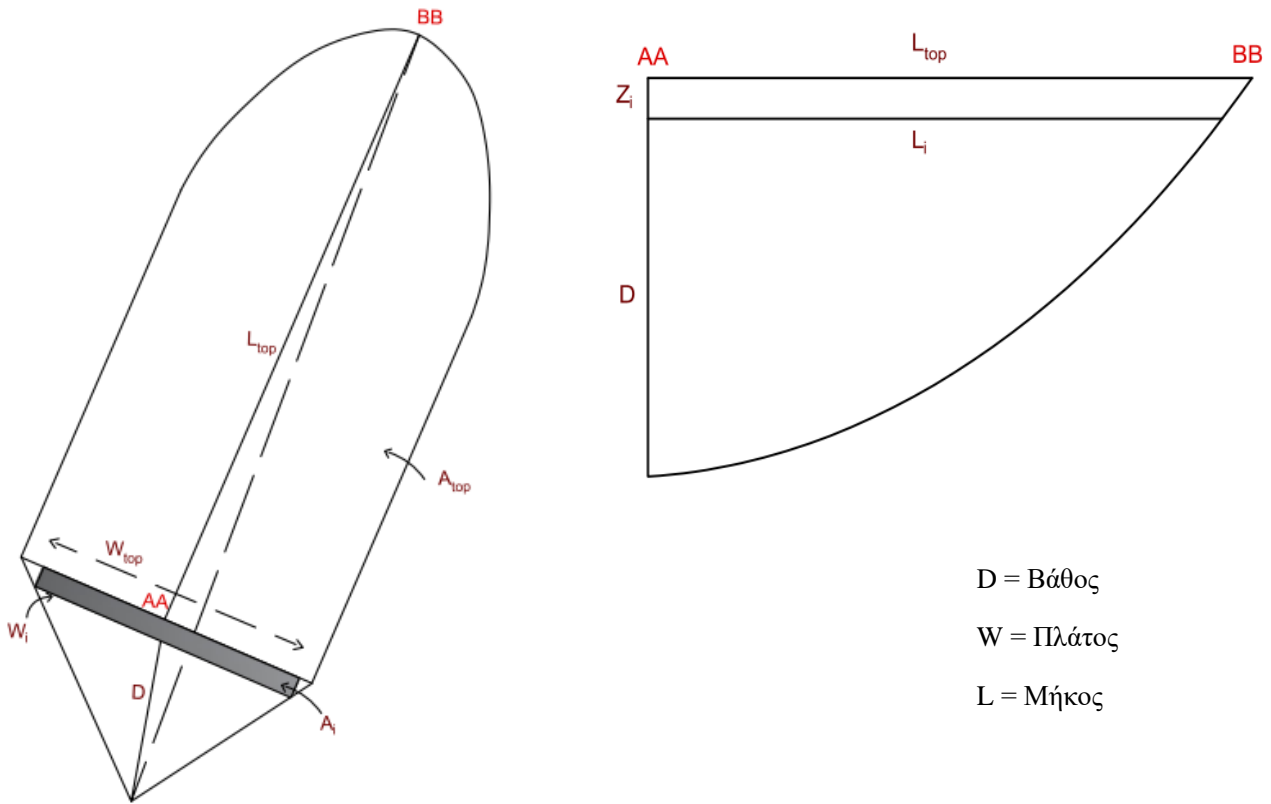
$$V_i = \frac{1}{2} \times (A_i + A_{i-1}) \times (Z_i - Z_{i-1}) = \frac{1}{2} \times (A_i + A_{i-1}) \times \Delta Z$$

$$\text{Surface Area, } A_T = C_{Ar} \times A_{top}$$

$$\text{Total Volume, } V_T = C_{vol} \times \Sigma V_i$$



## Parabolic Wedge



D = Βάθος  
W = Πλάτος  
L = Μήκος

$$L_i = L_{top} - L_{top} \times \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2 = L_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right)$$

$$W_i = W_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)\right)$$

$$A_{top} = \frac{2}{3} \times L_{top} \times W_{top}$$

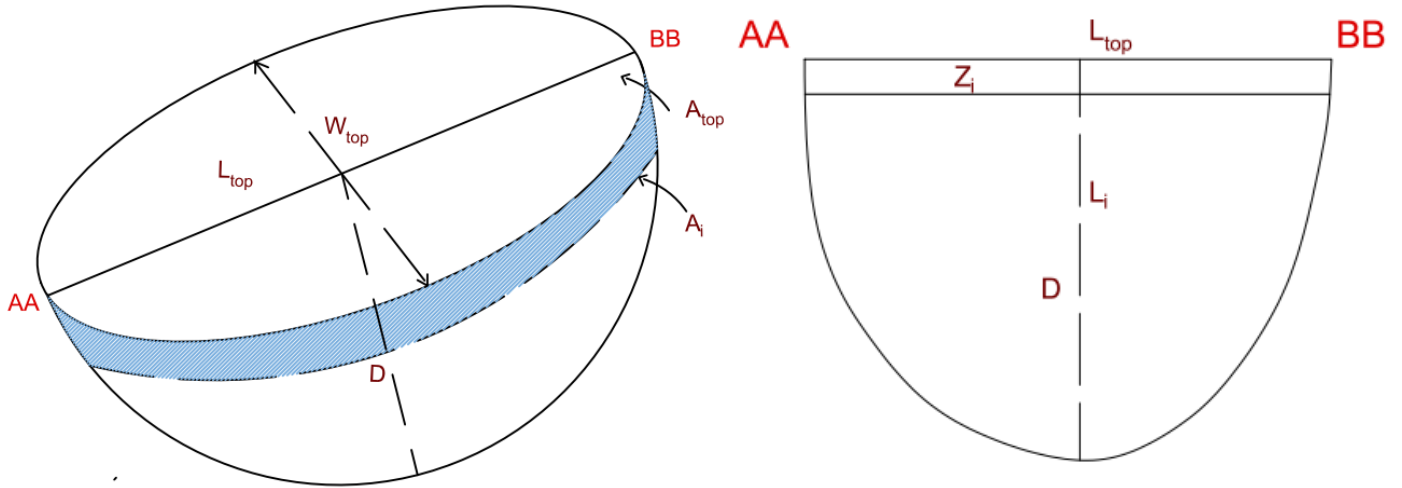
$$A_i = \frac{2}{3} \times L_i \times W_i = \frac{2}{3} \times L_{top} \times W_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right) \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)\right)$$

$$V_i = \frac{1}{2} \times (A_i + A_{i-1}) \times (Z_i - Z_{i-1}) = \frac{1}{2} \times (A_i + A_{i-1}) \times \Delta Z$$

$$\text{Surface Area, } A_T = C_{Ar} \times A_{top}$$

$$\text{Total Volume, } V_T = C_{vol} \times \Sigma V_i$$

## Elliptical Bowl



D = Βάθος

W = Πλάτος

L = Μήκος

$$L_i = L_{top} - L_{top} \times \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2 = L_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right)$$

$$W_i = W_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)\right)^{0,5}$$

$$A_{top} = \frac{\pi}{4} \times L_{top} \times W_{top}$$

$$A_i = \frac{\pi}{4} \times L_i \times W_i = \frac{\pi}{4} \times L_{top} \times W_{top} \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)^2\right) \times \left(1 - \left(\frac{Z_i}{D}\right)\right)^{0,5}$$

$$V_i = \frac{1}{2} \times (A_i + A_{i-1}) \times (Z_i - Z_{i-1}) = \frac{1}{2} \times (A_i + A_{i-1}) \times \Delta Z$$

$$\text{Surface Area, } A_T = C_{Ar} \times A_{top}$$

$$\text{Total Volume, } V_T = C_{vol} \times \Sigma V_i$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Στατιστικά χαρακτηριστικά συντελεστών των σχέσεων στάθμης – επιφάνειας - αποθέματος

Πίνακας 4.4: Στατιστικά χαρακτηριστικά συντελεστών κλίμακας  $a$ , αποθέματος - στάθμης

	<b>Prism</b>		<b>Bowl</b>		<b>Wedge</b>	
	b = 1,83		b = 2,31		b = 2,79	
	Local a	Global a*	Local a	Global a*	Local a	Global a*
Ελάχιστη Τιμή	0,001	0,0001	0,126	0,129	0,271	0,276
Μέγιστη Τιμή	652,81	634,63	117,91	113,43	36,37	34,80
Μέση Τιμή	2,11	1,80	0,43	0,41	0,12	0,11
Τυπική Απόκλιση	14,71	13,90	4,08	3,91	1,31	1,23
Ασυμμετρία	26,83	28,98	20,50	20,79	21,80	23,09
Διάμεσος	0,164	0,159	0,019	0,018	0,003	0,003

Πίνακας 4.5: Στατιστικά χαρακτηριστικά συντελεστών κλίμακας  $c$ , αποθέματος – επιφάνειας

	<b>Prism</b>		<b>Bowl</b>		<b>Wedge</b>	
	d = 2,55		d = 1,91		d = 1,64	
	Local c	Global c*	Local c	Global c*	Local c	Global c*
Ελάχιστη Τιμή	0,0000001	0,0000003	0,001	0,0009	0,0016	0,0016
Μέγιστη Τιμή	4806,70	5253,90	186,87	200,21	89,19	80,82
Μέση Τιμή	37,03	40,40	8,92	8,97	5,62	5,65
Τυπική Απόκλιση	186,13	206,79	17,13	17,62	8,21	7,90
Ασυμμετρία	14,74	14,21	4,17	4,34	3,93	3,40
Διάμεσος	1,89	1,94	2,48	2,53	2,77	2,86

**Πίνακας 4.6:** Στατιστικά χαρακτηριστικά συντελεστών κλίμακας  $c_1$ , επιφάνειας - αποθέματος

	<b>Prism</b>		<b>Bowl</b>		<b>Wedge</b>	
	$d_1 = 2,55$		$d_1 = 1,91$		$d_1 = 1,64$	
	Local $c_1$	Global $c_1^*$	Local $c_1$	Global $c_1^*$	Local $c_1$	Global $c_1^*$
Ελάχιστη Τιμή	0,0346	0,0349	0,0644	0,0636	0,0704	0,0697
Μέγιστη Τιμή	414,40	410,17	43,66	40,83	51,81	50,22
Μέση Τιμή	2,54	1,91	1,44	1,28	1,20	1,06
Τυπική Απόκλιση	9,77	8,40	3,03	2,33	3,06	2,55
Ασυμμετρία	23,59	34,35	13,02	6,87	9,70	12,11
Διάμεσος	0,806	0,791	0,639	0,632	0,542	0,529

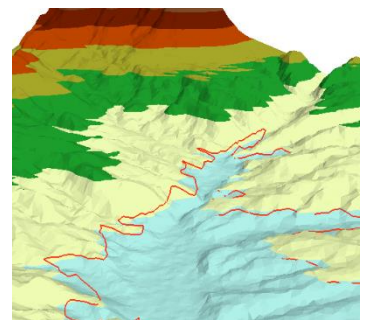
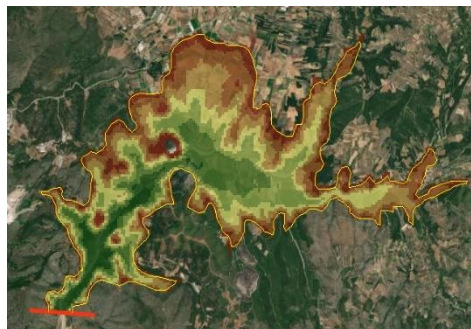
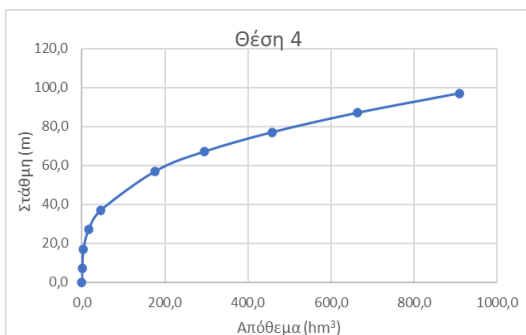
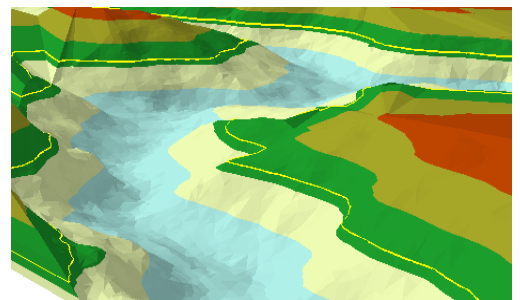
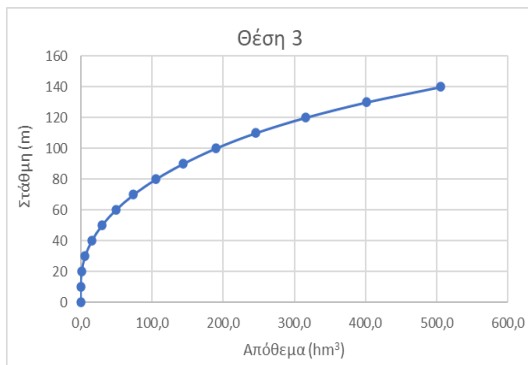
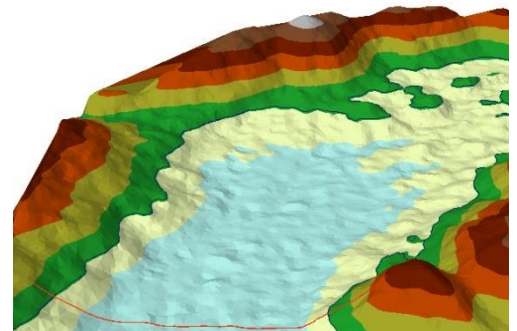
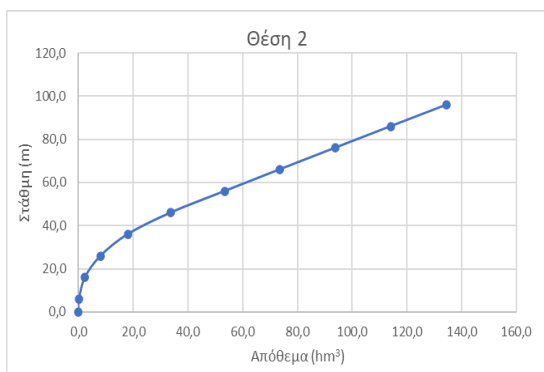
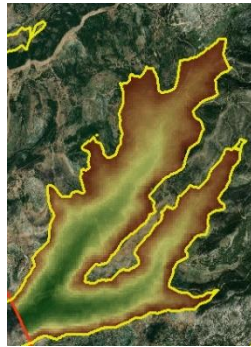
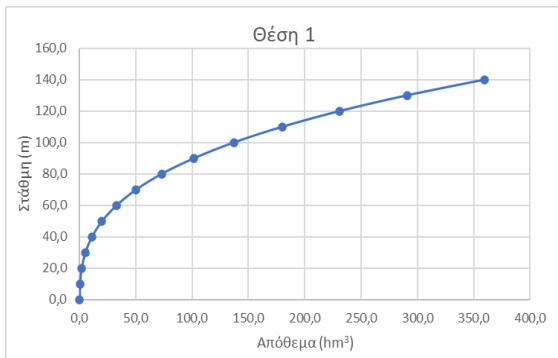
**Πίνακας 4.7:** Στατιστικά χαρακτηριστικά συντελεστών κλίμακας  $t$ , επιφάνειας - στάθμης

	<b>Prism</b>		<b>Bowl</b>		<b>Wedge</b>	
	$v = 0,70$		$v = 1,20$		$v = 1,70$	
	Local $t$	Global $t^*$	Local $t$	Global $t^*$	Local $t$	Global $t^*$
Ελάχιστη Τιμή	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001
Μέγιστη Τιμή	2911,00	2893,20	282,95	273,14	261,16	255,29
Μέση Τιμή	4,78	4,34	1,59	1,43	0,75	0,70
Τυπική Απόκλιση	55,56	55,07	10,83	10,24	8,73	8,45
Ασυμμετρία	40,72	41,07	16,01	16,88	24,80	25,39
Διάμεσος	0,405	0,403	0,081	0,079	0,015	0,015

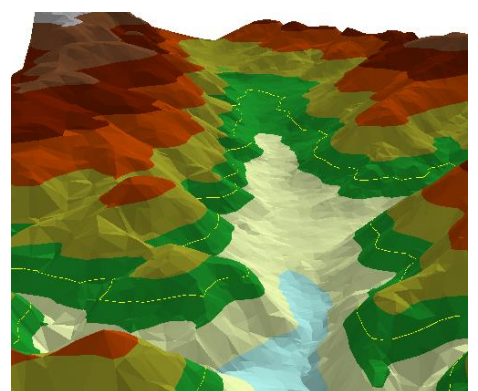
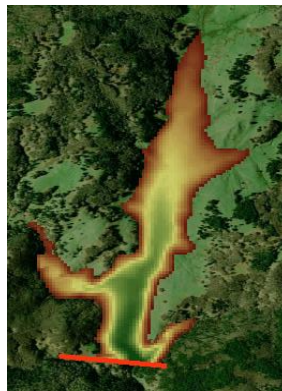
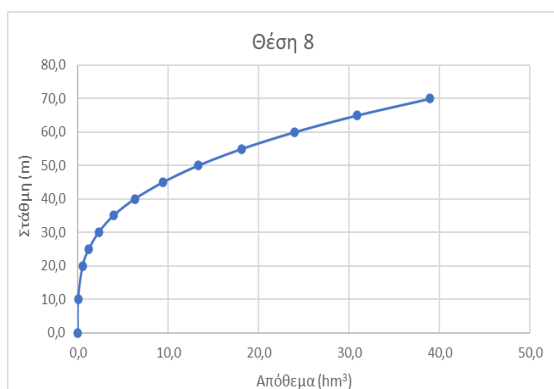
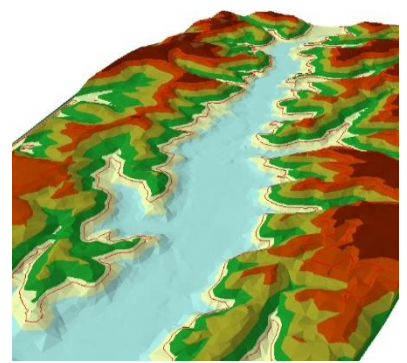
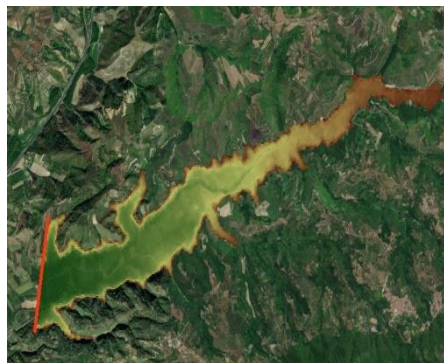
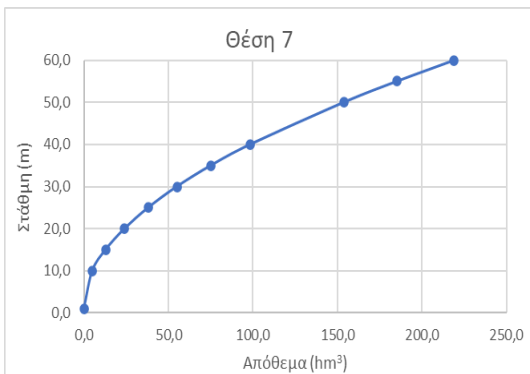
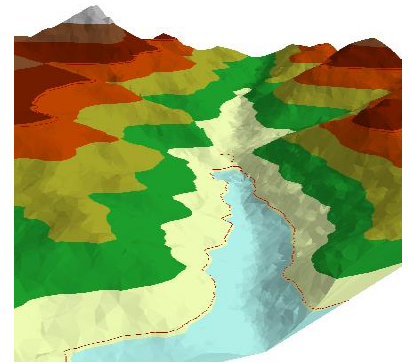
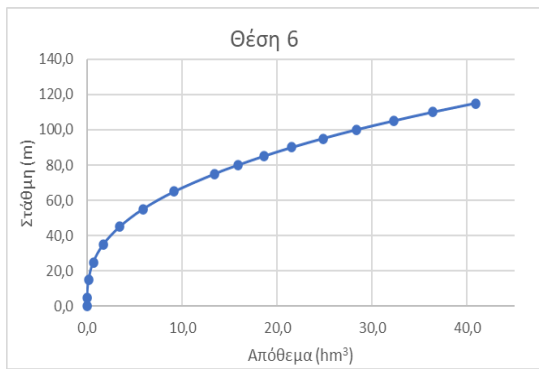
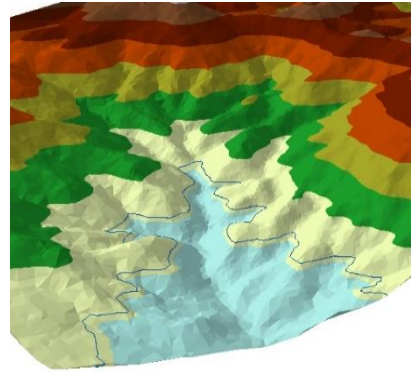
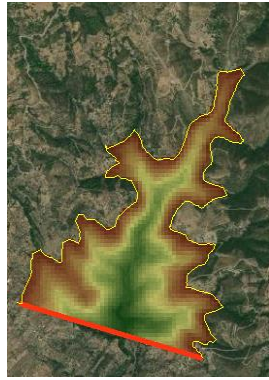
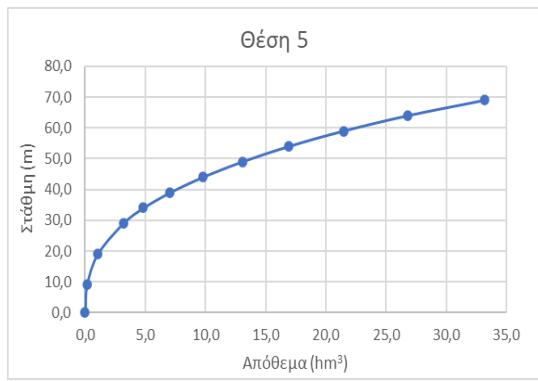
**Πίνακας 4.8:** Στατιστικά χαρακτηριστικά συντελεστών κλίμακας  $I_1$ , αποθέματος συναρτήσεως στάθμης - επιφάνειας

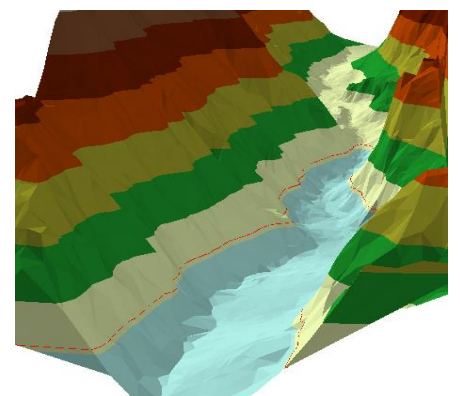
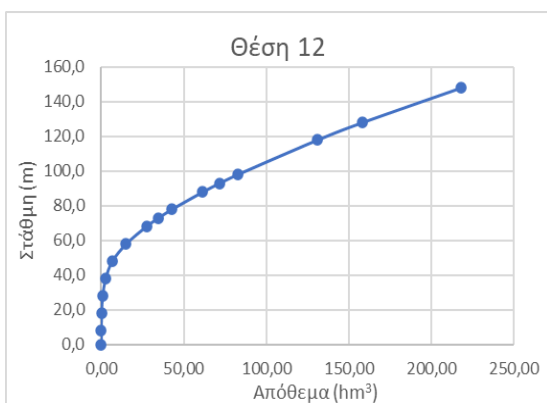
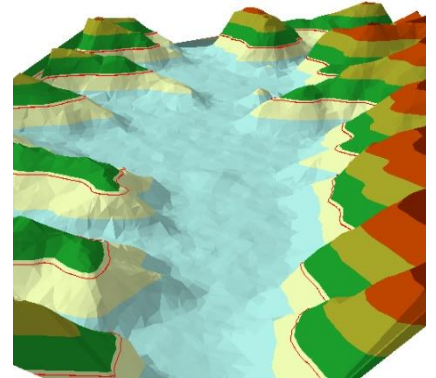
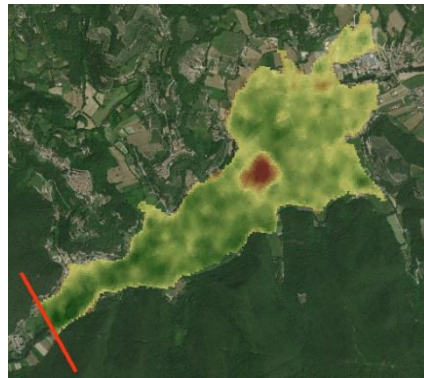
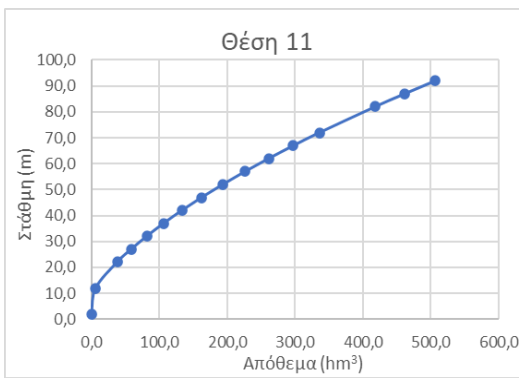
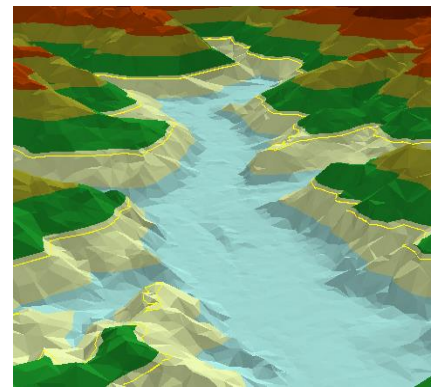
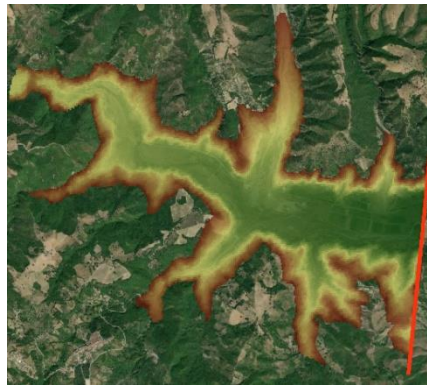
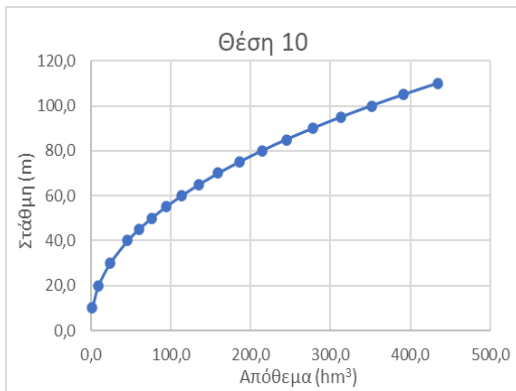
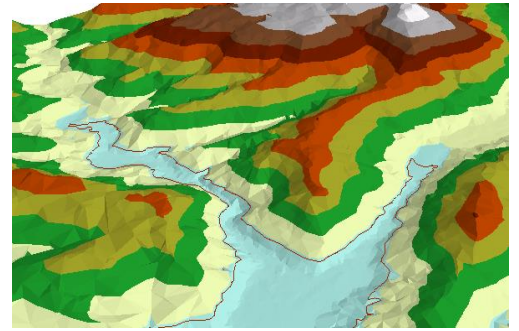
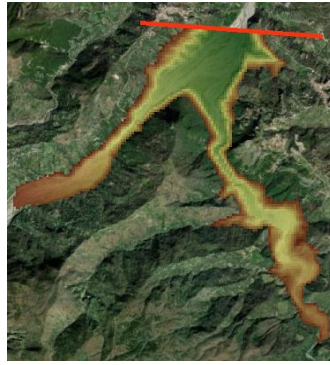
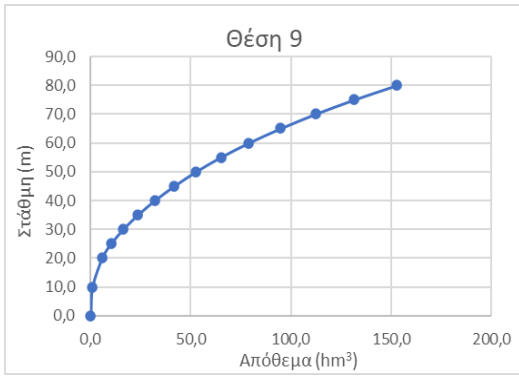
	<b>Prism</b>		<b>Bowl</b>		<b>Wedge</b>	
	$k_1 = 0,70$		$k_1 = 1,20$		$k_1 = 1,70$	
	Local $I_1$	Global $I_1^*$	Local $I_1$	Global $I_1^*$	Local $I_1$	Global $I_1^*$
Ελάχιστη Τιμή	0,012	0,012	0,019	0,02	0,012	0,013
Μέγιστη Τιμή	114,63	118,55	0,50	0,50	1,00	0,99
Μέση Τιμή	0,708	0,679	0,278	0,284	0,231	0,239
Τυπική Απόκλιση	2,903	2,788	0,086	0,088	0,082	0,078
Ασυμμετρία	24,54	28,64	-0,44	-0,43	1,52	0,095
Διάμεσος	0,422	0,428	0,291	0,296	0,240	0,251

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Υποψήφιες Θέσεις ταμιευτήρων

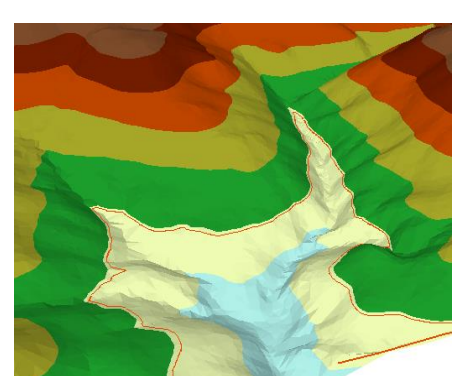
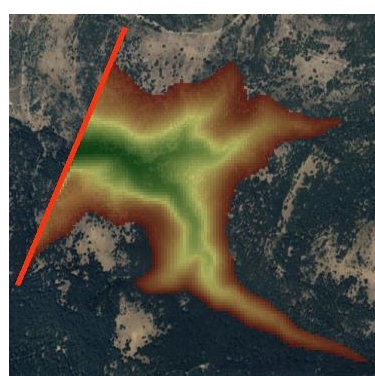
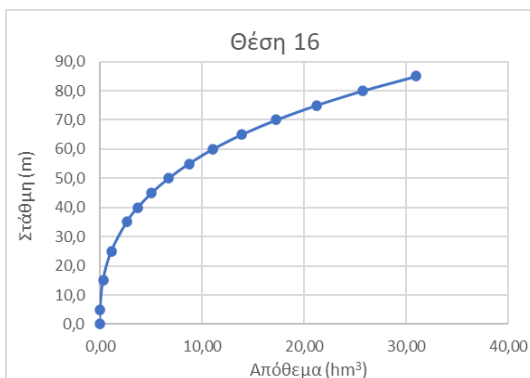
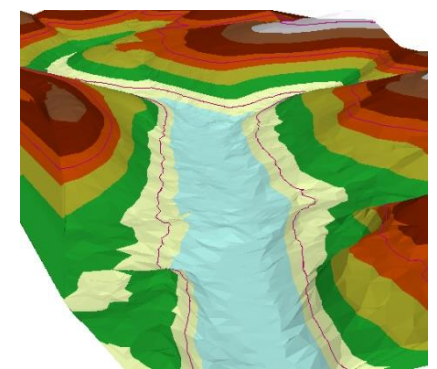
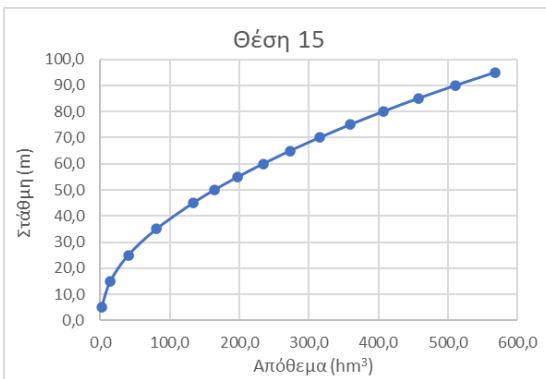
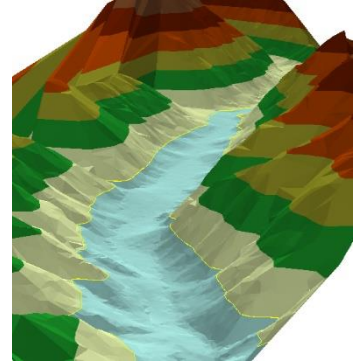
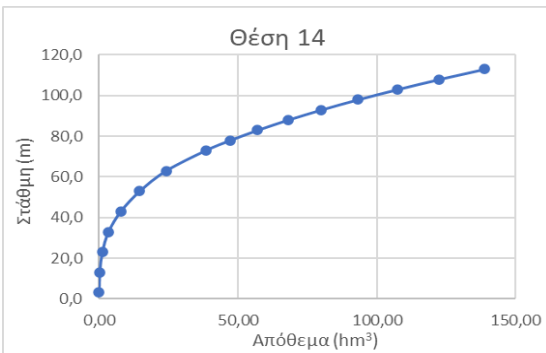
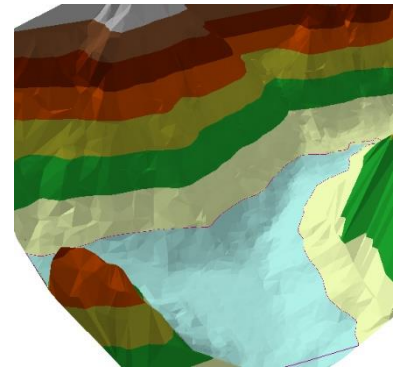
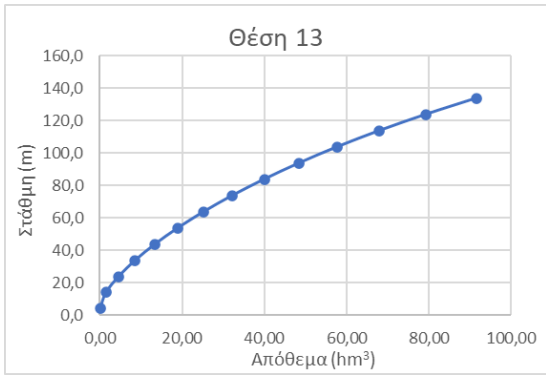


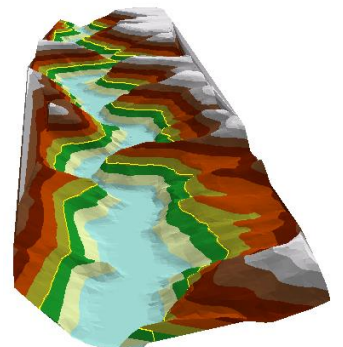
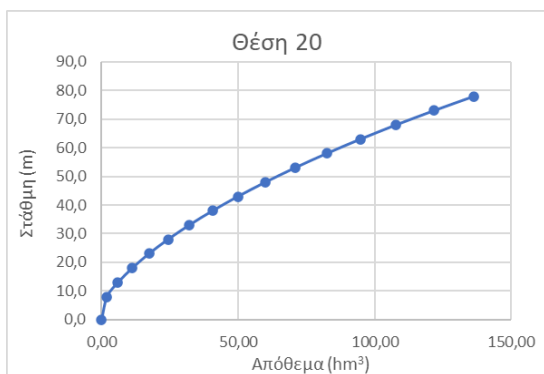
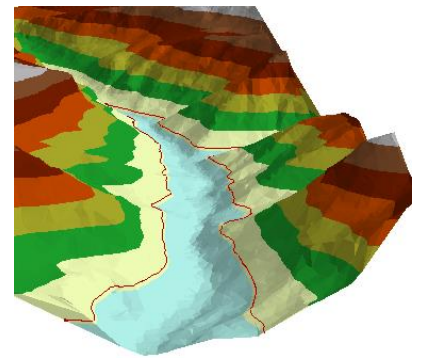
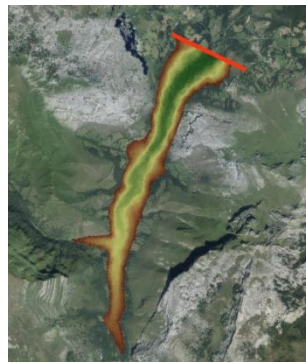
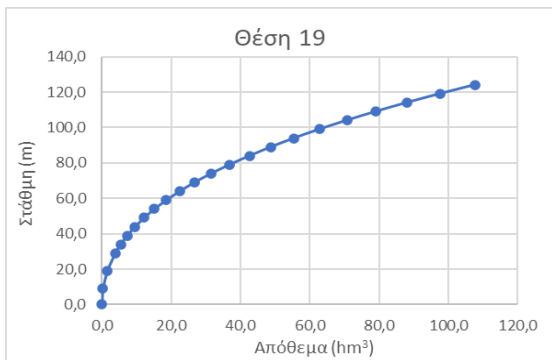
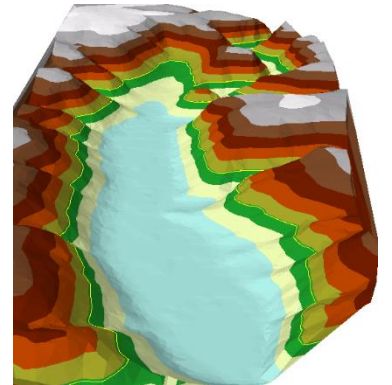
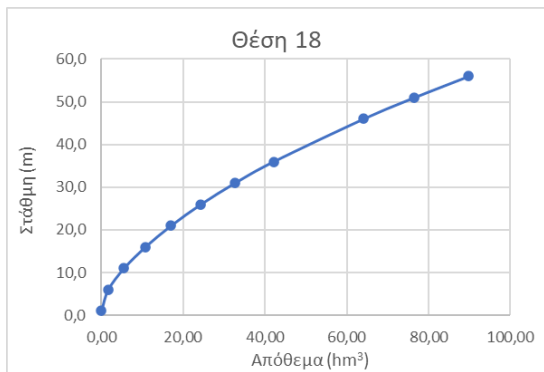
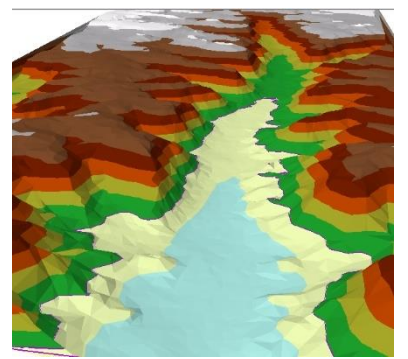
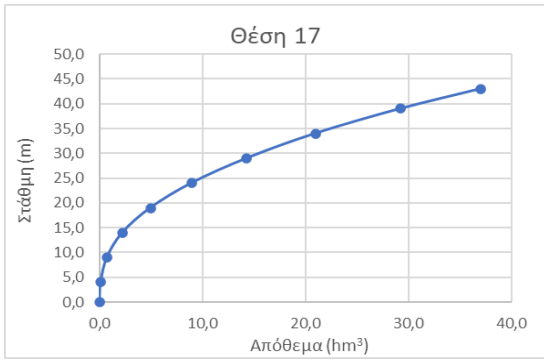




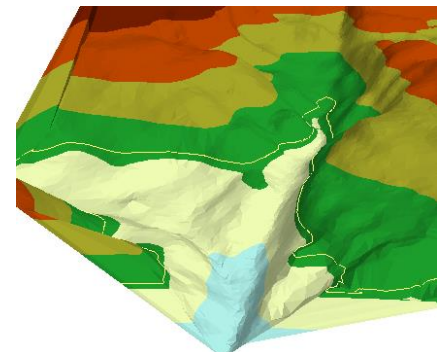
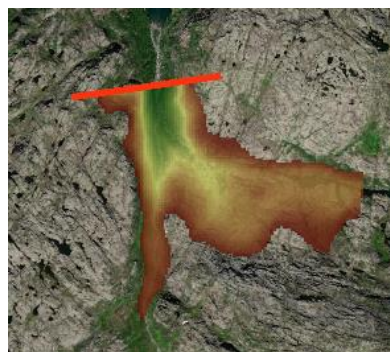
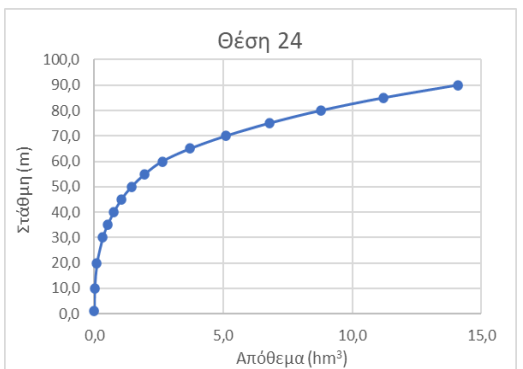
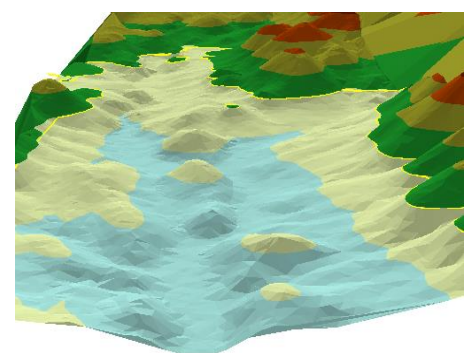
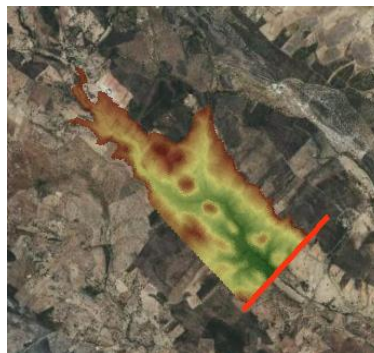
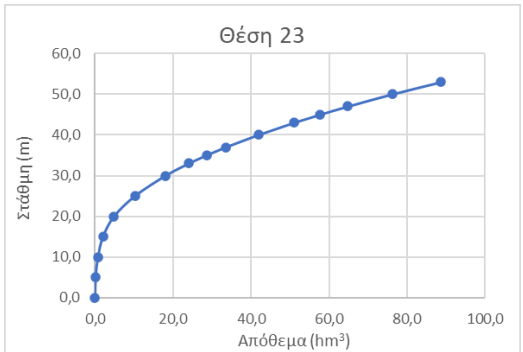
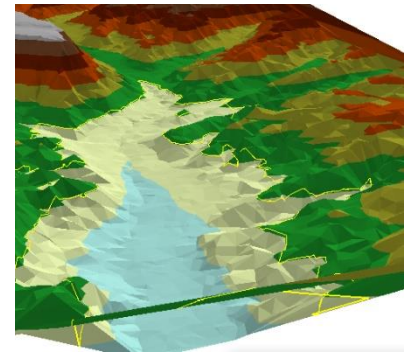
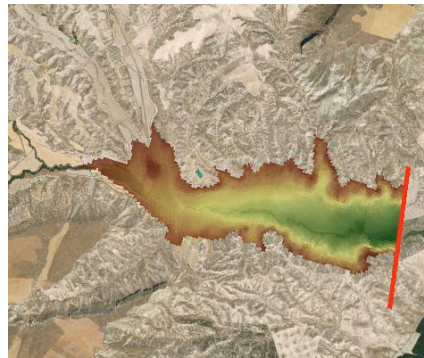
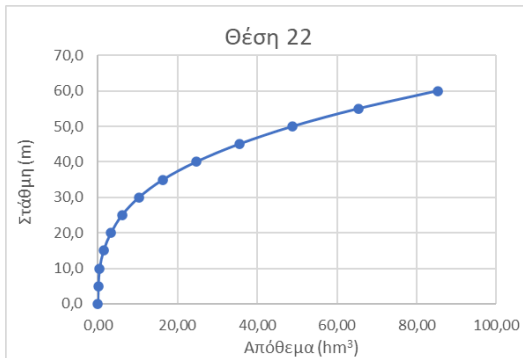
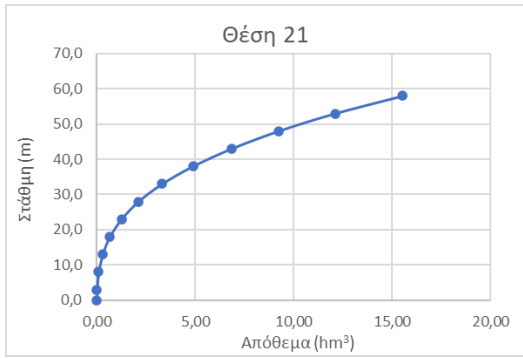


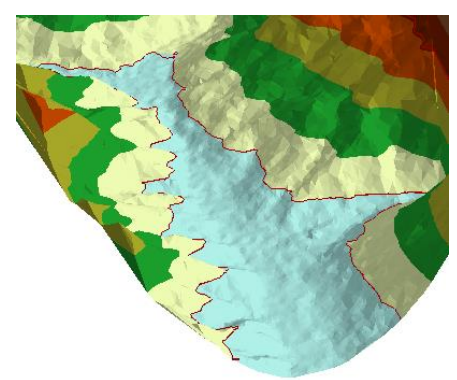
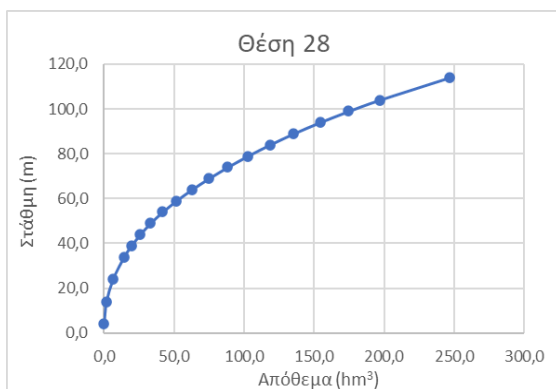
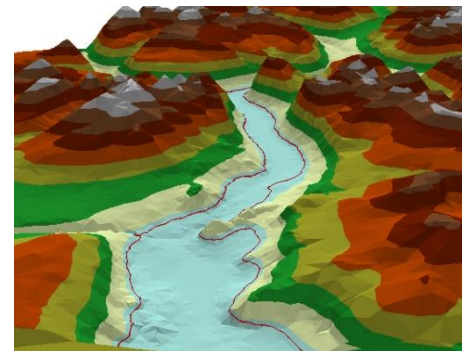
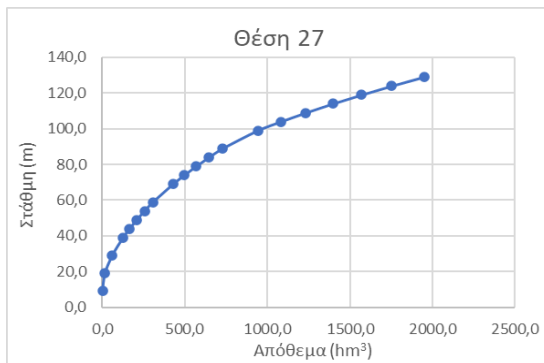
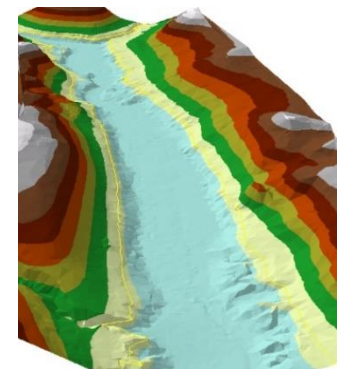
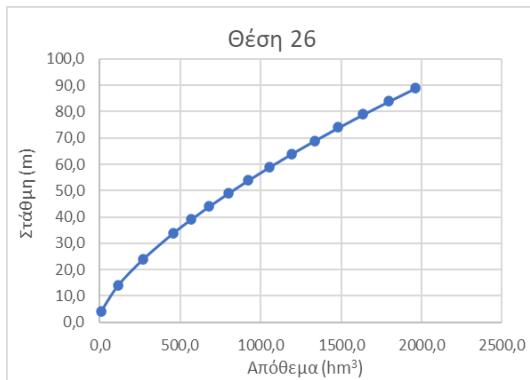
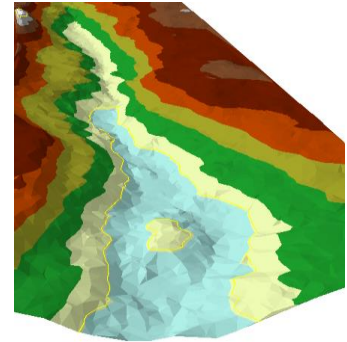
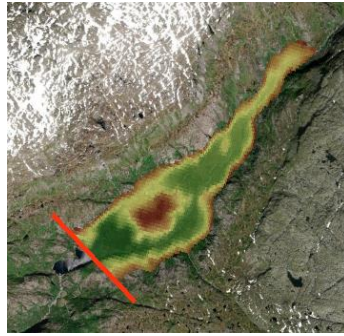




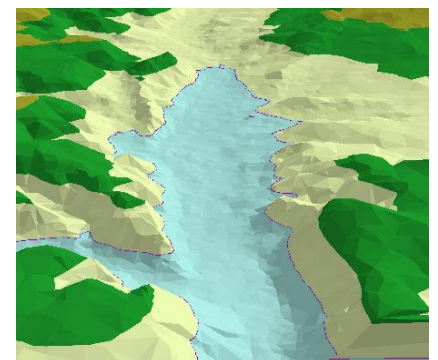
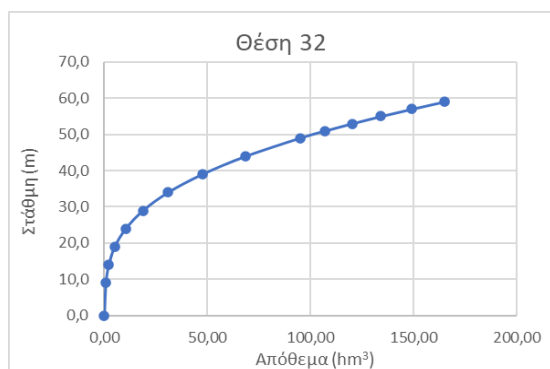
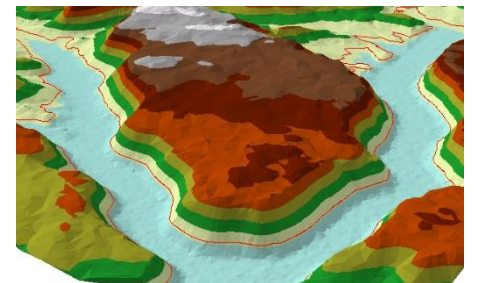
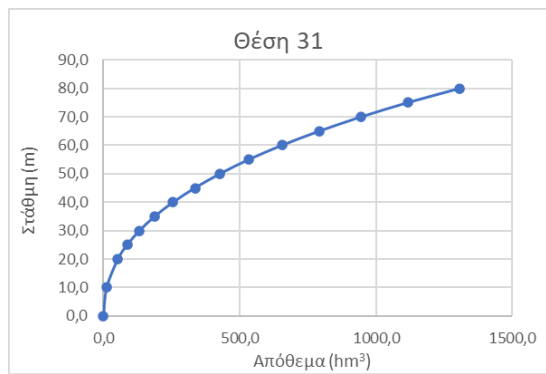
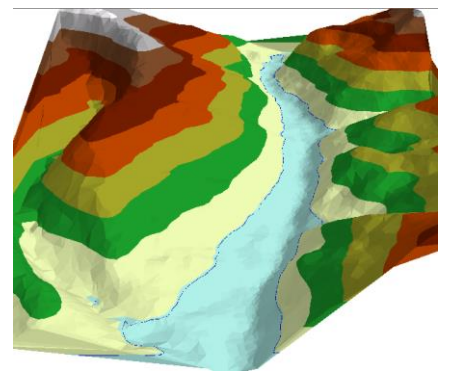
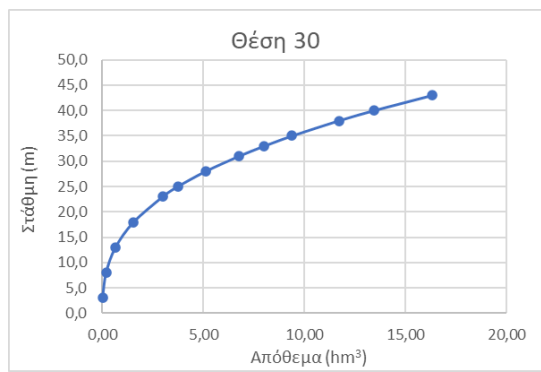
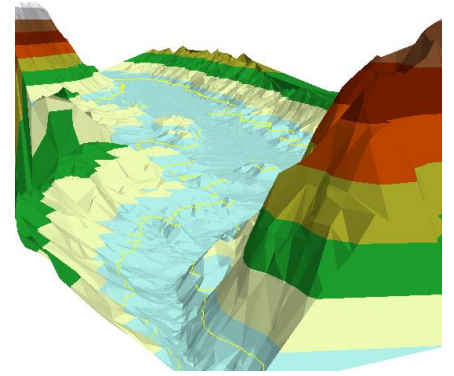
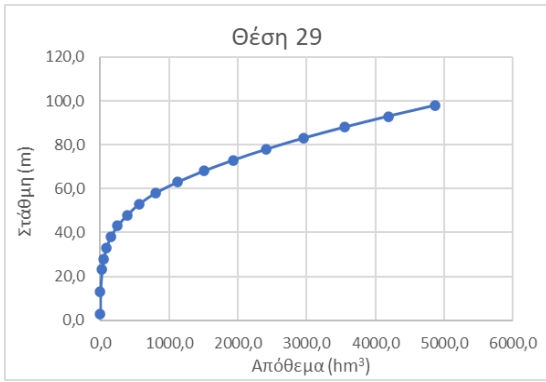


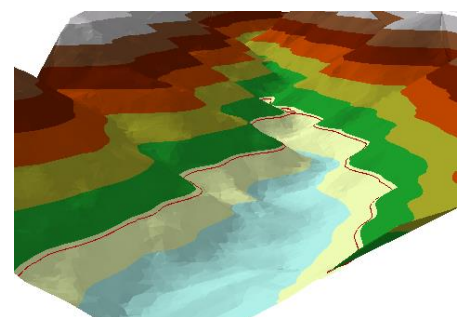
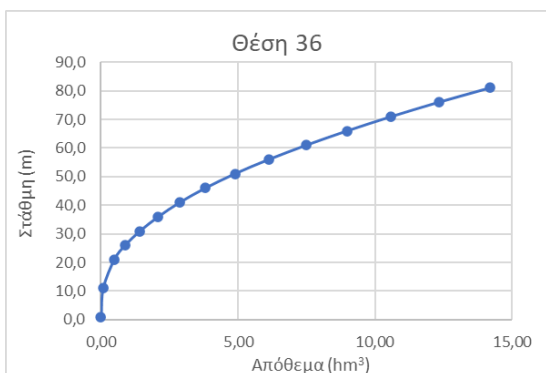
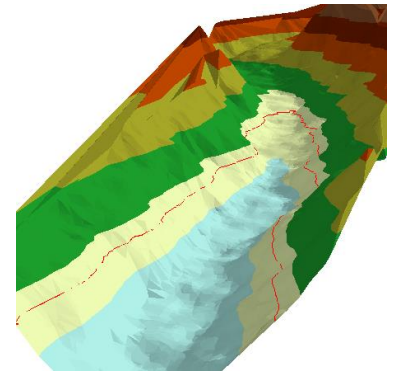
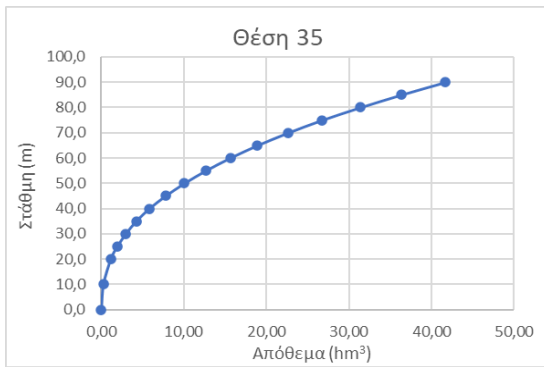
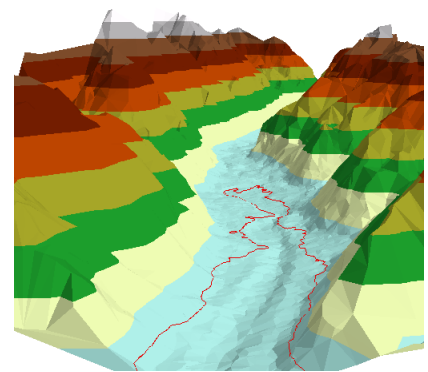
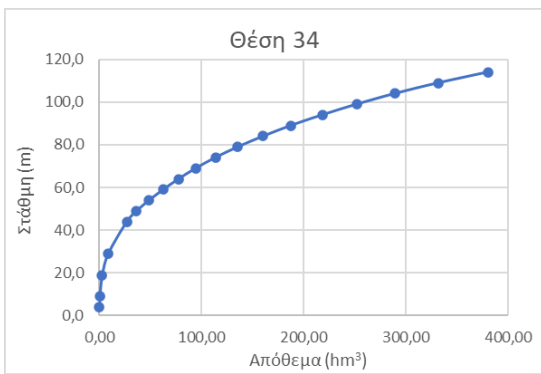
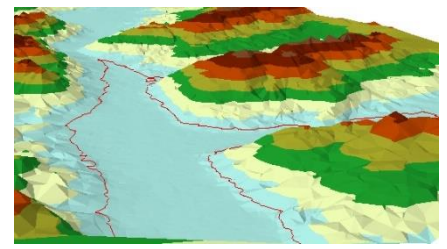
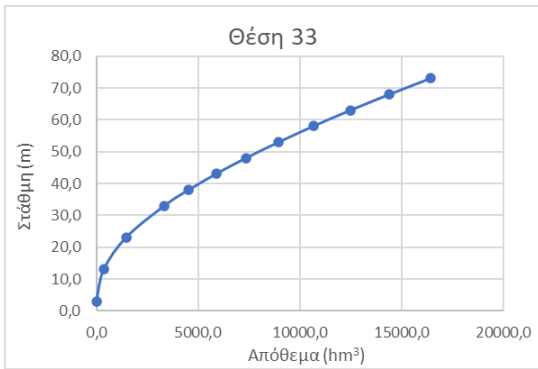




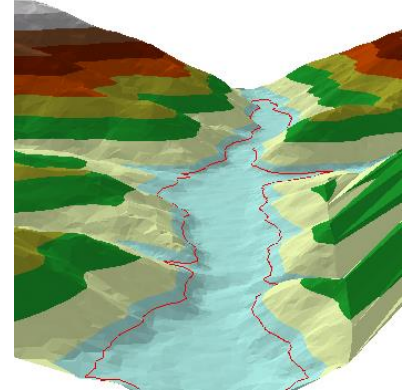
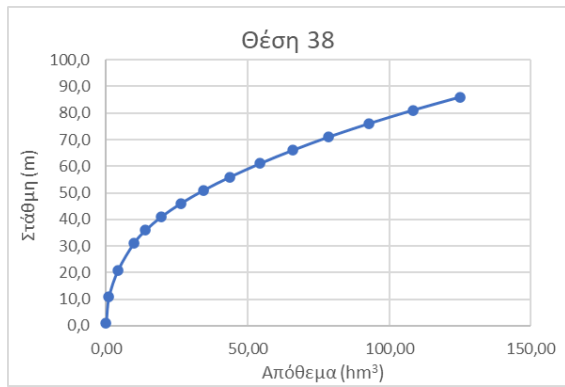
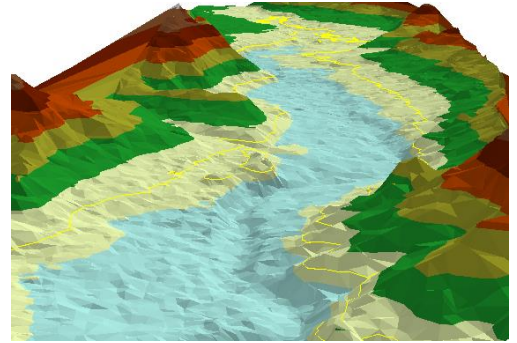
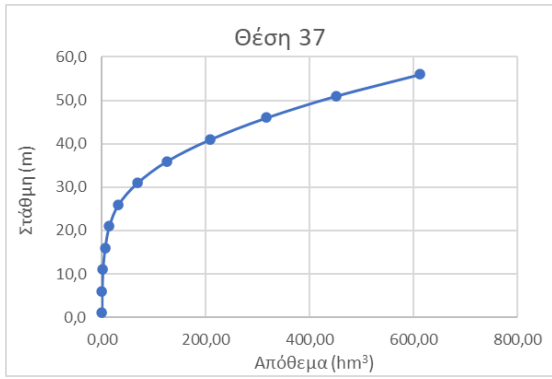








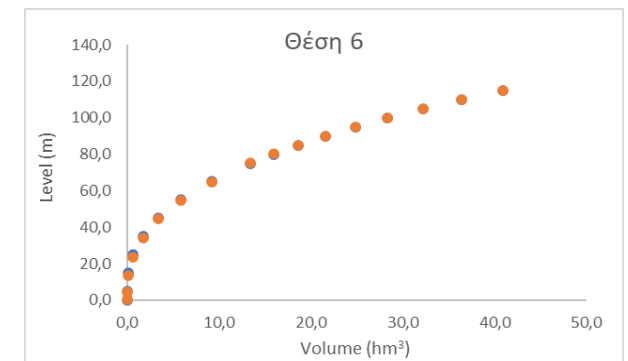
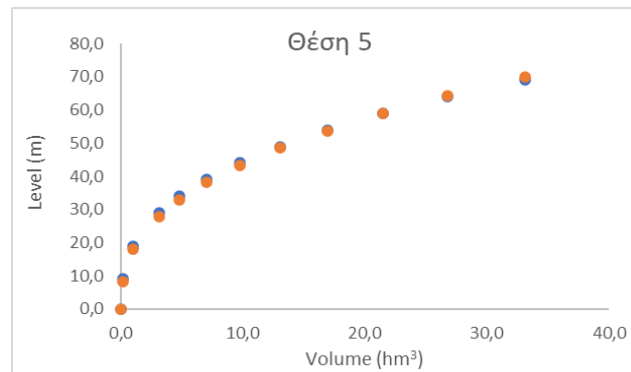
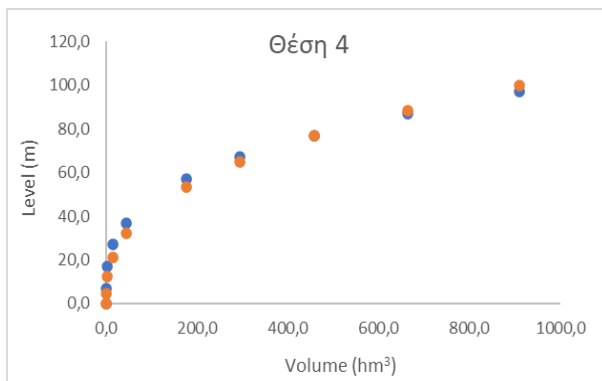
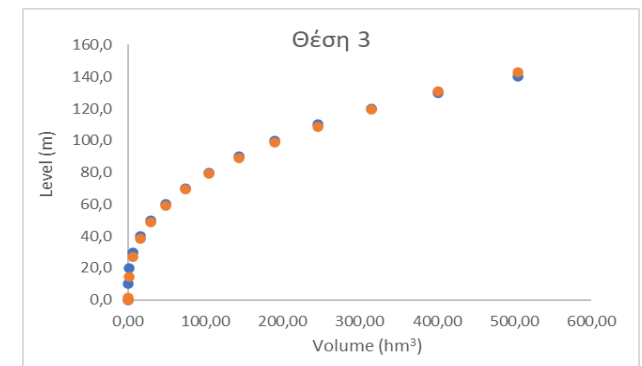
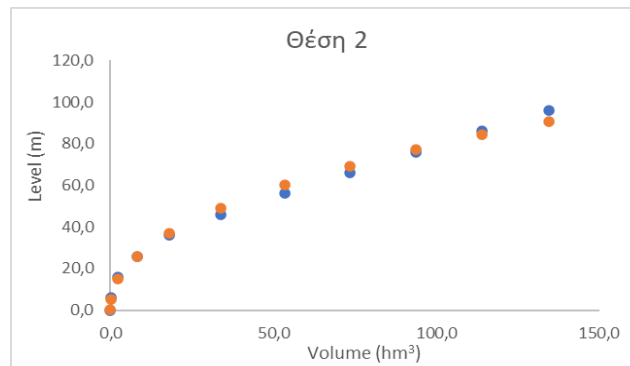
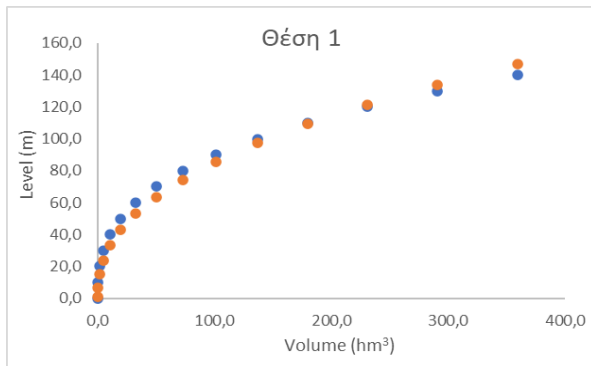




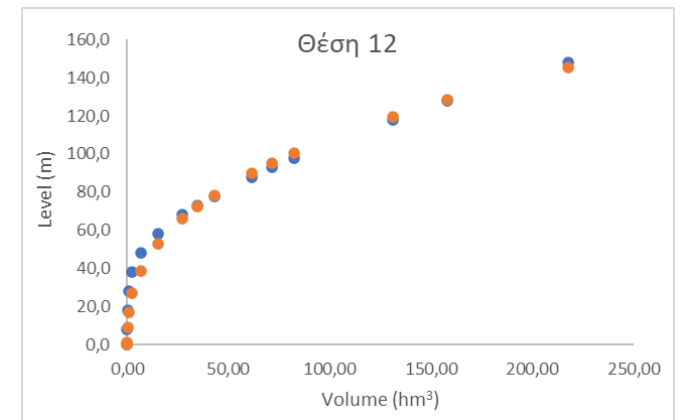
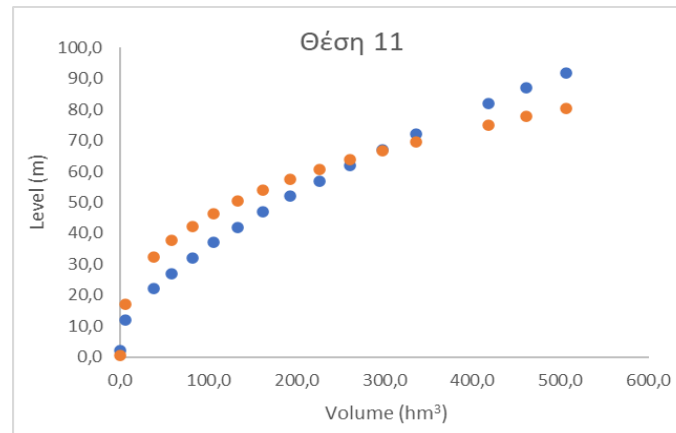
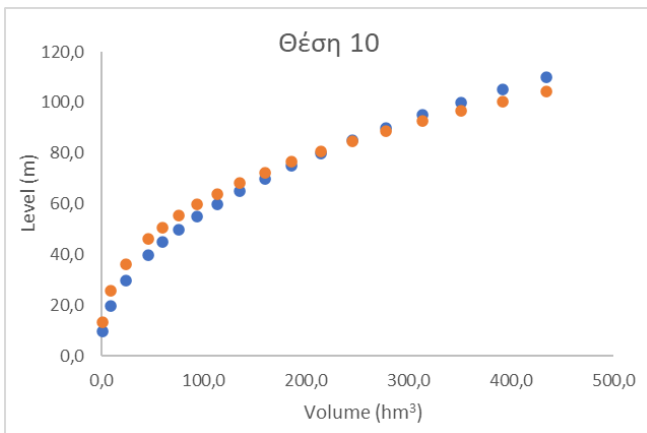
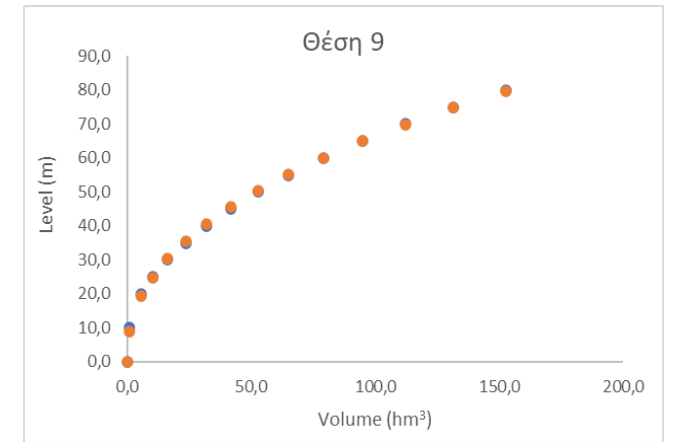
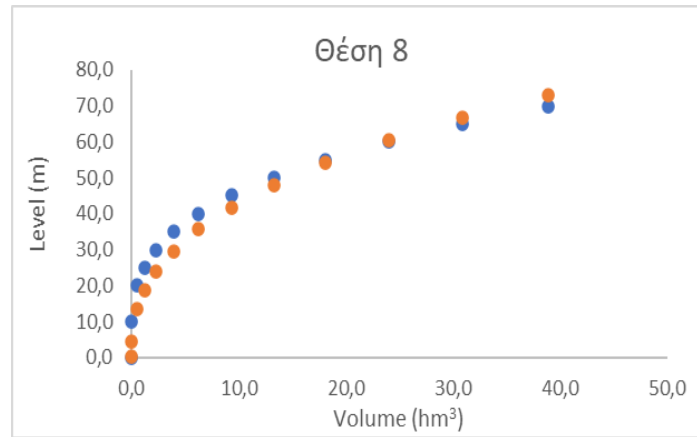
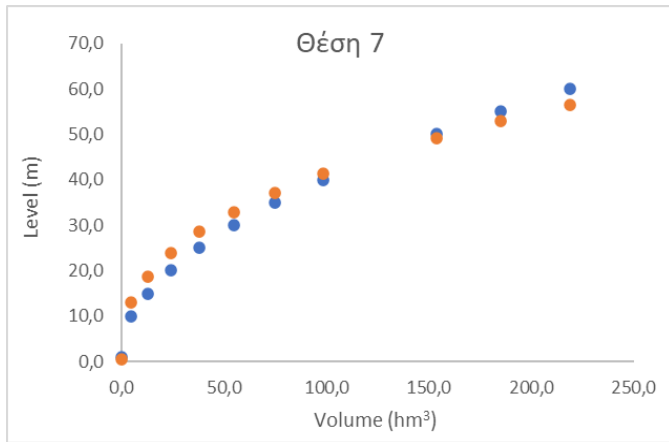
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Διαγράμματα Συσχέτισης των κύριων εξισώσεων

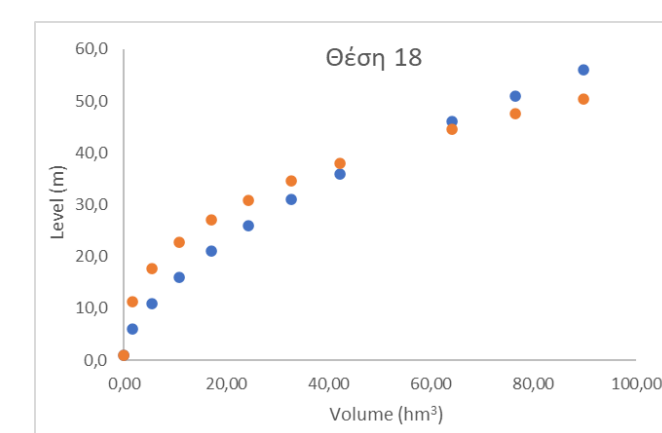
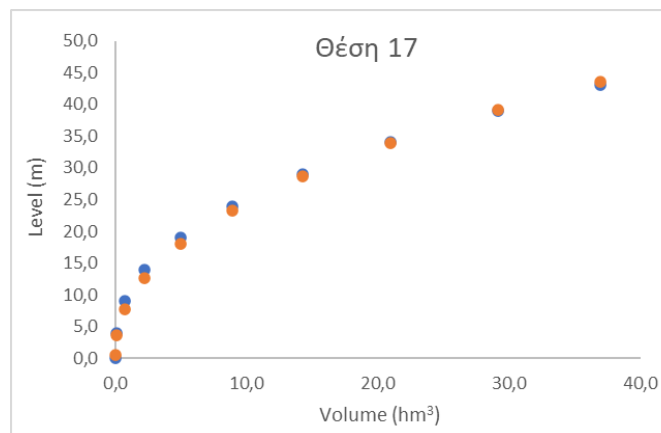
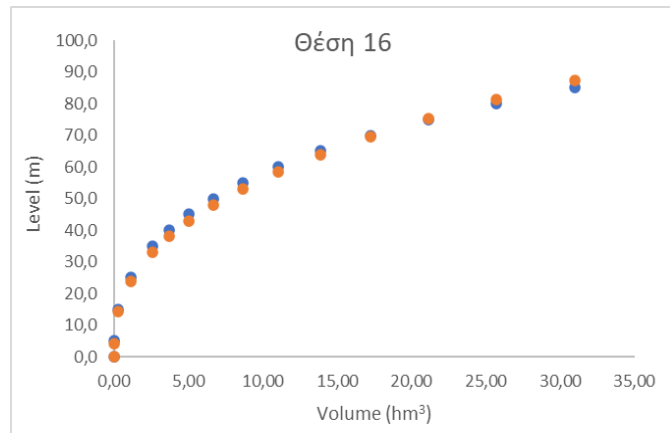
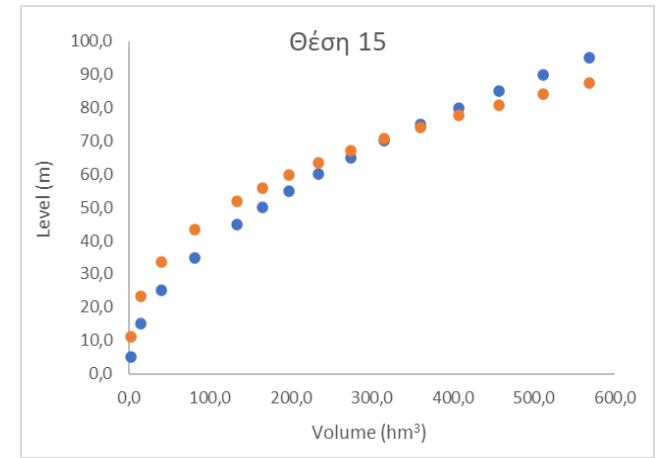
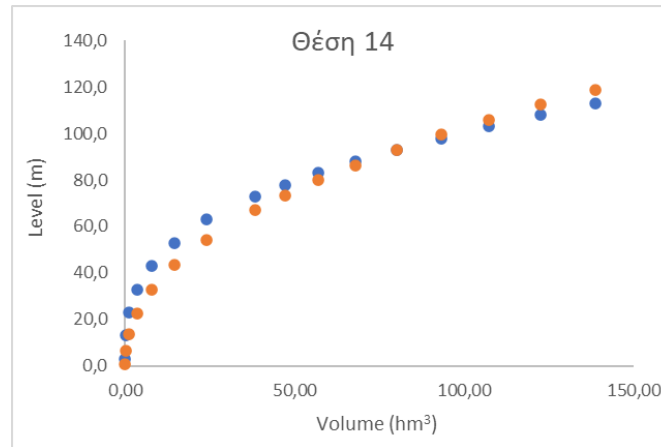
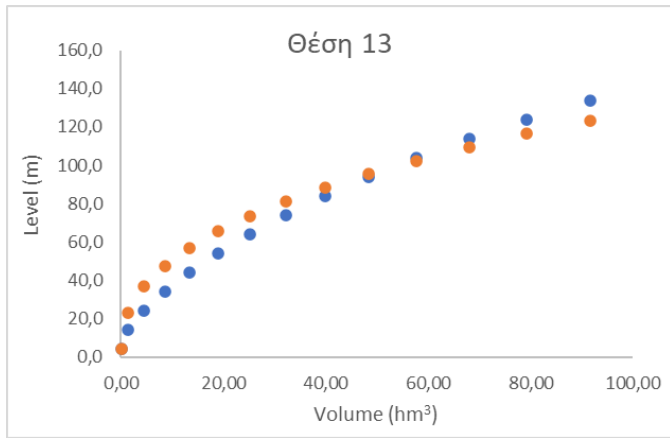
(Με μπλε χρώμα συμβολίζονται τα δεδομένα και με πορτοκαλί χρώμα συμβολίζονται τα αποτελέσματα των εκάστοτε εξισώσεων)

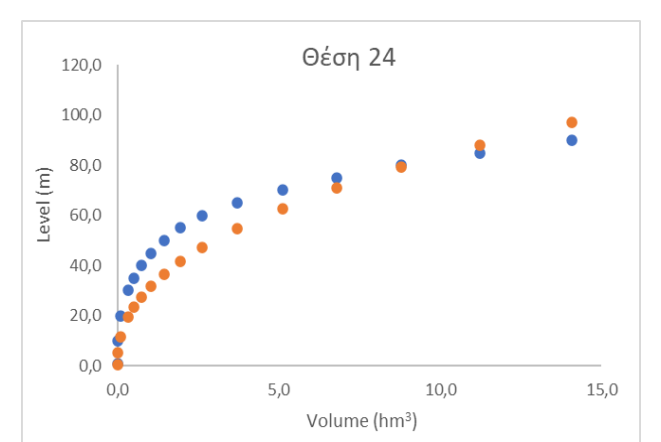
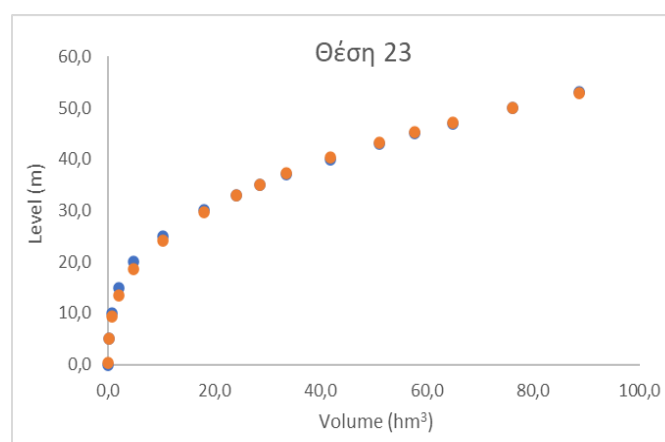
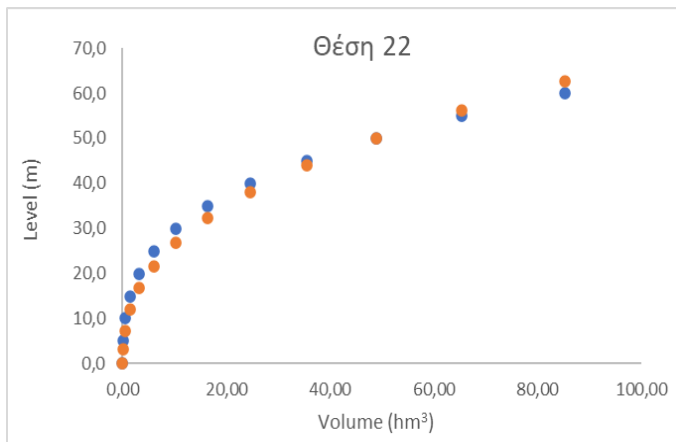
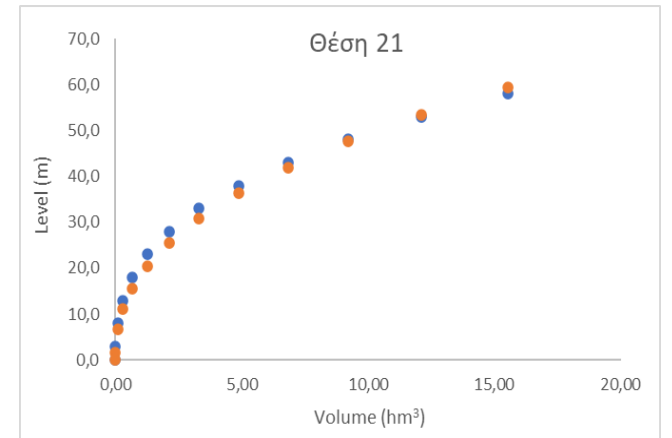
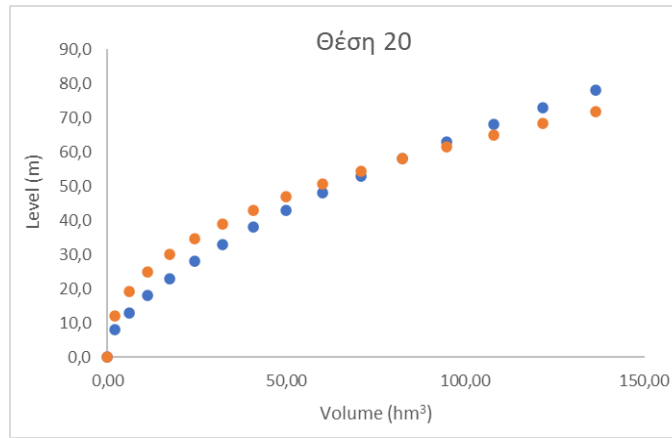
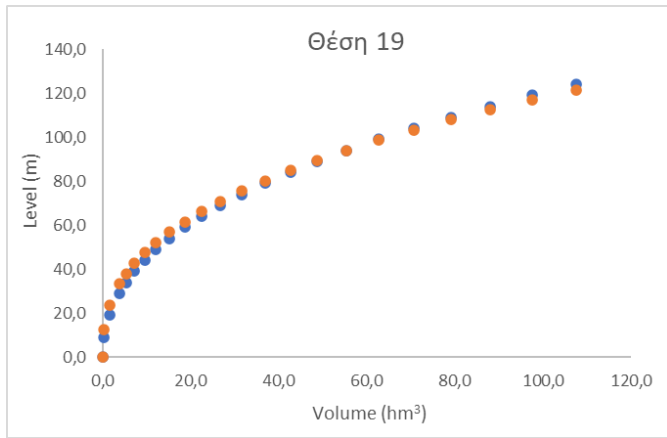
$$\lambda = \frac{78 \times S^{0,17} \times J^{0,43}}{b^{0,1}}$$

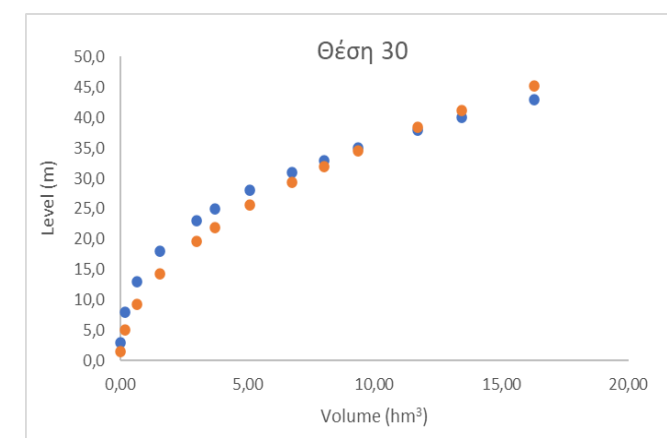
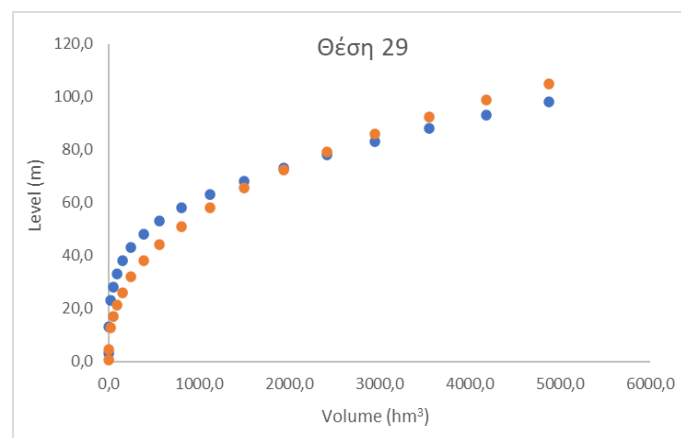
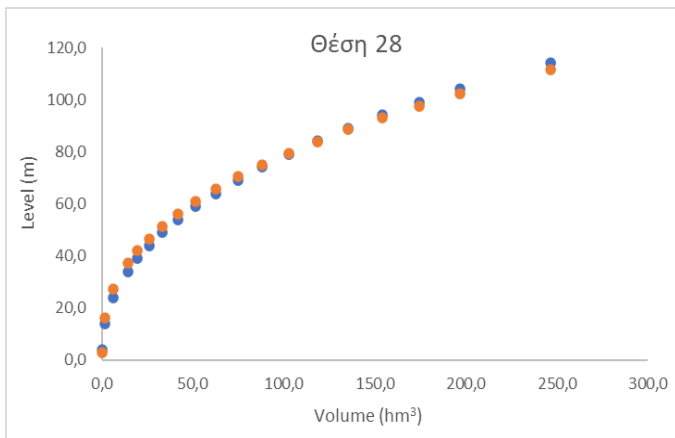
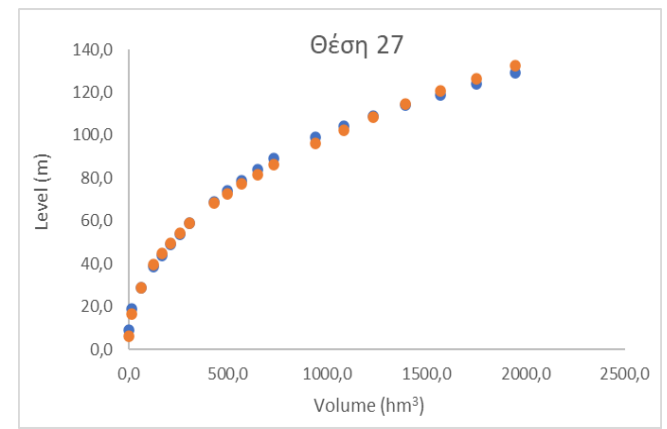
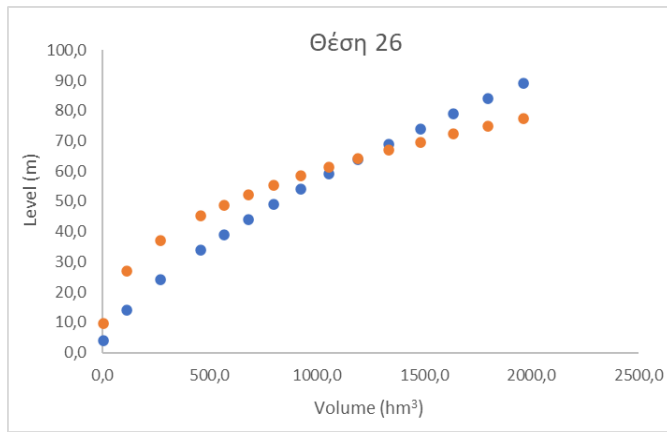
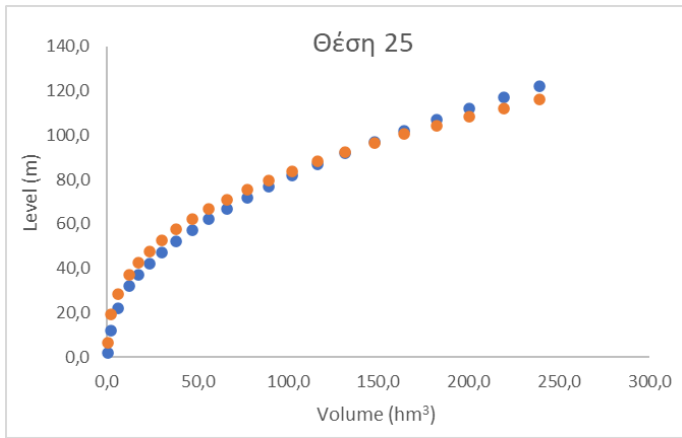


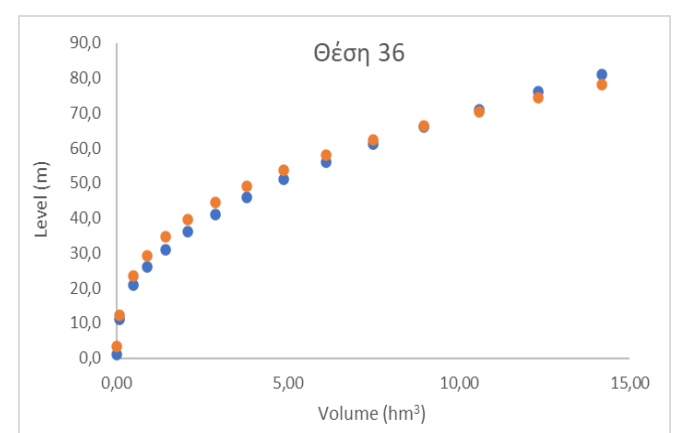
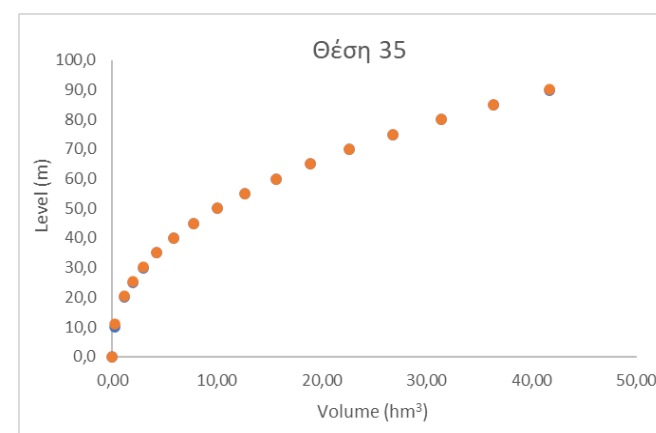
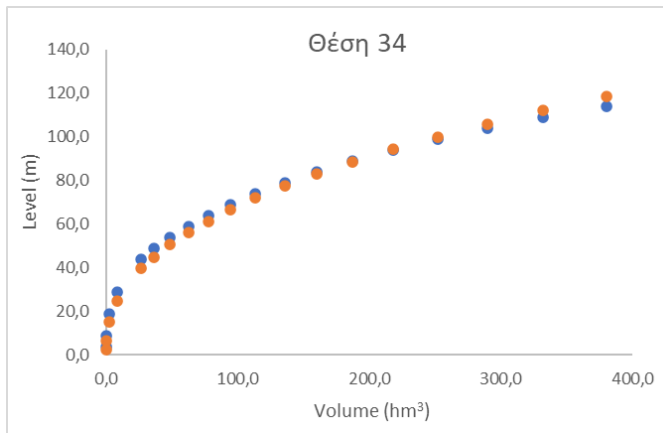
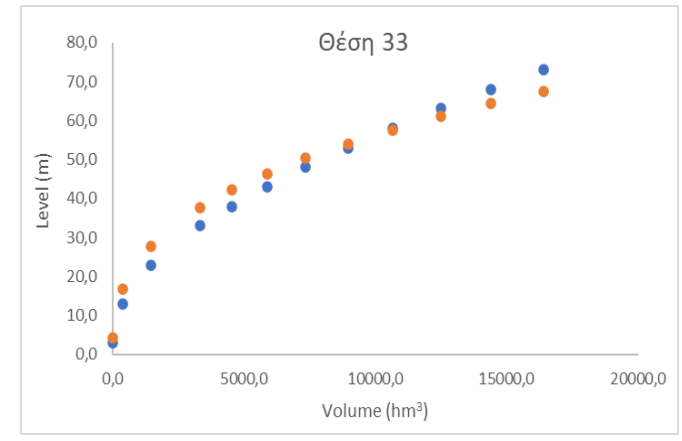
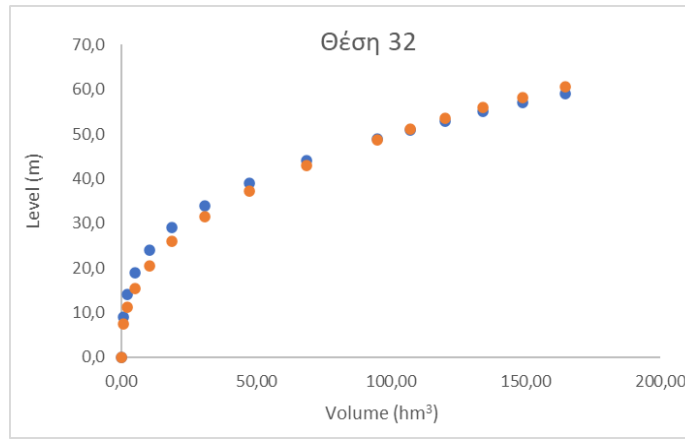
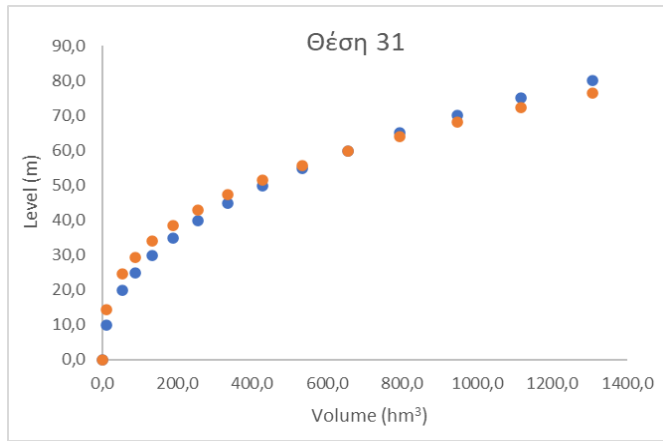


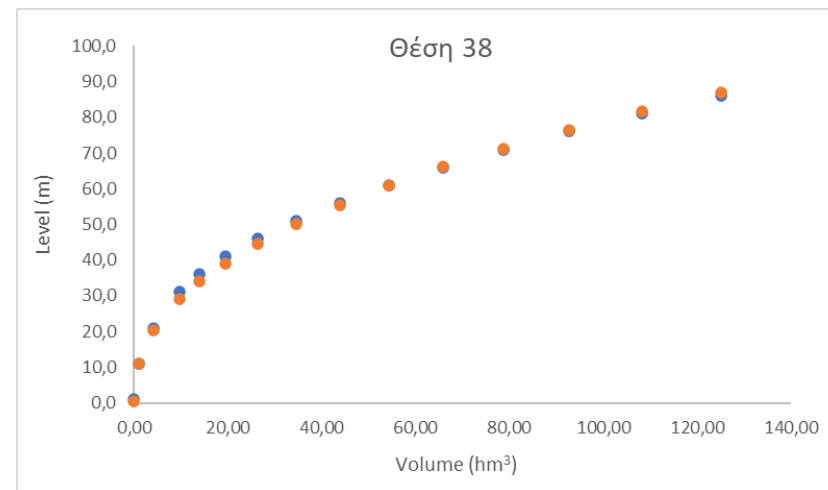
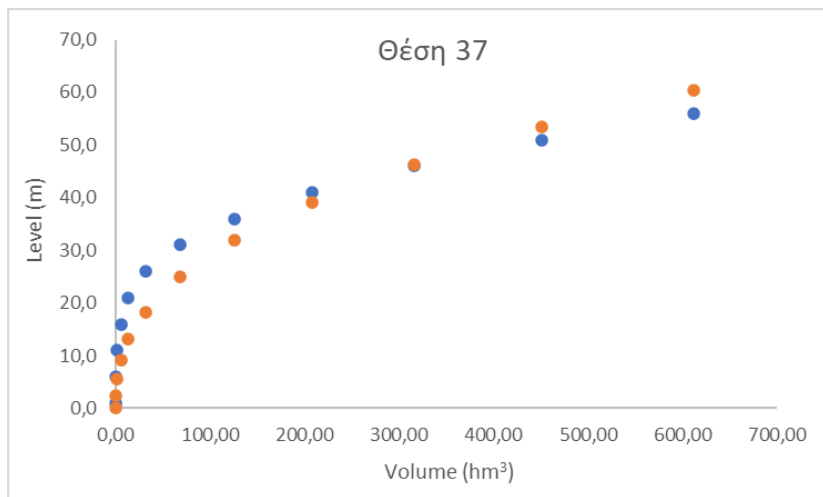






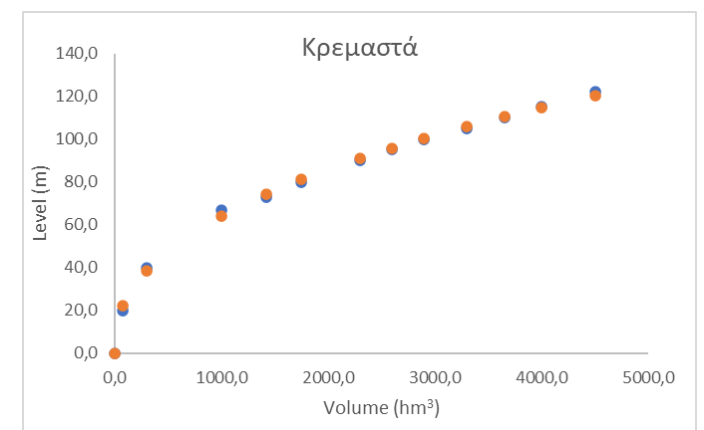
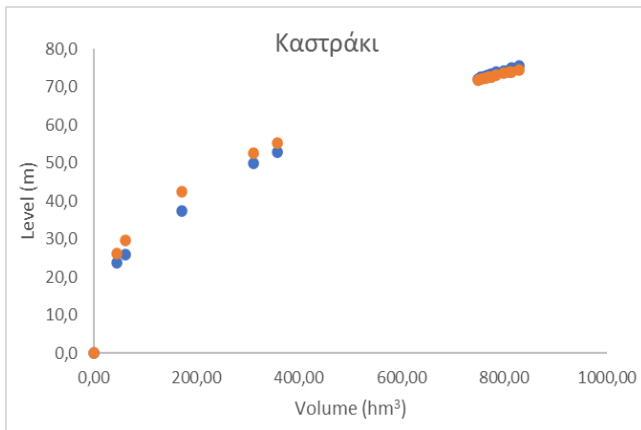
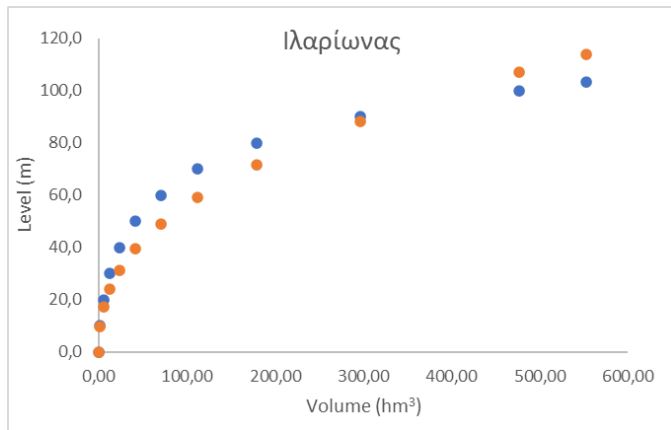
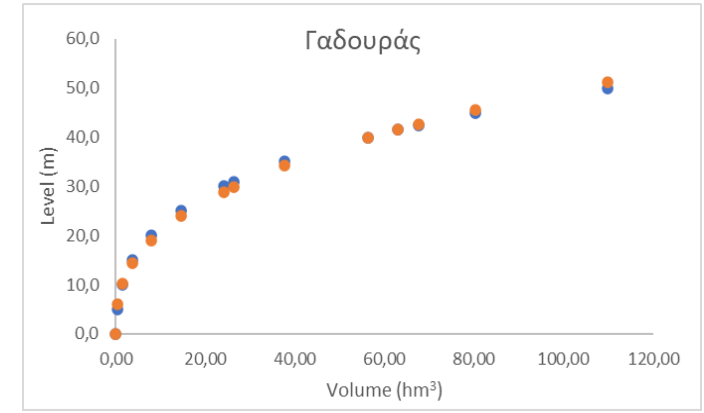
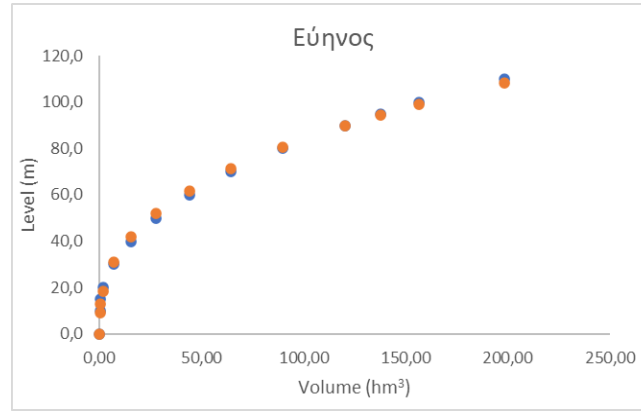
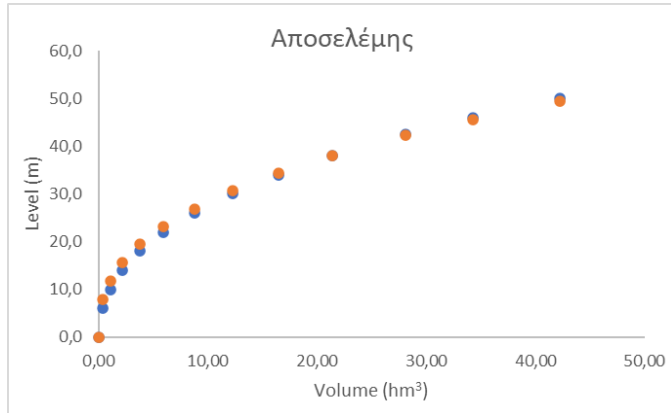


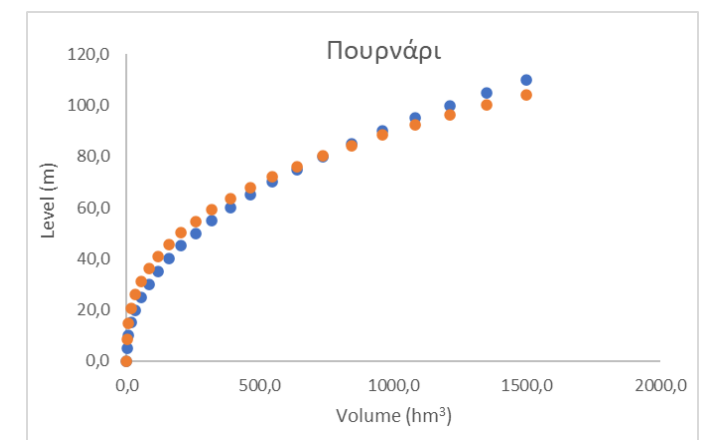
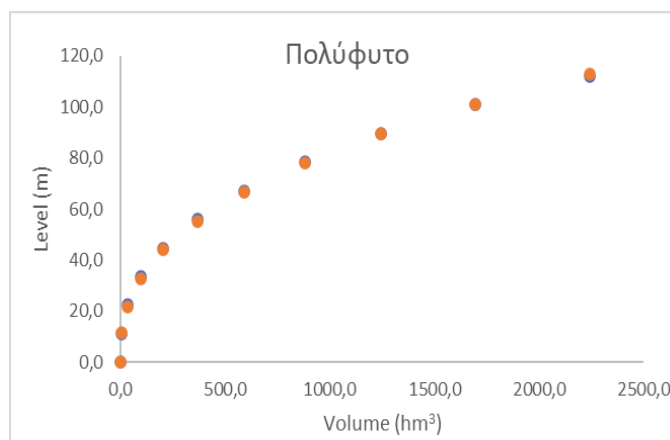
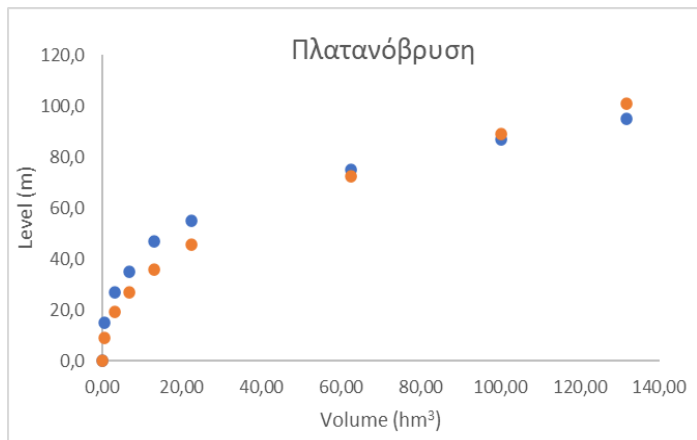
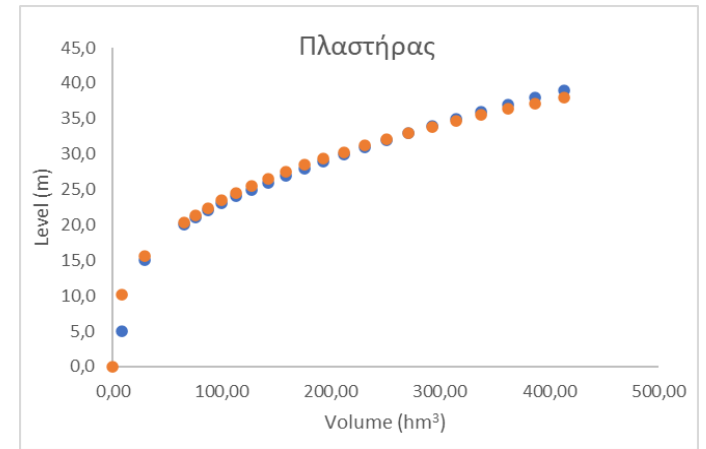
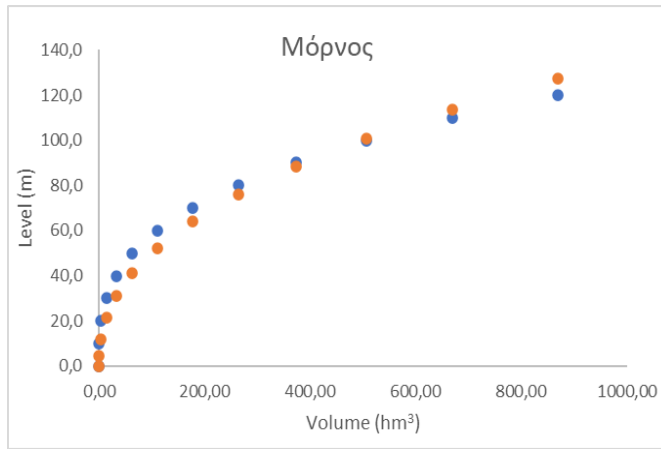
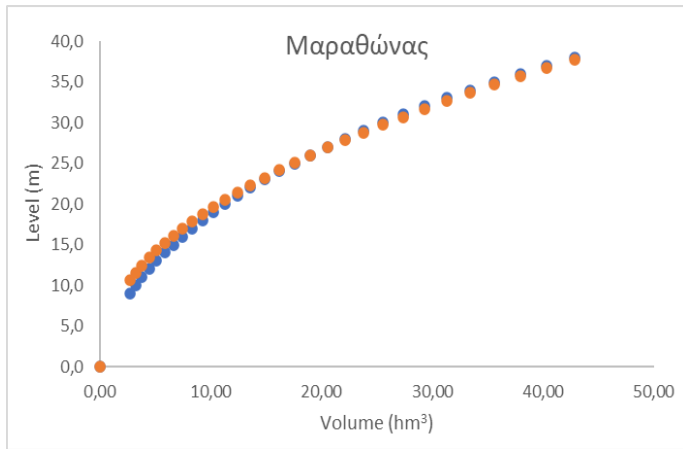




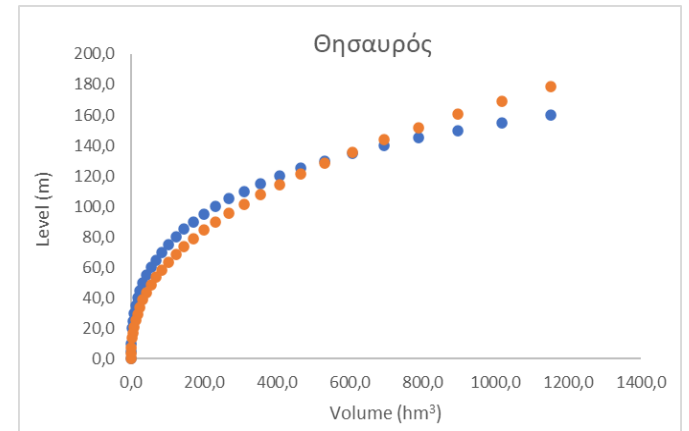
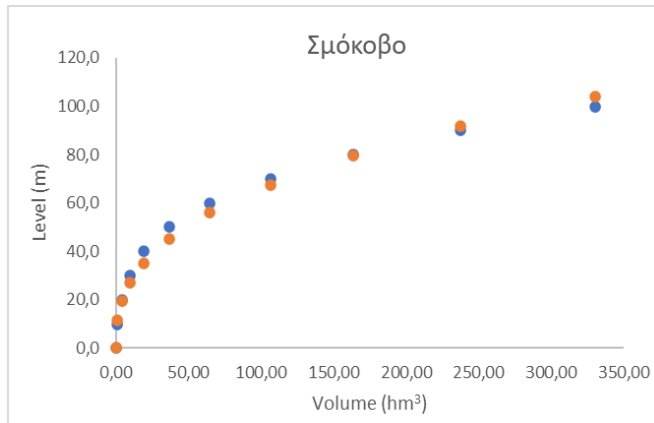
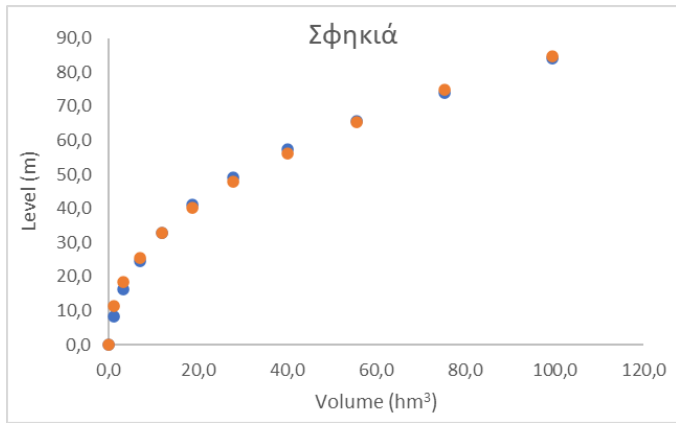
# Ελληνικοί Ταμιευτήρες:

$$\lambda = 5,92 \times S^{0,47} \times J^{0,21}$$



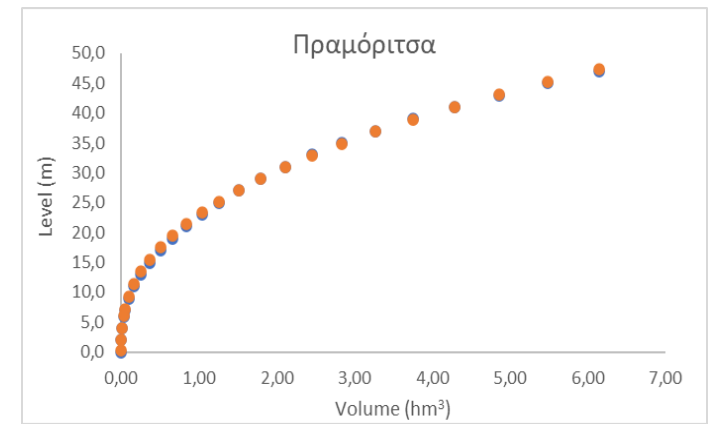
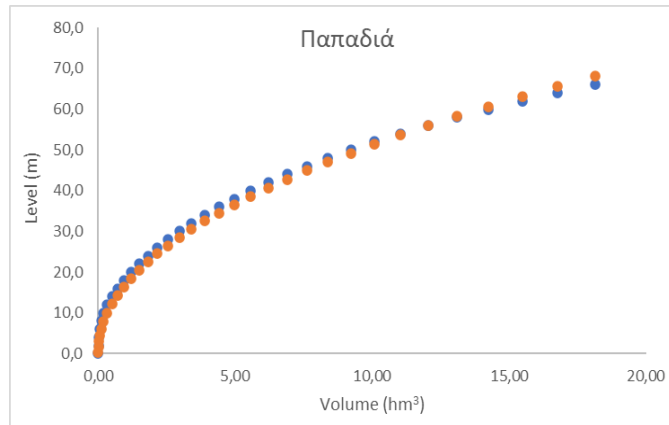
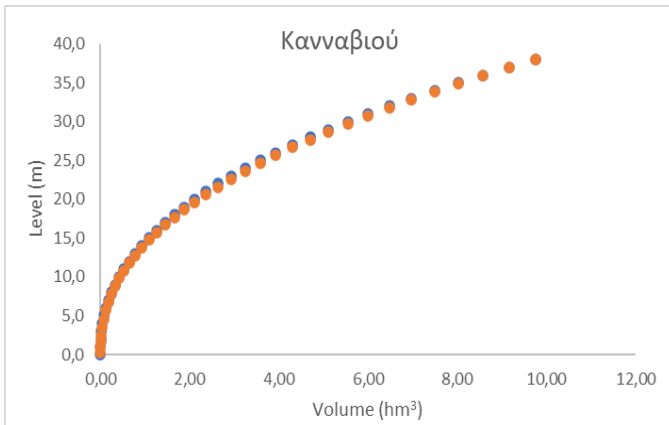
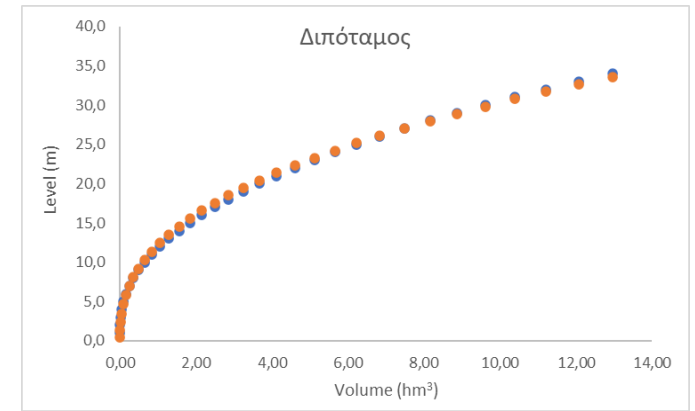
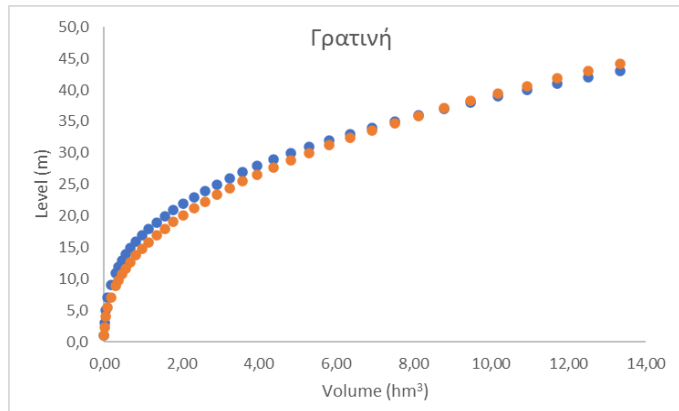
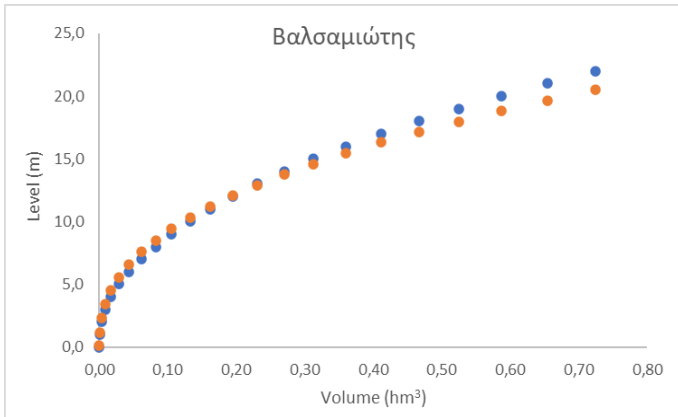


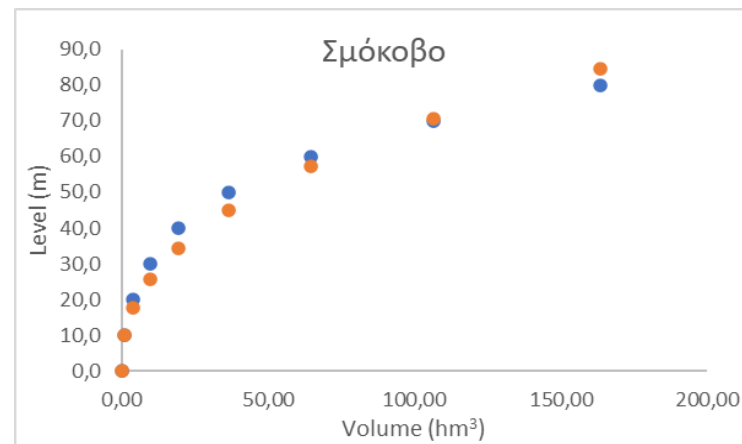
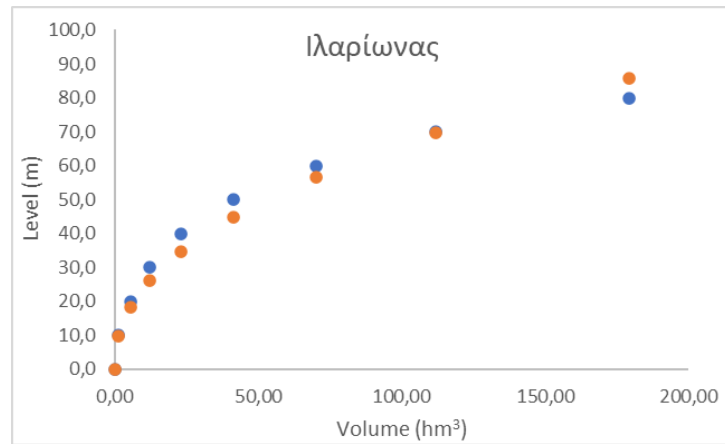
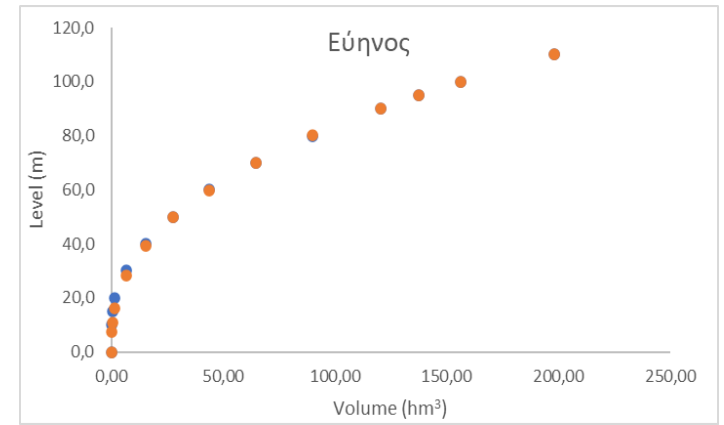
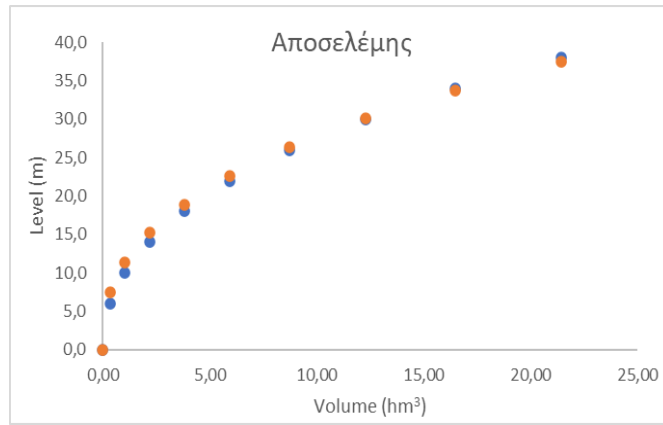
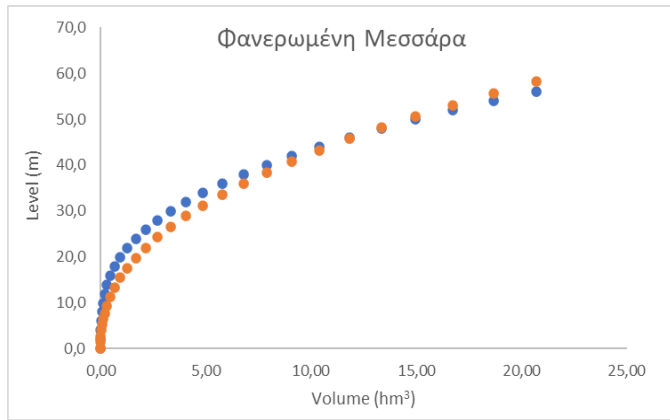




Επικύρωση Αποτελεσμάτων → 11 Ταμιευτήρες:

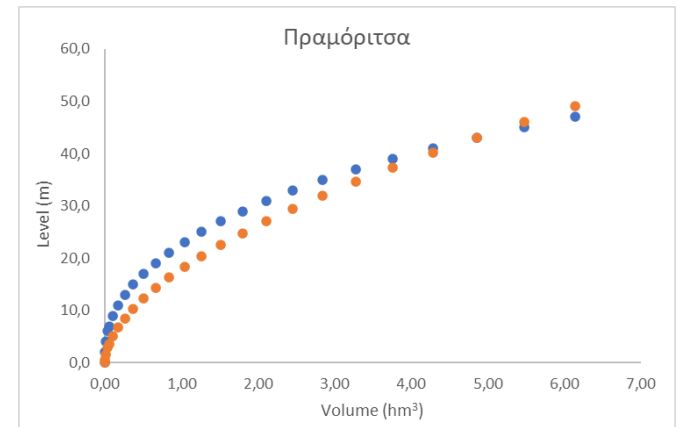
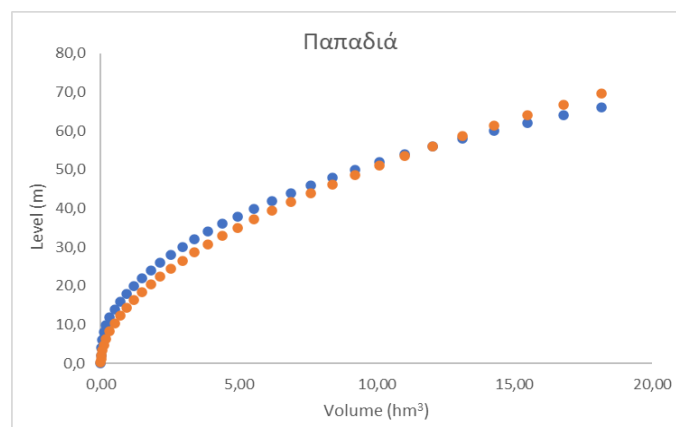
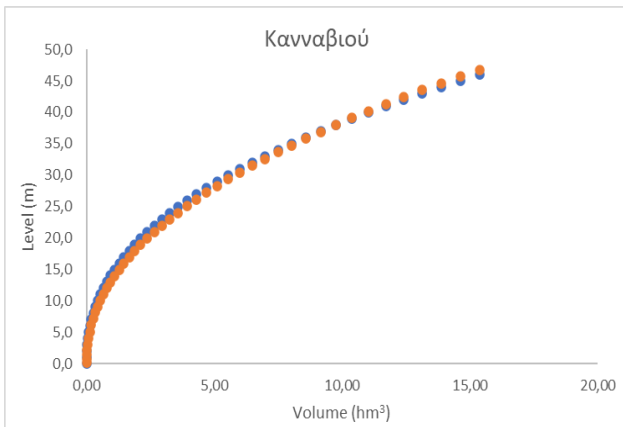
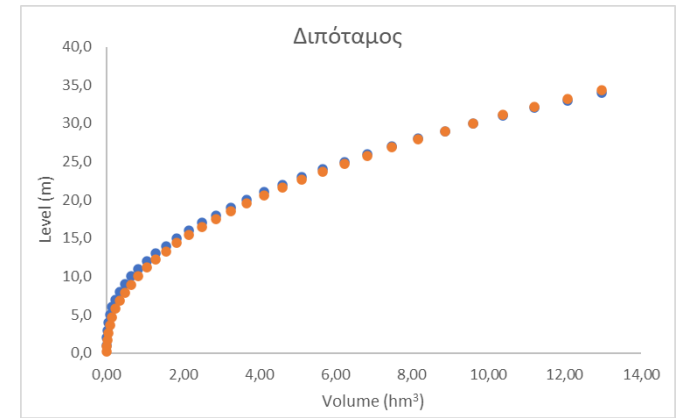
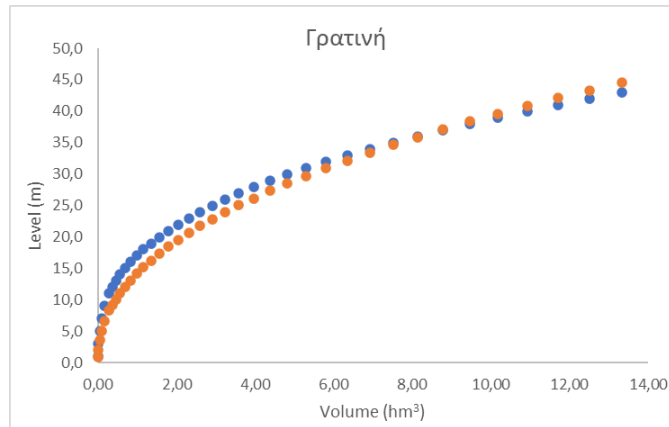
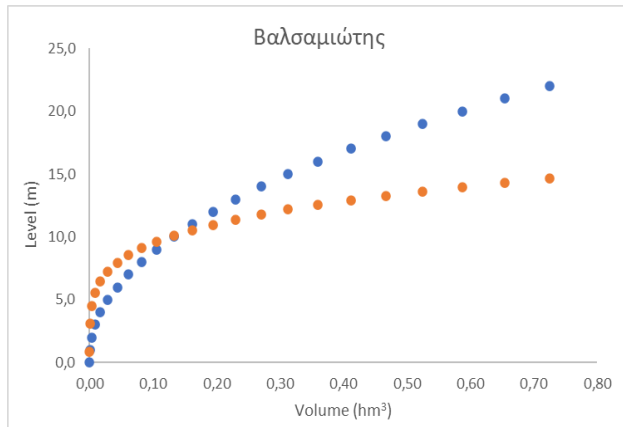
$$\lambda = \frac{78 \times S^{0,17} \times J^{0,43}}{b^{0,1}}$$

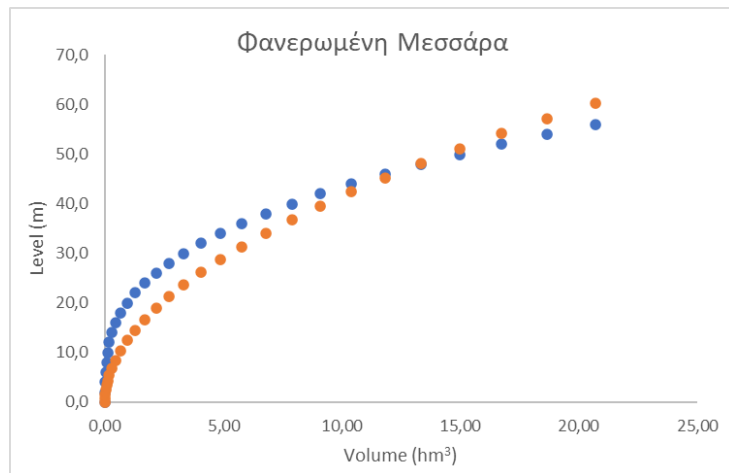




Επικύρωση Αποτελεσμάτων → 7 Ταμιευτήρες:

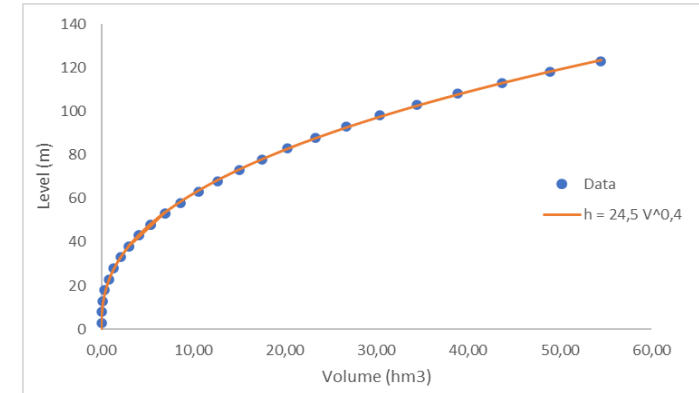
$$\lambda = 5,92 \times S^{0,47} \times J^{0,21}$$



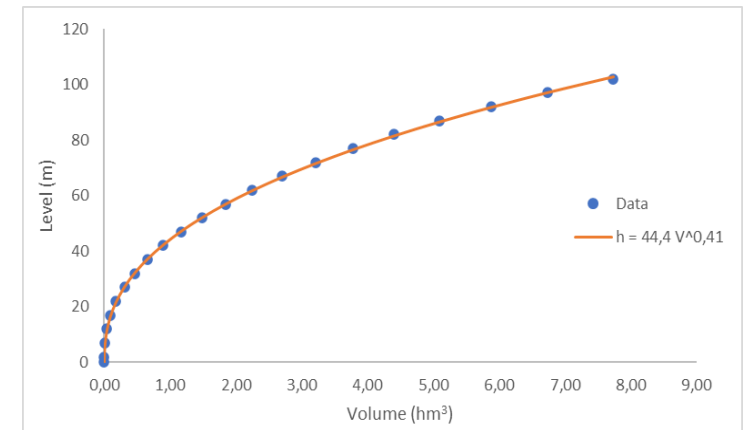


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Θέσεις Ταμιευτήρων υπό εξέταση – Ελβετία

(Εικόνες από Google Earth)

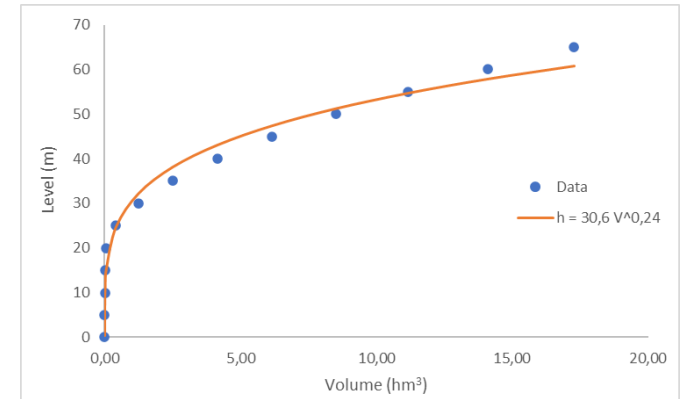


### Lac Des Toules Dam





## Limmernsee



## Goescheneralp

