

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**<<ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΚΑΤΑ  
ΒΑΥΕΣ ΣΕ ΘΕΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ>>**

**ΛΥΜΠΕΡΗ ΟΥΡΑΝΙΑ – ANNA**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)**

**Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος**

**Αν. Καθηγητής Ροζάκης Στυλιανός**

**Χανιά**

**Ιούνιος 2016**

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής διατριβής, αισθάνομαι την υποχρέωση να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνετέλεσαν στην επιτυχή διεκπεραίωσή της και, πρώτα, στον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα κ. Γεώργιο Καρατζά για την πολύτιμη συνεργασία, τη γενναιόδωρη προσφορά των γνώσεων και της εμπειρίας του αλλά και τις αξίες και τις ευαισθησίες του κατά τη διδασκαλία.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες πρέπει να δοθούν στο Δρ. Βαρουχάκη Εμμανουήλ για την καθοδήγησή του, τις προτάσεις του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας, για την άψογη συνεργασία και συνεχή βοήθεια παρά τις δυσκολίες που υπήρξαν, αλλά και για τις πολύτιμες συμβουλές του και σε προσωπικό επίπεδο.

Ευχαριστώ, επίσης, τους καθηγητές της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής κ. Νικόλαο Νικολαΐδη και κ. Ροζάκη Στυλιανό, για τις γνώσεις που μετέφεραν μέσα από τη διδασκαλία τους αλλά και για την συμμετοχή τους στην επιτροπή.

Οφείλω, ακόμη, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο Διδάκτορα Παλόγο Ιωάννη για την πολύ σημαντική βοήθεια και υποστήριξη κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ πρέπει να δοθεί στην πολύ καλή μου φίλη, Χριστίνα Λεοντάρη, με την οποία περάσαμε μαζί αδιάκοπα όλα τα χρόνια των σπουδών μας στο Πολυτεχνείο.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου, Γιάννη και Νεκταρία, για την οικονομική και ηθική συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	1
Abstract.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
1.1 Γενικά.....	4
1.2 Περιγραφή του προβλήματος .....	5
1.3 Εφαρμογή Περιβαλλοντικών Μοντέλων.....	7
1.4 Κατηγορίες Υδρολογικών μοντέλων .....	8
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	11
2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά.....	11
2.2 Κατακρήμιση και Εξατμισοδιαπνοή Περιοχής .....	12
2.3 Περιβαλλοντικά Χαρακτηριστικά .....	13
2.4 Υδρογεωλογικά Χαρακτηριστικά .....	14
2.5 Υδρολογικά χαρακτηριστικά.....	18
3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ BAYES RISK .....	22
3.1 Εισαγωγικές έννοιες στη Θεωρία Λήψης Αποφάσεων.....	22
3.2 Στατιστική Θεωρία Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes .....	24
3.3 Θεώρημα Bayes .....	25
3.4 Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes.....	26
3.5 Το Θεώρημα Bayes σε περιβαλλοντικά προβλήματα .....	27
3.6 Εφαρμογές Θεωρήματος Bayes.....	28
3.7 Πρόγραμμα hydrognomon .....	28
4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ BAYES RISK .....	30
4.1 Το πρόβλημα.....	30
4.2 Στατιστική ανάλυση .....	30
4.3 Εφαρμογή Bayes Risk .....	36
4.3.1 Μαθηματικό Υπόβαθρο .....	36
4.4 Κατασκευή και Κόστος Λιμνοδεξαμενής.....	45
4.5 Εναλλακτικές λύσεις σε περίπτωση ξηρού έτους .....	50
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	53
5.1 Αποτελέσματα μεθόδων .....	53
5.2 Συζήτηση.....	56
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	58
7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	61

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Γεωλογική τομή Α-Α1 της λεκάνης της Μεσσαράς .....	15
Εικόνα 2: Απλοποιημένη γεωλογική δομή της λεκάνης των Μοιρών.....	16
Εικόνα 3: Περιοχή Μελέτης, Κουιάδα Μεσσαράς, Κρήτη και χωροθέτηση των έντεκα βροχομετρικών σταθμών .....	22

Εικόνα 4: Δεδομένα ετήσιας βροχόπτωσης ετών 1980-2015 μέσα από το μοντέλο hydrognomon.....	31
Εικόνα 5: Διάγραμμα προσομοίωσης κατανομής Γάμμα (hydrognomon).....	32
Εικόνα 6: Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας-Ιστόγραμμα τιμών (hydrognomon) ...	32
Εικόνα 7: Τιμές παραμέτρων διάφορων κατανομών-Προβλέψεις (hydrognomon).....	33
Εικόνα 8: Έργα εξωποτάμιας λιμνοδεξαμενής .....	46
Εικόνα 9: Χάρτης της Ελλάδας που παρουσιάζει την τοποθεσία της κοιλάδας Μεσσαράς στην Κρήτη και ένας τοπογραφικός χάρτης της λεκάνης των Μοιρών .....	53
Εικόνα 10: Αποτέλεσμα βέλτιστης λύσης με διωνυμική κατανομή .....	54
Εικόνα 11: Αποτέλεσμα βέλτιστης λύσης με κατανομή Poisson .....	55

#### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Κατακρήμνιση, επίπεδο υπογείων υδάτων και ρυθμός άντλησης τα έτη 1980-2010 .....	17
Διάγραμμα 2α: Μέση ετήσια βροχόπτωση στην κοιλάδα της Μεσσαράς.....	19
Διάγραμμα 2β: Μέση μηνιαία βροχόπτωση στην κοιλάδα της Μεσσαράς .....	19
Διάγραμμα 3: Ημερήσια παροχή ποταμού Γεροπόταμου για το έτος 2013 .....	20

#### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Εύρεση όγκου ταμιευτήρα για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής μελέτης .....	35
--	----

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την εφαρμογή της θεωρίας λήψης αποφάσεων κατά Bayes σε ζητήματα διαχείρισης υδατικών πόρων. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται αν είναι συμφέρουσα η κατασκευή ενός ταμιευτήρα, έτσι ώστε να αποφευχθεί το πρόβλημα της υπεράντλησης των υδροφορέων μιας περιοχής. Αρχικά, αναφέρονται τα εισαγωγικά θέματα της διαχείρισης των υδατικών πόρων και περιγράφεται το πρόβλημα που καλείται η μελέτη αυτή να αντιμετωπίσει. Γίνεται, επίσης, η περιγραφή της περιοχής μελέτης, η οποία στην παρούσα μελέτη είναι η κοιλάδα της Μεσσαράς με επίκεντρο την περιοχή των Μοιρών, όπου θα γίνει και το υπό μελέτη τεχνικό έργο.

Στη συνέχεια, αναλύεται η εφαρμογή της στατιστικής θεωρίας λήψης αποφάσεων κατά Bayes για την κατασκευή ενός ταμιευτήρα ή την αναβολή της στην περιοχή των Μοιρών, με στόχο την αντικατάσταση της μεθόδου υπεράντλησης των υδροφορέων για άρδευση. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας της λήψης των αποφάσεων κατά Bayes και των βασικών σταδίων αυτής.

Επιπροσθέτως, γίνεται στατιστική επεξεργασία των δεδομένων βροχόπτωσης της περιοχής με χρήση του μοντέλου hydrognomon και εκτενής μαθηματική ανάλυση των κατανομών τους. Αρχικά, ορίζονται οι πιθανές αποφάσεις για την αναβολή του κατασκευής του έργου (απόφαση  $A(0)$ ) και την κατασκευή του ταμιευτήρα (απόφαση  $A(1)$ ). Ορίζεται η τυχαία μεταβλητή  $Y$  που λαμβάνει τιμές 1 (υπεράντληση - «επιτυχία») με πιθανότητα  $\theta$  και 0 (όχι υπεράντληση-«αποτυχία») με πιθανότητα  $1-\theta$ . Με βάση τα ανωτέρω δημιουργούνται δυο σενάρια. Στο πρώτο, το πρόβλημα λήψης αποφάσεων σχετίζεται με τα δεδομένα στάθμης του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής μελέτης. Η συνέχιση της άντλησης σχετίζεται με το κατώφλι της κατώτερης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, η υπέρβαση της οποίας οδηγεί σε πρόστιμα. Η κατανομή που ακολουθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι η διωνυμική και ορίζεται ως  $Y$  επιτυχίες σε  $N$  δοκιμαστικούς ελέγχους για υπεράντληση. Σύμφωνα με τη θεωρία του Bayes η πιθανότητα επιτυχίας,  $\theta$ , είναι άγνωστη, και τα δεδομένα για τις στάθμες προσαρμόζονται στην προγενέστερη κατανομή της διωνυμικής, την κατανομή βήτα, οι παράμετροι της οποίας βρέθηκαν ύστερα από κανονικοποίηση των τιμών. Στο δεύτερο σενάριο ορίζονται οι αποφάσεις  $A(0)$  για αναβολή της κατασκευής του ταμιευτήρα και πληρωμή των προστίμων και  $A(1)$  η κατασκευή του. Η μαθηματική έκφραση του συγκεκριμένου προβλήματος ασχολείται με  $Y$  επιτυχίες σε μια χρονική περίοδο  $N$  και περιγράφεται από τη στατιστική κατανομή Poisson. Στο σενάριο αυτό λαμβάνονται υπόψη τα βροχομετρικά δεδομένα της περιοχής. Προγενέστερη κατανομή της Poisson είναι η κατανομή Γάμμα, οι παράμετροι της οποίας βρέθηκαν από το μοντέλο hydrognomon.

Τα αποτελέσματα και συμπεράσματα της παραπάνω ανάλυσης περιγράφονται στο τελευταίο κεφάλαιο. Φαίνεται, λοιπόν, ότι οι δύο μεθοδολογίες προκρίνουν και διαφορετικά αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο σενάριο προκρίνει ως βέλτιστη λύση την κατασκευή του ταμιευτήρα έναντι της υπεράντλησης των υπόγειων υδάτων, ενώ το δεύτερο σενάριο δείχνει ότι υπάρχει η δυνατότητα μεγάλης αναβολής του έργου, τόση ώστε να καθιστά πιο συμφέρουσα την συνέχιση καταβολής των προστίμων λόγω παραβίασης του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα σε σχέση με την κατασκευή της λιμνοδεξαμενής. Αυτό συμβαίνει γιατί τα δύο αυτά σενάρια λαμβάνουν υπόψη διαφορετικά δεδομένα, η διωνυμική κατανομή περιλαμβάνει τις στάθμες του υδροφορέα και η κατανομή Poisson τα βροχομετρικά δεδομένα της περιοχής μελέτης. Έτσι, ο υπεύθυνος για το έργο καλείται να πάρει τη σωστή κατ' αυτόν απόφαση.

## Abstract

The rapid agricultural and tourism development in Crete during the last 30 years has exerted strong pressures on the island's water resources. Overexploitation of groundwater resources due to increased demand in agriculture is one of the biggest problems in Europe and around the world. Decision making is a significant tool in water resources management applications. This case study approaches a decision dilemma in hydrological/hydraulic applications. Bayesian decision analysis is applied to aid the decision maker on whether or not to construct a water reservoir for irrigation purposes based on the hydrological characteristics of the area. The alternative option examined is a scaled parabolic fine variation in terms of over-pumping violations in contrast to common practices that usually consider short-term fines. Precipitation data were analyzed by the hydrological model hydrognomon. The methodology that is followed to provide the optimal decision is known as "Bayesian Statistical Decision Theory". According to this method, the optimal decision or action is the one that maximizes the expected utility or minimizes the expected loss. The decision maker can compare two different scenarios using two different approaches before making a decision. The first scenario is about the appearance of wet and dry years and the ability of the reservoir to satisfy the needs of the study area. This is expressed by the binomial distribution (whose prior distribution is beta) setting the probability of over-pumping violations as a "success" in an interval of  $N$  audits. The second scenario is the postponement of the construction work for specific time. This case is expressed by the Poisson distribution (whose prior distribution is gamma) and it shows when the two options are preferable. In case that the reservoir cannot collect the appropriate amount of water, alternative options have been analyzed. Therefore, the exact dilemma in this case is whether to continue the irrigation practice and pay the fines or to construct a reservoir that will supply the area with water and stop the over-pumping of the aquifer, using the prior information of precipitation and sampling distribution of future successful audits.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικά

Αδιαμφισβήτητα, το νερό συγκαταλέγεται στους σημαντικότερους φυσικούς πόρους του πλανήτη και ταυτόχρονα αποτελεί ουσιώδη προϋπόθεση για τη διατήρηση της ζωής. Η συνολική ποσότητα του φρέσκου νερού στον πλανήτη θα επαρκούσε για να ικανοποιήσει το σύνολο των αναγκών του ανθρώπινου πληθυσμού, εφόσον ήταν ισάξια κατανεμημένη και προσβάσιμη (Bobba et al., 2000).

Ωστόσο, η ανισοκατανομή των υδατικών πόρων ευνοεί κάποιες περιοχές του πλανήτη εις βάρος άλλων που αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα σχετικά με τη διαθεσιμότητα, τη χρήση και τη διαχείριση των υδάτων που καταλήγουν τελικά να απειλούν τη βιωσιμότητα της ανάπτυξης τους. Η μεγάλη διαφοροποίηση των προβλημάτων που σχετίζονται με τους υδατικούς πόρους οφείλεται αφενός σε φυσικά (κλιματολογικά χαρακτηριστικά, διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων) και αφετέρου σε κοινωνικοοικονομικά αίτια (επίπεδο κοινωνικής, οικονομικής και τεχνολογικής ανάπτυξης). Τα προβλήματα αυτά συνδέονται άμεσα με τον τρόπο χρήσης των υδάτων και περιλαμβάνουν προβλήματα που αφορούν τόσο στην ποιότητα (π.χ. Καναδάς) όσο και στην ποσότητα των υδάτων (π.χ. Κίνα ή Ινδία) (Bobba et al., 2000).

Επιπλέον, τις τελευταίες δεκαετίες, οι υδατικοί πόροι υφίστανται ολοένα αυξημένες πιέσεις αφενός λόγω της εντατικής ανάπτυξης που δημιουργεί αυξανόμενη ζήτηση για επαρκές σε ποσότητα και ποιότητα νερό και αφετέρου λόγω της κλιματικής αλλαγής που αναμένεται να επηρεάσει μελλοντικά τον υδρολογικό κύκλο σε τοπικό και σταδιακά σε παγκόσμιο επίπεδο (IPCC, 2001).

Οι επιπτώσεις αναμένεται να είναι δυσμενέστερες στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές, όπως είναι οι περιοχές της Μεσογείου που μπορεί να οδηγηθούν σε καταστάσεις ερημοποίησης. Ειδικότερα για την Ελλάδα, αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που είναι μία σχετικά ευνοημένη υδρολογικά χώρα, η αναντιστοιχία της χρονικής και κυρίως χωρικής κατανομής των βροχοπτώσεων με τις χρονικές και χωρικές κατανομές της ζήτησης έχουν δημιουργήσει και εξακολουθούν να δημιουργούν προβλήματα έλλειψης νερού, ιδιαίτερα σε περιόδους ανομβρίας. Λόγω, λοιπόν, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του κλίματος οι περιοχές αυτές αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις στην αειφόρο διαχείριση των υδατικών πόρων.

Δεδομένης της σοβαρότητας των προβλημάτων που άπτονται του υδατικού περιβάλλοντος και υπό το πρίσμα της μελλοντικής επιδείνωσής τους, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη της άμεσης εφαρμογής βιώσιμων πολιτικών ανάπτυξης και

διαχείρισης των υδατικών πόρων, μέσω σχεδιασμού, υλοποίησης και βέλτιστης λειτουργίας έργων υποδομής και παρεμβάσεων διαχείρισης.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αναγνωρίζοντας ότι η προστασία και διατήρηση του υδατικού περιβάλλοντος είναι ζωτικής σημασίας, προχώρησε στη διαμόρφωση και εφαρμογή περιβαλλοντικών προγραμμάτων που καθορίζουν τις βασικές αρχές μιας βιώσιμης πολιτικής των υδάτων, όπως η Οδηγία – Πλαίσιο για τα νερά ώστε να επιτευχθεί η καλή ποιότητα τόσο των υπόγειων όσο και των επιφανειακών υδάτινων όγκων (EC, 2000; Rekolainen et al., 2003).

Η υπερεκμετάλλευση των περιορισμένων υδατικών πόρων στην περιοχή της Μεσογείου σε συνδυασμό με τις ενδεχόμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, έχει προκαλέσει έντονη ανησυχία όσον αφορά στη βιωσιμότητα των πόρων και στον κίνδυνο ερημοποίησης της περιοχής. Ειδικότερα, η νήσος Κρήτη, που εντοπίζεται στην περιοχή της νοτιοανατολικής Μεσογείου, θεωρείται ότι διατρέχει σημαντικότερο κίνδυνο τόσο λόγω των κλιματικών διαφοροποιήσεων όσο και των γεωργικών πρακτικών διαχείρισης. Για το λόγο αυτό, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη της κατανόησης του ρόλου των κλιματικών διαφοροποιήσεων και των πρακτικών χρήσης γης στους υδατικούς πόρους της νήσου, εστιάζοντας κυρίως στην υπερεκμετάλλευση των υδατικών πόρων στη μεγαλύτερη και πιο σημαντική αγροτική ζώνη της Κρήτης, την πεδιάδα της Μεσσαράς.

## 1.2 Περιγραφή του προβλήματος

Η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδάτινων πόρων, εξαιτίας της αυξανόμενης ζήτησης στον τομέα της γεωργίας, είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στην Ευρώπη αλλά και σε ολόκληρο τον κόσμο. Παραδείγματα από τέτοια προβλήματα είναι πολλές άγονες περιοχές, όπου η έλλειψη επαρκούς κατακρήμνισης ή μόνιμων ποταμών έχει στρέψει την προσοχή σε υπόγεια νερά. Η κύρια χρήση των υπογείων νερών είναι η άρδευση, η ανάπτυξη της οποίας έχει οδηγήσει σε μια αυξανόμενη εκμετάλλευση των υδάτινων πόρων, και συχνά με ένα μη βιώσιμο τρόπο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, πολλές λεκάνες ήδη να αντιμετωπίζουν σοβαρά οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές συνέπειες, οι οποίες με τη σειρά τους ασκούν οικονομική, κοινωνική και πολιτική πίεση με σκοπό την εύρεση λύσης στο πρόβλημα της υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτινων πόρων. Κάποια μέρη της Μεσογείου που αντιμετωπίζουν ανάλογο πρόβλημα βρίσκονται στην Ελλάδα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας περιοχής, το οποίο θα μελετήσουμε εκτενώς και στη συνέχεια, είναι η κοιλάδα της Μεσσαράς. Τελευταία, έχουν δημιουργηθεί ανησυχίες για την πιθανή εξάντληση και αλλοίωση στην ποιότητα των υπογείων υδάτων στη λεκάνη εξαιτίας της εντατικής άντλησης πέρα από το ασφαλές σημείο της λεκάνης. Η Μεσσαρά, έτσι, μπορεί να είναι μια κατάλληλη

τοποθεσία να διεξαχθούν μελέτες αξιολόγησης, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα μοντέλα. Η διαχείριση των φυσικών πόρων με ένα βιώσιμο τρόπο αποτελεί, στις μέρες μας, μια απόλυτη προϋπόθεση για την ανάπτυξη η οποία εγγυάται την προστασία και του περιβάλλοντος αλλά και της αξίας της επένδυσης.

Οι υδάτινοι πόροι είναι υψηλής ζωτικής σημασίας τόσο για τους ανθρώπους όσο και για το περιβάλλον. Η ολοκληρωμένη διαχείριση υδάτινων πόρων είναι σημαντική για την προστασία και τη βιωσιμότητα του φυσικού περιβάλλοντος. Μία πρόσφατη μελέτη κλιματικής αλλαγής δείχνει ότι στη λεκάνη της Μεσογείου η βροχόπτωση αναμένεται να μειωθεί στο προσεχές μέλλον. Η κλιματική αλλαγή συνδυασμένη με την υπεράντληση των υπόγειων υδάτινων πόρων μπορεί να οδηγήσουν σε έλλειψη υδάτινων πόρων σε ήδη ευάλωτες περιοχές. Η επέκταση της γεωργικής άρδευσης έχει σοβαρή επίδραση στους υδάτινους πόρους και το περιβάλλον. Η υπερεκμετάλλευση υπογείων υδάτων καταλήγει σε χαμηλής ποιότητας νερό και μειωμένης ποσότητας, και επηρεάζει τη βιωσιμότητα των ποταμών, των κατοίκων αλλά και της βιοποικιλότητας. Έτσι, είναι αναγκαίο για τους ενδιαφερόμενους να ανιχνευτεί διαθεσιμότητα νερού, να αξιολογηθούν τα υδρολογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των ευπαθών λεκανών απορροής και να βρεθούν τρόποι να διευκολυνθεί η αυξανόμενη ζήτηση του νερού προς κατανάλωση.

Η περιβαλλοντική μοντελοποίηση είναι ένα ουσιώδες εργαλείο για τη διαχείριση φυσικών πόρων, αφού δίνει σε αυτόν που λαμβάνει τις αποφάσεις την ικανότητα να αλλάζει ποικίλες παραμέτρους του συστήματος και να τρέξει ένα εύρος από σενάρια χωρίς τις δαπανηρές, ή κάποιες φορές, αδύνατες στο χώρο πειραματικές εργασίες. Επιπλέον, η περιβαλλοντική μοντελοποίηση επιτρέπει προβλέψεις από μεταβλητές που περιγράφουν φυσικά φαινόμενα. Αυτές οι προβλέψεις μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην κατανόηση και, κατ' επέκταση, διαχείριση των φυσικών μεταβλητών. Ταυτόχρονα, οι προβλέψεις του επιπέδου του υπόγειου νερού για περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα εξάντλησης υπόγειων υδάτων, όπως η παρούσα περιοχή μελέτης, η κοιλάδα της Μεσσαράς στην Κρήτη, μπορεί να είναι χρήσιμες για διαχείριση ακραίων γεγονότων, περιβαλλοντικό έλεγχο και προστασία, ακόμη και ως εργαλείο πολιτικής τιμής του νερού. Πρόσφατες πρακτικές τοπικών αρχών έχουν αποδειχτεί αναποτελεσματικές στην κατάκτηση ακριβών προβλέψεων αφού η διαθεσιμότητα των δεδομένων και ο χαρακτήρας του κλίματος περιορίζουν την εκτέλεση των υπάρχοντων μοντέλων.

Το νησί της Κρήτης μπορεί να χαρακτηριστεί ότι έχει οριακούς υπόγειους υδάτινους πόρους. Η κοιλάδα της Μεσσαράς είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας περιοχής όπου οι υδάτινοι πόροι είναι σε κρίσιμο σημείο.

Η Μεσσαρά είναι πεδιάδα της νότιας Κρήτης στον Νομό Ηρακλείου όπου προέρχεται το μεγαλύτερο μέρος του ελαιόλαδου του νησιού. Η πεδιάδα εκτείνεται

από ανατολικά προς δυτικά στη νότια ακτή της Κρήτης. Βόρεια συνορεύει με την οροσειρά του Ψηλορείτη, ενώ νότια με την οροσειρά των Αστερουσίων. Δυτικά βρέχεται από τον ομώνυμο κόλπο της Μεσσαράς, που αποτελεί τμήμα του Λιβυκού πελάγους. Ανατολικά εκτείνεται ως τις παρυφές του όρους Δίκη κοντά στη Βιάννο. Ο Γεροπόταμος, διασχίζει την πεδιάδα και εκβάλλει στον κόλπο της Μεσσαράς. Δυο παραπόταμοι του είναι ο Κουτσουλίδης και Μάγερας στο δ. Τυμπακίου. Το συνολικό μήκος της πεδιάδας είναι 55 περίπου χιλιόμετρα.

### 1.3 Εφαρμογή Περιβαλλοντικών Μοντέλων

Η ανάγκη κατανόησης και εκτίμησης των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής ποταμού σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη δεκάδων μοντέλων, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα γρήγορης, ακριβούς και ευέλικτης αναπαράστασης και μελέτης του φυσικού συστήματος. Τα μοντέλα μπορεί να είναι εννοιολογικά, λογικά, μαθηματικά ή άλλου τύπου, αλλά σε κάθε περίπτωση συνιστούν αφαίρεση ή απλοποίηση του φυσικού συστήματος. Υπάρχουν δύο κύριες συνιστώσες στις οποίες στηρίζεται η ανάπτυξη όλων των μοντέλων: α) η βελτίωση του βαθμού κατανόησης των πολύπλοκων υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα και β) ο έλεγχος της απόκρισης του συστήματος. Γενικά, τα ερευνητικά μοντέλα είναι πιο περίπλοκα από τα μοντέλα ελέγχου και σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζονται επειδή τα δεδομένα του πεδίου ή του εργαστηρίου δεν επαρκούν για την εκτίμηση των σεναρίων ή την αξιολόγηση των πρακτικών διαχείρισης.

Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές όσον αφορά τη μοντελοποίηση της ροής των υπογείων υδάτων και μεταβολών της στάθμης τους, επιπτώσεις από την υπερβολική άντληση των υδροφορέων (Kritsotakis and Tsanis 2009; Furi et al. 2011; Ta' any et al. 2013; Varouchakis 2009 et al. 2015), και τη ρύπανση των υπόγειων υδάτων όπως η διείσδυση υφάλμυρου νερού και τα νιτρικά δυναμικά (Gusman and Mariaeo 1999; Dokou and Karatzas 2012), υδροχημικές αναλύσεις υδροφορέων (Mariatos et al. 2014), SWAT υδρολογική μοντελοποίηση σε πεδίο με κοιλάδες, μοντέλα βροχόπτωσης – απορροής, και σχεδιασμό υδρολογικών σχεδίων (Shaban et al. 2005) αλλά και επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής σε πεδίο λεκανοπεδίου (Vrochidou et al. 2013).

Σε επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά και οι διάφορες εφαρμογές του είδους μοντέλου που εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

#### 1.4 Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν με βάση τη χωρική κλίμακα, την χρονική διακριτότητα, την στοχαστική ή όχι δομή των μεταβλητών του μοντέλου και το βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των διαφόρων κατηγοριών.

##### ➤ Κατηγοριοποίηση με βάση την χωρική κλίμακα

Τα υδρολογικά μοντέλα ανάγουν τις σημειακές διεργασίες σε επιφανειακές, με ολοκλήρωση των υδρολογικών μεταβλητών εισόδου και εξόδου (βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή, απορροή, κατείδυση), καθώς επίσης και των παραμέτρων που περιγράφουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος σε πεπερασμένη χωρική κλίμακα. Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις κατηγορίες σχηματοποίησης και παραμετροποίησης με βάση την χωρική τους διακριτότητα που αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό τους (Gupta et al., 2003):

- Αδιαμέριστα μοντέλα (lumped):

Οι χρονοσειρές φόρτισης ολοκληρώνονται σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης, για την οποία θεωρούνται ενιαίες τιμές παραμέτρων. Η εκτίμηση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης βασίζεται στις κύριες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου της.

- Ημι-κατανεμημένα μοντέλα (semi-distributed):

Η λεκάνη απορροής διακρίνεται σε επιμέρους υπολεκάνες (φυσικές ή χωρικές ενότητες με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά) με διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και τιμές παραμέτρων. Η εκτίμηση της απορροής στην έξοδο της λεκάνης προκύπτει συναρτήσει των υπολογισμών για κάθε υποενότητα.

- Ημι-αδιαμέριστα μοντέλα (semi-lumped):

Συνιστούν μια ενδιάμεση μορφή μεταξύ της αδιαμέριστης και της ημι-κατανεμημένης σχηματοποίησης, στην οποία θεωρούνται διακριτές χωρικές ενότητες που δέχονται διαφορετικές φορτίσεις, ωστόσο οι παράμετροι που εφαρμόζονται είναι κοινές για όλες τις ενότητες (Ajami et al., 2004).

- Πλήρως κατανεμημένα μοντέλα (distributed):

Πραγματοποιείται κατάτμηση του φυσικού συστήματος σε πολύ μικρές χωρικές ενότητες (κύτταρα) που αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά

τμήματα, στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και τιμές παραμέτρων (ή φυσικών ιδιοτήτων) (Μαμάσης, 2007).

➤ Κατηγοριοποίηση με βάση την χρονική διακριτότητα

Η χρονική διακριτότητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον σκοπό του μοντέλου. Σχήματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για διαχειριστικούς σκοπούς υιοθετούν την μηνιαία ή σπανιότερα, την ημερήσια κλίμακα, ενώ τα μοντέλα πλημμυρών ή τα συνδυαστικά υδρολογικά – υδροδυναμικά μοντέλα υιοθετούν μικρότερες κλίμακες, με μέγιστη την ημερήσια.

Γενικά, τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες με βάση την χρονική τους διακριτότητα:

- Μοντέλα μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος:

Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας.

- Συνεχή μοντέλα:

Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν την διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας (Μαμάσης, 2007).

➤ Κατηγοριοποίηση με βάση την στοχαστική δομή των μεταβλητών του μοντέλου

Γενικά, τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες με βάση την στοχαστικότητά τους, όπως το μοντέλο που θα εφαρμόσουμε στην παρούσα εργασία:

- Στοχαστικά μοντέλα:

Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην πιθανολογική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες αντιμετωπίζουν ως τυχαίες μεταβλητές, είτε μεμονωμένες είτε από κοινού. Χρησιμοποιούν μεθόδους επαγωγικής στατιστικής και ενδείκνυνται για περιπτώσεις στις οποίες η πραγματοποίηση ενός υδρολογικού φαινομένου (π.χ. η αιχμή μιας πλημμύρας) είναι ή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου.

Τα μοντέλα αυτά δεν δίνουν μονοσήμαντες προγνώσεις των μεταβλητών που αναπαριστούν, αλλά ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των προγνώσεων. Αναπαράγοντας τα στατιστικά μεγέθη των παρατηρημένων δειγμάτων, όχι μόνο

εξασφαλίζουν στατιστική συνέπεια, αλλά διατηρούν και μια στοιχειώδη, έστω, συνέπεια με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (Salas et al., 1980).

- Προσδιοριστικά μοντέλα:

Σε καμία μεταβλητή των μοντέλων αυτών δεν υπεισέρχεται στοχαστική δομή των δεδομένων. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να προσομοιώνουν πλήρως τον υδρολογικό κύκλο και τις συνιστώσες του, ώστε να αποτελούν μία αξιόπιστη αναπαράσταση της συμπεριφοράς και απόκρισης του φυσικού συστήματος δίνοντας σαφή και μονοσήμαντα αποτελέσματα. Το μειονέκτημά τους έγκειται στην αδυναμία τους να δώσουν πιθανολογική διάσταση στα αποτελέσματα.

- Κατηγοριοποίηση με βάση τον βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών

Γενικά, τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες με βάση τον βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών:

- Μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based):

Τα μοντέλα φυσικής βάσης είναι εξ ορισμού κατανεμημένα, καθώς αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής), καθώς και σε άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες. Ωστόσο, στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι ένα πολύπλοκο μοντέλο περιγραφής των φυσικών διεργασιών είναι σχεδόν αδύνατον να είναι απόλυτα φυσικής βάσης, απλούστατα, διότι οι ενδιάμεσες διεργασίες του κύκλου του νερού και των θρεπτικών δεν είναι τελείως γνωστές. Η χρήση του ενδείκνυται περισσότερο σε επίπεδο λεκάνης απορροής λόγω της μεγάλης απαίτησής του σε δεδομένα.

- Εννοιολογικά μοντέλα (conceptual):

Τα μοντέλα αυτά διατυπώνουν όχι τους φυσικούς νόμους αλλά παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από την σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη). Ειδικότερα, τα επιφανειακά εννοιολογικά μοντέλα αναφέρονται και ως μοντέλα συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας (soil moisture accounting models), καθώς το υδραυλικό ανάλογο που χρησιμοποιούν είναι μια υποθετική δεξαμενή νερού, η στάθμη της οποίας αναπαριστά το μέσο ύψος υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους.

- Μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box):

Στην περίπτωση των μοντέλων αυτών, οι εξισώσεις δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες τον υδρολογικού κύκλου, όπως συμβαίνει με τα εννοιολογικά και τα φυσικής βάσης μοντέλα, αλλά συνιστούν διαδοχικούς μη γραμμικούς μετασχηματισμούς σχέσεων αιτίου – αποτελέσματος. Το πλεονέκτημά τους έγκειται στη δυνατότητα περιγραφής οσοδήποτε πολύπλοκων συστημάτων, με πολύ μικρότερο (σχεδόν αμελητέο) υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης (Μαμάσης, 2007).

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Η Κρήτη έχει ένα ξηρό, ύφυγρο μεσογειακό κλίμα με πολύ ζεστά και ξηρά καλοκαίρια και σχετικά υγρούς και κρύους χειμώνες. Οι υπόγειοι υδάτινοι πόροι του νησιού χρησιμοποιούνται εκτενώς για γεωργικές δραστηριότητες και ανθρώπινη κατανάλωση. Αν και η θερμοκρασία της Κρήτης κυμαίνεται μεταξύ των ισόθερμων 18,5 και 19,0° C, φαίνεται ότι υπάρχει σημαντική μεταβλητότητα σε όλο το νησί. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η θερμοκρασία μειώνεται με το αυξανόμενο υψόμετρο, όμως κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού αυξάνεται από τις παράκτιες προς τις εσωτερικές περιοχές. Η παρουσία των βουνών, κυρίως στο κέντρο και στο νότιο τμήμα του νησιού, επηρεάζει σημαντικά το κλίμα σε διάφορες περιοχές. Η κατακρήμνιση είναι υψηλότερη στις βορειοδυτικές παράκτιες περιοχές και χαμηλότερη στο νοτιοανατολικό μέρος του νησιού. Επιπλέον, οι συνολικές ώρες ηλιοφάνειας στο νοτιοανατολικό μέρος είναι περισσότερες από το βορειοδυτικό. Αυτές οι διαφορές στις κλιματικές παραμέτρους δημιουργούν αρκετά διαφορετικά τοπικά μικροκλίματα (Department of Water Resources Management 2000; Chartzoulakis and Psarras 2005).

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής της Δυτικής Μεσσαράς, η οποία ανήκει στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Κρήτης και υπάγεται στο Νομό Ηρακλείου. Η πεδιάδα της Μεσσαράς, που είναι η μεγαλύτερη πεδιάδα της Κρήτης και βρίσκεται στο νότιο – κεντρικό τμήμα της, διαιρείται σε δύο μεγάλα τμήματα το ανατολικό που καλύπτει την επαρχία και διαρρέεται από τον ποταμό Αναποδάρη και το κεντρικό και δυτικό της τμήμα που καλύπτει γεωγραφικά τις επαρχίες Καινούργιου και Πυργιώτισσας και διαρρέεται από τον ποταμό Γεροπόταμο, που εκβάλλει στον κόλπο της Μεσσαράς, στο Λιβυκό πέλαγος. Ο Γεροπόταμος και ο Αναποδάρης είναι οι μεγαλύτεροι ποταμοί της Κρήτης (Σκουλικίδης, 2006). Η πεδιάδα της Μεσσαράς έχει

παραμένει αγροτική περιοχή με το συνολικό πληθυσμό να ανέρχεται περίπου σε 40.000 κατοίκους.

## 2.2 Κατακρήμνιση και Εξατμισοδιαπνοή Περιοχής

Για την μελέτη αυτή, έχουν βρεθεί τα καθημερινά αρχεία των μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως η βροχόπτωση, η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η σχετική υγρασία ώστε να υπολογιστούν οι μέσες ημερήσιες τιμές της επιτόπιας κατακρήμνισης και της πιθανής εξατμισοδιαπνοής.

Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στα δεδομένα κατακρήμνισης αφού αντιστοιχεί σε ένα κύριο συστατικό του υδατικού ισοζυγίου. Οι χρονοσειρές της βροχόπτωσης ελέγχονται ως προς την πληρότητα και τα κενά συμπληρώνονται με τη μέθοδο χωρικής πλήρωσης (Buishand 1982). Οι χρονοσειρές ομογένειας εξετάζονται, στη συνέχεια, ως προς τη μέθοδο καμπύλης διπλής μάζας (Buishand 1982), διαιρώντας τη λεκάνη σε δύο μέρη, το βόρειο και το νότιο μέρος, και εξετάζοντας τις χρονοσειρές κάθε σταθμού όσον αφορά τους γειτονικούς τους σταθμούς στο αντίστοιχο τμήμα της λεκάνης. Η μέση κατακρήμνιση της λεκάνης (μέσος όρος κατακρήμνισης ολόκληρης της περιοχής) υπολογίζεται από τον ημερήσιο μετρητή βροχής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Thiessen. Η λεκάνη, η κοιλάδα και η ορεινή περιοχή καλύπτονται επαρκώς από το υφιστάμενο βροχομετρικό δίκτυο καθώς η κατακρήμνιση, η οποία υπολογίζεται συστηματικά για την χρονική περίοδο 1980-2015, αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα της ετήσιας κατακρήμνισης της λεκάνης του Γεροπόταμου. Κάποιοι από τους σταθμούς έχουν μετρήσεις από παλιότερες χρονολογίες, όμως εντατικά η βροχόπτωση παρακολουθείται τα τελευταία τριάντα πέντε χρόνια.

Ίσως η μεγαλύτερη πηγή σφαλμάτων στα υδρολογικά μοντέλα είναι αυτή που προκύπτει από τη διατύπωση της εξατμισοδιαπνοής. Με έλλειψη της άμεσης καθημερινής μέτρησης της ενδεχόμενης εξατμισοδιαπνοής, οι διαθέσιμες επιλογές, δεδομένης της ύπαρξης προηγούμενων δεδομένων, είναι η χρήση είτε συνδυασμού της φόρμουλας αεροδυναμικής ενέργειας είτε της εξάτμισης.

Με στόχο την καλύτερη κατανόηση του τοπικού κλίματος της περιοχής μελέτης, η διαχρονική κατακρήμνιση για κάθε βροχομετρικό σταθμό της λεκάνης του Γεροπόταμου υπολογίζεται για την εκτίμηση της μεταβολής της μετρημένης βροχόπτωσης με το υψόμετρο, δηλαδή η σχέση βροχόπτωσης - υψόμετρου της λεκάνης, όπως επίσης και για το νότιο και το βόριο μέρος της. Καθώς είναι δεδομένη επαρκής περιγραφή της ετήσιας κατακρήμνισης (Linsley et al. 1988), η πιθανολογική εικόνα της κανονικής κατανομής ρυθμίζεται σε ένα δείγμα μιας 30-χρονης ετήσιας κατακρήμνισης. Η εμφάνιση των υγρών και ξηρών ετών όπως και η

συχνότητα εμφάνισής τους εκτιμώνται μέσω της καμπύλης των υπόλοιπων σειρών της κατακρήμνισης για την χρονική περίοδο 1980-2015 σε ετήσιο χρονικό βήμα (HYMOS 4.0 1990).

### 2.3 Περιβαλλοντικά Χαρακτηριστικά

Ο υδροφορέας της Κοιλιάδας της Μεσσαράς θεωρείται ότι είναι η μόνη “αποθήκη” νερού, όπου η επαναφόρτιση αντιπροσωπεύει την εισροή και η εκφόρτιση την εκροή (η αποχώρηση και φυσική εκφόρτιση, όπως η εξατμισοδιαπνοή, επιφανειακές και υπόγειες απώλειες). Η επαναφόρτιση γίνεται κυρίως λόγω της κατακρήμνισης, όπως και όλα τα άλλα συστατικά, δηλαδή η προμήθεια άρδευσης, είναι αμελητέα εξαιτίας των ειδών των φυτών και του συστήματος άρδευσης που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, η επαναφόρτιση από το ρέμα του Γεροπόταμου θεωρείται επίσης ότι είναι μικρή, αφού τα τελευταία χρόνια (από το 1989) η ροή του ρέματος έχει μειωθεί κατά πολύ.

Η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Γεροπόταμου καλύπτει μια περιοχή των 400 km<sup>2</sup> και είναι τοποθετημένη στο νοτιο-κεντρικό μέρος της Κρήτης, περίπου 50 km από την πόλη του Ηρακλείου. Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής είναι καλλιεργημένο και η εναπομένουσα περιοχή χρησιμοποιείται για κτηνοτροφία. Η Κοιλιάδα της Μεσσαράς εξαπλώνεται στη λεκάνη του Γεροπόταμου και έχει ως κύρια πηγή άρδευσης και αστικής προμήθειας τα υπόγεια νερά.

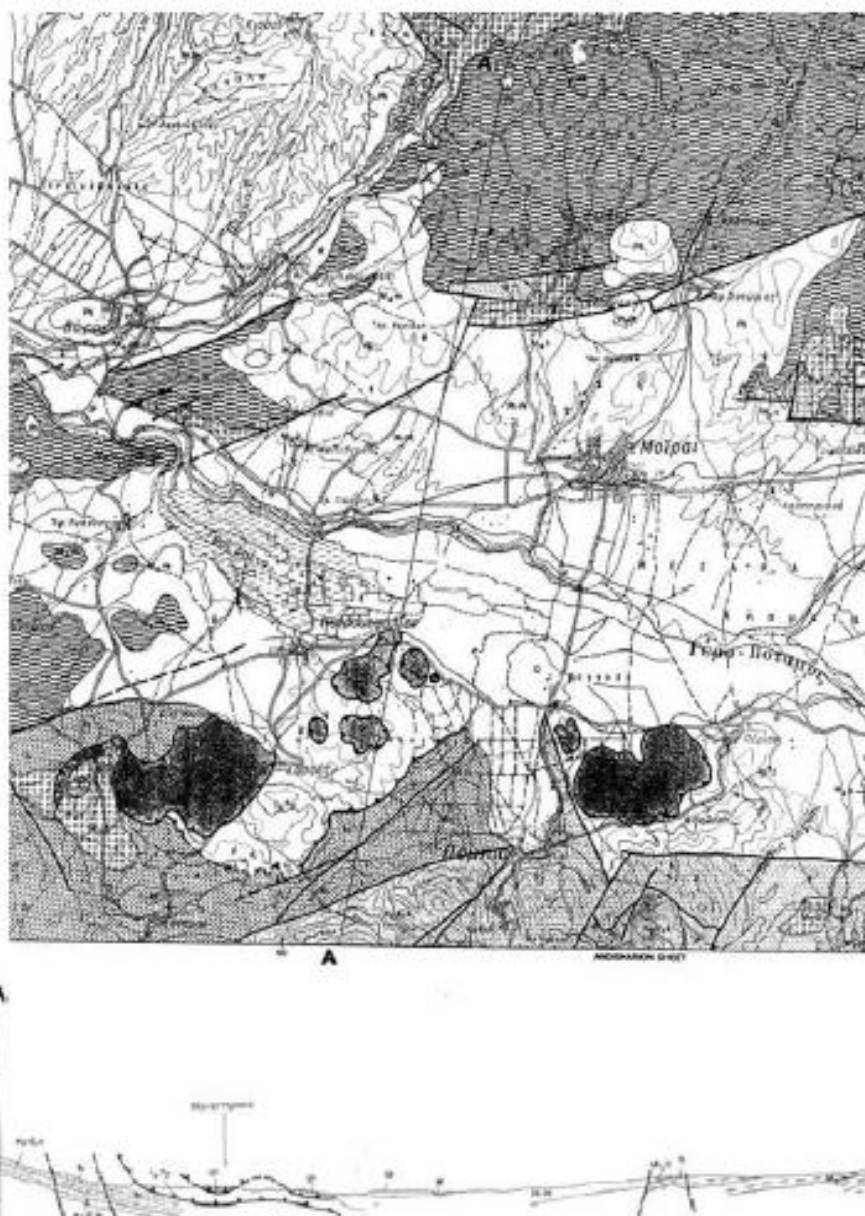
Η λεκάνη απορροής της Μεσσαράς καλύπτει μια περιοχή των 398 km<sup>2</sup> στο νότιο Ηράκλειο και είναι η μεγαλύτερη και πιο παραγωγική κοιλάδα του νησιού. Μια περιοχή των 250 km<sup>2</sup> της κοιλάδας είναι καλλιεργημένη. Η κατανομή των καλλιεργούμενων φυτών είναι 75% ελιές, 10% αμπέλια, 2% εσπεριδοειδή, και 13% λαχανικά (κυρίως σε ανοιχτό πεδίο και σε κάποια θερμοκήπια). Οι ελιές καταλαμβάνουν περισσότερες περιοχές επίπεδης γης, ενώ τα αμπέλια, λιγότερο εκτενή, είναι τοποθετημένα κυρίως στα νοτιότερα των Μοιρών και στα βορειότερα της κοιλάδας απορροής.

Η κύρια δραστηριότητα χρήσης γης της λεκάνης του Γεροπόταμου είναι η καλλιέργεια των ελαιόδεντρων και των αμπελιών, με την άρδευση νερού να έρχεται αποκλειστικά από τα υπόγεια νερά. Η υπόλοιπη καλλιεργήσιμη περιοχή χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια λαχανικών και δημητριακών. Η μέγιστη απαίτηση αρδευτικού νερού ανά χιλιόμετρο για κάθε χρήση γης είναι 0,6 mm<sup>3</sup> το χρόνο για λαχανικά και 0,25mm<sup>3</sup> το χρόνο για δημητριακά, αμπέλια και ελαιόδεντρα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης είναι 650 mm και το μέσο υψόμετρό της εκτιμάται ότι είναι 435 mm.

Ένα εκτεταμένο δίκτυο σταθμών άντλησης είναι σε λειτουργία από το 1984, μετατρέποντας ξηρές καλλιέργειες ελαιόδεντρων σε στάγδην αρδευόμενες καλλιέργειες (Donta et al. 2006). Συνεπώς, η παραγωγικότητα έχει ανέβει με κόστος την ανησυχητική πτώση του υδροφόρου ορίζοντα. Η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριανταπέντε ετών έχει οδηγήσει σε μια δραματική μείωση της στάθμης που ανέρχεται σε περισσότερο από 35 m. Πιθανή μελλοντική κλιματική αλλαγή στην περιοχή της Μεσογείου, αύξηση του πληθυσμού και εκτενής γεωργική δραστηριότητα δημιουργούν ανησυχία ως προς τη βιωσιμότητα των υδάτινων πόρων. Ακριβής εκτίμηση της χωρικής μεταβλητότητας της υδραυλικής κεφαλής είναι σημαντική για τα ολοκληρωμένα σχέδια διαχείρισης των υπόγειων υδάτινων πόρων, τα οποία θα βοηθήσουν στη μείωση του κινδύνου ερημοποίησης.

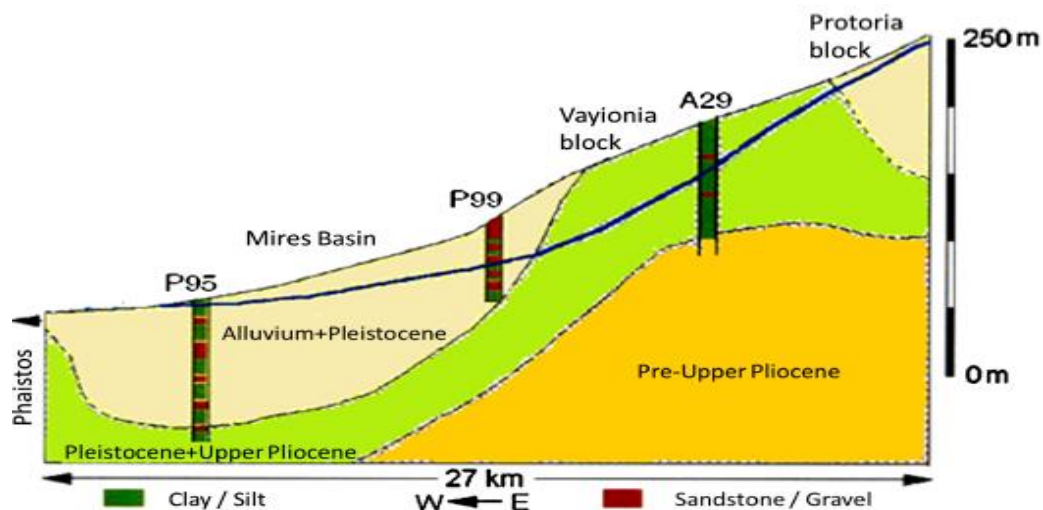
#### 2.4 Υδρογεωλογικά Χαρακτηριστικά

Η λεκάνη απορροής της Μεσσαράς περιλαμβάνει μια ανατολικής – δυτικής κατεύθυνσης πεδιάδα. Υπάρχουν απότομα βουνά στην βόρεια και δυτική πλευρά. Στα βόρεια, το χάσμα ποικίλει από 2200 έως 600 m από ανατολικά στα δυτικά, με το μεγαλύτερο σημείο να είναι μέρος της οροσειράς Ίδα (κορυφή στα 2540 m), η οποία είναι ένας ασβεστολιθικός όγκος. Στα νότια βρίσκεται η οροσειρά Αστερουσία, η οποία υψώνεται ως τα 600 m στα δυτικά και 1200 m στα ανατολικά, και συνιστά την νοτιότερη οροσειρά της Ευρώπης. Στη στένωση της Φαιστού στα δυτικά, η έξοδος της λεκάνης απορροής του ποταμού Γεροπόταμου είναι στα 30 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (Fytrolakis et al. 2005). Η λεκάνη της Μεσσαράς (δηλαδή η περιοχή της πεδιάδας της Μεσσαράς) ορίζεται από την εσωτερική ζώνη της. Παρόλο που η λεκάνη της επεκτείνεται σε ανατολική – δυτική κατεύθυνση, η πλειοψηφία των ενεργών συνόρων της τείνει λοξά προς τον άξονα της λεκάνης (70-80°). Τοπογραφικά, το πάχος του μειώνεται από το κέντρο της λεκάνης στο βορρά και το νότο. Το μεγαλύτερο πάχος εντοπίζεται στο ανατολικό τμήμα, όπου ο ποταμός Ληθαίος διασχίζει τον ποταμό Γεροπόταμο. Σε γεωλογικούς όρους, το αυλάκι είναι καλυμμένο κυρίως με συσσωματώματα, άμμους και αργίλους ποταμίσιας προέλευσης. Αυτοί οι σχηματισμοί ευνοούν υδροφορείς υψηλής χωρητικότητας ειδικά σε περιοχές όπου υπάρχουν κυρίως συσσωματώματα.



Εικόνα 1: Γεωλογική τομή A-A1 της λεκάνης της Μεσσαράς (δημοσιευμένο από το Ι.Γ.Μ.Ε., 1984). Ξεκινώντας από τα νεότερα, α) αλλουβιακά ιζήματα, Q κόκκινα συσσωματώματα, άμμος-άργιλος, Pl-Pt συσσωματώματα, άμμος-άργιλος, Plι θαλάσσιες αποθέσεις, M4m κομμάτια, M3c, θαλάσσιες υφάλμυρες και ποταμών-λιμνών αποθέσεις, gn γνευσίτης (ΠΗΓΗ: Tsanis and Apostolakis 2009)

Οι καταγραφές των γεωτρήσεων στο ανατολικό και κεντρικό τμήμα της λεκάνης δείχνουν ότι το πάχος των συσσωματωμάτων ποικίλουν από 75-180 m (Fytrolakis et al. 2005). Η σύσταση της αλλουβιακής λεκάνης αλλάζει από ανατολικά στα δυτικά. Στο ανατολικό μέρος τα κοιτάσματα είναι χονδροειδή, με στρώματα αργίλου και λάσπης μικρότερα από 5 m πάχος. Το επιφανειακό στρώμα αποτελείται από χαλίκι και άμμο, επιτρέποντας υψηλή διήθηση. Κατάντη, δυτικά των Μοιρών, το πάχος των στρωμάτων από χαλίκι και άργιλο αυξάνεται με το επιφανειακό στρώμα το οποίο αποτελείται κυρίως από κοιτάσματα χαλικιού (Vardavas et al. 1996; Kritsotakis and Tsanis 2009).



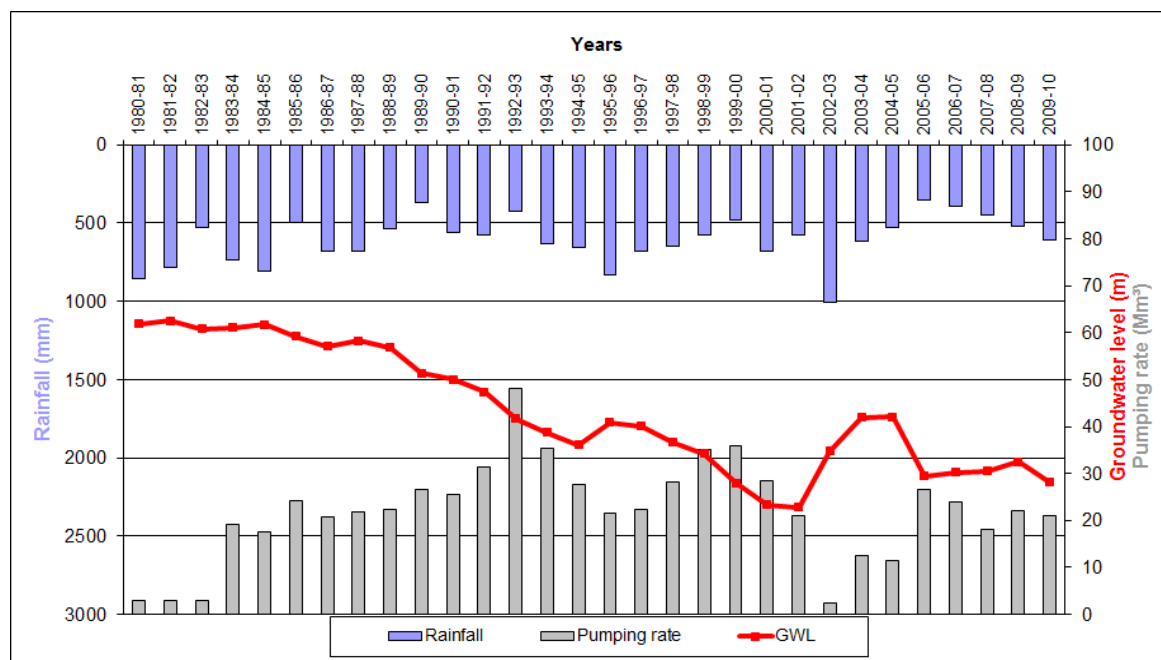
Εικόνα 2: Απλοποιημένη γεωλογική δομή της λεκάνης των Μοιρών (τροποποιημένο από Vardavas et al. 1996)

Γενικά, ο αλλουβιακός υδροφορέας έχει επίμηκες σχήμα, καταλαμβάνει το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς και συνίσταται από σύγχρονες ποταμολιμναίες αποθέσεις κροκαλοπαγών, άμμων, ιλυόλιθων και αργίλων. Αν και ο υδροφορέας αυτός αποτελείται από αποθέσεις διαφορετικών υδρογεωλογικών ιδιοτήτων (διαφορετική στρωματογραφική ηλικία, σύσταση και τύπος απόθεσης), σε όλες σχεδόν τις υδρογεωλογικές μελέτες αντιμετωπίζεται ως ενιαίος.

Η χωρητικότητα του υδροφορέα δε μπορεί να εκτιμηθεί ακριβώς επειδή είναι μέρος του ενοποιημένου υδρολογικού συστήματος απορροής της Μεσσαράς. Η Διεθνής Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας (FAO 1972) εκτίμησε την χωρητικότητα του υδροφορέα ότι είναι περίπου  $86 \text{ Mm}^3$  βασισμένο στα δεδομένα καταγραφών των γεωτρήσεων. Η σημερινή χωρητικότητα του υδροφορέα είναι μικρότερη (εξαιτίας της σημαντικής εξάντλησης των υπογείων υδάτων) και εκτιμήθηκε περίπου στα  $55 \text{ Mm}^3$  (Kritsotakis and Tsanis 2009). Ο υδροφορέας εφοδιάζεται κατά τη διάρκεια του χειμώνα από το κύριο ποτάμι το οποίο διασχίζει τη λεκάνη, το Γεροπόταμο, και από ένα δευτερεύων ποτάμι, το Ληθαίο, στο ανατολικό μέρος. Η επιφανειακή απορροή από τις βόρειες και νότιες πλευρές της λεκάνης καταλήγει στη λεκάνη, όπου ένα σημαντικό ποσοστό εφοδιάζει τον υδροφορέα. Πλευρική εισροή υπόγειου νερού στη λεκάνη συμβαίνει από τη λεκάνη της Βαγιωνιάς στα ανατολικά των Μοιρών, ενώ η εισροή υπόγειων νερών είναι πιθανό να συμβαίνει επίσης από νεογενείς σχηματισμούς στα βόρεια-βορειοδυτικά (Kilili-Polychronaki 2001).

Το επίπεδο των υπογείων υδάτων στην κοιλάδα της Μεσσαράς μεγιστοποιείται κατά τη διάρκεια του Μαρτίου ή Απριλίου, με διήθηση μέχρι να συμβεί η επαναφόρτιση το χειμώνα. Οι υδροφορείς στις λεκάνες Μοίρες και Βαγιωνιά απέδωσαν υψηλά ποσοστά εκφόρτισης, όπως  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ , στις αρχές της δεκαετίας του 1970, τώρα όμως έχουν μειωθεί περίπου στο 1/10 του εν λόγω αριθμού. Σύμφωνα με δοκιμές άντλησης, η ειδική απόδοση (S) κυμαίνεται κυρίως μεταξύ

0,05 και 0,15 m<sup>3</sup>/h, αλλά τοπικά στις Μοίρες φτάνει 0,2 m<sup>3</sup>/h. Ο οριζόντιος συντελεστής μεταφορικότητας (transmissivity) κυμαίνεται κυρίως μεταξύ 0,1 και 0,01 m<sup>2</sup>/s από ανατολικά στα δυτικά, και είναι στο ψηλότερο σημείο της κατά μήκος της κοίτης του ποταμού Γεροπόταμου. Στο κέντρο του αλλουβιακού υδροφορέα και σε όλη την κοίτη του ποταμού, η ειδική εκφόρτιση προσδιορίστηκε να είναι 40-100 m<sup>3</sup>/h ανά μέτρο της πτώσης του επιπέδου των υπογείων υδάτων. Στο ανατολικό μέρος της λεκάνης, η τιμή μειώνεται στο 15-70 m<sup>3</sup>/h. Η πλευρική υπόγεια εκροή από την κοιλάδα είναι μικρή σε σχέση με την κατακόρυφη εκροή.



Διάγραμμα 1: Κατακρήμνιση, επίπεδο υπογείων υδάτων και ρυθμός άντλησης τα έτη 1980-2010 (Varouchakis 2015).

Οι υψηλότερες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι συγκεντρωμένες στη λεκάνη των Μοιρών, όπου αυτές ποικίλλουν μεταξύ των 10-120 m/day, αντανakλώντας την παρουσία αρκετών οριζόντων χαλικιού και άμμου στην αλλουβιακή ακολουθία. Λόγω της περαιτέρω μείωσης του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) που είχαν υπολογιστεί στη δεκαετία του 1980 έχουν μειωθεί. Έτσι, δεδομένου των πρόσφατων τιμών μεταφορικότητας (T), οι οποίες αποκτήθηκαν από δοκιμές άντλησης που έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του 2000 στις Μοίρες από τοπικές αρχές σε τέσσερα πηγάδια άντλησης και σε εκτίμηση του πρόσφατου πάχους του υδροφορέα (b), νέες τιμές K μπορούν να υπολογιστούν μέσω της ισότητας  $T = K b$ .

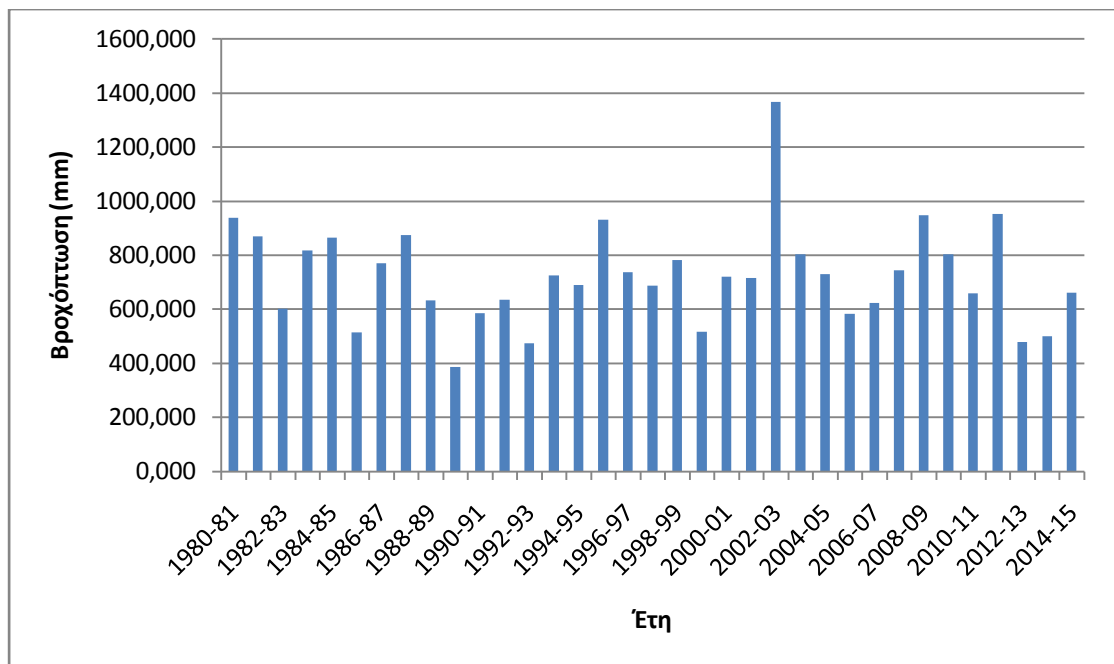
Το πορώδες μειώνεται με το βάθος κάτω από την επιφάνεια σε ένα εύρος 0,05-0,12 (Croke et al. 2000), ενώ το ενεργό πορώδες, το οποίο είναι το ποσοστό των πόρων (διασυνδεδεμένο) που είναι διαθέσιμοι για τη ροή του ρευστού (Bear 1979), έχει προσδιοριστεί ότι είναι 0,085 στη λεκάνη των Μοιρών (Kilili-Polychronaki 2001). Η

ταχεία μείωση του επιπέδου των υπογείων υδάτων έχει επηρεάσει τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Μια εκτίμηση της ελάττωσης του επιπέδου αυτού με αντίκτυπο στις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα, έδειξε μια μείωση στη μεταφορικότητα κυρίως επειδή το πάχος της κορεσμένης ζώνης έχει αλλάξει (Kilili-Polychronaki 2001; Donta et al. 2006).

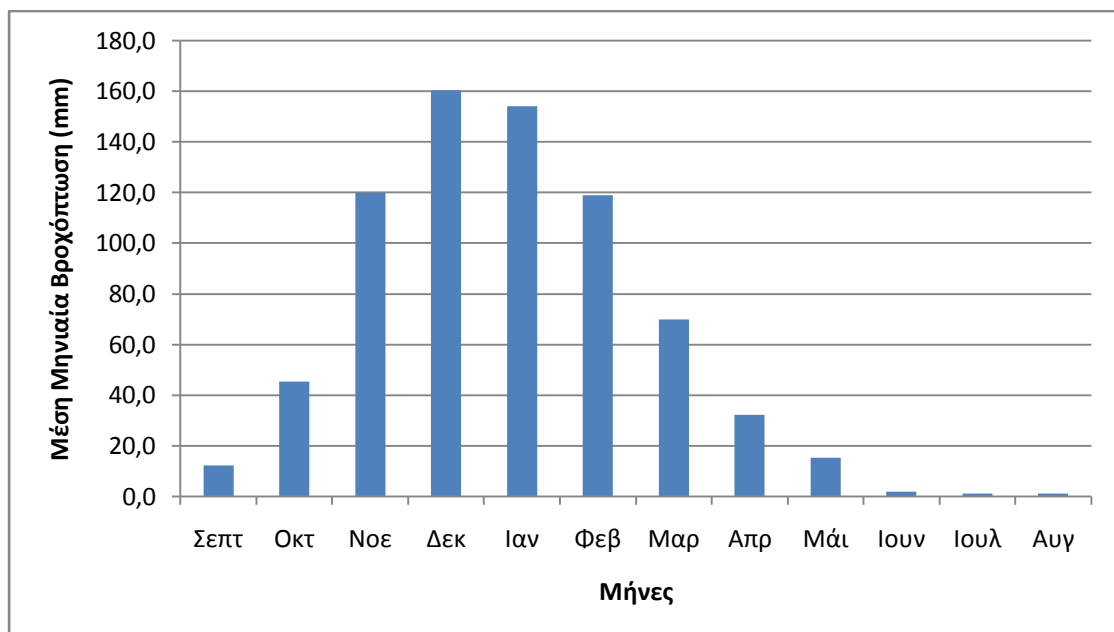
Ο υδροφορέας της λεκάνης χαρακτηρίζεται σύμφωνα με υδρογεωλογικές εκθέσεις ως μη περιορισμένος (Kilili-Polychronaki 2001; Donta et al. 2006), και παρακολουθείται αραιά ως προς το επίπεδο των υπογείων υδάτων. Οι συντελεστές αποθήκευσης των υδροφορέων, που λαμβάνονται από τις δοκιμές άντλησης του FAO (1972), σε συνδυασμό με τη συμπεριφορά του υδροφόρου ορίζοντα υποδηλώνουν ότι, αν και ετερογενής και τοπικά περιορισμένος, ο υδροφορέας συμπεριφέρεται σε περιφερειακή κλίμακα ως μια μη περιορισμένη μονάδα (Donta et al. 2006).

## 2.5 Υδρολογικά χαρακτηριστικά

Το υδρολογικό έτος της Μεσσαράς μπορεί να διαιρεθεί σε υγρή και ξηρή εποχή. Περίπου το 40% της κατακρήμνισης συμβαίνει στους μήνες Δεκέμβρη και Ιανουάριο καθώς από τον Ιούνιο έως τον Αύγουστο υπάρχει αμελητέα βροχόπτωση. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην πεδιάδα της Μεσσαράς ήταν γύρω στα 650 mm μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990, αλλά τελευταία έχει μειωθεί στα 625 mm. Σύμφωνα με μια μελέτη, περίπου 65% της βροχόπτωσης χάνεται στην εξατμισοδιαπνοή και 10% ως απορροή στη θάλασσα, αφήνοντας μόνο ένα 25% για επαναφόρτιση του υπόγειου υδροφορέα (Croke et al. 2000). Η βροχόπτωση αυξάνεται με το υψόμετρο από περίπου 500 mm στην πεδιάδα της Μεσσαράς έως περίπου 800 mm στις πλαγιές της κοιλάδας, 1100 mm στο βουνό της Αστερουσίας και πάνω από 2000 mm στο βουνό Ίδα. Κατά τη διάρκεια της προαναφερθείσας περιόδου, το πιο ξηρό καταγεγραμμένο υδρολογικά έτος ήταν 1989-1990 (386 mm), ενώ το πιο υγρό έτος ήταν 2002-2003 (1365 mm). Οι πτωτικές τάσεις της κατακρήμνισης και προαναφερθείσες πληροφορίες όσον αφορά την αλλαγή της μέσης ετήσιας κατακρήμνισης μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990, υποδηλώνουν μια μείωση στο μέσο όρο κατακρήμνισης της κοιλάδας. Η ταξινόμηση των ξηρών και υγρών ετών στην λεκάνη της Μεσσαράς μπορεί να καθοριστεί μέσω μιας στατιστικής διαδικασίας η οποία περιλαμβάνει το 25<sup>ο</sup> και 75<sup>ο</sup> εκατοστημόριο των μετρημένων τιμών. Έτσι, το 25<sup>ο</sup> εκατοστημόριο της ετήσιας τιμής κατακρήμνισης είναι ίσο με 602 mm και το 75<sup>ο</sup> είναι ίσο με 816 mm. Συνεπώς, οχτώ υδρολογικά έτη χαρακτηρίζονται ως ξηρά (<602 mm) και εννιά χρόνια ως υγρά (>816 mm). Ωστόσο, τέσσερις από τις οχτώ τιμές των ξηρών ετών είναι κοντά στην χαμηλότερη τιμή για ξηρά έτη αλλά και μόνο δύο από τις οχτώ τιμές για υγρά έτη είναι κοντά στη μέγιστη τιμή. Αυτή είναι μια ένδειξη της πτωτικής τάσης της μέσης ετήσιας κατακρήμνισης.



Διάγραμμα 2α: Μέση ετήσια βροχόπτωση στην κοιλάδα της Μεσσαράς

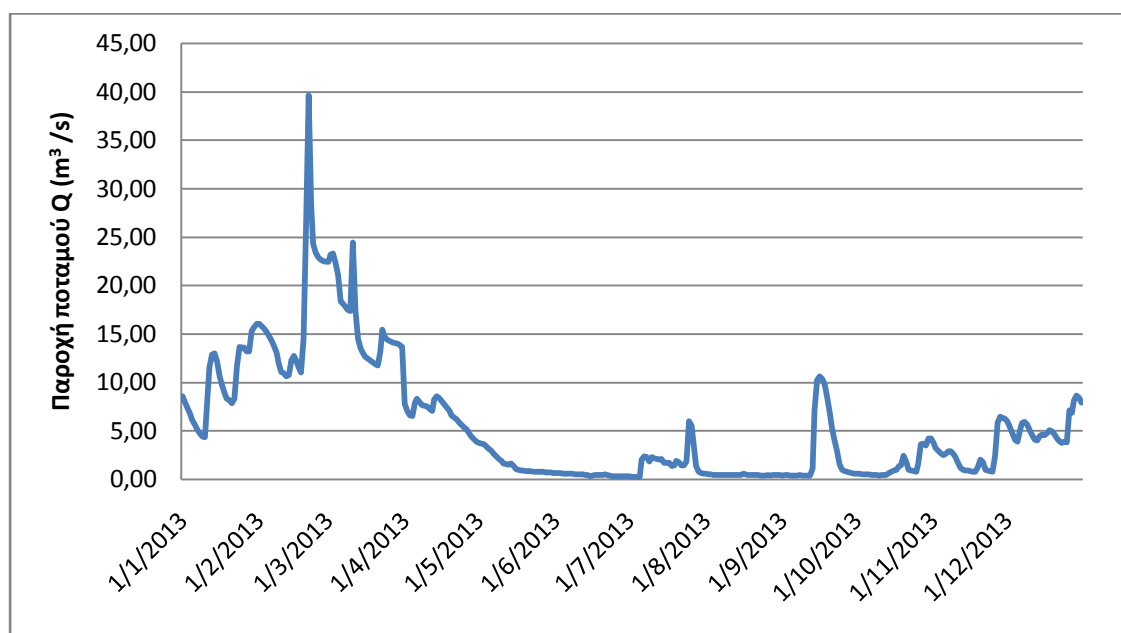


Διάγραμμα 2β: Μέση μηνιαία βροχόπτωση στην κοιλάδα της Μεσσαράς

Η μέση χειμερινή θερμοκρασία είναι 12° C ενώ η μέση καλοκαιρινή είναι 28° C. Η σχετική υγρασία είναι περίπου 70% το χειμώνα και 60% το καλοκαίρι (Tsanis et al. 2011). Η εξάτμιση εκτιμάται στα 1500 ± 300 mm το χρόνο καθώς οι άνεμοι είναι κυρίως βορειοδυτικοί. Η πιθανή εξάτμιση εκτιμάται στα 1300 mm το χρόνο, ρυθμίζοντας έτσι και την αναλογία της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης προς την πιθανή εξάτμισης περίπου στο 0,5. Αυτό φανερώνει την ταξινόμηση σε ξηρό ύφυγρο, σύμφωνα με τους ορισμούς της Σύμβασης των Ηνωμένων Εθνών για την καταπολέμηση της Ερημοποίησης (United Nations Convention on Desertification,

UNCED 1994; Croke et al. 2000; Tsanis and Apostolakis 2009). Το υψόμετρο της πεδιάδας στις Μοίρες είναι λιγότερο από 300 m, αν και η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι όμοια με τον μέσο όρο στη λεκάνη. Συγκεκριμένα για τη λεκάνη των Μοιρών, η πιο πρόσφατη υδρογεωλογική μελέτη (Kilili-Polychronaki 2001) εκτίμησε την εξατμισοδιαπνοή στο 82% της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, τη διήθηση στο 18% και την επιφανειακή απορροή ως αμελητέα.

Η κύρια εκροή της λεκάνης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι ο ποταμός Γεροπόταμος στη στένωση της Φαιστού στα δυτικά. Στη φυσική του κατάσταση, ο Γεροπόταμος έρεε συνεχώς και συντηρούσε έναν υγρότοπο κοντά στην εκροή της λεκάνης. Η πτώση του επιπέδου των υπογείων υδάτων είχαν ως αποτέλεσμα τη ξήρανση του υγρότοπου και την απουσία ροής στο ποτάμι κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου των υδρολογικών ετών 1989-1990 καθώς και κατά τη διάρκεια όλης της περιόδου 1992-1993 (Donta et al. 2006). Επιπλέον, κατά την τελευταία περίοδο που αναφέρθηκε, δεν υπήρχε εκροή του ποταμού από την κοιλάδα, παρά μόνο μια μικρή ροή μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των 1999-2000 και 2004-2007. Σύμφωνα με πρόσφατες πληροφορίες και μετρήσεις στην περιοχή, η ροή στο Γεροπόταμο το έτος 2013 μας δίνεται ότι μεταβάλλεται σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 3: Ημερήσια παροχή ποταμού Γεροπόταμου για το έτος 2013

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, η ροή του ποταμού μειώνεται εξαιρετικά τους θερινούς μήνες και ανεβαίνει στο μέγιστο σημείο της το μήνα Φεβρουάριο.

Τα ποσοστά άντλησης υπογείων υδάτων στη λεκάνη των Μοιρών ποικίλει από 20 έως 400 m<sup>3</sup>/h πριν ξεκινήσει η εκτεταμένη εκμετάλλευση του υδροφορέα, καθώς τα ποσοστά άντλησης συσχετίζονται με τους υδρογεωλογικούς σχηματισμούς. Ο

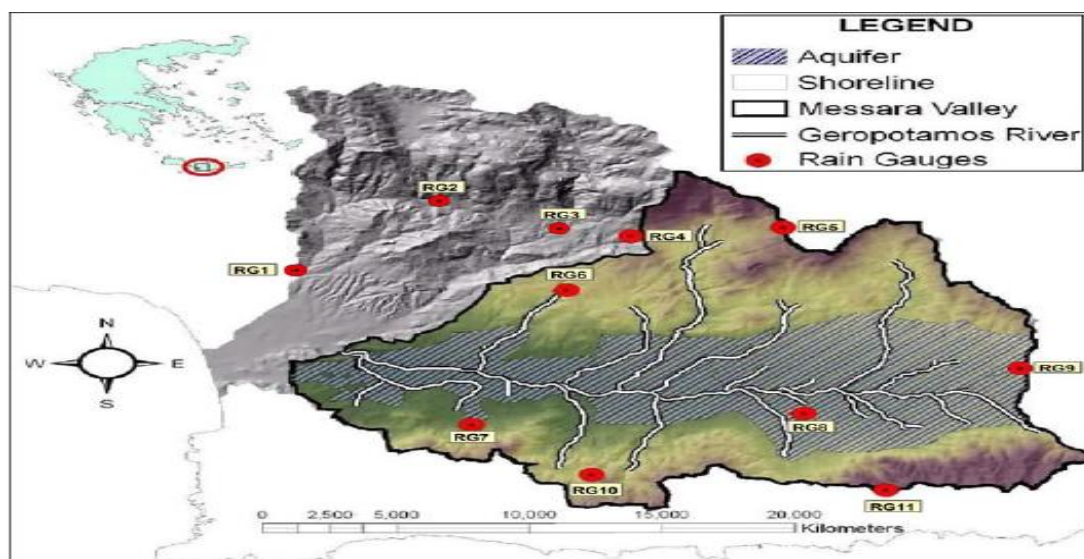
αριθμός των γεωτρήσεων στα τέλη της δεκαετίας του 1970 σε ολόκληρη την κοιλάδα ήταν 26. Ο μέσος όρος του ποσοστού άντλησης στο κέντρο της λεκάνης σε όλη τη ρίζα του Γεροπόταμου είναι  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  και το επίπεδο των υπογείων υδάτων είναι λιγότερο από 10 μέτρα κάτω από την επιφάνεια. Στο ανατολικό μέρος, κοντά στο Ληθαίο ποταμό, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα είναι όμοιο αλλά τα ποσοστά άντλησης ποικίλουν σε  $20\text{-}40 \text{ m}^3/\text{h}$  από τα νότια στα βόρεια.

Το 1970, δύο συστήματα άρδευσης κατασκευάστηκαν στην περιοχή ως πρωτότυπα για ένα μελλοντικό εκτεταμένο δίκτυο (FAO 1972). Οι μετρήσεις έδειξαν ότι το επίπεδο εκείνη τη χρονική στιγμή ήταν περίπου 5 m κάτω από την επιφάνεια και το μέγιστο ποσοστό μείωσης ήταν  $5 \text{ mm}^3$  το χρόνο. Το 1984 ένα εκτεταμένο δίκτυο σταθμών άρδευσης υπόγειων υδάτων εγκαταστάθηκε στην κοιλάδα της Μεσσαράς, προκαλώντας μια αύξηση στο ποσοστό μείωσης του υπόγειου νερού και μια δραματική πτώση του υδροφόρου ορίζοντα. Επιπρόσθετα, η διαδοχική εμφάνιση ξηρών ετών τη δεκαετία του 1990 έχει οδηγήσει σε πιο έντονη αρδευτική δραστηριότητα ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις τις περιοχής. Ως αποτέλεσμα, το έτος 2000 το επίπεδο του υπόγειου νερού ήταν 45 m κάτω από την επιφάνεια.

Σύμφωνα με το δίκτυο που προαναφέρθηκε, εκτιμάται ότι κατά μέσο όρο περίπου  $40 \text{ Mm}^3$  ( $22 \text{ Mm}^3$  στη λεκάνη των Μοιρών) αντλούνται τώρα το χρόνο. Πριν την εγκατάσταση του συστήματος άντλησης των υπογείων υδάτων, λιγότερο από  $10 \text{ Mm}^3$  το χρόνο αντλούνταν, κατά μέσο όρο η αποφόρτιση της κοιλάδας ήταν περίπου  $20 \text{ Mm}^3$  το χρόνο, δεδομένου ότι τα 50 mm της ετήσιας βροχόπτωσης χάνονται ως απορροή στη θάλασσα. Εκτιμάται, επίσης, ότι η ετήσια επαναφόρτιση της αποθήκης του υπόγειου νερού ήταν περίπου  $60 \text{ Mm}^3$  το χρόνο (150 mm) και οι απώλειες εξατμισοδιαπνοής ήταν περίπου  $160 \text{ Mm}^3$  το χρόνο (400 mm). Στις μέρες μας, η επιφανειακή απορροή και οι παροχές των υπόγειων υδάτων μειώνονται γρήγορα (Donta et al. 2006; Kritsotakis 2010). Ο μεγάλος αριθμός των λειτουργικών γεωτρήσεων και υπερεκμετάλλευσης είναι υπεύθυνα για αυτήν την τάση. Μια πρόσφατη δημοσίευση αναφέρει ότι 1400 πηγάδια ήταν ενεργά το 2007 στην κοιλάδα της Μεσσαράς (Kritsotakis and Tsanis 2009).

Το βροχομετρικό δίκτυο της λεκάνης του Γεροποτάμου αποτελείται από έντεκα σταθμούς βροχόπτωσης (τα δεδομένα ήταν διαθέσιμα από την Ελληνική Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία) και έξι τυπικά πηγάδια για τη μέτρηση του επιπέδου των υπογείων υδάτων, όπου τα επίπεδα αυτά μετριοούνται δύο φορές το χρόνο (στην αρχή και στο τέλος της περιόδου βροχόπτωσης). Η βροχόπτωση μετريέται με το βροχόμετρο ως όργανο μέτρησης και κάθε σταθμός αφορά μια υδρολογική λεκάνη, αναγράφοντας την περίοδο λειτουργίας της και τις συντεταγμένες της. Οι έντεκα σταθμοί που μελετήσαμε τα βροχομετρικά δεδομένα τους βρίσκονται στην περιοχή του Γεροπόταμου στο Ηράκλειο, και πιο συγκεκριμένα, είναι οι σταθμοί στις περιοχές Αγία Βαρβάρα, Άγιος Κύριλλος, Ασήμι, Βαγιωνιά, Βόριζια, Γέργερη, Ζαρός,

Καπετανιανά, Λαγόλιο, Μορόνι και Πόμπια (Tsanis and Apostolakis 2009). Από τα ημερήσια δεδομένα των σταθμών που αναφέρθηκαν προέκυψαν τα ετήσια δεδομένα με το σύνολο των βροχοπτώσεων για κάθε έτος και για κάθε σταθμό. Επίσης, υπολογίστηκε ο ετήσιος Μέσος Όρος της βροχόπτωσης της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 3: Περιοχή Μελέτης, Κοιλάδα Μεσσαράς, Κρήτη και χωροθέτηση των 11 βροχομετρικών σταθμών, RG1 Λαγόλιο, RG2 Βόριζια, RG3 Ζαρός, RG4 Γέργερη, RG5 Αγία Βαρβάρα, RG6 Μορόνι, RG7 Πόμπια, RG8 Βαγιωνιά, RG9 Ασήμι, RG10 Άγιος Κύριλλος, RG11 Καπετανιανά (Tsanis and Apostolakis 2009).

### 3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ BAYES RISK

Στην παράγραφο αυτή, γίνεται μια εκτίμηση για τις αποφάσεις που θα ληφθούν στο ενδεχόμενο κατασκευής ή μη ενός ταμιευτήρα, μέρος ενός συστήματος διαχείρισης των υδατικών πόρων.

#### 3.1 Εισαγωγικές έννοιες στη Θεωρία Λήψης Αποφάσεων

Θεωρούμε ότι αντιμετωπίζουμε ένα πρόβλημα απόφασης όταν, από ένα σύνολο δυνατών εναλλακτικών προτάσεων (λύσεων, πορειών), καλούμαστε να επιλέξουμε μια – τη “βέλτιστη”. Ο χαρακτηρισμός της βέλτιστης λύσης προκύπτει μέσα από καθορισμένα κριτήρια. Ως απόφαση χαρακτηρίζουμε την τελική επιλογή, αν και συχνά οι εναλλακτικές λύσεις ή πορείες αναφέρονται και ως εναλλακτικές αποφάσεις. Μια απόφαση θεωρείται κομμάτι γνώσης καθώς η λήψη μιας απόφασης είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα της σύνθεσης και επεξεργασίας

πληροφορίας και γνώσης για την παραγωγή νέας γνώσης (Holsapple & Whinston, 1996).

Κάθε απόφαση (παρόν) στηρίζεται σε δεδομένα (παρελθόν) και ακολουθείται από επακόλουθα (μέλλον). Δεδομένης της απόφασης, μπορεί τα επακόλουθα να είναι βέβαια ή αβέβαια ή άγνωστα. Γενικά, σε κάθε εναλλακτική απόφαση αντιστοιχεί ένα επακόλουθο (αποτέλεσμα) ή ένας αριθμός πιθανών επακόλουθων (ενδεχομένων αποτελεσμάτων). Η απόφαση, ως δράση, δημιουργεί αποτέλεσμα. Αν σε κάθε εναλλακτική απόφαση αντιστοιχούσε με βεβαιότητα ένα συγκεκριμένο επακόλουθο, τότε η βέλτιστη απόφαση θα ήταν εκείνη με το βέλτιστο επακόλουθο. Πολλές φορές, όμως, όχι μόνο μπορεί να ανακύψουν δύο ή περισσότερα πιθανά επακόλουθα από μια επιλογή (το καθένα με τη δική του πιθανότητα), αλλά ανάλογα με το τυχαίο επακόλουθο που θα συμβεί, μπορεί να ανακύψουν και νέα προβλήματα αποφάσεων.

Ένα απαραίτητο στοιχείο στη διαδικασία λήψης απόφασης είναι η λογική ανάλυση (η οποία δεν αποκλείεται να είναι υποκειμενική) των δυνατών εναλλακτικών αποφάσεων και των επακόλουθών τους. Έτσι, λοιπόν, ένας στόχος της Θεωρίας Αποφάσεων είναι να προσφέρει στον αναλυτή κατάλληλα εργαλεία για προσδιορισμό λογικών και ορθολογικών σταθμίσεων (βαθμών σημαντικότητας) στα επακόλουθα των εναλλακτικών πορειών, ώστε να μπορεί να γίνει “αντικειμενική” επιλογή. Το κατά πόσον υπάρχει ορθολογισμός (δηλαδή αντικειμενικότητα και συνέπεια) στη διαδικασία λήψης αποφάσεων είναι ζητούμενο. Αυτό συμβαίνει για τέσσερις κυρίως λόγους. Πρώτον, οι αποφάσεις αφορούν το μέλλον το οποίο είναι αβέβαιο. Δεύτερον, είναι δύσκολο να βρεθούν όλες οι εναλλακτικές λύσεις ενός προβλήματος. Τρίτον, είναι δύσκολο να αναλυθεί αρκούντως κάθε εναλλακτική λύση. Τέταρτον, η πληροφόρηση που χρειάζεται εκείνος που λαμβάνει την τελική απόφαση είναι σχεδόν πάντοτε ατελής, και επίσης δεν επαρκούν ο χρόνος και τα χρήματα που πρέπει να διατεθούν.

Κάθε διαδικασία λήψης αποφάσεων χαρακτηρίζεται από:

- Τα χαρακτηριστικά αυτού που λαμβάνει την απόφαση, και συγκεκριμένα αν πρόκειται για ένα ή για πολλά άτομα και το σύστημα των αξιών του, που υποδηλώνει τις προτεραιότητές του και τα κριτήρια επιλογής. Στην περίπτωση πολυπρόσωπου φορέα λήψης απόφασης, κάθε άτομο ενδέχεται να έχει το δικό του σύστημα αξιών. Οι πολυπρόσωπες αποφάσεις διαχωρίζονται ανάλογα με το αν υπάρχει κοινός στόχος (θεωρία ομάδων) ή συγκρουόμενοι στόχοι (θεωρία παιγνίων).

- Το αν και πως αναδεικνύονται εναλλακτικές πορείες ή λύσεις (πρόβλημα περιορισμένων πληροφοριών). Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την ποσότητα και ποιότητα των πληροφοριών που διαθέτει ο αναλυτής και κατ' επέκταση τη διαμόρφωση των εναλλακτικών αποφάσεων. Αυτοί οι παράγοντες είναι α) η εκπαίδευση, ικανότητα και εμπειρία του αναλυτή, β) το επίπεδο ανάπτυξης της τεχνολογίας, γ) οι διαθέσιμοι πόροι και ο χρόνος για ανάλυση του προβλήματος και τη συλλογή και ανάλυση πληροφοριών.
- Το βαθμό ελευθερίας στην ανάδειξη και επιλογή των εναλλακτικών αποφάσεων
- Το βαθμό βεβαιότητας (ή αβεβαιότητας) στη συσχέτιση της απόφασης με το επακόλουθο, του αιτίου με το αιτιατό (ύπαρξη τυχαίων φαινομένων).

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων αποτελείται από δύο βασικά στάδια: α) το στάδιο εκτίμησης της κατάστασης πραγματικότητας και β) το στάδιο λήψης αποφάσεων. Για την εκτίμηση της κατάστασης της πραγματικότητας ακολουθείται η εξής διαδικασία: Αρχικά, απαριθμούνται οι πιθανές καταστάσεις πραγματικότητας  $\theta_k$  και έπειτα καθορίζονται οι αντίστοιχες προγενέστερες πιθανότητες  $P(\theta_k|I)$  για οποιαδήποτε πληροφορία που υπάρχει για τις  $\theta_k$ . Στη συνέχεια, καθορίζουμε τις δειγματολογικές πιθανότητες  $P(z_M|\theta_k)$ , οι οποίες αντιπροσωπεύουν οποιαδήποτε προγενέστερη γνώση υπάρχει σχετικά με το μηχανισμό των μετρήσεων, ο οποίος παράγει τις μετρήσεις  $z_M$ . Τέλος, εφαρμόζεται το Θεώρημα του Bayes και λαμβάνουμε τις μεταγενέστερες πιθανότητες  $P(\theta_k|z_M, I)$ .

Η Στατιστική Θεωρία Αποφάσεων (Statistical Decision Theory) ασχολείται με την λήψη αποφάσεων, βασισμένη στη στατιστική γνώση που προκύπτει από δειγματοληπτική έρευνα και προσδιορίζει ορισμένες αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στο υπό ανάλυση πρόβλημα της λήψης αποφάσεων.

### 3.2 Στατιστική Θεωρία Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, θα χρησιμοποιηθεί η Στατιστική Θεωρία Αποφάσεων του Bayes διότι χρησιμοποιεί ταυτόχρονα τη χρήση στατιστικής πληροφορίας και ποιοτικής πληροφορίας για τη λήψη των αποφάσεων, ενώ συνδυάζει τη στατιστική με το οικονομικό κόστος μέσω της κατασκευής της Συνάρτησης Απώλειας (Loss Function) ή Χρησιμότητας (Utility Functions). Ως ποιοτική πληροφορία, ορίζεται η μη αυστηρά προσδιοριζόμενη ποσοτική πληροφορία. Τα βασικά στοιχεία της Θεωρίας Λήψης Αποφάσεων είναι α) η εκτίμηση της κατάστασης πραγματικότητας (παράμετρος  $\theta$ ), β) οι πιθανές αποφάσεις (ενέργειες) και γ) η Συνάρτηση Απώλειας που θα προκύψει.

Με την προσέγγιση Bayes, με άλλα λόγια, επιδιώκεται μια γεφύρωση του κενού μεταξύ αποφάσεων με διακινδύνευση και αποφάσεων υπό αβεβαιότητα. Ακόμα και όταν δεν είναι γνωστές οι πιθανότητες, πάντα θα υπάρχει κάποια υπόνοια, υποψία ή διαίσθηση, τουλάχιστον ως προς το αν κάποιο ενδεχόμενο είναι πιο πιθανό από κάποιο άλλο. Να σημειωθεί ότι πρόβλημα λήψης αποφάσεων, με επικινδυνότητα ή διακινδύνευση (Risk) έχουμε όταν η πιθανότητα κάθε εναλλακτικής είναι γνωστή, και ίση με το γινόμενο της πιθανότητας επί τη συνέπεια της απόφασης, ενώ πρόβλημα λήψης αποφάσεων υπό αβεβαιότητα έχουμε όταν οι πιθανότητες αυτές είναι άγνωστες, αλλά θεωρείται ότι ακολουθεί μια συγκεκριμένη κατανομή.

Η μέθοδος κατά Bayes, είναι μια συνεχής επικαιροποίηση ή αναθεώρηση των δεδομένων και των υποθέσεων μας καθώς ανακύπτουν νέα στοιχεία. Είναι μια προσπάθεια ανάλυσης και συνθεώρησης των όποιων νέων στοιχείων προκύπτουν από διάφορες διαδικασίες, οι οποίες είτε γίνονται με εντολή του αρμόδιου για την τελική απόφαση (όπως δοκιμές, έλεγχοι κ.ά.) ή είναι νέες πληροφορίες που ανακύπτουν από τυχαία φαινόμενα. Με τη διαδικασία αυτή, οι αρχικές εκτιμήσεις για τις τιμές των πιθανοτήτων των διάφορων ενδεχομένων συνεχώς βελτιώνονται (με την έννοια ότι στηρίζονται σε επιπρόσθετες πληροφορίες και αποκτούν στατιστική αξιοπιστία, είτε υφίστανται τροποποίηση είτε όχι).

### 3.3 Θεώρημα Bayes

Η πιθανότητα επαλήθευσης μιας αρχικής παραδοχής B για ένα γεγονός, δεδομένου ότι έχουμε μια πληροφορία A για το γεγονός αυτό, δίνεται από το λόγο (ratio) της άνευ συνθήκης (unconditional) πιθανότητάς του να ισχύουν ταυτόχρονα η παραδοχή M και η πληροφορία L, δια της άνευ συνθήκης πιθανότητας μόνο της πληροφορίας L.

Η ανάγκη να χρησιμοποιηθεί και να αποδοθεί ποσοτικά η ποιοτική, προγενέστερη της δειγματοληψίας, πληροφορία δεν είναι αφηρημένη. Κάθε εργαζόμενος μηχανικός γνωρίζει τον κίνδυνο να στηριχθούν οι τεχνικές μελέτες αποκλειστικά και μόνο στις δειγματοληπτικές μετρήσεις πεδίου. Στις περιβαλλοντικές μελέτες οι μετρήσεις είναι συνήθως ελάχιστες σε σχέση με τις ανάγκες προσδιορισμού των πολλαπλών παραγόντων που επιδρούν στην απόδοση ενός τεχνικού έργου.

Η αξιοπιστία των μετρήσεων είναι τις περισσότερες φορές αμφίβολη. Οι μετρήσεις δεν αποκαλύπτουν στοιχεία μόνο του υπό εξέταση φυσικού φαινομένου, αλλά και του τρόπου της τεχνικής που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη και ανάλυση των δειγμάτων. Τώρα η πιθανότητα δεν αποτελεί κάποια φυσική ιδιότητα ενός φαινομένου, η οποία μπορεί να αποκαλυφθεί μετά την επανάληψη πολλαπλών πειραμάτων, αλλά ένα μέτρο του βαθμού της γνώσης μας για το φαινόμενο. Οι

έννοιες υποκειμενική, προγενέστερη και μεταγενέστερη πιθανότητα (π.χ. γνώμη των ειδικών) δεν αντικατοπτρίζουν τίποτε άλλο παρά διαφορετικά στάδια στη γνώση ενός φαινομένου, η οποία μπορεί να περιέχει μετρήσεις ή όχι, και η οποία ανανεώνεται μετά την πρόσληψη καινούριας πληροφορίας.

Συμπερασματικά, η θεωρία του Bayes εφαρμόζεται συνήθως για τη λήψη αποφάσεων με ύπαρξη αβεβαιότητας. Έτσι, πρωτίστως αναπτύχθηκε για τη χρήση επιπρόσθετων πληροφοριών ώστε να μειώνει το ρίσκο των αβέβαιων αποφάσεων. Η θεωρία λήψης αποφάσεων του Bayes ποσοτικοποιεί την απόδοση των διάφορων αποφάσεων χρησιμοποιώντας πιθανότητες και κόστη που συνοδεύουν αυτές τις αποφάσεις. Ο κύριος στόχος είναι να επιλέξει την κατηγορία για την οποία η αναμενόμενη απώλεια είναι η μικρότερη. Το πρόβλημα τίθεται σε πιθανολογικούς όρους και θεωρείται ότι όλες οι σχετικές πιθανότητες είναι άγνωστες. Η πιθανολογική προσέγγιση είναι δυνατή αν οι κατανομές πιθανότητας είναι πράγματι γνωστές, αλλά συχνά δεν είναι αυτό το θέμα. Ένας κοινός τρόπος να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία είναι να εφαρμοστεί η θεωρία λήψης αποφάσεων του Bayes καθιερώνοντας μια προγενέστερη κατανομή για κάθε πιθανή κατάσταση πραγματικότητας.

### 3.4 Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes

Η δομή του μοντέλου λήψης απόφασης, για την επιλογή της βέλτιστης απόφασης, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα, περιλαμβάνει:

1. Τον ορισμό του προβλήματος λήψης αποφάσεων και τον καθορισμό του χώρου των εναλλακτικών λύσεων ή ενεργειών  $A_i$  και των πιθανών καταστάσεων πραγματικότητας κάθε επιλογής  $\theta_i$ .
2. Δημιουργία κατάλληλων συναρτήσεων απώλειας,  $L(A, \theta)$ , για την εκτίμηση των συνεπειών κάθε εναλλακτικής για όλα τα  $A_i$ ,  $\theta_i$  που ανήκουν στο διάστημα  $\Theta \times A$  (ή αντίστοιχα συναρτήσεων χρησιμότητας). Ο όρος "απώλεια" είναι συμβατικός και χρησιμοποιείται στην στατιστική κυρίως.
3. Ανάπτυξη κατανομών πυκνότητας πιθανότητας, ως προγενέστερη πληροφορία, κάνοντας χρήση της εμπειριεχόμενης γνώσης ή πληροφορίας των πιθανών καταστάσεων πραγματικότητας κάθε επιλογής  $\theta_i$ .
4. Συνδυασμό της προγενέστερης πληροφορίας και της συνάρτησης απώλειας μέσα από τη συνάρτηση επικινδυνότητας του Bayes για τη λήψη της βέλτιστης απώλειας. Δηλαδή παίρνουμε την απόφαση η οποία

ελαχιστοποιεί, με κατάλληλα κριτήρια, ένα μέτρο της αναμενόμενης απώλειας για όλες τις μεταγενέστερες πιθανότητες  $\Theta$ .

Το θεώρημα του Bayes χρησιμοποιείται για να ανανεώσει τις προγενέστερες πιθανότητες μετά την καινούρια πληροφορία (τη δειγματοληψία).

### 3.5 Το Θεώρημα Bayes σε περιβαλλοντικά προβλήματα

Με βάση τη μέθοδο Bayes βλέπουμε πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ύπαρξη ιδιαίτερων γεγονότων για την ανανέωση των αρχικών εκτιμήσεων πιθανότητας. Η οπτική αυτή του θεωρήματος Bayes στην εκτίμηση επικινδυνότητας στο περιβάλλον είναι ιδιαίτερα ισχυρή στην προσπάθειά της να αποδείξει την ύπαρξη των πιθανών αιτιών ενός περιβαλλοντικού κινδύνου. Έτσι, μπορεί συνεχώς να αναβαθμίζει τα ενδεχόμενα πλάνα για τις αντίστοιχες θεραπευτικές ενέργειες με βάση την πιο πιθανή αιτία. Επιπρόσθετα, μπορεί να εκτιμήσει την αναγκαιότητα να θέσει τέτοια πλάνα σε μία ενέργεια με βάση τα πραγματικά γεγονότα τα οποία έχουν συμβεί και η χρήση τους αποδεικνύει τις εκτιμήσεις των περαιτέρω καταστροφικών γεγονότων που συμβαίνουν.

Είναι ξεκάθαρο ότι με το θεώρημα Bayes μπορούν να χειριστούν το ίδιο καλά ακόμη και περισσότερα από δύο πιθανά σενάρια. Το κυρίαρχο θέμα είναι να υπάρχει κάποιος εκ των προτέρων τρόπος εκτίμησης της πιθανότητας ενός δεδομένου σεναρίου που θεωρείται σωστό και τότε, μαζί με τον σκελετό του κάθε σεναρίου, να παρέχει μία εκ των προτέρων εκτίμηση ενός ιδιαίτερου τύπου του γεγονότος που συμβαίνει ή δε συμβαίνει. Από τη στιγμή που οι δύο οπτικές του περιβαλλοντικού προβλήματος επικινδυνότητας έχουν διατυπωθεί επαρκώς, τότε είναι ένα σχετικά απλό θέμα να ανανεωθεί η πιθανότητα των περαιτέρω γεγονότων που συμβαίνουν και επίσης να ανανεωθεί η πιθανότητα ότι το δεδομένο σενάριο είναι έγκυρο χρησιμοποιώντας την μέθοδο Bayes.

Είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι, όπως σε όλα τα προβλήματα ανάλυσης επικινδυνότητας, έτσι και στα περιβαλλοντικά θέματα, οι αποφάσεις δεν λαμβάνονται από έναν ορθολογικό και οικονομικά προερχόμενο λήπτη, ο οποίος ίσως είναι απρόθυμος να αναλάβει κινδύνους αλλά διαφορετικά παίρνει αποφάσεις που μεγιστοποιούν την οικονομική του θέση. Ωστόσο, οι αποφάσεις είναι ισχυρά επηρεασμένες από το προφίλ του λήπτη αποφάσεων, δηλαδή η τελική απόφαση είναι καθαρά υποκειμενική. Έτσι, οι ειδικοί διαχείρισης υδάτινων πόρων πρέπει να είναι ενημερωμένοι για την πολυπλοκότητα της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, τη στενή σχέση που υπάρχει ανάμεσα στις τεχνικές εισόδου και τους όρους επικινδυνότητας σε μια ανάλυση λήψης αποφάσεων, καθώς και την μεγάλη

διαφορά οπτικής ανάμεσα στη μεθοδολογία και την αξία των υπολογισμών επικινδυνότητας (Freeze, 2015).

### 3.6 Εφαρμογές Θεωρήματος Bayes

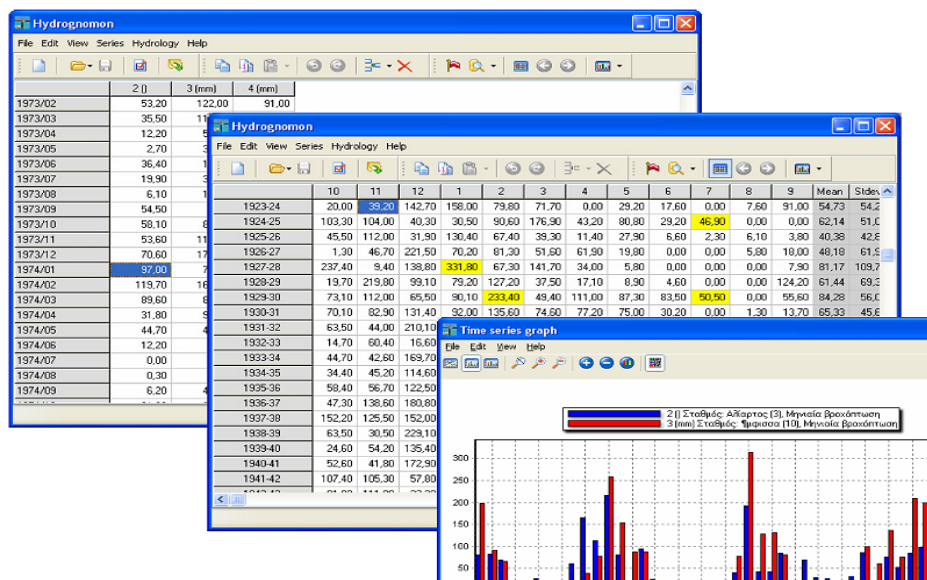
Μια αρχική εφαρμογή της λήψης αποφάσεων κατά Bayes στο πεδίο της υδρολογίας έγινε για την εκτίμηση του κόστους του σχεδιασμού του επιπέδου πλημμυρών ενόψει της αβεβαιότητας στη συχνότητα των πλημμυρών (Davis et al., 1972). Από τότε, έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα, έχει χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει τις βέλτιστες συχνότητες δειγματοληψίας στα υπόγεια νερά (Grosser and Goodman, 1985) και αναλύσεις αποφάσεων στο μηχανικό σχεδιασμό έργων, ροή υπογείων υδάτων και μεταφορά, και δίκτυα παρακολούθησης στα οποία το υδρογεωλογικό περιβάλλον παίζει σημαντικό ρόλο (Freeze et al., 1990). Έχει χρησιμοποιηθεί, επίσης, για να απευθύνει το πρόβλημα της αποδοχής χώρων διάθεσης αποβλήτων κάτω από συνθήκες ατελούς πληροφόρησης (Marin et al., 1989, Medina et al., 1989) και στον μηχανολογικό σχεδιασμό της αναχαίτισης υπόγειων υδάτων στα οποία έχει εντοπιστεί ρυπασμένο πλούμιο (Wijedasa and Kemblowski, 1993). Επιπλέον, έχει χρησιμοποιηθεί για την επιλογή των καλύτερων πειραματικών σχεδιασμών για μοντελοποίηση και διαχείριση υπογείων υδάτων κάτω από συνθήκες αβεβαιότητας (McPhee and Yeh, 2006) και για διερεύνηση της αξίας συλλογής δεδομένων υδραυλικής αγωγιμότητας για την βέλτιστη διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων (Feyen and Gorelick, 2005).

### 3.7 Πρόγραμμα hydrognomon

Το hydrognomon είναι ένα σύστημα βάσης δεδομένων για τη διαχείριση υδρομετεωρολογικών σταθμών και χρονοσειρών. Πιο συγκεκριμένα, είναι μια εφαρμογή ελεύθερου λογισμικού κατάλληλη για την επεξεργασία και ανάλυση των υδρολογικών δεδομένων, κυρίως με τη μορφή χρονοσειρών. Οι κύριες λειτουργίες του περιλαμβάνουν στατιστικές αναλύσεις, πινακοποίηση δεδομένων σε διάφορες μορφές, ανάλυση σε διάφορα χρονικά βήματα από λεπτά μέχρι δεκαετίες ή αιώνες, εργαλεία στατιστικής ανάλυσης για προσαρμογή συναρτήσεων κατανομής, πολυμεταβλητή γραμμική παλινδρόμηση, Monte Carlo, στατιστική πρόγνωση, όμβριες καμπύλες, και τέλος ειδικά εργαλεία για υδρολογικά δεδομένα, όπως υπολογισμοί εξατμισοδιαπνοής, μοντέλο λεκάνης απορροής (μονοδιάστατο), καμπύλες στάθμης – παροχής, κ.ά.

Το «Υδρογνώμων» είναι ένα εργαλείο πληροφορικής για τη διαχείριση και ανάλυση της υδρολογικής πληροφορίας. Έχει κατασκευαστεί πάνω σε τυπική πλατφόρμα

Windows, που βασίζεται σε αρχιτεκτονική client-server. Ο server είναι μια βάση δεδομένων όπου αποθηκεύονται τα υδρολογικά δεδομένα, ενώ διάφοροι σταθμοί εργασίας εκτελούν το πρόγραμμα, έχοντας πρόσβαση σε κοινή πληροφορία. Η ανάκτηση, επεξεργασία και οπτικοποίηση των δεδομένων υποστηρίζεται από πολυγλωσσικό γραφικό περιβάλλον εργασίας. Η διαχείριση των δεδομένων βασίζεται στη γεωγραφική οργάνωση οντοτήτων όπως μετρητικοί σταθμοί, λεκάνες απορροής και ταμιευτήρες. Σε κάθε οντότητα αντιστοιχούν χρονοσειρές, φυσικές ιδιότητες, υπολογιστικές παράμετροι, οπτικοακουστικό υλικό, κτλ. Η κύρια ενότητα της ανάλυσης υδρολογικών δεδομένων περιλαμβάνει εφαρμογές επεξεργασίας χρονοσειρών, όπως συνάθροιση και κανονικοποίηση χρονικού βήματος, παρεμβολή, ανάλυση παλινδρόμησης και συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών, ελέγχους συνέπειας, φιλτράρισμα δεδομένων, οπτικοποίηση χρονοσειρών με χρήση γραφημάτων και πινάκων, κτλ. Το πρόγραμμα υποστηρίζει ακόμη εξειδικευμένες υδρολογικές εφαρμογές, στις οποίες περιλαμβάνονται μοντέλα εξατμισοδιαπνοής, κατασκευή καμπυλών στάθμης-παροχής, έλεγχοι ομοιογένειας, ανάλυση υδατικού ισοζυγίου, κτλ. Η στατιστική ενότητα παρέχει εργαλεία για ανάλυση δειγμάτων, συναρτήσεις κατανομής, στατιστική πρόγνωση, προσομοίωση Monte-Carlo, ανάλυση ακραίων γεγονότων και κατασκευή όμβριων καμπυλών. Μια τελευταία ενότητα περιλαμβάνει ένα συγκεντρωτικό υδρολογικό μοντέλο, με εναλλακτικές διαμορφώσεις, που επιπλέον υποστηρίζεται από διαδικασίες αυτόματης βαθμονόμησης.



Με βάση τα βροχομετρικά δεδομένα των έντεκα σταθμών, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, της περιοχής μελέτης για τα έτη 1980-2015, τοποθετήθηκαν οι ετήσιες μετρήσεις κάθε σταθμού καθώς και ο ετήσιος μέσος όρος της βροχόπτωσης της περιοχής μελέτης. Αναλυτικά παρουσιάζεται στη συνέχεια.

#### 4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ BAYES RISK

##### 4.1 Το πρόβλημα

Εξετάζεται το ενδεχόμενο κατασκευής ενός ταμιευτήρα, το νερό του οποίου προορίζεται για άρδευση, ή η εφαρμογή μιας πολιτικής διαχείρισης των υπόγειων υδάτινων πόρων κάτω από όρους κλιμακωτών προστίμων όταν ο υδροφόρος ορίζοντας εξαντλείται κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Η διερεύνηση θα γίνει στην περιοχή των Μοιρών, και συγκεκριμένα στην κοιλάδα της Μεσσαράς στο Ηράκλειο Κρήτης, όπου το ανεκτό όριο επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα έχει καθοριστεί από τις τοπικές αρχές στα 38 m πάνω από τη θάλασσα. Στην κατάληξη της τελικής απόφασης θα συμπεριληφθούν τα βροχομετρικά δεδομένα αλλά και οι στάθμες νερού του υδροφορέα.

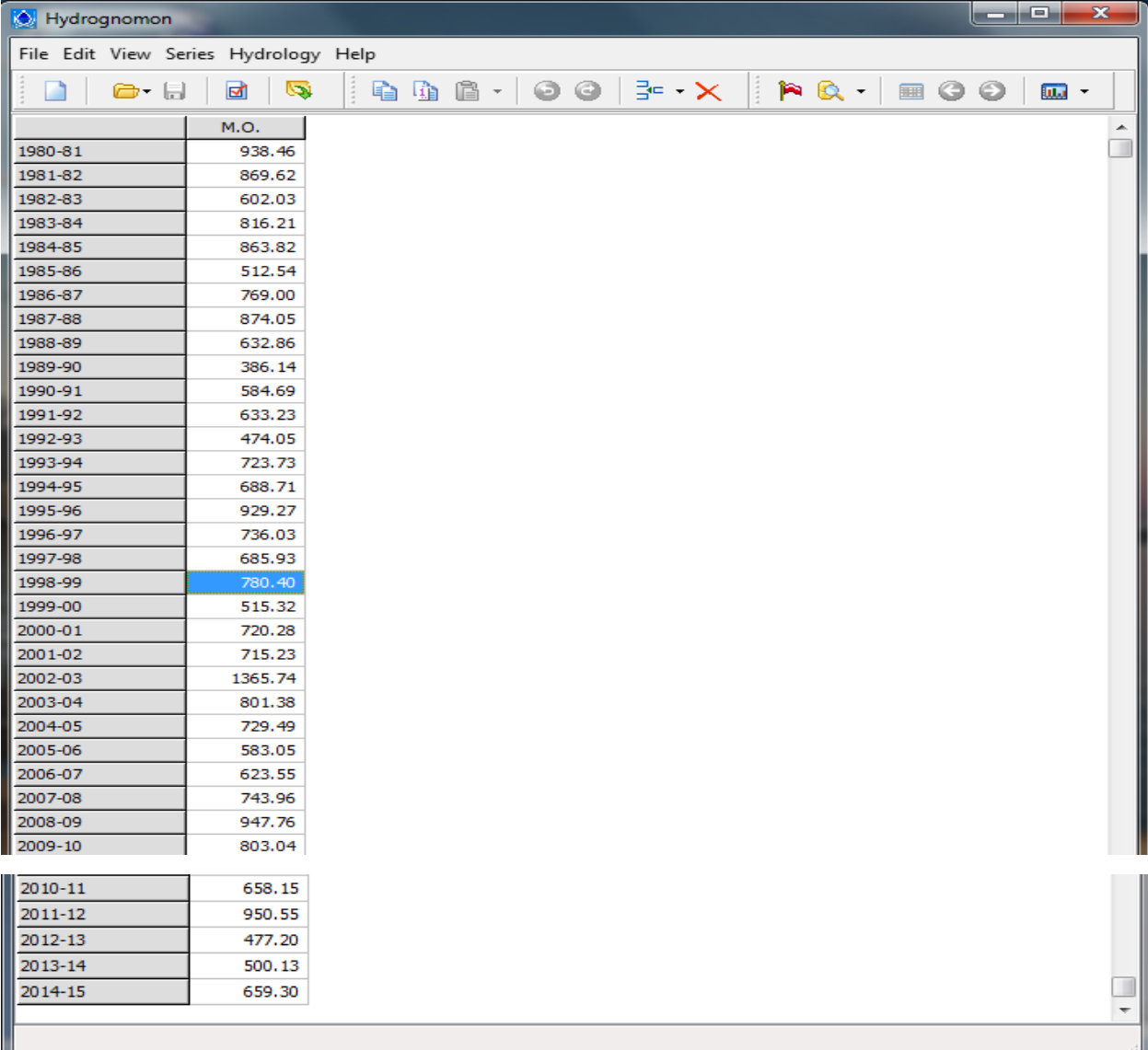
Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, τα οποία έχουν υπολογιστεί σε μέση ετήσια βροχόπτωση από τις μετρήσεις κάθε σταθμού της περιοχής, διαμορφώνονται τα εξής σενάρια: α) Κατασκευή ή μη του ταμιευτήρα λαμβάνοντας υπόψη τις υπεραντλήσεις του υδροφορέα και τα αντίστοιχα πρόστιμα που καλούνται να πληρώσουν οι υπεύθυνοι. Στο σενάριο αυτό ως προγενέστερη πληροφορία λαμβάνεται από τα δεδομένα της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. β) Πόσο μπορούμε να περιμένουμε για την κατασκευή του ταμιευτήρα με στόχο την πλήρη κάλυψη των αναγκών της περιοχής, ώστε να αποφευχθεί η υπεράντληση του υδροφορέα. Στη συνέχεια, όσον αφορά το επιπλέον κόστος στην περίπτωση που ο ταμιευτήρας δεν αποταμιεύει το επιθυμητό νερό, υπάρχουν τρεις εκδοχές: α) Η σύνδεση του ταμιευτήρα με αγωγό από το Ηράκλειο για την μεταφορά του νερού που χρειάζεται, β) Η χρήση νερού από το Βιολογικό Καθαρισμό της περιοχής, η οποία πραγματοποιεί τριτοβάθμια επεξεργασία στα λύματά της με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση, γ) Η παράλληλη άντληση του υδροφορέα ως συμπλήρωμα, χωρίς όμως να ασκείται υπεράντληση.

##### 4.2 Στατιστική ανάλυση

Αρχικά, με βάση τα βροχομετρικά δεδομένα των έντεκα σταθμών της Μεσσαράς για όλα τα έτη λειτουργίας τους, βρέθηκε ο μέσος όρος βροχόπτωσης κάθε έτους. Δηλαδή με δεδομένη την ετήσια συνολική βροχόπτωση κάθε σταθμού, υπολογίστηκε ο ετήσιος μέσος όρος βροχόπτωσης για την περιοχή μελέτης. Οι μετρήσεις των σταθμών ξεκινούν από το 1965 περίπου, όμως συστηματικά η περιοχή παρακολουθείται από το 1980 και μετά.

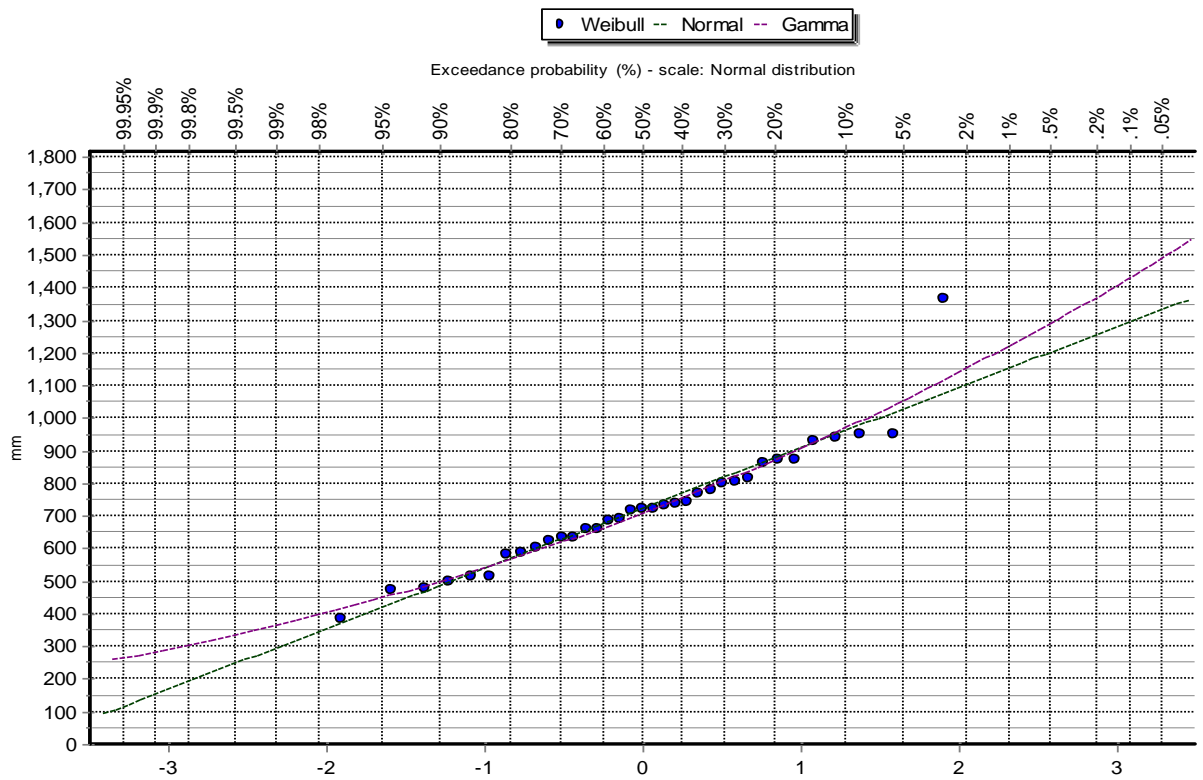
Στη συνέχεια, με τη μέθοδο που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, προσδιορίζονται τα υγρά και ξηρά έτη αυτής της περιόδου. Υγρά έτη, λοιπόν, χαρακτηρίζονται εκείνα που η ετήσια βροχόπτωσή τους ξεπερνά τα 816 mm και ξηρά εκείνα που η ετήσια βροχόπτωσή τους είναι μικρότερη των 602 mm. Έτσι, βρέθηκαν 9 υγρά έτη και 8 ξηρά κατά την περίοδο 1980-2015.

Ο μέσος όρος βροχόπτωσης των ετών αυτών για κάθε σταθμό τοποθετήθηκε στο πρόγραμμα hydrognomon για την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων. Επίσης, πραγματοποιήθηκε προσαρμογή κατανομών και εύρεση των αντίστοιχων παραμέτρων τους. Στη συνέχεια φαίνεται η στατιστική ανάλυση για τα δεδομένα του ετήσιου μέσου όρου βροχόπτωσης για την περιοχή μελέτης τα έτη 1980-2015.

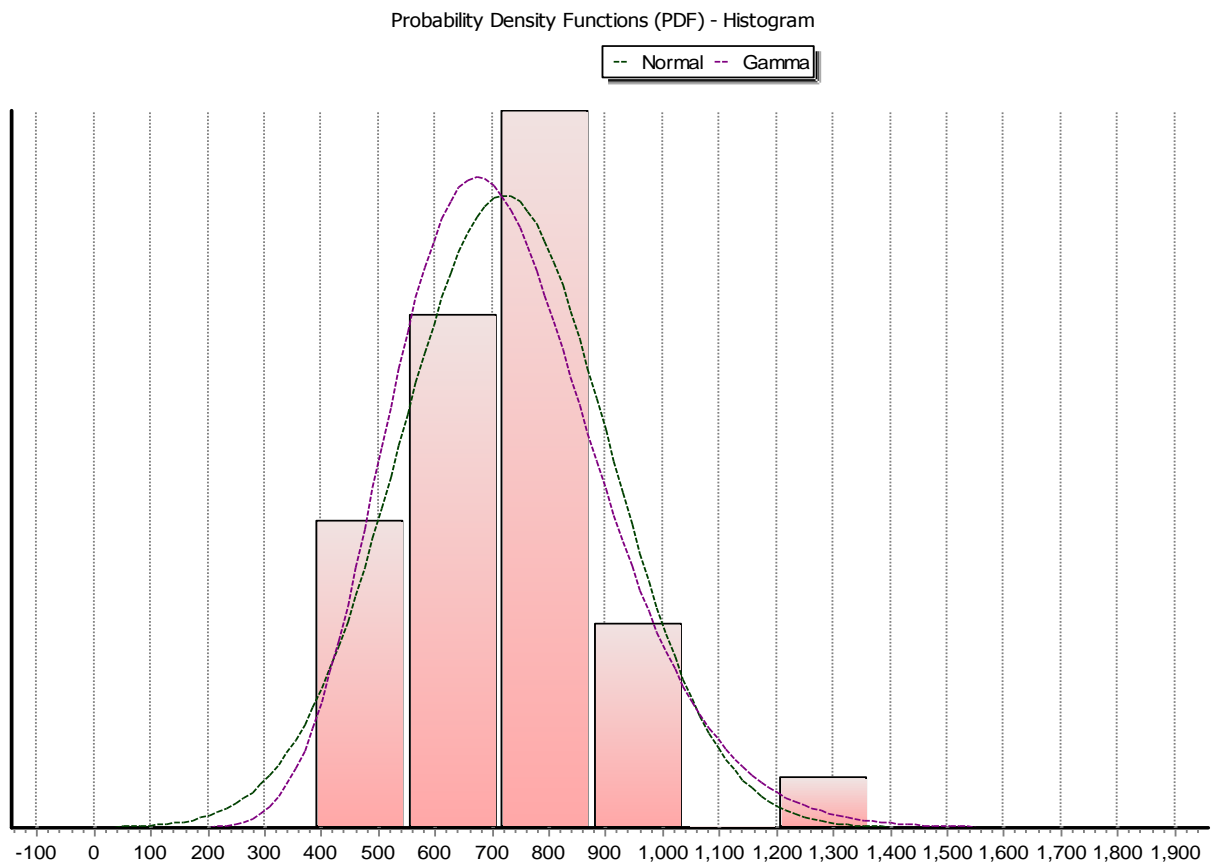


	M.O.
1980-81	938.46
1981-82	869.62
1982-83	602.03
1983-84	816.21
1984-85	863.82
1985-86	512.54
1986-87	769.00
1987-88	874.05
1988-89	632.86
1989-90	386.14
1990-91	584.69
1991-92	633.23
1992-93	474.05
1993-94	723.73
1994-95	688.71
1995-96	929.27
1996-97	736.03
1997-98	685.93
1998-99	780.40
1999-00	515.32
2000-01	720.28
2001-02	715.23
2002-03	1365.74
2003-04	801.38
2004-05	729.49
2005-06	583.05
2006-07	623.55
2007-08	743.96
2008-09	947.76
2009-10	803.04
2010-11	658.15
2011-12	950.55
2012-13	477.20
2013-14	500.13
2014-15	659.30

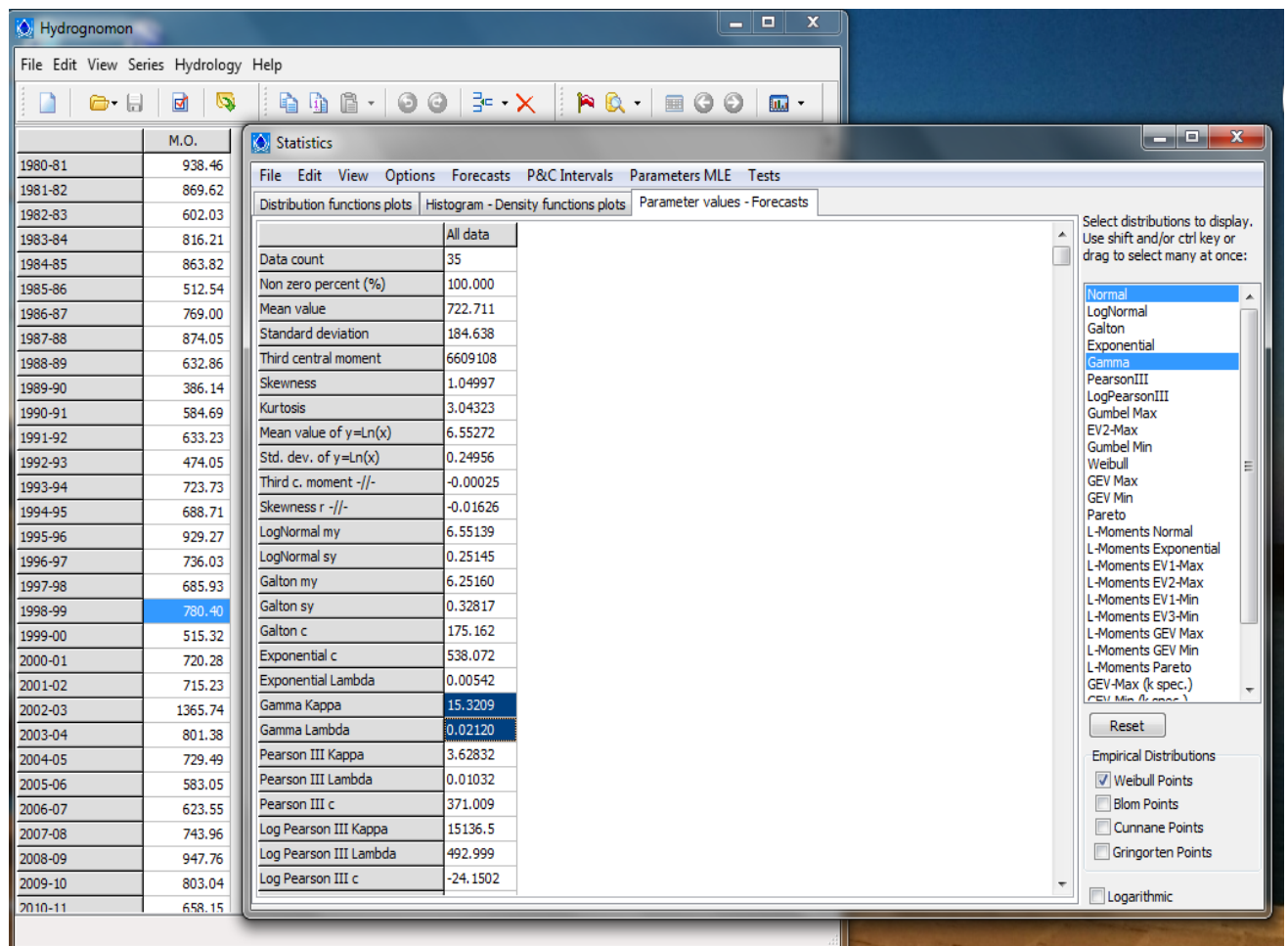
Εικόνα 4: Δεδομένα ετήσιας βροχόπτωσης ετών 1980-2015 μέσα από το μοντέλο hydrognomon



Εικόνα 5: Διάγραμμα προσομοίωσης κατανομής Γάμμα (hydrogeomorion)



Εικόνα 6: Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας – Ιστόγραμμα τιμών (hydrogeomorion)



Εικόνα 7: Τιμές παραμέτρων διάφορων κατανομών – Προβλέψεις (hydrognomon)

Έτσι, διαπιστώνεται ότι τα δεδομένα μας ακολουθούν την κατανομή Γάμμα με παραμέτρους  $\alpha = 15,32$  και  $\beta = 0,0212$  σύμφωνα με το μοντέλο hydrognomon. Για επαλήθευση των παραμέτρων αυτών ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Γνωρίζουμε ότι στην κατανομή Γάμμα η μέση τιμή των μετρήσεων ισούται με  $\frac{\alpha}{\beta}$  ενώ αντίστοιχα η διακύμανση ισούται με  $\frac{\alpha}{\beta^2}$ . Στη δική μας περίπτωση, χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB R2013a και θέτοντας ως  $x$  τις τιμές των ετήσιων βροχομετρικών δεδομένων, η μέση τιμή τους ( $\text{mean}(x)$ ) υπολογίστηκε 722,7114 και η διακύμανση ( $\text{var}(x)$ ) βρέθηκε ότι ισούται με 34091.

Προκύπτει, λοιπόν, το παρακάτω σύστημα:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\alpha}{\beta} &= 722,7114 \\ \frac{\alpha}{\beta^2} &= 34091 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \alpha &= 722,7114 \cdot \beta \\ \frac{722,7114 \cdot \beta}{\beta^2} &= 34091 \Leftrightarrow \beta = 0,0212 \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \alpha = 722,7114 \cdot 0,0212 = 15,32.$$

Είναι φανερό ότι οι παράμετροι της κατανομής Γάμμα επαληθεύονται και είναι  $\alpha = 15,32$  και  $\beta = 0,0212$ .

Στη συνέχεια, είναι απαραίτητο να βρεθεί ο όγκος νερού που χρειάζεται η περιοχή για να καλύπτει τις ανάγκες της κάθε χρόνο. Έτσι, αυτός θα πρέπει να είναι και ο όγκος του νερού που θα μαζεύει ο ταμιευτήρας κάθε χρόνο.

Όπως έχει αναφερθεί, η περιοχή έχει κατά μέσο όρο βροχόπτωση 722,7114 mm το χρόνο. Χρειάζεται, όμως, να προσδιοριστεί και η εξατμισοδιαπνοή της περιοχής σύμφωνα με το τύπο του Turc, που φαίνεται παρακάτω.

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0,90 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

όπου ET = μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή (mm)

P = μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)

L = 300 + 25\*T + 0,05\*T<sup>3</sup>

T = μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα (°C)

Σύμφωνα με τα δεδομένα της ιστοσελίδας METEO, που έχει αναλάβει τις μετρήσεις της περιοχής, υπολογίστηκε η μέση ετήσια θερμοκρασία στους 19,15° C. Έτσι, ο συντελεστής L προκύπτει:

$$L = 300 + 25*T + 0,05*T^3 = 300 + 25*19,15 + 0,05*19,15^3 = 1130,19$$

Συνεπώς, μπορεί πλέον να υπολογιστεί η μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή και είναι:

$$ET = \frac{722,7114}{\sqrt{0,90 + \left(\frac{722,7114}{1130,19}\right)^2}} = 631,6988 \text{ mm}$$

Το ποσοστό, λοιπόν, εξατμισοδιαπνοής ως προς τη βροχόπτωση είναι  $\frac{631,6988}{722,7114} = 0,87=87\%$ . Αυτό, επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη που αναφέρθηκε προηγουμένως, ότι η εξατμισοδιαπνοή στην περιοχή των Μοιρών είναι 82% με κατείδυση 18% και αμελητέες απορροές, αφού η περιοχή αυτή βρίσκεται σε χαμηλό υψόμετρο.

Μέση ετήσια βροχόπτωση – Μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή = 722,7114 mm/yr – 631,6988 mm/yr = 91,012 mm/yr = 0,091 m/yr

Έχουμε επιφάνεια λιμνοδεξαμενής A = 500.000 m<sup>2</sup>.

$$V = 0,091 \text{ m/yr} * 500.000 \text{ m}^2 = 45.500 \text{ m}^3/\text{yr}$$

Αυτός είναι ο όγκος νερού που θα μαζεύει η λιμνοδεξαμενή μόνο από τη βροχόπτωση κάθε χρόνο. Είναι φανερό ότι ο όγκος αυτός δεν επαρκεί και αν περιμένουμε να γεμίσει μόνο από τη βροχόπτωση, αυτό θα γίνει σε πάνω από 100 χρόνια. Είναι αναγκαίο, λοιπόν, να πραγματοποιηθεί μια εκτροπή από τον ποταμό Γεροπόταμο, ο οποίος εκβάλλει στο Λιβυκό πέλαγος, στα ανάντη της λιμνοδεξαμενής, ώστε να χρησιμοποιείται μια ποσότητα νερού για να γεμίσει.

Σύμφωνα με δεδομένα και μετρήσεις των ετών 1980-2007 η μέση παροχή του ποταμού είναι  $43 \text{ Mm}^3$ , ιστορικά όμως παρατηρείται η μέση παροχή να είναι περίπου  $21.000.000 \text{ m}^3/\text{yr}$ . Συνεπώς, μπορούμε να αποσπούμε  $4.076.750,7 \text{ m}^3$  το χρόνο από τον Γεροπόταμο για να γεμίζει λιμνοδεξαμενή και να ικανοποιούνται οι ανάγκες των Μοιρών. Επιπλέον, επειδή ο Γεροπόταμος είναι πλέον εποχιακός ποταμός, τα κυβικά αυτά θα αποσπώνται κατά τη χειμερινή περίοδο (Δεκέμβρης – Μάρτιος), που έχει τη μεγαλύτερη ροή. Στην περίπτωση που υπάρχει ξηρό έτος (μικρότερη βροχόπτωση και μικρότερη παροχή ποταμού) περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια πως θα αντιμετωπιστεί.

Με αυτή την πληροφορία, μπορούμε να υπολογίσουμε το μέσο μηνιαίο ύψος νερού από τη βροχόπτωση μαζί με την εξατμισοδιαπνοή και την εισροή από το ποτάμι έχοντας ως δεδομένα τις μηνιαίες βροχοπτώσεις της περιοχής από τα τελευταία 35 χρόνια.

Έτσι, συμπεριλαμβάνοντας το μηνιαίο ποσοστό ζήτησης νερού και την πληροφορία του ύψους νερού προκύπτει ο όγκος νερού που θα πρέπει να έχει ο ταμιευτήρας για να καλύπτει τις ανάγκες της περιοχής, καθώς και η επιφάνεια και το ύψος του.

Τα παραπάνω φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Μήνας	Ζήτηση (%)	Ζήτηση ( $10^3 \text{ m}^3$ )	Αθροιστική κατανάλωση ( $10^3 \text{ m}^3$ )	Εισροή (Βροχόπτωση + Εκτροπή ποταμού) ( $10^3 \text{ m}^3$ )	Αθροιστική εισροή ( $10^3 \text{ m}^3$ )	Αθροιστικό σύνολο ( $10^3 \text{ m}^3$ )	Κατακρήμνιση (m)
1ος	3	150	150	1252,85	1252,85	1102,85	0,12
2ος	3	150	300	1239,67	2492,52	2192,52	0,09
3ος	4	200	500	1221,25	3713,77	3213,77	0,05
4ος	5	250	750	12,03	3725,81	2975,81	0,02
5ος	6	300	1050	1,91	3727,71	2677,71	0,00
6ος	12	600	1650	0,21	3727,92	2077,92	0,00
7ος	15	750	2400	0,12	3728,04	1328,04	0,00
8ος	16	800	3200	0,11	3728,15	528,15	0,00
9ος	14	700	3900	1,51	3729,66	-170,34	0,00
10ος	10	500	4400	16,97	3746,63	-653,37	0,03
11ος	6	300	4700	44,90	3791,52	-908,48	0,09
12ος	6	300	5000	1255,20	5046,72	46,72	0,12
	100	5000		5046,72			

Πίνακας 1: Εύρεση όγκου ταμιευτήρα για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής μελέτης

Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτουν τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα που χρειάζεται να έχει και είναι όγκος  $V = 4.122.250,7 \text{ m}^3$ , επιφάνεια  $A = 500.000 \text{ m}^2$  και ύψος  $H = 8,2 \text{ m}$ .

### 4.3 Εφαρμογή Bayes Risk

#### 4.3.1 Μαθηματικό Υπόβαθρο

Το πρόβλημα λήψης αποφάσεων, στην προκειμένη περίπτωση, αφορά δύο πιθανές λύσεις. Η πρώτη είναι να συνεχιστεί η ίδια πολιτική άρδευσης, η οποία προκαλεί την υπεράντληση του υδροφορέα, με μια πιθανότητα πληρωμής προστίμων προς τις αρμόδιες αρχές κάθε φορά που εντοπίζεται η παράβαση. Η δεύτερη είναι να σταματήσει αυτή η πρακτική και να χρησιμοποιηθεί ένας ταμιευτήρας ο οποίος θα προμηθεύει την περιοχή με νερό προς άρδευση. Επομένως, οι αρχές θα πρέπει να εξετάσουν μια περιβαλλοντική πολιτική βασισμένη σε ποινές υπεράντλησης εφόσον είναι δυνατή η κατασκευή ενός ταμιευτήρα. Αν, δηλαδή, θα εφαρμοστεί η αρχή <<ο ρυπαίνων πληρώνει>> ή θα προστατευτούν τα υπόγεια ύδατα της περιοχής. Έτσι, το δίλλημα σ' αυτήν την περίπτωση είναι είτε να συνεχιστεί η αρδευτική πρακτική υπεράντλησης και να καταβάλλονται τα πιθανά πρόστιμα είτε να κατασκευαστεί ένας ταμιευτήρας. Συγκεκριμένα, όμως, θα εξεταστεί με βάση τις στάθμες νερού του υδροφορέα και τα βροχομετρικά δεδομένα (υγρά – ξηρά έτη), που αναλύθηκαν προηγουμένως, αν τελικά η λιμνοδεξαμενή που ενδεχομένως κατασκευαστεί παρέχει ικανοποιητικές ποσότητες νερού προς τις αρδευτικές ανάγκες σύμφωνα και με το θεώρημα του Bayes. Διαφορετικά, θα χρειαστεί επιπλέον παροχή νερού, γεγονός που ίσως επιβαρύνει οικονομικά την εναλλακτική αυτή απόφαση.

- 1<sup>ο</sup> Σενάριο: Κατασκευή του ταμιευτήρα – Λαμβάνοντας υπ όψιν τα υγρά και ξηρά έτη

Η απάντηση, αρχικά, θα δοθεί σύμφωνα με τη Θεωρία Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes, θεωρώντας ένα συγκεκριμένο κόστος κατασκευής του ταμιευτήρα και μια περιβαλλοντική πολιτική όσον αφορά την άρδευση υπόγειων υδάτων η οποία θεωρείται πολιτική ποινής, με μορφή χρηματικών προστίμων, για υπεράντληση. Η προσέγγιση που ακολουθεί παρουσιάζει την μαθηματική διαδικασία που μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε παραβατική πολιτική και κόστος κατασκευής.

- Ενέργεια  $A(0)$ : Να μην κατασκευαστεί ο ταμιευτήρας

Η συνάρτηση επιδίωξης είναι η αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης απώλειας για την ενέργεια  $A(0)$ . Έτσι, η Συνάρτηση Επιδίωξης (Goal Function) εκφράζεται ως εξής:

$$G(A(0), \theta_0) = E[L(A(0), Y)]. \quad (1)$$

Η πολιτική των προστίμων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα εύρος συστημάτων συνάρτησης απώλειας. Συνήθως, σε περιβαλλοντικά προβλήματα, εφαρμόζεται η γραμμική ή παραβολική συνάρτηση απώλειας. Επιπλέον, ένας συνδυασμός

κλιμακούμενων συναρτήσεων απώλειας εφαρμόζεται συχνά για να εκφράσει αρχικά ελαφρές και στη συνέχεια δριμύς ποινές. Έτσι, μια κλιμακωτή παραβολική συνάρτηση θεωρείται ότι εκφράζει μεταβολή της ποινής εξαιτίας της σημαντικότητας του προβλήματος. Τα παραπάνω εκφράζονται ως εξής:

$$L(A(0), Y) = \begin{cases} K_1 Y^2, & 0 \leq Y \leq n_1 \\ K_2 Y^2, & n_1 < Y \leq n_2, \quad K_1 < K_2 < K_3, \\ K_3 Y^2, & Y > n_2 \end{cases} \quad (2)$$

όπου  $K_n$  είναι τα πρόστιμα που θα πληρωθούν ( $n = 1, 2, 3$ ),  $n_j$  είναι ο αριθμός των ελέγχων της στάθμης του υδροφορέα ανά κάποιο χρονικό όριο και το  $Y$  υποδηλώνει τον άγνωστο αριθμό των παραβιάσεων υπεράντλησης. Η συνάρτηση απώλειας φανερώνει τα πρόστιμα που θα πρέπει να πληρωθούν στις τοπικές αρχές. Η αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης απώλειας δίνεται στην επόμενη σχέση:

$$G(A(0), \theta_0) = \sum_{Y=0}^N L(A(0), Y) f(Y) \Leftrightarrow$$

$$G(A(0), \theta_0) = \sum_{Y=0}^{n_1} L(A(0), Y) * f(Y) + \sum_{n_1+1}^{n_2} L(A(0), Y) * f(Y) + \sum_{n_2+1}^N L(A(0), Y) * f(Y) \quad (3)$$

Στην προηγούμενη ισότητα, το  $f(Y)$  υποδηλώνει τη διακριτή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των  $Y$  παραβάσεων σε ένα χρονικό διάστημα  $N$  ελέγχων του υδροφορέα, και το  $L(A(0), Y)$  υποδηλώνει με τη σειρά του τη συνάρτηση απώλειας της απόφασης  $A(0)$ . Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2) και (3), η μαθηματική έκφραση της Συνάρτησης Επιδίωξης (Goal Function) για την ενέργεια  $A(0)$  είναι:

$$G(A(0), \theta_0) = \sum_{Y=0}^{n_1} K_1 Y^2 f(Y) + \sum_{n_1+1}^{n_2} K_2 Y^2 f(Y) + \sum_{n_2+1}^N K_3 Y^2 f(Y). \quad (4)$$

Η πιθανότητα ότι η υπεράντληση πράγματι θα συμβαίνει, χαρακτηρίζεται ως “επιτυχία” και η αντίθετη περίπτωση ως “αποτυχία”. Έτσι, η πιθανότητα μιας “επιτυχίας” αντιστοιχεί στο  $\theta_0$ , καθώς η πιθανότητα “αποτυχίας” θα αντιστοιχεί στο  $1 - \theta_0$ . Αυτό το πρόβλημα είναι γνωστό ως “πείραμα Bernoulli”. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, η οποία εκφράζει μια τέτοια περίπτωση όπου ο αριθμός των  $N$  ελέγχων ακολουθεί τη διωνυμική κατανομή, και εκφράζεται από τη σχέση:

$$f(Y) = \binom{N}{Y} \theta_0^Y (1 - \theta_0)^{N-Y} = \frac{N!}{Y! (N - Y)!} \theta_0^Y (1 - \theta_0)^{N-Y}, \quad (5)$$

$$E[Y] = N\theta_0, \quad (6)$$

$$\sigma^2 = N\theta(1 - \theta_0). \quad (7)$$

Επεξεργάζοντας την σχέση (4) με την κατάλληλη παραγοντοποίηση, προκύπτει η επόμενη έκφραση για την Συνάρτηση Επιδίωξης:

$$G(A(0), \theta_0) = K_1 \sum_{Y=0}^{n_1} Y^2 f(Y) + K_2 \sum_{n_1+1}^{n_2} Y^2 f(Y) + K_3 \sum_{n_2+1}^N Y^2 f(Y)$$

Ισχύει:

$$\sum_{n_1+1}^{n_2} Y^2 f(Y) = \sum_0^N Y^2 f(Y) - \sum_{Y=0}^{n_1} Y^2 f(Y) - \sum_{n_2+1}^N Y^2 f(Y), \text{ όπου } \sum_0^N Y^2 f(Y) = E[Y^2]$$

$$\Rightarrow G(A(0), \theta_0) = K_2 E[Y^2] + K_{1,2} \sum_{Y=0}^{n_1} Y^2 f(Y) + K_{3,2} \sum_{n_2+1}^N Y^2 f(Y), \quad (8)$$

όπου  $K_{1,2} = K_1 - K_2$  και  $K_{3,2} = K_3 - K_2$ . Σύμφωνα με τις στατιστικές ιδιότητες της διακύμανσης χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (6) και (7), έχουμε:

$$E[Y^2] = (E[Y])^2 + \sigma^2 = N^2 \theta_0^2 + N \theta_0 (1 - \theta_0) \quad (9)$$

Συνδυάζοντας, τώρα, τις σχέσεις (8) και (9), ο τελικός τύπος της Συνάρτησης Επιδίωξης για την ενέργεια  $A(0)$  είναι:

$$G(A(0), \theta_0) = m(N, \theta_0) + K_{1,2} \sum_{Y=0}^{n_1} Y^2 f(Y) + K_{3,2} \sum_{n_2+1}^N Y^2 f(Y), \quad (10)$$

όπου  $m(N, \theta_0) = K_2 (N^2 \theta_0^2 + N \theta_0 (1 - \theta_0))$ . Η Συνάρτηση Επικινδυνότητας (Risk Function) για την ενέργεια  $A(0)$  σχηματίζεται ως η αναμενόμενη τιμή της Συνάρτησης Επιδίωξης από την άποψη της άγνωστης παραμέτρου  $\theta_0$  όπως φαίνεται στη συνέχεια:

$$R(A(0)) = \int_0^1 G(A(0), \theta_0) \pi(\theta_0) d\theta_0. \quad (11)$$

Η πιθανότητα  $\theta_0$  θεωρείται μια άγνωστη ποσότητα. Έτσι, η υποκειμενική προγενέστερη κατανομή  $\pi(\theta_0)$ , που φαίνεται στην προηγούμενη σχέση, χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αβεβαιότητα της  $\theta_0$  ως συζυγής της προγενέστερης κατανομής. Η κατάλληλη συζυγής της προγενέστερης κατανομής, δηλαδή της διωνυμικής, είναι η κατανομή Βήτα. Αν μεταγενέστερη είναι μια κατανομή οποία είναι της ίδιας οικογένειας με την προγενέστερη, τότε η προγενέστερη είναι συζυγής με την πιθανότητα. Επιπλέον, η μεταγενέστερη συνάρτηση ικανοποιεί τις ιδιότητες της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας, δηλαδή μια μη-αρνητική συνάρτηση και το ολοκλήρωμα (ή άθροισμα) σε ολόκληρο το εύρος ισοδύναμο με το 1. Η κατανομή Βήτα, έτσι, χρησιμοποιείται ως η προγενέστερη κατανομή για διωνυμικές κατανομές στην ανάλυση Bayes. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Βήτα είναι:

$$\text{Beta}(\theta_0, \alpha, \beta) = \frac{\theta_0^{\alpha-1}(1-\theta_0)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}, \quad (12)$$

όπου  $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$  είναι οι παράμετροι της κατανομής Βήτα οι οποίοι μπορούν να εκτιμηθούν με την εγκατάσταση των διαθέσιμων δεδομένων στην Βήτα συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας,  $\theta_0 \in [0, 1]$ , και  $B(\alpha, \beta)$  είναι η εξίσωση της Βήτα συνάρτησης, δηλαδή:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1}(1-t)^{\beta-1} dt. \quad (13)$$

Έτσι, η Συνάρτηση Επικινδυνότητας κατά Bayes για την ενέργεια  $A(0)$  παρουσιάζεται ως εξής:

$$R(A(0)) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} \int_0^1 \left\{ m(N, \theta_0) + K_{1,2} \sum_{Y=0}^{n_1} Y^2 f(Y) + K_{3,2} \sum_{n_2+1}^N Y^2 f(Y) \right\} \theta_0^{\alpha-1} (1-\theta_0)^{\beta-1} d\theta_0 \quad (14)$$

Όπως φαίνεται και στη σχέση (14), η κατανομή Βήτα έχει δύο παραμέτρους, την  $\alpha$  και την  $\beta$  ( $\alpha, \beta > 0$ ). Η μέση τιμή και η διασπορά της κατανομής Βήτα δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$$E(x) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$$

$$\text{Var}(x) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)}$$

Η κατανομή Βήτα χρειάζεται πάντα κανονικοποίηση από το 0 στο 1 στα δεδομένα που δέχεται. Αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τον επόμενο τύπο στα δεδομένα που αφορά η κατανομή, και στη συγκεκριμένη περίπτωση τις στάθμες του νερού του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής μελέτης για τα έτη 1980-2015:

$$Z_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

όπου  $x_i$ : η τιμή πριν την κανονικοποίηση

$\max(x)$ : η μέγιστη τιμή των δεδομένων

$\min(x)$ : η ελάχιστη τιμή των δεδομένων

Έτσι, εφαρμόζονται οι κανονικοποιημένες πλέον τιμές για την κατανομή Βήτα στο λογισμικό MATLAB R2013a ώστε να βρεθεί η μέση τιμή και η διασπορά της.

Τα δεδομένα ελήφθησαν από τη δημοσιευμένη εργασία των Varouchakis et al. (2016) και, έτσι, προέκυψαν οι παράμετροι  $\alpha = 1,29$  και  $\beta = 0,71$  για την κατανομή Βήτα.

➤ Ενέργεια  $A(1)$ : Κατασκευή του ταμιευτήρα

Στην περίπτωση της κατασκευής του ταμιευτήρα, η συνάρτηση απώλειας για την ενέργεια  $A(1)$  είναι:

$$L(A(1), Y) = C \quad (15)$$

όπου  $C$  είναι το ολικό κόστος κατασκευής του ταμιευτήρα. Έτσι, η Συνάρτηση Απώλειας είναι  $G(A(1), \theta_1) = E[L(A(1), Y)] = E[C] = C$ , και η Συνάρτηση Επικινδυνότητας κατά Bayes είναι  $R(A(1)) = E[G(A(1), \theta_1)] = C$ . Η βέλτιστη απόφαση μεταξύ των ενεργειών  $A(0)$  και  $A(1)$  είναι η ενέργεια εκείνη που ελαχιστοποιεί το ρίσκο κατά Bayes.

$$\mathbf{Best} = \min\{R(A(0)), R(A(1))\}. \quad (16)$$

Αν  $R(A(1)) > R(A(0))$  ή  $C > R(A(0))$ , τότε η ενέργεια  $A(1)$  είναι η προτιμότερη απόφαση. Διαφορετικά, όταν  $C < R(A(0))$ , η βέλτιστη απόφαση είναι η  $A(0)$ . Το αντίστοιχο ολοκλήρωμα της  $R(A(0))$  μπορεί να λυθεί αριθμητικά μετά από κατάλληλη κωδικοποίηση (MATLAB).

Περίπτωση μη συλλογής του απαραίτητου νερού στον ταμιευτήρα

Ας θεωρήσουμε την περίπτωση ότι υπάρχει ο κίνδυνος ο ταμιευτήρας να μην παρέχει επαρκές νερό κατά τη διάρκεια των ξηρών ετών. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα επιπλέον κόστος  $M$ , που θα υποδηλώνει τον επιπλέον ανεφοδιασμό νερού (δηλαδή τη μεταφορά νερού) θα πρέπει να συμπεριληφθεί. Η συνάρτηση απώλειας για την ενέργεια  $A(1)$  είναι η εξής:

$$L(A(1), Y_1) = C + MY_1, \quad (17)$$

όπου η μεταβλητή  $Y_1$  εκφράζει την άγνωστη ποσότητα να έχουμε ένα ξηρό έτος. Η πιθανότητα να έχουμε ένα ξηρό έτος θα χαρακτηρίζεται ως “επιτυχία”. Από την άλλη μεριά, η “αποτυχία” αναφέρεται στην πιθανότητα να έχουμε υγρό έτος. Έτσι, η πιθανότητα μιας “επιτυχίας” να συμβεί, αντιστοιχεί στο  $\theta_1$ , καθώς η πιθανότητα “αποτυχίας” είναι  $1 - \theta_1$ . Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, η οποία εκφράζει μια τέτοια περίπτωση όπου  $N_1$  ο αριθμός των χρόνων ακολουθούν επίσης τη διωνυμική κατανομή. Η Συνάρτηση Επιδίωξης εκφράζεται από τη σχέση:

$$G(A(1), \theta_1) = E[L(A(1), Y_1)] = E[C + MY_1] = C + ME[Y_1] = C + MN_1\theta_1. \quad (18)$$

Η πιθανότητα  $\theta_1$  θεωρείται ομοίως ως άγνωστη ποσότητα. Η επικινδυνότητα κατά Bayes,  $R(A(1))$ , μπορεί να εκτιμηθεί από την ενσωμάτωση της προγενέστερης (Βήτα) κατανομής ή απλά χρησιμοποιώντας τις στατιστικές ιδιότητες της αναμενόμενης τιμής. Έτσι, η υποκειμενική συνάρτηση της προγενέστερης κατανομής μπορεί να παραληφθεί. Η Συνάρτηση Επικινδυνότητας κατά Bayes μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί εφαρμόζοντας τις στατιστικές ιδιότητες της αναμενόμενης τιμής για ένα γραμμικό τύπο συνάρτησης απώλειας.

$$R(A(1)) = E^{\pi(\theta_1)}[G(A(1), \theta_1)] = E^{\pi(\theta_1)}[C + MN_1\theta_1] = C + MN_1E^{\pi(\theta_1)}[\theta_1], \quad (19)$$

Η έκφραση  $E^{\pi(\theta_1)}[G(A(1), \theta_1)]$  υποδηλώνει την αναμενόμενη τιμή της Συνάρτησης Επιδίωξης με όρους της προγενέστερης κατανομής  $\pi(\theta_1)$ . Η αναμενόμενη τιμή  $E^{\pi(\theta_1)}[\theta_1]$ , φανερώνει την αναμενόμενη τιμή της άγνωστης ποσότητας  $\theta_1$  από την προγενέστερη πληροφορία σύμφωνα με τις ιδιότητες της συζυγής κατανομής Βήτα, και μπορεί να εκτιμηθεί από την ετήσια κατακρήμνιση με βάση δεδομένων τα οποία υπερβαίνουν ένα όριο κατακρήμνισης, το οποίο κατηγοριοποιεί σε υγρά και ξηρά τα έτη στην περιοχή που μας ενδιαφέρει.

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα περιοχή μελέτης, αυτό το όριο εκτιμήθηκε στο επίπεδο των 816 mm για ετήσια κατακρήμνιση, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Εξετάζοντας τα δεδομένα κατακρήμνισης της περιοχής για τα έτη 1980-2015, μόνο τα 9 έτη από συνολικά τρεις δεκαετίες περίπου χαρακτηρίζονται ως υγρά. Έτσι, η σχέση  $E^{\pi(\theta_1)}[\theta_1]$  σύμφωνα με τις ιδιότητες της κατανομής Βήτα είναι ίση με το 25,7% ( $E^{\pi(\theta_1)}[\theta_1] = 9/35$ ).

Αν  $R(A(1)) > R(A(0))$ , τότε η ενέργεια  $A(0)$  είναι η προτιμότερη απόφαση. Η  $A(1)$  θα είναι η βέλτιστη ενέργεια αν ισχύει το αντίθετο. Η υποθετική αυτή ανισότητα εκφράζεται ως εξής:

$$C + MN_1E^{\pi(\theta_1)}[\theta_1] > R(A(0)) \quad (20)$$

- 2<sup>ο</sup> Σενάριο: Πόσο διάστημα μπορεί να αναβληθεί η κατασκευή του ταμιευτήρα;

Οι υπεύθυνοι για τη δημιουργία του έργου πρέπει να αποφασίσουν αν θα αναβάλλουν την κατασκευή του για κάποιο χρονικό διάστημα με το ενδεχόμενο να προκύψουν, μέσα στο διάστημα αυτό,  $Y$  ενδεχόμενα γεγονότα υπεράντλησης. Η τυχαία μεταβλητή  $Y$  σημαίνει:  $Y$  γεγονότα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όπου γεγονός εννοείται η εμφάνιση “επιτυχίας”, και περιγράφεται μαθηματικά από την Κατανομή Poisson.

Η κατανομή Poisson είναι μια διακριτή συνάρτηση κατανομής τυχαίας μεταβλητής που περιγράφει τον αριθμό εμφανίσεων ενός γεγονότος σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η κατανομή Poisson έχει ως παράμετρο  $\lambda$  που δηλώνει τη μέση τιμή αριθμού εμφανίσεων ενός γεγονότος, οι οποίες είναι ανεξάρτητες της τελευταίας χρονικής στιγμής εμφάνισης του γεγονότος. Με  $Y$  συμβολίζουμε τον αριθμό των ενδεχομένων γεγονότων που πραγματοποιούνται στη μονάδα του χρόνου. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Poisson είναι η παρακάτω:

$$P_{\lambda}(Y) = \frac{(N\theta_0)^Y}{Y!} e^{-N\theta_0}, Y = 0, 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Η αναμενόμενη τιμή και η διασπορά της κατανομής Poisson δίνονται από την εξής σχέση:

$$E[Y] = \text{Var}(Y) = N\theta_0 = \lambda \quad (2)$$

Όπου,

$n$  = η περίοδος αναβολής του έργου σε ημέρες

$\theta_0$  = η πιθανότητα να συμβεί υπεράντληση (“επιτυχία”)

Έτσι, η κατανομή Poisson μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της  $\lambda$ :

$$P_{\lambda}(Y) = f(Y) = \frac{(\lambda)^Y}{Y!} e^{-\lambda} \quad (3)$$

Στην περίπτωση αυτή, η πιθανότητα είναι άγνωστη παράμετρος και πρέπει να εκτιμηθεί σύμφωνα με την κατανομή που ακολουθεί η προγενέστερη κατανομή που είναι συζυγής της κατανομής Poisson. Η προγενέστερη συζυγής κατανομή που εκφράζει την άγνωστη παράμετρο  $Y$  (παραβάσεις υπεράντλησης) με πιθανότητα επιτυχίας  $\theta_0$ , είναι η κατανομή Γάμμα. Έτσι, τα δεδομένα του επιπέδου των υπόγειων υδάτων πρέπει να ταιριάζουν στην κατανομή Γάμμα έτσι ώστε να αποκτήσουν τις παραμέτρους της. Επιπλέον, η έκφραση του θεωρήματος του Bayes θα είναι πλέον μια συνάρτηση περιόδου αναβολής, για  $N$  ελέγχους. Όσο το  $N$

ποικίλει, μπορούμε να βρούμε τη μέγιστη τιμή των ελέγχων  $N$ , για την οποία η αναβολή της κατασκευής της λιμνοδεξαμενής να είναι η επιθυμητή απόφαση.

Συνεπώς, η απόφαση  $A(0)$  θα εκφράζεται ως “Πόσο καιρό μπορεί να αναβληθεί η κατασκευή της λιμνοδεξαμενής και να πληρώνονται τα πρόστιμα;”, καθώς η απόφαση  $A(1)$  παραμένει η ίδια.

Ωστόσο, η τυχαία παράμετρος  $Y$  έχει την κατανομή Poisson ως την αντίστοιχη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Η μεθοδολογία και οι εξισώσεις για την κατανομή αυτή παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Ας αναλύσουμε, λοιπόν, την κλιμακωτή – γραμμική συνάρτηση απώλειας. Η κλιμακωτή συνάρτηση απώλειας όταν η απόφαση είναι  $A(0)$  εκφράζεται ως εξής:

$$L(A(0), Y) = \begin{cases} K_1 Y, & 0 \leq Y \leq n_1 \\ K_2 Y, & n_1 < Y \leq n_2 \\ M, & Y > n_2 \end{cases} \quad (4)$$

Η αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης απώλειας, σε σχέση με την τυχαία μεταβλητή  $Y$ , αναφέρεται στην κλασσική θεωρία λήψης αποφάσεων ως Συνάρτηση Επικινδυνότητας (Risk Function) ή Συνάρτηση Επιδίωξης (Goal Function).

Η Συνάρτηση Επιδίωξης της απόφασης  $A(0)$  μπορεί τώρα να γραφτεί ως:

$$G(A(0), \theta) = E[L(A(0), Y)] = \sum_{Y=0}^N L(A(0), Y) \cdot f(Y) \quad (5)$$

Από τις σχέσεις (4) και (5) προκύπτει ότι:

$$G(A(0), \theta) = \sum_{Y=0}^N L(A(0), Y) \cdot f(Y) = \sum_{Y=0}^{n_1} K_1 Y \cdot f(Y) + \sum_{Y=n_1+1}^{n_2} K_2 Y \cdot f(Y) + \sum_{Y=n_2+1}^N M \cdot f(Y) \quad (6)$$

Η σχέση (6) αναλύεται ως εξής:

$$G(A(0), \theta) = \sum_{Y=0}^{n_1} K_1 Y \cdot f(Y) + \sum_{Y=n_1+1}^{n_2} K_2 Y \cdot f(Y) + M \sum_{Y=n_2+1}^N f(Y) \quad (7)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Poisson είναι:

$$f(Y) = \frac{\lambda^Y}{Y!} e^{-\lambda} \quad (8)$$

$$\text{Με } E[Y] = \text{Var}[Y] = \lambda$$

Με αντικατάσταση της (8) στη σχέση (7) θα ισχύει:

$$G(A(0), \lambda) = \sum_{Y=0}^{n_1} K_1 Y \cdot \lambda^Y \left( \frac{e^{-\lambda}}{Y!} \right) + \sum_{Y=n_1+1}^{n_2} K_2 Y \cdot \lambda^Y \left( \frac{e^{-\lambda}}{Y!} \right) + M \sum_{Y=n_2+1}^N \lambda^Y \left( \frac{e^{-\lambda}}{Y!} \right) \quad (9)$$

Η συνάρτηση Επικινδυνότητας του Bayes  $R(A(0))$  είναι η αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης στόχου και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$R(A(0)) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \pi(\theta) G(A(0), \lambda) d\theta \quad (10)$$

Όπου η συνάρτηση  $\pi(\theta)$  είναι η υποκειμενική προγενέστερη κατανομή της κατανομής Poisson, δηλαδή η κατανομή Γάμμα. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η συζυγής κατανομή, ως προγενέστερη στην κατανομή Poisson είναι η κατανομή Γάμμα (Gamma distribution). Η κατανομή Γάμμα ανήκει στην οικογένεια των συνεχών κατανομών και αποτελεί γενίκευση της εκθετικής κατανομής. Έτσι, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\pi(\theta) = \pi(Y) = f(Y, a, \beta) = \frac{(\beta^a) Y^{a-1}}{\Gamma(a)} e^{-\beta Y} \quad (11)$$

Όπως φαίνεται και από την εξίσωση (11) η κατανομή Γάμμα έχει δύο παραμέτρους, την  $a$  και την  $b$  ( $a, b > 0$ ). Η παράμετρος  $a$  ονομάζεται παράμετρος σχήματος (shape parameter), ενώ η  $\beta$  αποτελεί την παράμετρο κλίμακας (scale parameter). Οι παράμετροι δίνουν τη δυνατότητα στην κατανομή Γάμμα να λάβει πολύ διαφορετικές μορφές και την καθιστούν πολύ ευέλικτη στην προσομοίωση διαφορετικών δεδομένων.

Σε προηγούμενο κεφάλαιο υπολογίστηκαν οι παράμετροι της κατανομής Γάμμα με τη βοήθεια του μοντέλου hydrognomση και επαληθεύτηκαν από το λογισμικό MATLAB R2013a, και είναι  $a = 15,32$  και  $b = 0,0212$ .

Όπως αναφέρθηκε αρχικά, ισχύει ότι  $\lambda = N\theta$  και συνεπώς  $d\lambda = Nd\theta$ . Έτσι, η εξίσωση (10) μπορεί να γραφεί ως

$$R(A(0)) = \frac{1}{N} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \pi(\theta) G(A(0), \theta) d\lambda \quad (12)$$

Η σχέση  $\lambda = N\theta$  ισχύει για τιμές του  $\lambda \leq 5$ , οπότε  $\lambda_{\min} = 0$  και  $\lambda_{\max} = 5$ .

Η συνάρτηση επικινδυνότητας που προκύπτει για την  $A(1)$  είναι:

$$R(A(1)) = E^{\pi} [C] = C \quad (13)$$

Η βέλτιστη απόφαση κατά Bayes (optimal Bayes decision) λαμβάνεται για την ενέργεια, η οποία ελαχιστοποιεί την συνάρτηση επικινδυνότητας του Bayes.

Το σημείο όπου δεν υπάρχει προτίμηση μεταξύ των ενεργειών  $A(0)$  και  $A(1)$  είναι το σημείο όπου ισχύει  $R(A(0)) = R(A(1))$ .

Αν  $R(A(1)) > R(A(0))$ , τότε  $A(0)$  είναι η βέλτιστη απόφαση. Η υποθετική ανισότητα εκφράζεται αναλυτικά ως:

$$C > \frac{1}{N} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \pi(\theta) G(A(0), \theta) d\lambda \quad (14)$$

#### 4.4 Κατασκευή και Κόστος Λιμνοδεξαμενής

Το νερό ανέκαθεν υπήρξε βασική υποδομή για την ανάπτυξη της ελληνικής γεωργίας. Η διαχείριση των υδατικών πόρων στον αγροτικό τομέα αποτελεί πολυσύνθετη δραστηριότητα, που αφορά αφενός μέτρα και πολιτικές που στοχεύουν στη βιώσιμη ανάπτυξη με ορθολογική χρήση των πόρων και αφετέρου μελέτες και έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων, τα οποία αποτελούν βάθρο κάθε επιχειρούμενης αναδιάρθρωσης μεγάλης εμβέλειας.

Το μοντέλο ανάπτυξης της χώρας, λόγω των κοινωνικοοικονομικών συνθηκών που επικρατούσαν κατά το παρελθόν, στηρίχθηκε κυρίως σε έργα αξιοποίησης υπογείων νερών με φρέατα και γεωτρήσεις, ενώ η κατασκευή έργων ταμίευσης επιφανειακών νερών με φράγματα και λιμνοδεξαμενές αποτέλεσε μεταγενέστερη δραστηριότητα.

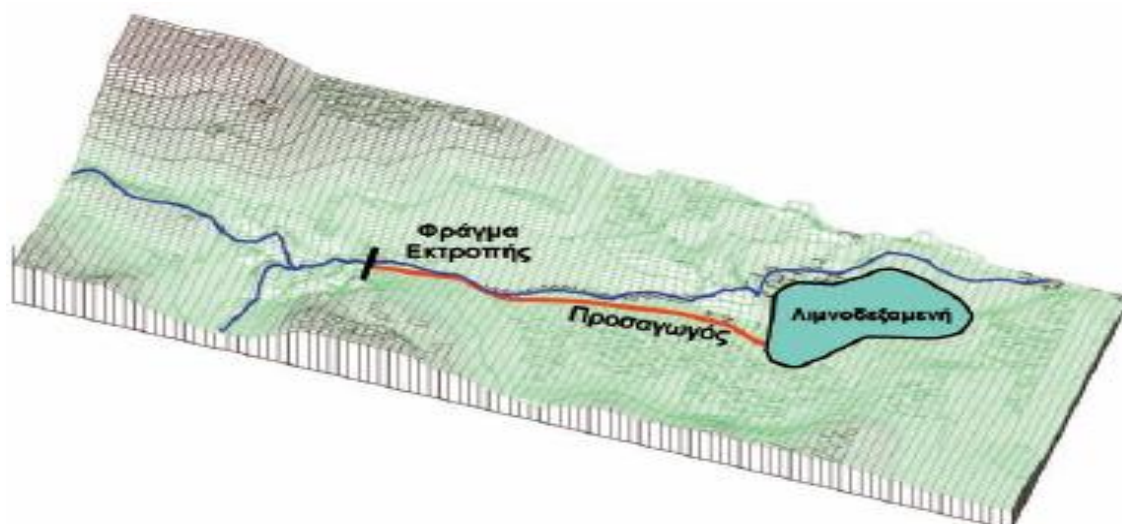
Το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων άρχισε να ενδιαφέρεται για την κατασκευή φραγμάτων στη χώρα μας από τα μέσα της δεκαετίας του '60. Τότε, σχεδόν κάθε πρόγραμμα ανάπτυξης περιοχής γεωργικού ενδιαφέροντος περιλάμβανε και τη μελέτη ή την υπόδειξη προς μελέτη φραγμάτων.

Οι λιμνοδεξαμενές είναι μικροί ταμιευτήρες επιφανειακών υδάτων, που κατασκευάζονται είτε μέσα στις κοίτες χειμάρρων (επιποτάμεις), είτε έξω από αυτές σε φυσικές ή τεχνητές λεκάνες κατάκλυσης (εξωποτάμεις).

Σήμερα με τον όρο λιμνοδεξαμενή, αναφέρονται συνήθως οι εξωποτάμιοι ταμιευτήρες επιφανειακών υδάτων (εξωποτάμια λιμνοδεξαμενή). Πρόκειται για λεκάνες κατάκλυσης, που διαμορφώνονται με εκσκαφές και φράσσονται με ανάχωμα, το οποίο κατασκευάζεται σε επιλεγμένη περιοχή με κατάλληλα

μορφολογικά χαρακτηριστικά, συνήθως αμφιθεατρικής μορφής. Πρόκειται για σύνθετα έργα αποτελούμενα από τρία διακριτά έργα:

- Τον χώρο του ταμιευτήρα που διαμορφώνεται τεχνητά, όπως προαναφέρθηκε
- Το φράγμα εκτροπής στο ποτάμι του οποίου θα αξιοποιηθούν οι απορροές
- Τον αγωγό μεταφοράς του νερού από το φράγμα εκτροπής έως τον ταμιευτήρα



Εικόνα 8: Έργα εξωποτάμιας λιμνοδεξαμενής

Το φράγμα εκτροπής είναι υπερπηδητός αναβαθμός χαμηλού ύψους, με δυνατότητα πλευρικής απαγωγής του νερού μέσω αύλακας που φέρει σχάρα. Τα χονδρόκοκκα φερτά υλικά συνεχίζουν την πορεία τους προς τα κατάντη. Η διαστασιολόγησή του είναι συνάρτηση των συνθηκών απορροής.

Στο φράγμα εκτροπής προσαρμόζονται επίσης και έργα παγίδευσης φερτών υλικών, ειδικά όταν ο χείμαρρος τροφοδοτείται από λεκάνη απορροής γυμνή σε βλάστηση και με εκτεταμένο εδαφικό κάλυμμα ή ευδιάβρωτα πετρώματα. Η δεξαμενή καθίζησης των λεπτόκοκκων φερτών αποτελεί ιδιαίτερο τμήμα, πριν από τον αγωγό μεταφοράς του νερού και εξοπλίζεται με πλέγμα (σίτα) ή φιτροσωλήνα για τη συγκράτηση έξω από τον προσαγωγό υλικών που επιπλέουν, όπως φύλλα κ.α. Η διάσταση της δεξαμενής αυτής εξαρτάται από τον όγκο του απαγόμενου νερού.

Τα έργα κατασκευής του προσαγωγού, γενικά, δεν είναι σημαντικά και περιορίζονται στην εκσκαφή για την προστασία του σωλήνα ή της διώρυγας και τυχόν τεχνικά στις διασταυρώσεις με ρέματα. Επίσης, απαιτείται τεχνικογεωλογική αναγνώριση της διαδρομής για να αποφευχθούν περιοχές κατολισθήσεων ή καταπτώσεων και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας. Επιδιώκεται πάντα η εξεύρεση της πλέον οικονομικής και τεχνικά απλής διαδρομής του έργου προσαγωγής του νερού.

Όταν η λιμνοδεξαμενή τροφοδοτείται από τη βασική ροή του ποταμού προτιμάται κλειστός αγωγός. Όταν υπάρχει ανάγκη εκμετάλλευσης τμήματος των πλημμυρικών παροχών προτιμάται η ανοικτή διώρυγα.

Οι εξωποτάμιες λιμνοδεξαμενές κατασκευάζονται έξω από την κοίτη μικρών ποταμών, σε φυσικές συνήθως κοιλότητες του εδάφους που προσφέρονται για αποθήκευση νερού, χωρίς απαραίτητα να εξετάζεται αν το έδαφος είναι διαπερατό ή όχι.

Η φυσική κοιλότητα που επιλέγεται για την κατασκευή της λιμνοδεξαμενής φράσσεται στα τμήματα όπου το φυσικό ανάγλυφο είναι χαμηλότερα από τη στέψη της δεξαμενής, με αναχώματα που κατασκευάζονται από τα υλικά των εκσκαφών διαμόρφωσης της λεκάνης κατάκλυσης. Ο τρόπος κατασκευής του αναχώματος είναι παρόμοιος με αυτόν των χωμάτων ή λιθόρριπτων φραγμάτων και ακολουθούνται οι ίδιες προδιαγραφές συμπίκνωσης, στράγγισης και σεισμικής απόκρισης και ελέγχεται με επιτόπου εργαστήριο δοκιμών εδαφομηχανικής. Οι τυχόν εκσκαφές γίνονται για την οριζοντίωση του πυθμένα, αλλά και για τη διαμόρφωση επίπεδων επιφανειών στα πρανή της δεξαμενής ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητά της και να είναι στη συνέχεια εύκολη, εφόσον χρειάζεται, η κάλυψή τους με αδιαπέρατη μεμβράνη από πλαστικό (γεωμεμβράνη).

Η γεωμεμβράνη χρησιμοποιείται όταν το έδαφος δεν είναι στεγανό, όπως συμβαίνει και στην περίπτωσή μας, για την κάλυψη τόσο του πυθμένα όσο και των πρανών. Κατά κανόνα τοποθετείται πάνω σε ένα στρώμα γαιωδών προϊόντων της εκσκαφής, κατάλληλης κοκκομετρικής σύνθεσης και στη συνέχεια επικαλύπτεται με ένα στρώμα από τα ίδια υλικά ή αφήνεται ακάλυπτη, αφού αγκυρωθεί με βάρη για προστασία από τον άνεμο και τον κυματισμό. Έτσι, πλέον, η στεγανότητα δεν αποτελεί κυρίαρχο κριτήριο επιλογής μιας θέσης, λόγω της ευρείας χρήσης των μεμβρανών.

Το υλικό κατασκευής της μπορεί να είναι πολυμερισμένο πλαστικό, όπως το ειδικά επεξεργασμένο PVC (χλωριούχο πολυβινύλιο), ή το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) απλού τύπου ή ενισχυμένου με γεωπλέγμα (διπλή μεμβράνη – COEX).

Λόγω της απλότητας της κατασκευής της, η εξωποτάμια λιμνοδεξαμενή είναι οικονομικά συμφέρουσα για εφαρμογή σε μικρής έκτασης αρδευτικά δίκτυα. Από γεωτεχνικής πλευράς η λύση της λιμνοδεξαμενής προσφέρεται για εφαρμογές σε ποικίλες γεωλογικές συνθήκες, ενώ περιβαλλοντικά είναι αποδεκτή λόγω της περιορισμένης ανάγκης εκχέρσωσης περιοχών δανειοθαλάμων και της ασήμαντης επίδρασης στα οικοσυστήματα που υπάρχουν κατά μήκος των ποταμών καθώς και στις κατάντη περιοχές που τυχόν τροφοδοτούνται από τις απορροές του ποταμού.

Επίσης αντικείμενο του έργου αποτελεί και η κατασκευή των απαιτούμενων υδραυλικών έργων για την άρδευση της περιοχής. Ειδικότερα, θα κατασκευαστούν έργα συλλήψεως, μεταφοράς και διανομής του νερού προς τους αγρούς με δίκτυο ανοικτών διωρύγων, τα απαραίτητα αποχετευτικά – αποστραγγιστικά έργα καθώς και η εξασφάλιση της προσπελάσεως στην περιοχή των έργων με την κατασκευή πλήρους δικτύου αγροτικών οδών.

Ο εκσυγχρονισμός του αγροτικού τομέα και οι εκάστοτε σχεδιασμένες αναδιαρθρώσεις για την επίτευξή του, όπως έχει περιγραφεί και προηγουμένως, συνδυάζονται με την κάλυψη αρδευτικών αναγκών.

Η υφιστάμενη κατάσταση εκμετάλλευσης του υπόγειου υδατικού δυναμικού της χώρας φαίνεται ότι έχει προσεγγίσει τα μέγιστα όρια αξιοποίησης στους περισσότερους υδροφορείς, ενώ είναι διαπιστωμένες και αρκετές περιπτώσεις υπερεκμετάλλευσης με ελλειμματικά ισοζύγια υπογείων υδάτων. Επίσης, διαπιστώνονται σοβαρές περιβαλλοντικές – και όχι μόνο – επιπτώσεις, όπως η τάση εξάντλησης των αποθεμάτων σε περιοχές της ενδοχώρας ή η προώθηση μετώπων υφαλμύρισης σε παράκτιες ζώνες γεωργικού ενδιαφέροντος.

Η κατασκευή μεγάλων ταμιευτήρων επιφανειακών υδάτων είναι σίγουρο ότι επιτρέπει την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων και επομένως τη διάθεση “φθηνού” νερού για την κάλυψη αναγκών πολλαπλής χρήσης (ύδρευση, άρδευση, ενέργεια, τουρισμός κλπ.). Πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι οι μορφολογικές συνθήκες δεν είναι πάντα ευνοϊκές για το σχεδιασμό μεγάλων φραγμάτων. Άλλωστε λίγοι είναι και οι ποταμοί της Ελλάδας με συνεχή ροή και αξιόλογη παροχή και οι περισσότεροι βρίσκονται στον κορμό της ηπειρωτικής χώρας.

Σε αντιδιαστολή με τα μεγάλα αυτά έργα, υπάρχει η λύση της αποθήκευσης σημαντικών αποθεμάτων νερού για την ανάπτυξη της χώρας σε πολλούς και μικρούς ταμιευτήρες με λιμνοδεξαμενές μικρού ύψους, που αξιοποιούν αρκετά καλά τις δυνατότητες που προσφέρει ένα ομαλότερο τοπογραφικό ανάγλυφο και οι μικρές λεκάνες απορροής.

Επισημαίνεται ότι το μέγεθος αυτών των έργων είναι περισσότερο συμβατό με τις συνθήκες των ξηρών και ημίξηρων περιοχών της χώρας, όπου παρατηρούνται οι απορροές χειμαρρικού τύπου με μεγάλες άνυδρες περιόδους.

Το σχετικά χαμηλό κόστος και το σύντομο χρονικό διάστημα κατασκευής επιτρέπει το σχεδιασμό τέτοιων έργων ακόμη και όταν υπάρχουν θέσεις για μεγάλα φράγματα, καθώς εμπεριέχει αναπτυξιακή δυναμική άμεσης απόδοσης. Τα κεφάλαια που δεσμεύονται, ως επένδυση δε συγκρίνονται με τα αντίστοιχα των μεγάλων φραγμάτων στο επίπεδο του κατασκευαστικού σταδίου ούτε και στο επίπεδο του ερευνητικού σταδίου. Ο χρόνος που απαιτείται για την επιλογή θέσης,

την εκπόνηση του ερευνητικού – μελετητικού προγράμματος και την έναρξη της κατασκευής μπορεί να είναι ακόμα και μικρότερος του ενός έτους. Επίσης, μικρό είναι και το κόστος των συνοδών έργων (υπερχειλιστής κλπ.), σύντομο χρονικό διάστημα κατασκευής (μία ή το πολύ δύο περίοδοι) και μικρά τα απαιτούμενα αρδευτικά δίκτυα. Με άλλα λόγια πρόκειται για παραγωγικά έργα άμεσης απόδοσης.

Οι μικροί ταμιευτήρες μπορούν να καλύπτουν υδροδοτικές ανάγκες πολλαπλών χρήσεων, όπως η ύδρευση, η άρδευση, η βιομηχανία, ο τουρισμός, η κτηνοτροφία, οι ιχθυοκαλλιέργειες κλπ. Η χωρητικότητα ενός μικρού ταμιευτήρα μπορεί να κυμαίνεται από 10.000 m<sup>3</sup> έως 1.000.000 m<sup>3</sup> και περισσότερο.

Στις περιοχές που κατασκευάστηκαν φράγματα ή λιμνοδεξαμενές άρχισαν να αντιμετωπίζονται με αποτελεσματικό τρόπο οι επικρατούσες συνθήκες απερίμωσης και έκτοτε επικρατεί ένα καθεστώς αναπτυξιακής πνοής. Παράλληλα, αναπτύχθηκαν αξιόλογα οικοσυστήματα χλωρίδας και πανίδας στο νέο περιβάλλον, που δημιούργησε η παρουσία του νερού. Έτσι, αναβαθμίστηκε και η οικολογική αξία αυτών των περιοχών.

Οι “τεχνητές λίμνες” που δημιουργήθηκαν μπορούν να αποτελέσουν πόλο έλξης για αναψυχή του ανθρώπινου δυναμικού που διαβιώνει στην ευρύτερη ζώνη, αλλά και για επενδύσεις αγρο-τουριστικών μονάδων κλπ.

Έτσι, στις περιοχές αυτές, παρατηρείται σήμερα μια αξιοσημείωτη αναζωογόνηση του κοινωνικού ιστού και αρχίζουν αναπτυξιακές προσπάθειες με νέες δυναμικές.

Η ενιαία τιμή προεκτιμώμενης αμοιβής (Α) για την εκπόνηση μελέτης λιμνοδεξαμενών υπολογίζεται συναρτήσει της χωρητικότητας της δεξαμενής βάσει του παρακάτω τύπου και περιλαμβάνει:

- τη μελέτη του αναχώματος για τη δημιουργία της λίμνης κατάκλυσης
- τη μελέτη διαμόρφωσης της λεκάνης κατάκλυσης (εκσκαφές και επιχώσεις)
- τη μελέτη στεγάνωσης / στράγγισης της λεκάνης κατάκλυσης στην έκταση που απαιτείται
- τη μελέτη των έργων υδροληψίας προς και από τη λιμνοδεξαμενή και των έργων υπερχειλίσης
- τη μελέτη των απαιτούμενων υποστηρικτικών έργων (οδοποιίας κλπ.) και των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας της λιμνοδεξαμενής
- τη μελέτη θραύσης του αναχώματος και διόδευσης του πλημμυρικού κύματος

$$A = \beta \cdot V$$

όπου  $\beta$  συντελεστής ως εξής:

για λιμνοδεξαμενές όγκου  $\leq 100.000 \text{ m}^3$

$$\beta=0.60$$

για λιμνοδεξαμενές όγκου 300.000 m <sup>3</sup>	β=0.40
για λιμνοδεξαμενές όγκου 500.000 m <sup>3</sup>	β=0.30
για λιμνοδεξαμενές όγκου 1.000.000 m <sup>3</sup>	β=0.25
για λιμνοδεξαμενές όγκου $\geq 1.500.000$ m <sup>3</sup>	β=0.20

Για ενδιάμεσους όγκους λιμνοδεξαμενών το β υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή.

V: η χωρητικότητα της λιμνοδεξαμενής σε m<sup>3</sup>.

Άρα, για τη συγκεκριμένη λιμνοδεξαμενή χωρητικότητας 4.122.250,7 m<sup>3</sup>, ο κατάλληλος συντελεστής είναι β = 0,20. Προκύπτει, έτσι, το προεκτιμώμενο κόστος της λιμνοδεξαμενής που πρόκειται να κατασκευαστεί και είναι:

$$A = 0,20 * 4.122.250,7 \text{ m}^3 = 824.450,14 \text{ €}.$$

Συνεπώς η λιμνοδεξαμενή που προτείνεται να κατασκευαστεί στην περιοχή των Μοιρών με χωρητικότητα 4.122.250,7 m<sup>3</sup>, επιφάνειας 500 στρεμμάτων, ύψους 8,2 m, μήκους στέψης 225 m, πλάτους στέψης 8 m και όγκου αναχώματος 680.000 m<sup>3</sup>, θα κοστίζει περίπου 824.450 €.

#### 4.5 Εναλλακτικές λύσεις σε περίπτωση ξηρού έτους

Στην περίπτωση που έχουμε ξηρά έτη και δεν συμπληρώνεται ο απαραίτητος όγκος νερού στη λιμνοδεξαμενή για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής, θα πρέπει να μεταφερθεί νερό από κάποιες άλλες πηγές. Αυτό, όπως είναι αντιληπτό, θα επιφέρει επιπλέον τελικό κόστος στην ενέργεια A(1), που ίσως τη μετατρέψει εντέλει σε μη βέλτιστη απόφαση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα τρία ενδεχόμενα (M) μεταφοράς νερού που μπορούν να συμβούν σε αυτή την περίπτωση.

##### 1<sup>ο</sup> Ενδεχόμενο: Μεταφορά νερού μέσω σωλήνα από το Ηράκλειο

Μετά από έρευνα για το πιθανό κόστος μεταφοράς νερού από την Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου (Δ.Ε.Υ.Α.Η.) σε περίπτωση ξηρού έτους, διαπιστώθηκε σοβαρά υψηλό κόστος με αποτέλεσμα να καθιστά αυτό το ενδεχόμενο αδύνατο να υλοποιηθεί. Το κύριο κόστος οφείλεται κυρίως στη μεταφορά του νερού λόγω της απόστασης αλλά και της μορφολογίας του ενδιάμεσου εδάφους, που σε συνδυασμό με την αγορά του νερού από την Δ.Ε.Υ.Α.Η., ακυρώνει την επιλογή αυτή ως εναλλακτική συμπληρώματος νερού στη λιμνοδεξαμενή.

## 2<sup>ο</sup> Ενδεχόμενο: Μεταφορά νερού μέσω σωλήνα από τον Βιολογικό Καθαρισμό Τυμπακίου

Με βάση τον επίσημο ιστότοπο της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του ΥΠΕΚΑ στη Βάση Δεδομένων Παρακολούθησης Λειτουργίας για τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων, βρέθηκε ότι ο πιο κοντινός στην περιοχή μελέτης Βιολογικός Καθαρισμός είναι αυτός του Τυμπακίου. Ο ΒΙΟΚΑ Τυμπακίου εφαρμόζει και τριτοβάθμια επεξεργασία στα λύματα που δέχεται, με στόχο την επαναχρησιμοποίηση του νερού για άρδευση της περιοχής. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα συμφέρουσα γιατί το νερό της επαναχρησιμοποίησης θα παρέχεται δωρεάν για πιθανή συμπλήρωση του ταμιευτήρα και, επιπλέον, βρίσκονται σε σημαντικά κοντινή απόσταση. Συνεπώς, το κόστος της εναλλακτικής αυτής περιορίζεται μόνο στην μεταφορά του νερού από την έξοδο της τριτοβάθμιας επεξεργασίας του ΒΙΟΚΑ προς την λιμνοδεξαμενή. Το κόστος αυτό υπολογίζεται στη συνέχεια.

Η ενιαία τιμή προεκτιμώμενης αμοιβής (Α) για την εκπόνηση μελέτης αγωγού εξωτερικού υδραγωγείου ύδρευσης υπολογίζεται συναρτήσει του μήκους του αγωγού και της εσωτερικής διαμέτρου βάσει του τύπου:

$$A = (8 * D^{1/2} + \beta / L^{1/3}) * L$$

όπου L: το μήκος του αγωγού σε μέτρα

D: η διάμετρος του αγωγού σε μέτρα

B: συντελεστής έως εξής:

για αγωγό διαμέτρου $D \leq 250$ mm	$\beta=40$
για αγωγό διαμέτρου $D = 500$ mm	$\beta=75$
για αγωγό διαμέτρου $D = 900$ mm	$\beta=250$
για αγωγό διαμέτρου $D = 1200$ mm	$\beta=400$
για αγωγό διαμέτρου $D = 1500$ mm	$\beta=600$
για αγωγό διαμέτρου $D \geq 2000$ mm	$\beta=800$

Το μήκος του αγωγού θα είναι 11.856,44 m και η κατάλληλη διάμετρος που επιλέχθηκε για μεταφορές νερού είναι D400. Με γραμμική παρεμβολή υπολογίζεται ο συντελεστής  $\beta = 54$ .

$$A = (8 * D^{1/2} + \beta / L^{1/3}) * L = (8 * 0,4^{1/2} + 54 / 11856,44^{1/3}) * 11856,44 = 88.067,18$$

Συνεπώς, το κόστος της εναλλακτικής αυτής προσδιορίστηκε περίπου στα 88.068 €.

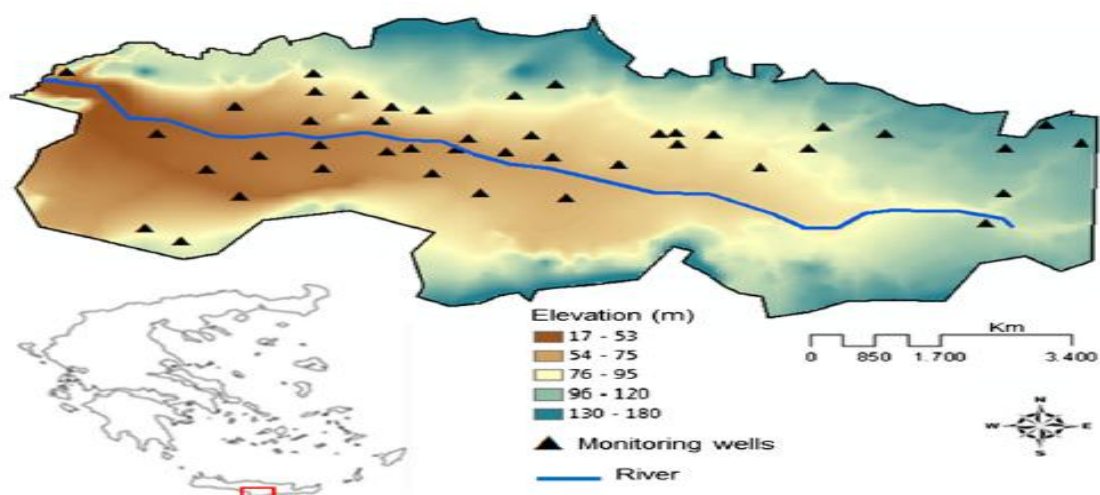
Ο ΒΙΟΚΑ Τυμπακίου, όμως, σύμφωνα με το ΥΠΕΚΑ, διαθέτει ως παροχή επαναχρησιμοποίησης μόνο 550 m<sup>3</sup>/έτος. Είναι, λοιπόν, φανερό ότι αυτή η εναλλακτική συμπλήρωσης νερού στη λιμνοδεξαμενή σε περίπτωση ξηρού έτους, δεν είναι αρκετή μόνη της. Θα πρέπει να συνδυαστεί με το επόμενο ενδεχόμενο, που παρουσιάζεται στη συνέχεια, ή να γίνει μια πρόταση για δημιουργία πολλών Βιολογικών Καθαρισμών στις γύρω περιοχές, ώστε να μαζεύεται μια ικανή ποσότητα νερού για συμπλήρωμα της λιμνοδεξαμενής όποτε χρειάζεται.

### 3<sup>ο</sup> Ενδεχόμενο: Συμπλήρωμα νερού από Γεωτρήσεις (χωρίς υπεράντληση)

Η συλλογή νερού από τοπικές γεωτρήσεις, στην περίπτωση που δεν καλύπτονται οι ανάγκες της περιοχής μόνο από την λιμνοδεξαμενή, μπορεί να διαφέρει από χρονιά σε χρονιά. Η άντληση θα γίνεται σε επίπεδα που δε θα επηρεάζεται αρνητικά ο υπόγειος υδροφόρος, δηλαδή δε θα γίνεται υπεράντληση. Μια τυπική τιμή αγοράς νερού από γεωτρήσεις είναι 0,08€/m<sup>3</sup> για την περιοχή της Κρήτης. Έτσι, ως παράδειγμα, για όγκο νερού 1.000.000 m<sup>3</sup> από γεωτρήσεις, το κόστος θα είναι 80.000€.

Στον χάρτη που απεικονίζει το επίπεδο των υπογείων υδάτων και φαίνεται στη συνέχεια, παρατηρείται ότι η χωρική μεταβλητότητα του επιπέδου των υπογείων υδάτων αλλάζει από τα ανατολικά προς τα δυτικά ακολουθώντας τάση ανύψωσης της επιφάνειας του εδάφους. Τα υψηλότερα επίπεδα συναντώνται στα ανατολικά της λεκάνης καθώς τα χαμηλότερα επίπεδα προς τα Δυτικά (Ε. Varouchakis, Κ. Kolosionis and G. Karatzas 2016). Επίσης, το 40% της αγροτικής δραστηριότητας, και κατά συνέπεια της χρήσης του νερού, γίνεται κοντά στο ποτάμι και στη δυτική πλευρά της λεκάνης.

Προτείνεται, επομένως, η ελεγχόμενη άντληση υδάτων από γεωτρήσεις να γίνεται συγκεκριμένα στο ανατολικό κομμάτι της λεκάνης, όπου η στάθμη του υδροφόρου είναι υψηλότερη σε σχέση με το δυτικό, και μακριά από το ποτάμι.



Εικόνα 9: Χάρτης της Ελλάδας που παρουσιάζει την τοποθεσία της κοιλάδας Μεσσαράς στην Κρήτη και ένας τοπογραφικός χάρτης της λεκάνης των Μοιρών που δείχνει τις χωροθετημένες μετρήσεις υπογείων υδάτων μαζί με την αντίστοιχη ανύψωση της επιφάνειας και την προσωρινή διαδρομή του ποταμού. Τα μαύρα τρίγωνα απεικονίζουν τα 43 χωροθετημένα πηγάδια παρακολούθησης στην λεκάνη για το έτος 2007-08 (τροποποιημένο από Varouchakis and Hristopulos (2013b)).

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 5.1 Αποτελέσματα μεθόδων

Επομένως, μπορεί τώρα να γίνει η εφαρμογή του κώδικα των κατανομών που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB R2013a, ώστε να διαπιστωθεί ποια είναι η βέλτιστη απόφαση όσον αφορά την κατασκευή της λιμνοδεξαμενής ή όχι.

Για το πρώτο σενάριο, εφαρμόζοντας τη διωνυμική κατανομή, το θεώρημα του Bayes θα μας δείξει αν πρέπει ή όχι να πραγματοποιηθεί η κατασκευή του ταμιευτήρα με βάση τα δεδομένα για τις στάθμες του υδροφορέα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί,  $A(0)$  έχει οριστεί η απόφαση να μην κατασκευαστεί η λιμνοδεξαμενή ενώ ως  $A(1)$  η απόφαση για την κατασκευή της. Το κόστος του ταμιευτήρα έχει εκτιμηθεί και ορίζεται, επίσης, το διάστημα των ελέγχων σε εξάμηνα. Τα πρόστιμα έχουν καταχωρηθεί με αυτές τις τιμές σύμφωνα με τη δημοσίευση E.A. Varouchakis et al. (2016), από βιβλιογραφικές πηγές, και κατά την περίπτωση ξηρού έτους έχει προεκτιμηθεί και το κόστος μεταφοράς νερού για συμπλήρωμα στον ταμιευτήρα.

```
Command Window
>> Bayesian_Binomial
give the reservoir cost:824450
give the value of n1:6
give the value of n2:12
give the interval of N:24
give the first penalty fine:2000
give the second penalty fine:4000
give the third penalty fine:8000
weather consider potential drought or not1
e.g. the water transport cost in €88068
best option is A(1)
fx >> |
```

Εικόνα 10: Αποτέλεσμα βέλτιστης λύσης με διωνυμική κατανομή

Παρατηρείται ότι η βέλτιστη λύση με βάση το θεώρημα του Bayes για την διωνυμική κατανομή είναι η A(1), δηλαδή συμφέρει να κατασκευαστεί η λιμνοδεξαμενή και να μην πληρώνονται τα πρόστιμα που προκύπτουν λόγω της υπεράντλησης των υπόγειων υδροφορέων.

Για το δεύτερο σενάριο, εφαρμόζοντας την κατανομή Poisson, το θεώρημα του Bayes θα μας υποδείξει για πόσο διάστημα μπορούμε να αναβάλλουμε την κατασκευή του έργου και μέχρι τότε να πληρώνονται τα πρόστιμα, με βάση τα βροχομετρικά δεδομένα της περιοχής. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, A(0) έχει οριστεί η απόφαση να αναβληθεί το έργο ενώ A(1) η απόφαση για κατασκευή του. Η συνάρτηση αυτή τη φορά είναι γραμμική και γι' αυτό το λόγο ισχύει  $n_1 = n_2 = N$ . Τα κόστη και τα πρόστιμα παραμένουν ίδια.

Έγιναν, λοιπόν, δοκιμές στο διάστημα ελέγχων N και διαπιστώθηκαν τα αποτελέσματα. Για λόγους συντομίας, παρατίθεται ένα κομμάτι των δοκιμών που έγιναν στη συνέχεια.

```
Command Window
weather consider potential drought or not.
best option is A(0)
>> Bayesian_Poisson
give the reservoir cost:824450
give the value of n1:80
give the value of n2:80
give the interval of N:80
give the first penalty fine:2000
give the second penalty fine:4000
give the third penalty fine:8000
weather consider potential drought or not1
e.g. the water transport cost in €88068
best option is A(0)
>> Bayesian_Poisson
give the reservoir cost:824450
give the value of n1:120
give the value of n2:120
give the interval of N:120
give the first penalty fine:2000
give the second penalty fine:4000
give the third penalty fine:8000
weather consider potential drought or not1
e.g. the water transport cost in €88068
fx best option is A(0)
```

Εικόνα 11: Αποτέλεσμα βέλτιστης λύσης με κατανομή Poisson

Παρατηρείται ότι ακόμα και για μεγάλο διάστημα ελέγχων (120 εξαμήνων) η βέλτιστη απόφαση δεν αλλάζει από A(0) σε A(1) ώστε να ορίσουμε το ακριβές διάστημα που μπορεί να αναβληθεί το έργο. Ακόμα, όμως, και να άλλαζε η απόφαση σε ένα τόσο μεγάλο διάστημα δε μας αποδίδει κάποιο ιδιαίτερο νόημα. Η απόφαση, λοιπόν, που προκρίνει η κατανομή Poisson μεταφράζεται ως εξής: Με βάση το κόστος της λιμνοδεξαμενής και τα βροχομετρικά δεδομένα της περιοχής, είναι δυνατόν να συνεχίσουν οι καταβολές των προστίμων, με άμεση συνέπεια την υπεράντληση των υπογείων υδάτων, και να μην κατασκευαστεί η λιμνοδεξαμενή.

## 5.2 Συζήτηση

Είναι φανερό ότι σε ένα δίλημμα που καλείται η ανάλυση επικινδυνότητας να επιλύσει, η απόφαση που φαίνεται βέλτιστη αρχικά, μπορεί να ανατραπεί σε ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Η γνώση της πληροφορίας, που προκύπτει από προγενέστερες καταστάσεις ή μετρήσεις, είναι αυτή που επηρεάζει την ποιοτική πληροφορία και συμβάλει στον προσδιορισμό της αβεβαιότητας. Τα περισσότερα προβλήματα λήψης αποφάσεων σχετίζονται με την αβεβαιότητα την οποία ο υπεύθυνος πρέπει να προσδιορίσει. Η απόφαση που προσδίδει το ελάχιστο αναμενόμενο ρίσκο είναι η βέλτιστη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εφαρμόστηκε η θεωρία λήψης αποφάσεων κατά Bayes με πληροφορία την βροχόπτωση της περιοχής και τις στάθμες νερού του υδροφορέα, χρησιμοποιώντας δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, η περίπτωση της διωνυμικής κατανομής δηλώνει άμεσα ποια απόφαση συμφέρει τον υπεύθυνο να ακολουθήσει, ενώ, στο δεύτερο, η κατανομή Poisson δείχνει αν υπάρχει η δυνατότητα αναβολής του έργου. Πρόκειται, λοιπόν, για δύο διαφορετικές προσεγγίσεις εκ των οποίων τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν αφού λαμβάνουν υπόψη διαφορετικά δεδομένα και κατ' επέκταση διαφορετικές στατιστικές παραμέτρους. Η μεν διωνυμική κατανομή περιλαμβάνει τις στάθμες του υπόγειου υδροφορέα που έχουν καταμετρηθεί ενώ η κατανομή Poisson έχει ως δεδομένα τις τιμές της βροχόπτωσης της περιοχής. Η χρήση και των δύο δεδομένων, όμως, συνδέονται με τη λειτουργία του ταμιευτήρα.

Ο υπεύθυνος για την απόφαση του έργου καλείται ουσιαστικά να επιλέξει ανάμεσα στα βροχομετρικά δεδομένα ή στα δεδομένα στάθμης του υδροφορέα με κριτήριο ποια θεωρεί εκείνος πιο αξιόπιστα. Η βροχόπτωση θεωρείται ότι έχει αβεβαιότητα στα δεδομένα της, χωρίς όμως να γνωρίζουμε αν είναι μεγαλύτερη από τα δεδομένα της στάθμης του υδροφορέα. Σε αυτή την περίπτωση, ο υπεύθυνος είναι απαραίτητο να κρίνει ανάμεσα στα δύο δεδομένα, και κατά συνέπεια στις δύο προσεγγίσεις, με γνώμονα το πόσο πιο εύκολα θα είναι για εκείνον σε τακτά χρονικά διαστήματα να συλλέξει επιπλέον πληροφορία για τα δεδομένα του. Η διαθεσιμότητα και η ποιότητα των δεδομένων, λοιπόν, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την εκτίμηση του αντίστοιχου προβλήματος αλλά και στην απόφαση που εντέλει πρέπει να επιλεγεί.

Η τελική απόφαση, όμως, δε μπορεί να παρθεί μόνο με βάση τον περιβαλλοντικό παράγοντα. Κύριο ρόλο στη θεωρία λήψης αποφάσεων παίζει και το οικονομικό κομμάτι του έργου, το οποίο απευθύνεται στη χρησιμότητα που ασκεί στον υπεύθυνο. Αν ένα έργο, ακόμη και μακροπρόθεσμα, είναι συμφέρον να πραγματοποιηθεί, αποδίδοντας λύση στο εκάστοτε πρόβλημα, και τα χρήματα για την υλοποίησή του είναι διαθέσιμα, τότε μπορεί να επιλεγεί η απόφαση που αρχικά φαίνεται να μην είναι η πιο επιθυμητή.

Έτσι, λοιπόν, η τελική απόφαση που θα πάρει ο υπεύθυνος για το έργο είναι καθαρά υποκειμενική και βασίζεται στις προτεραιότητες που εκείνος θέτει κάθε φορά. Η απόφαση, δηλαδή, μπορεί είτε να συμφωνεί με το αποτέλεσμα που προκρίνει το θεώρημα του Bayes είτε να επιλεγεί η εναλλακτική λύση, που για τα κριτήρια του υπευθύνου θεωρείται καλύτερη.

Όσον αφορά τη βιωσιμότητα της περιοχής και τη σημαντικότητα του προβλήματος από περιβαλλοντική και κοινωνική οπτική, ως βέλτιστη λύση προτείνεται η κατασκευή της λιμνοδεξαμενής καθώς θα σταματήσει την υπεράντληση των υπογείων υδάτων που έχουν σχεδόν εξαντλήσει τους υδροφορείς. Ο ταμιευτήρας θα είναι σε θέση να παρέχει νερό που θα καλύπτει τις αρδευτικές, κυρίως, ανάγκες της περιοχής και έτσι θα αποτελεί μια μακροπρόθεσμη λύση στη διαχείριση υδάτινων πόρων της περιοχής.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου κατά Bayes αποτελούν εργαλείο λήψης αποφάσεων για κατασκευή ή όχι τεχνικών έργων αποταμίευσης νερού σε περιοχές με αντίστοιχες ιδιότητες και χαρακτηριστικά προβλήματα ώστε να αντιμετωπίζεται το πρόβλημα εξάντλησης των υδατικών πόρων. Σημειώνεται ότι δεν είναι ανάγκη οι υπεύθυνοι κάθε προτεινόμενου έργου να προσφεύγουν σε μεγάλες λύσεις (π.χ. μεγάλα φράγματα) τα οποία παίρνουν πολύ χρόνο να αποδώσουν, απαιτούν σημαντικά χρηματικά ποσά και προκαλούν δυσκολίες στην ένταξή τους στα υδρολογικά δίκτυα.

Η παρούσα διπλωματική διατριβή ασχολήθηκε κυρίως με το υδρολογικό και στατιστικό κομμάτι του προβλήματος και δεν έγινε εκτενής μελέτη για το ρεαλιστικό οικονομικό κόστος κατασκευής της λιμνοδεξαμενής. Ο ακριβής υπολογισμός είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος και αφορά μια ξεχωριστή μελέτη πάνω σε αυτό. Για το λόγο αυτό, έγινε μια προεκτίμηση του κόστους κατασκευής του ταμιευτήρα αλλά και των τριών ενδεχομένων που θα εφαρμοστούν σε περίπτωση που υπάρξουν ξηρά έτη και η λιμνοδεξαμενή χρειαστεί επιπλέον νερό.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Βαρουχάκης Εμμ. Πιθανοτική Προσέγγιση Υδρολογικών Μεταβλητών. Προπτυχιακές Σημειώσεις. Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2014.

Βιβλίο ΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΟΙ ΛΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΤΟΥ ΥΠΟΥΡΓΕΙΟΥ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ & ΤΡΟΦΙΜΩΝ, Έκδοση Β', Φεβρουάριος 2006

Παλαιολόγος Ε. Ανάλυση Επικινδυνότητας. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2007

### ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Berger J.O. (1985). Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis, 2nd Ed. New York: Springer series in Statistics. Springer-Verlag.

Croke B., Cleridou N., Kolovos A., Vardavas I., Papamastorakis J. (2000) Water resources in the desertification – threatened Messara Valley of Crete: estimation of the annual water budget using a rainfall-runoff model. Environ Model Softw 15:987-402.doi:10.1016/S1364-8152(00)00018-9

Dokou, Z., and Karatzas, G.P. (2012). Saltwater intrusion estimation in a karstified coastal system using density-dependent modeling and comparison with the sharp-interface approach. Hydrol. Sci. J., 57(5), 985-999

Donta, A. A., Lange, M. A., and Herrmann, A. (2006). Water on Mediterranean islands: Current conditions and prospects for sustainable management. Project No. EVK1-CT-2001-00092, Centre for Environment Research (CER), Univ. of Muenster, Muenster, Germany.

FAO (1972) FAO study of water resources and their exploitation for irrigation in the eastern Crete. Overall study of the Messara Plain. AGL:SF/GRE 31, Tech Rep 1, 368 pp, United Nations Development Programme, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Iraklion

Furi, W., Razack, M., Haile, T., Abiye, T., and Legesse, D. (2011). The hydrogeology of Adama-Wonji Basin and assessment of groundwater level changes in Wonji wetland, main Ethiopian Rift: Results from 2D tomography and electrical sounding methods. Environ. Earth Sci., 62(6), 1323-1335.

Freeze, A., 2015. Hydrogeological Decision Analysis Revisited. NGWA Groundwater Summit, San Antonio, TX, United States.

Freeze, R.A., Massamann, J., Smith, L., Sperling, T., James, B., 1990. Hydrogeological decision analysis: 1. A framework. *Groundwater* 28 (5), 738-766.

Fytrolakis, N., Peterek, A., and Schroder, B. (2005). Initial geoarchaeologic investigations on the Holocene coastal configuration near Phaistos/Agia Triada (Messara Plain, Central Crete, Greece. *Z. Geomorphol. N.F.*, 137, 111-123.

Gusman, A. J., and Marino, M.A. (1999). Analytical modeling of nitrogen dynamics in soils and ground water. *J. Irrig. Drain Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9437(1999)125:6(330),330 – 337.

HYMOS 4.0 (1999) User's manual. WL| Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands

Kilili-Polychronaki, A. (2001). Hydrogeological study of Mires municipality. Institute of Geology and Mineral Exploration, Rethymnon, Greece, 100.

Kritsotakis, M. (2010). Water resources management in Messara valley of Crete. Ph.D. thesis, Technical Univ. of Crete, Chania, Greece (in Greek).

Kritsotakis, M., and Tsanis, I. (2009). An integrated approach for sustainable water resources management of Messara Basin, Crete, Greece. *Europ. Water*, 27(28), 15-30.

Matiatos, I. Alexopoulos, A., and Godelitsas, A. (2014). Multivariate statistical analysis of the hydrogeochemical and isotopic composition of the groundwater resources in the northeastern Peloponnesus (Greece). *Sci. Total Environ.*, 476-477(0), 577-590.

McPhee, J., Yeh, W.W.G., 2006. Experimental design for groundwater modeling and management. *Water Resour. Res.* 42. W02408.

Paleologos E.K. (2008). The Lost Value of Groundwater and its Influence on Environmental Decision Making. *Risk Analysis*. 28(4), 939-950.

Shaban, A., Khawlie, M., Abdallah, C., and Awad, M. (2005). Hydrological and watershed characteristics of the El-Kabir River, North Lebanon''Lakes Reserv. *Res. Manage.*, 10(2), 93-101.

Ta'any, R. A., Al-Syaheen, A.I. and Jiries, A.J. (2013). Characteristics of the aquifer systems in Wadi Kafra Catchment area, Jordan. *J. Environ. Hydrol.*, 21.

Tsanis I., Apostolaki M., (2009) Estimating Groundwater Withdrawal in Poorly Gauged Agricultural Basins, *Water Resources Management*, 23(6):1097-1123

Varouchakis, E.A., 2015. Integrated water resources analysis at basin scale: a case study in Greece. J. Irrig. Drain. Eng. (ASCE), 05015012. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000966](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000966)

Varouchakis E.A., Palogos I., Karatzas G.P., 2016. Application of Bayesian and cost benefit risk analysis in water resources management. J. Journal of Hydrology <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.007>

Vrochidou, A.E.K., Tsanis, I.K., Grillakis, M.G., and Koutroulis, A.G. (2013). The impact of climate change on hydrometeorological droughts at a basin scale. J.Hydrol., 476(0), 290-301.

#### ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [http://ipml-o.ee.duth.gr/~chamzas/courses/dsp\\_grad/pdfs/Chapter\\_2\\_Bayesian\\_Decision\\_Duda\\_2nd\\_ed.pdf](http://ipml-o.ee.duth.gr/~chamzas/courses/dsp_grad/pdfs/Chapter_2_Bayesian_Decision_Duda_2nd_ed.pdf)
- <http://ikee.lib.auth.gr/record/114070/files/vaina.pdf>
- <http://astikalimata.ypeka.gr/Services/Pages/View.aspx?xuwcode=GR4310250111>
- <http://www.thessaly.gov.gr/data/mpe/2015//3529/2015-09-30%20-%20CE%BIC%CE%B5%20CE%BC%CE%B5%CE%BB%CE%AD%CF%84%CE%B5%CF%82%20CF%80%CE%B1%CE%BB%CE%B9%CE%B5%CF%82/%CE%95%CE%9D%CE%99%CE%91%CE%99%CE%9F%20CE%A4%CE%95%CE%A5%CE%A7%CE%9F%CE%A3%20CE%9C%CE%A0%CE%A4.pdf>
- <https://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/512/>
- [http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/handle/123456789/39325/kragiopoulou\\_e\\_oilrisk.pdf?sequence=1](http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/handle/123456789/39325/kragiopoulou_e_oilrisk.pdf?sequence=1)
- <http://ikee.lib.auth.gr/record/114070/files/vaina.pdf>
- [https://books.google.gr/books?id=dR1sFWIUpPUC&pg=PA496&lpg=PA496&dq=bayes+risk+water+resources+management&source=bl&ots=njb2Uxsgm5&sig=IGMgvjYof9CKfHaFom6wK3iBZE8&hl=el&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwi5kbC\\_2obLAhUI6RQKHZZ1D\\_oQ6AEIODAE#v=onepage&q=bayes%20risk%20water%20resources%20management&f=false](https://books.google.gr/books?id=dR1sFWIUpPUC&pg=PA496&lpg=PA496&dq=bayes+risk+water+resources+management&source=bl&ots=njb2Uxsgm5&sig=IGMgvjYof9CKfHaFom6wK3iBZE8&hl=el&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwi5kbC_2obLAhUI6RQKHZZ1D_oQ6AEIODAE#v=onepage&q=bayes%20risk%20water%20resources%20management&f=false)
- <https://www.itia.ntua.gr/el/softinfo/21/>
- <http://penteli.meteo.gr/meteosearch/>

## 7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Βροχομετρικά δεδομένα των 11 σταθμών στη Μεσσαρά το έτος 2004-2005.

DISTRICT OF CRETE	
HYDROFINANCIAL SECTION	
HYDROLOGICAL YEAR 2004-2005	
STATION: AGIA BARBARA HERAKLION	STATION COORDINATES
MEASURING DEVICE: RAIN GAUGE	X: 590910
HYDROLOGICAL BASIN: WEST MESSARA	Y: 3887874
TIME PERIOD: 1965-2011	Z: 570

DAILY RAINFALL IN MM												
DAY	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.
1				4,6	7,6	14,4						
2				3,5	25,5		6,0					
3				3,9	5,8		3,8					
4					28,4	26,3						
5	5,0				5,6	7,0	12,6					
6			55,5		2,8		1,5					
7			1,0		9,6							
8					7,1							
9		6,0		1,6	18,0							
10			4,3	1,6	15,6							
11					28,9							
12			17,1		2,5	6,2						
13			1,0		2,4	9,4						
14			19,5	35,8		21,0						
15			3,0									
16			37,2	22,0		3,2						
17			9,6	22,5		12,5						
18				25,0		40,5						
19				4,5								
20												
21					4,8							
22					17,3	7,7		7,5				
23					5,0							
24				2,0								
25				18,6	25,6							
26				26,5	6,0							
27				24,0	7,0							
28			15,6	1,0	1,5			2,3				
29		3,6						6,3				
30		3,4	3,8	35,0	8,8							
31		4,5		21,0	11,5		1,6					
SUM	5	17,5	168	253	247,3	148,2	25,5	16,1	0	0	0	0

ANNUAL HEIGHT 880,3

**DISTRICT OF CRETE  
HYDROFINANCIAL SECTION**

**HYDROLOGICAL YEAR 2004-2005**

**STATION: AGIOS KIRILLOS HERAKLION**

**MEASURING DEVICE: RAIN GAUGE**

**HYDROLOGICAL BASIN: ASTEROUSION**

**TIME PERIOD: 1961-2011**

**STATION COORDINATES**

**X: 583036**

**Y: 3870700**

**Z: 450**

**DAILY RAINFALL IN MM**

DAY	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.
1					22,4	5,5						
2												
3					24,2							
4			12,5		15,4							
5			4,5		15,7							
6					7,5							
7					4,5							
8					4,5							
9					27,3							
10					31,3							
11					3,5							
12			21,5		6,1	5,5						
13			6,5	36,5	7,3	25,3						
14			41,5	2,5		3,5						
15			6,5	23,5		27,3						
16			5,5	13,7		3,5						13,0
17										3,5		
18				25,3						2,5		
19												
20												
21					7,3			6,2				
22				6,5	10,7							
23				3,8								
24				29,7								
25				43,2	37,0							
26					10,0							
27				39,8		1,8		9,5				
28			2,5					6,5				
29			1,5		6,5							
30			13,5	14,3	15,2							
31					7,3							
<b>SUM</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>116</b>	<b>239</b>	<b>263,7</b>	<b>72,4</b>	<b>0</b>	<b>22,2</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>13</b>

**ANNUAL HEIGHT            732,1**

**DISTRICT OF CRETE**  
**HYDROFINANCIAL SECTION**  
**HYDROLOGICAL YEAR 2004-2005**

**STATION: ASIMI HERAKLION**  
**MEASURING DEVICE: RAIN GAUGE**  
**HYDROLOGICAL BASIN: EAST MESSARA**  
**TIME PERIOD: 1961-2011**

**STATION COORDINATES**

**X: 600049**  
**Y: 3877943**  
**Z: 200**

**DAILY RAINFALL IN MM**

DAY	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.
1				5,2	13,7	13,2						
2				0,9	18,3		3,2					
3			18,2	2,2	3,8		2,9					
4			13,2		24,9	12,2						
5					8,5	12,4	3,7					
6					1,7							
7					8,3							
8												
9												
10			1,5		13,4							
11			10,2		14,6							
12			0,7		9,6	3,2	0,4					
13			20,8		3,3	3,4						
14			2,3	31,8	2,5	3,0						
15			25,8	3,4	0,6	22,2						
16			3,2	24,0		8,7						
17				7,8		3,6						
18			0,3	26,2		26,8				0,3		
19				8,2								
20												
21					1,2							
22				4,6	3,2			3,1				
23				0,3	11,3	0,9						
24				3,2								
25				26,3	47,3							
26				29,6	4,1							
27				5,2	7,2	0,8						
28			0,8		0,9			0,5				
29												
30		0,5	1,1	21,1	5,2		0,2					
31				10,2	6,2		1,5					
<b>SUM</b>	<b>0</b>	<b>0,5</b>	<b>98,1</b>	<b>210</b>	<b>209,8</b>	<b>110,4</b>	<b>11,9</b>	<b>3,6</b>	<b>0</b>	<b>0,3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**ANNUAL HEIGHT      644,8**

**DISTRICT OF CRETE  
HYDROFINANCIAL SECTION  
HYDROLOGICAL YEAR 2004-2005**

**STATION: VAGIONIA HERAKLION**  
**MEASURING DEVICE: RAIN GAUGE**  
**HYDROLOGICAL BASIN: WEST MESSARA**  
**TIME PERIOD: 1969-2010**

**STATION COORDINATES**

**X: 591040**  
**Y: 3874936**  
**Z: 190**

**DAILY RAINFALL IN MM**

DAY	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.
1				7,2		3,6						
2					26,0							
3					8,2	9,1	7,3					
4					22,6	5,4						
5					14,7		4,7					
6												
7					18,3							
8					9,0							
9												
10												
11					13,0							
12			43,0		4,2							
13												
14				45,0	4,1	16,5						
15			44,7	7,1								
16						17,3						
17					25,0	32,2						
18										0,2		
19										0,2		
20												
21								5,0				
22					10,0			1,7				
23												
24												
25				43,8	30,8							
26				40,2								
27					6,6	0,6						
28					0,3							
29								5,3				
30			14,1	48,0	8,3		0,1					
31		2,0		5,2	7,1							
<b>SUM</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>102</b>	<b>197</b>	<b>208,2</b>	<b>84,7</b>	<b>12,1</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>0,4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**ANNUAL HEIGHT                      617,7**

**DISTRICT OF CRETE  
HYDROFINANCIAL SECTION  
HYDROLOGICAL YEAR 2004-2005**

**STATION: VORIZIA HERAKLION**  
**MEASURING DEVICE: RAIN GAUGE**  
**HYDROLOGICAL BASIN: WEST MESSARA**  
**TIME PERIOD: 1963-2012**

**STATION COORDINATES**

**X: 577228**  
**Y: 3889597**  
**Z: 520**

**DAILY RAINFALL IN MM**

DAY	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.
1				35,8	12,3	45,8						
2					16,1							
3					13,2		13,9					
4					59,3	61,2						
5				7,1	26,1	44,9						
6			20,2		15,8							
7					7,1							
8												
9												
10					2,1							
11			30,2		14,9							
12					106,2							
13			19,8		66,1	34,9						
14			4,8	44,1		45,1						
15			32,1									
16				38,8		15,8						6,8
17						24,1						
18				53,7		46,9						
19				36,3								
20												
21												
22					31							
23					18,5			23,9				
24												
25				14,1	42,9							
26				5,9	8,8							
27												
28								11,1				
29												
30			2,1	52,5								
31		16,1		10,2	26,1							
<b>SUM</b>	<b>0</b>	<b>16,1</b>	<b>109</b>	<b>299</b>	<b>466,5</b>	<b>318,7</b>	<b>13,9</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6,8</b>

**ANNUAL HEIGHT      1264,7**

**DISTRICT OF CRETE**  
**HYDROFINANCIAL SECTION**  
**HYDROLOGICAL YEAR 2004-2005**

**STATION: GERGERI HERAKLION**  
**MEASURING DEVICE: RAIN GAUGE**  
**HYDROLOGICAL BASIN: WEST MESSARA**  
**TIME PERIOD: 1963-2012**

**STATION COORDINATES**

**X: 584536**  
**Y: 3887230**  
**Z: 450**

**DAILY RAINFALL IN MM**

DAY	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.
1				6,0	8,5	22,5						
2					18,5		6,0					
3					9,5							
4					13,5							
5			12,0		28,0	40,0	4,0					
6			13,0		14,0							
7						5,1						
8												
9		2,0										
10					22,0							
11			24,1		19,5							
12			1,2		29,0	2,5						
13			18,1		2,0							
14			1,5	39,0								
15			41,0	5,0								
16			12,0	20,5		48,0						
17				24,5		25,0						
18						21,0						
19				57,5								
20												
21					17,0							
22					12,0				5,5			
23				1,0	23,5							
24				3,5								
25				4,0	57,0							
26				33,0								
27				12,5	7,5							
28			4,5		1,5				1,5			
29									14,0			
30		3,5	2,5	39,0	10,0							
31				6,0	10							
<b>SUM</b>	<b>0</b>	<b>5,5</b>	<b>130</b>	<b>252</b>	<b>303</b>	<b>164,1</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>21</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**ANNUAL HEIGHT 885,0**

**DISTRICT OF CRETE  
HYDROFINANCIAL SECTION  
HYDROLOGICAL YEAR 2004-2005**

**STATION: ZAROS HERAKLION**  
**MEASURING DEVICE: RAIN GAUGE**  
**HYDROLOGICAL BASIN: WEST MESSARA**  
**TIME PERIOD: 1952-2012**

**STATION COORDINATES**

**X: 581799**  
**Y: 3887788**  
**Z: 500**

**DAILY RAINFALL IN MM**

DAY	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.
1						45,5						
2							8,0					
3												
4					38,5	47,0	5,0					
5					6,5	8,5						
6			19,5									
7												
8												
9												
10			26,0		36,0							
11					18,5							
12					46,0	3,5						
13			21,5			15,5						
14			9,0		4,5							
15				56,0								
16			46,0	29,0		31,0						
17						4,5						
18				72,0		51,0						
19				29,5								
20												
21					19,0							
22					15,0			8,0				
23					25,0							
24				6,0	65,0							
25				25,0								
26					8,5							
27				23,5								
28								20,0				
29												
30		5,0	10,5	27,0			3,0					
31				8,0	26,0							
<b>SUM</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>133</b>	<b>276</b>	<b>308,5</b>	<b>206,5</b>	<b>16</b>	<b>28</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**ANNUAL HEIGHT      972,5**

**DISTRICT OF CRETE  
HYDROFINANCIAL SECTION  
HYDROLOGICAL YEAR 2004-2005**

**STATION: KAPETANIANA HERAKLION**  
**MEASURING DEVICE: RAIN GAUGE**  
**HYDROLOGICAL BASIN: EAST MESSARA**  
**TIME PERIOD: 1969-2010**

**STATION COORDINATES**  
**X: 594138**  
**Y: 3869421**  
**Z: 800**

**DAILY RAINFALL IN MM**

DAY	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.
1				11,2	32,7							
2					16,3							
3					30,6		8,7					
4					9,3							
5			18,7									
6			7,5									
7												
8												
9												
10			0,7		21,6							
11												
12					18,7	8,7						
13			23,5									
14				42,5		2,5						
15			32,2	7,8								
16				22,4		18,3						
17				8,9								
18				1,0		44,6						
19												
20												
21												
22				15,3	15,6							
23				22,7	18,7							
24												
25				25,5	6							
26												
27								35,7				
28												
29				11,8				14,3				
30				20,5	8,5							
31		7,2			14,4							
<b>SUM</b>	<b>0</b>	<b>7,2</b>	<b>82,6</b>	<b>190</b>	<b>192,4</b>	<b>74,1</b>	<b>8,7</b>	<b>50</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**ANNUAL HEIGHT      604,6**

**DISTRICT OF CRETE  
HYDROFINANCIAL SECTION  
HYDROLOGICAL YEAR 2004-2005**

**STATION: LAGOLIO HERAKLION**  
**MEASURING DEVICE: RAIN GAUGE**  
**HYDROLOGICAL BASIN: WEST MESSARA**  
**TIME PERIOD: 1969-2012**

**STATION COORDINATES**

**X: 571666**  
**Y: 3884860**  
**Z: 140**

**DAILY RAINFALL IN MM**

DAY	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.
1				12,5	10,0	15,5						
2				0,4	20,4		2,0					
3					15,7		2,5					
4			15,0		30,0	6,0						
5			4,2		12,5		6,0					
6			43,5									
7												
8												
9												
10					14,5							
11			5,0		34,0							
12					7,0							
13			13,0			8,5						
14			2,5	43,5		14,0						
15			49,5	1,5								
16			16,1	33,0								
17			1,0	35,0		16,5						
18				40,8		31,5						
19										2,5		
20										2,0		
21					6,0							
22					28,0			7,5				
23					18,5							
24												
25				17,0	25,5							
26				21,0								
27				3,0	5,0	2,5		4,5				
28			0,9					12,0				
29							2,5					
30		10,0	8,0	20,0	7,5							
31				6,0	16,5							
<b>SUM</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>159</b>	<b>234</b>	<b>251</b>	<b>94,5</b>	<b>13</b>	<b>24</b>	<b>0</b>	<b>4,5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**ANNUAL HEIGHT                      789,5**

**DISTRICT OF CRETE**  
**HYDROFINANCIAL SECTION**  
**HYDROLOGICAL YEAR 2004-2005**

**STATION: MORONI HERAKLION**  
**MEASURING DEVICE: RAIN GAUGE**  
**HYDROLOGICAL BASIN: WEST MESSARA**  
**TIME PERIOD: 1969-2012**

**STATION COORDINATES**

**X: 582134**  
**Y: 3883486**  
**Z: 400**

**DAILY RAINFALL IN MM**

DAY	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.
1					21,4		1,2					
2					5,2		6,3					
3					34,5	15,2						
4			4,5		8,7	1,3						
5			13,6		9,1		7,2					
6					3,2							
7				3,2								
8												
9					18,4							
10			9,7		19,5							
11					11,6	8,9						
12			27,5		4,1	14,1						
13			2,3	42,6	1,7	16,2						
14			38,4									
15			16,7	24,7		8,5						
16			15,8	28,5		13,4						3,2
17				33,8		22,8						
18												
19												
20												
21				1,2	22,4			6,9				
22					6,5							
23												
24				12,6	36,2							
25				34,3				0,8				
26				5,2	6,0			5,2				
27			1,8									
28								0,5				
29		1,0	8,6	31,6	9,2		0,6					
30		1,2	6,3	8,7	11,6		0,3					
31				19,2	7,1							
<b>SUM</b>	<b>0</b>	<b>2,2</b>	<b>145</b>	<b>246</b>	<b>236,4</b>	<b>100,4</b>	<b>15,6</b>	<b>13,4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3,2</b>

**ANNUAL HEIGHT      762,0**

**DISTRICT OF CRETE**  
**HYDROFINANCIAL SECTION**  
**HYDROLOGICAL YEAR 2004-2005**

**STATION: POMPIA HERAKLION**  
**MEASURING DEVICE: RAIN GAUGE**  
**HYDROLOGICAL BASIN: WEST MESSARA**  
**TIME PERIOD: 1945-2010**

**STATION COORDINATES**

**X: 578536**  
**Y: 3874150**  
**Z: 150**

**DAILY RAINFALL IN MM**

DAY	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.
1				30,5	18,2							
2					34,3							
3					7,8		9,1					
4			3,5		21,8	5,1						
5			0,3		11,5		3,1					
6					1,2							
7												
8												
9					1,5							
10					18,1							
11					23,1							
12					2,5	3,0						
13			25,5		1,2	9,1						
14			5,6	38,5	4,5	4,1						
15			47,1	2,1	0,3							
16			9,5	18,3								
17			18,5	12,5								
18				26,4		29,1						
19												
20												
21					2,4							
22				6,5	14,2			9,7				
23				2,5	2,0							
24												
25				12,5	28,1							
26				42,8	0,3							
27				4,5	8,5			12,0				
28			2,2		0,2							
29												
30		0,3	7,1	34,5	7,1		0,5					
31		2,1		4,5	9,1		1,5					
<b>SUM</b>	<b>0</b>	<b>2,4</b>	<b>119</b>	<b>236</b>	<b>218</b>	<b>50,4</b>	<b>14,2</b>	<b>21,7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**ANNUAL HEIGHT      662,0**