



**Πολυτεχνείο Κρήτης**

**Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΩΝ ΜΟΙΡΩΝ  
ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ BAYES RISK»*

**ΙΩΑΝΝΑ ΒΑΡΣΑΜΟΥ**

**ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2019**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης



**Πολυτεχνείο Κρήτης**

**Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*«ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΩΝ ΜΟΙΡΩΝ  
ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ BAYES RISK»*

**ΙΩΑΝΝΑ ΒΑΡΣΑΜΟΥ**

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΑΡΑΤΖΑΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΩΡ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΒΑΡΟΥΧΑΚΗΣ

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συντέλεσαν στη σωστή διεκπεραίωσή της.

Αρχικά ευχαριστώ τον κύριο Καρατζά Γεώργιο για την ανάθεση της εργασίας, την πολύτιμη βοήθειά του και τις γνώσεις που μου μετέδωσε μέσα από τη διδασκαλία του.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να δώσω στον Δρ. Βαρουχάκη Εμμανουήλ για την καθοδήγηση, την άψογη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας και για τις συμβουλές του.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους προαναφερθείς και τον κύριο Παρανυχιανάκη Νικόλαο για τη συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Άννα και Άγγελο για την οικονομική και ηθική στήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου στα Χανιά για τη συμπαράσταση και τη φιλοξενία.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υπεράντληση του των υπόγειων υδροφορέων είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται έντονα τα τελευταία χρόνια λόγω ελλιπούς σχεδιασμού διαχείρισης των υδατικών πόρων. Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η περιοχή των Μοιρών Ηρακλείου στη δυτική Μεσσαρά όπου έχει παρατηρηθεί πτώση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα λόγω υπερεκμετάλλευσης. Η πεδιάδα της Μεσσαράς χαρακτηρίζεται από έντονη αγροτική δραστηριότητα και μεγάλες ανάγκες άρδευσης συνεπώς είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας περιβαλλοντικής πολιτικής για την κάλυψη των αναγκών αυτών. Προτείνεται, η κατασκευή μιας λιμνοδεξαμενής που συγκεντρώνει το νερό της βροχής και της επιφανειακής απορροής, ενώ σε περίπτωση ξηρού έτους προτείνεται η μεταφορά νερού με επιπρόσθετο κόστος. Το δίλημμα που προκύπτει είναι αν η προτεινόμενη ενέργεια είναι πιο συμφέρουσα περιβαλλοντικά και οικονομικά από την υπάρχουσα πολιτική, η οποία περιλαμβάνει την πληρωμή προστίμου για υπεράντληση και υποβάθμιση του υπόγειου νερού.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η θεωρία λήψης αποφάσεων κατά Bayes υπολογίζοντας την επικινδυνότητα κάθε απόφασης με την έννοια του οικονομικού κόστους. Μέσω της θεωρίας του Bayes υπολογίστηκαν οι άγνωστες παράμετροι των συναρτήσεων επικινδυνότητας με χρήση προγενέστερων συναρτήσεων που προέκυψαν από μετρήσεις στην περιοχή μελέτης. Οι προγενέστερες και μεταγενέστερες συναρτήσεις που αφορούν την άγνωστη πιθανότητα υπεράντλησης δόθηκαν από τη διωνυμική κατανομή και την κατανομή Βήτα για δύο διαφορετικά σενάρια συνάρτησης απώλειας σύμφωνα με τα δεδομένα στάθμης υπόγειου νερού της περιοχής. Επίσης συνεκτιμήθηκε η πιθανότητα παρουσίας ξηρών ετών σύμφωνα με τα βροχομετρικά δεδομένα της περιοχής μελέτης ώστε να υπολογιστεί το κόστος μεταφοράς νερού σε περίπτωση μη πλήρωσης της λιμνοδεξαμενής. Για την ορθή διεξαγωγή αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν 4 δοκιμές για καθένα από τα δύο σενάρια αλλάζοντας τους παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος. Έτσι προσδιορίστηκε ο αριθμός των θετικών ελέγχων υπό την επιβολή μεταβαλλόμενου προστίμου που εξισορροπεί το κόστος για την κατασκευή του προτεινόμενου περιβαλλοντικού έργου για την προστασία των υπόγειων υδάτων. Ο κατάλληλος συνδυασμός χρήσης υπογείων υδάτων και νερού από την λιμνοδεξαμενή είναι αυτός που ισορροπεί τα οικονομικά οφέλη της κοινωνίας και τη βιωσιμότητα του περιβάλλοντος.

## **ABSTRACT**

Over-pumping of groundwater is a common phenomenon in semiarid and coastal areas. The basic reason is poor water resources management plans. In this thesis the study area is the Mires basin of western Messara watershed, located in Heraklion, Crete, Greece. The aquifer level has dropped significantly the past 30 years due to overexploitation. The Messara plain is characterized by strong agricultural activity and is in great need of irrigation water. An optimal environmental strategy is necessary to cover these needs. Therefore, a construction of a reservoir is proposed to collect the rain water and runoff, while water transfer is considered in case of dry years with extra financial cost. The decision dilemma is whether the proposed environmental policy is riskier than the existing policy that considers the use of groundwater only.

The proposed environmental policy competes against high groundwater overexploitation fines, the lost value of groundwater and the pumping cost. The method used to assess the decision dilemma was Bayes risk. In Bayes theory the unknown parameters of the risk functions were calculated using prior functions derived from measurements of the study area. Prior functions related to the unknown probability of over-pumping were given by the binomial distribution and the posterior by Beta distribution for two different loss function scenarios. The probability of dry year was also estimated according to the rainfall data of the area in order to calculate the water transfer cost in case the reservoir fails to provide sufficient reserves. Four tests were performed for each of the two scenarios, changing the factors that affect the reservoir cost in order to get the optimal outcome. Thus, it was determined the optimal reservoir capacity compared to the penalties that occur from the positive over-pumping audits. The right combination of the two actions is the one that balances the economic benefits of society and the sustainability of the groundwater and the environment.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	5
<b>ABSTRACT</b> .....	6
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	10
1.1. Το Υπόγειο Νερό .....	10
1.2. Το Πρόβλημα της Περιοχής .....	11
1.3. Τρόπος Προσέγγισης.....	12
<b>2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ</b> .....	13
2.1. Χαρακτηριστικά Ευρύτερης Περιοχής.....	13
2.2. Γεωγραφική Θέση Περιοχής .....	14
2.3. Κλίμα Περιοχής .....	15
2.4. Περιβάλλον και Χρήσεις Γης .....	16
2.5. Υδρογεωλογικά Χαρακτηριστικά .....	16
2.6. Υδρολογικά χαρακτηριστικά.....	19
2.7. Άρδευση της περιοχής.....	23
<b>3. ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ</b> .....	25
3.1. Στατιστική Θεωρία .....	25
3.1.1. Διωνυμική Κατανομή.....	25
3.1.2. Κατανομή Βήτα .....	26
3.2. Θεωρία Λήψης Αποφάσεων .....	27
3.3. Λήψη Αποφάσεων κατά Bayes .....	31
3.4. Το πρόβλημα με Bayes .....	32
<b>4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ BAYES</b> .....	34
4.1. 1 <sup>ο</sup> Σενάριο .....	34
4.2. 2 <sup>ο</sup> Σενάριο .....	38
<b>5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b> .....	41
5.1. Υπολογισμοί Παραμέτρων .....	41
5.2. Δοκιμές.....	52
<b>6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b> .....	56
<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	58
<b>8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	59
<b>9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ</b> .....	62

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Ετήσιες απορροές Μεσσαράς για τα έτη 1967-2007 .....	44
Πίνακας 2. Στατιστικές και σχεδιαστικές παράμετροι .....	44
Πίνακας 3. Τιμές της τυχαίας μεταβλητής $Z_p$ για διάφορα ποσοστά πιθανότητας κάλυψης αναγκών για νερό.....	44
Πίνακας 4. Κόστος και όγκος λιμνοδεξαμενών στην Ελλάδα .....	47
Πίνακας 5. Υπολογισμοί σε Excel για Δοκιμή 1-Σενάριο 1 και $C=6.000.000\text{€}$ .....	52
Πίνακας 6. Παράμετροι και αποτελέσματα για κάθε δοκιμή .....	55



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ/ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1. Πεδιάδα Μεσσαράς [Google Maps, 10/12/18].....	14
Εικόνα 2. Πεδιάδα Δυτικής Μεσσαράς [Google Maps, 10/12/2018] .....	15
Εικόνα 3. Απλοποιημένη γεωλογική δομή της λεκάνης των Μοιρών [Varouchakis, 2016 τροποποιημένο από Vardavas et al., 1996].....	17
Εικόνα 4. Πεδιάδα Μεσσαράς και χωροθέτηση των 11 βροχομετρικών σταθμών, RG1 Λαγόλιο, RG2 Βοριζία, RG3 Ζαρός, RG4 Γεργάρη, RG5 Αγία Βαρβάρα, RG6 Μορόνι, RG7 Πόμπια, RG8 Βαγιωνιά, RG9 Ασήμι, RG10 Άγιος Κύριλλος, RG11 Καπετανιανά [Tsanis and Apostolakis, 2009] .....	23
Εικόνα 5. Τεχνητή λίμνη Φανερωμένης (πάνω: 2016, κάτω: 2018).....	24
Διάγραμμα 1. Κατακρήμνιση, επίπεδο υπογείων υδάτων και ρυθμός άντλησης τα έτη 1980-2010 [Varouchakis, 2015].....	18
Διάγραμμα 2. Μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις στην πεδιάδα της Μεσσαράς (1980-2015).....	20
Διάγραμμα 3. Μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις στην πεδιάδα της Μεσσαράς.....	20
Διάγραμμα 4. Ημερήσια παροχή ποταμού Γεροπόταμου για το έτος 2013 .....	21
Διάγραμμα 6. Ωφέλιμος όγκος σαν συνάρτηση των αναγκών για νερό για διάφορα ποσοστά πιθανότητας κάλυψή τους .....	45
Διάγραμμα 7. Κόστος κατασκευής ταμιευτήρα ως προς τον ωφέλιμο όγκο του .	45
Διάγραμμα 8. Κόστος λιμνοδεξαμενών ως προς τον ωφέλιμο όγκο τους στην Ελλάδα .....	48
Διάγραμμα 9. Κόστος ενεργειών 0 και 1 ως προς τις παραβάσεις για Δοκιμή 1-Σενάριο 1 .....	53
Διάγραμμα 10. Κόστος ενεργειών 0 και 1 ως προς τις παραβάσεις για Δοκιμή 1-Σενάριο 2 .....	54

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Το Υπόγειο Νερό

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν τη μεγαλύτερη δεξαμενή γλυκού νερού στον κόσμο. Υπολογίζεται ότι αποτελούν πάνω από το 97% των διαθέσιμων γλυκών νερών στη γη. Το υπόλοιπο 3% αποτελείται κυρίως από επιφανειακά ύδατα και την υγρασία εδάφους. Μέχρι σήμερα, το ενδιαφέρον για τα υπόγεια νερά αφορούσε κυρίως στην κάλυψη των αναγκών για ύδρευση, αναγνωρίζοντας επίσης ότι είναι ένας σημαντικός φυσικός πόρος για την άντληση νερού για τη βιομηχανία και τη γεωργία. Εντούτοις, γίνεται όλο και περισσότερο αντιληπτό ότι τα υπόγεια ύδατα πρέπει να αντιμετωπισθούν όχι μόνο ως μια δεξαμενή, από την οποία μπορεί να αντληθεί νερό καλής ποιότητας, για διάφορες χρήσεις, αλλά και να προστατευθούν για την περιβαλλοντική αξία τους. Τα υπόγεια ύδατα διαδραματίζουν έναν ουσιαστικό ρόλο στον υδρολογικό κύκλο και είναι πολύτιμη η αξία τους ως ρυθμιστικός παράγοντας για τη διατήρηση υγροτόπων και ποταμών, ιδιαίτερα σε περιόδους ξηρασίας, γιατί εξασφαλίζουν τη μόνιμη ροή των συστημάτων επιφανειακών υδάτων, πολλά από τα οποία χρησιμοποιούνται για υδροδότηση και αναψυχή. Σε πολλούς ποταμούς της Ευρώπης, πλέον του 50% της ετήσιας ροής προέρχεται από υπόγεια ύδατα. Το καλοκαίρι που το νερό λιγοστεύει, πλέον του 90% της ροής σε μερικούς ποταμούς μπορεί να είναι υπόγειας προέλευσης. Γι' αυτό και η υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων μπορεί να επηρεάσει άμεσα τα συνδεόμενα με αυτά υδατικά και χερσαία οικοσυστήματα [European Communities, 2008].

Ο παγκόσμιος πληθυσμός φτάνει σήμερα περίπου τα  $7,6 \cdot 10^9$  και μέχρι το 2050 θα φτάσει τα  $9,8 \cdot 10^9$  [Population Reference Bureau, 2017]. Ο υπερπληθυσμός έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των αναγκών σε νερό και τροφή, ενώ ήδη πρέπει να αντιμετωπισθεί η κακή διαχείριση των υδάτων και η κλιματική αλλαγή που επιφέρει η ανθρώπινη δραστηριότητα. Η ορθή διαχείριση των υδάτων αφορά την ποιότητα και την ποσότητά του γι' αυτό έχει αναπτυχθεί Ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο για την προστασία τους. Όσον αφορά τα υπόγεια ύδατα, στη δήλωση του Υπουργικού Σεμιναρίου, το οποίο διοργανώθηκε στη Χάγη το 1991, αναγνωρίστηκε η ανάγκη ανάπτυξης δράσης προς αποφυγή μακροπρόθεσμης επιδείνωσης της ποιότητας και της ποσότητας των γλυκών υδάτων. Έγινε έκκληση για ένα πρόγραμμα δράσεων, υλοποιητέων μέχρι το έτος 2000, με στόχο την προώθηση της βιώσιμης διαχείρισης και προστασίας των πόρων γλυκών υδάτων. Ακολούθησε πρόταση της Επιτροπής για ένα πρόγραμμα δράσης για την ολοκληρωμένη προστασία και τη διαχείριση των υπόγειων υδάτων, η οποία εγκρίθηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο στις 25 Νοεμβρίου 1996. Η πρόταση επισήμανε την ανάγκη καθιέρωσης διαδικασιών για τη ρύθμιση της άντλησης και για την παρακολούθηση της ποιότητας και της ποσότητας των γλυκών νερών. [COM 1996/0355]

## 1.2. Το Πρόβλημα της Περιοχής

Η πεδιάδα της Μεσσαράς είναι μια περιοχή με έντονη αγροτική δραστηριότητα αφού αποτελείται ως επί το πλείστον από καλλιεργημένες εκτάσεις και παράγει συνολικά το μεγαλύτερο ποσοστό ελαιόλαδου της Κρήτης. Η άρδευση των καλλιεργειών καλύπτεται από γεωτρήσεις που αντλούν υπόγειο νερό και από έργα όπως φράγματα και λιμνοδεξαμενές που συγκεντρώνουν επιφανειακά νερά. Το εκτεταμένο δίκτυο σταθμών άντλησης είναι σε λειτουργία από το 1984, μετατρέποντας ξηρές καλλιέργειες ελαιόδεντρων σε αρδευόμενες καλλιέργειες [Donta et al., 2006]. Συνεπώς, η παραγωγικότητα έχει ανέβει όπως και η αυξημένη ανάγκη για άρδευση με αποτέλεσμα την υπεράντληση του υπόγειου νερού και 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.

Μία ακόμα επίπτωση της εκτεταμένης υπεράντλησης είναι η καθίζηση του εδάφους. Όταν αφαιρείται υπόγειο νερό μέσω άντλησης τα κενά μεταξύ των κόκκων στο υπέδαφος μικραίνουν με αποτέλεσμα το έδαφος να υποχωρεί. Στην περιοχή που μελετήθηκε έχει υπολογιστεί υποχώρηση του εδάφους κατά 3 cm/year για την περίοδο 2007-2011 με μέγιστες τιμές κοντά στις Μοίρες και το Χάρακα. [Paradaki, 2014]

Όσον αφορά τα έργα που έχουν κατασκευαστεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος, στη δυτική Μεσσαρά υπάρχει το φράγμα Φανερωμένης που δημιουργεί τεχνητή λίμνη χωρητικότητας 20.000.000 m<sup>3</sup>. Κατασκευάστηκε το 2005 για να καλύψει τις ανάγκες για άρδευση της περιοχής κινδυνεύοντας όμως κάποιες χρονιές να μη γεμίσει και να μη μπορεί να καλύψει τις ανάγκες αυτές. Για παράδειγμα το 2018 ήταν μια άσχημη χρονιά για το φράγμα Φανερωμένης αφού οι βροχοπτώσεις ήταν πολύ περιορισμένες και το νερό έφτασε τα 800.000 m<sup>3</sup> ενώ το όριο ασφαλείας είναι περίπου τα 4.000.000 m<sup>3</sup>. Ευτυχώς ο Φεβρουάριος του 2019 ήταν ένας υγρός μήνας με την ποσότητα νερού στο φράγμα να ξεπερνάει τα 10.000.000 m<sup>3</sup>.

Συνεπώς είναι αναγκαία μια λύση ώστε να συγκεντρώνεται αρκετό νερό για την άρδευση της περιοχής και να μειωθεί η παραβατική συμπεριφορά της υπεράντλησης του υπόγειου νερού. Έτσι λοιπόν ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να προτείνει μια περιβαλλοντική λύση, να μελετηθεί κατά πόσο είναι συμφέρουσα οικονομικά σε σχέση με την υπάρχουσα πολιτική και να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός των δύο ενεργειών με χρήση της θεωρίας λήψης αποφάσεων κατά Bayes.

### 1.3. Τρόπος Προσέγγισης

Το πρόβλημα προσεγγίστηκε με οικονομικούς παράγοντες λαμβάνοντας υπόψη τους περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Ως ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων έπρεπε να οριστούν οι ενέργειες. Η πρώτη ενέργεια αφορά την τροφοδότηση νερού με άντληση από τον υπόγειο υδροφόρα και η δεύτερη ενέργεια την κατασκευή μιας λιμνοδεξαμενής που θα συσσωρεύει το νερό της βροχής. Αρχικά ορίστηκαν οι συναρτήσεις απώλειας, οι οποίες δινόντουσαν από το άθροισμα των οικονομικών επιβαρύνσεων κάθε ενέργειας. Στην πρώτη ενέργεια οι οικονομικές επιβαρύνσεις ήταν η επιβολή προστίμων για τις παραβάσεις υπεράντλησης του υπόγειου υδροφόρα, το κόστος άντλησης και η χαμένη αξία του υπόγειου νερού καθώς το πόσιμο νερό υποβαθμίζεται σε αρδευτικό. Στη δεύτερη ενέργεια οι οικονομικές επιβαρύνσεις ήταν το κόστος κατασκευής του ταμιευτήρα, το ετήσιο κόστος του και σε περίπτωση μη πλήρωσής του, το κόστος μεταφοράς συμπληρωματικού νερού.

Για την εκτίμηση της επικινδυνότητας της κάθε ενέργειας χρειάστηκε να υπολογιστούν άγνωστες πιθανότητες που θεωρήθηκαν τυχαίες μεταβλητές. Έτσι υπολογίστηκαν οι τιμές της συνάρτησης επιδίωξης ως προς τις άγνωστες πιθανότητες σύμφωνα με τη θεωρία του Bayes. Η εκτίμηση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας έγινε με χρήση προγενέστερης κατανομής που προέκυψε από μετρήσεις στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα οι αβεβαιότητες που προέκυψαν αφορούσαν την πιθανότητα υπεράντλησης για τον υπολογισμό του προστίμου στην πρώτη ενέργεια και η πιθανότητα μη πλήρωσης της δεξαμενής στη δεύτερη ενέργεια. Αρχικά χαρακτηρίστηκε ως επιτυχία σύμφωνα με το πείραμα Bernoulli η εμφάνιση υπεράντλησης και στη συνέχεια μετρήθηκαν οι επιτυχίες αυτές με χρήση των βιβλιογραφικών δεδομένων. Δηλαδή για την πιθανότητα παράβασης μετρήθηκαν οι φορές που η στάθμη του υπόγειου νερού έπεσε πάνω από το όριο σύμφωνα με τα δεδομένα στάθμης του υπόγειου υδροφόρα της περιοχής. Στη συνέχεια υπολογίστηκε στατιστικά η πιθανότητα για υπεράντληση με χρήση της διωνυμικής κατανομής και της κατανομής Β ως προγενέστερης. Για την πιθανότητα να μη γεμίσει ο ταμιευτήρας θεωρήθηκε επιτυχία η εμφάνιση ξηρού έτους. Αρχικά μετρήθηκαν οι φορές που η ετήσια βροχόπτωση της ήταν τόση ώστε να θεωρηθεί ξηρό έτος σύμφωνα με τα βροχομετρικά δεδομένα των σταθμών της περιοχής. Στη συνέχεια υπολογίστηκε στατιστικά η πιθανότητα για μη πλήρωση του έργου με χρήση των στατιστικών ιδιοτήτων της αναμενόμενης τιμής για ένα γραμμικό τύπο συνάρτησης απώλειας.

## 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 2.1. Χαρακτηριστικά Ευρύτερης Περιοχής

Η Κρήτη χαρακτηρίζεται από μεσογειακό κλίμα, με ζεστά και ξηρά καλοκαίρια και ήπιους, υγρούς χειμώνες. Κατά το καλοκαίρι, δεν παρατηρούνται βροχοπτώσεις, ενώ το χειμώνα παρατηρείται μεγαλύτερη υγρασία. Μάλιστα, θεωρείται ότι έχει το ηπιότερο κλίμα σε όλη την Ελλάδα. Τους πιο ζεστούς μήνες αποτελούν ο Ιούλιος και ο Αύγουστος και η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει έως και 38 °C τις θερμότερες ημέρες. Ο χειμώνας είναι αρκετά ήπιος και υγρός, με αρκετές βροχοπτώσεις, ως επί το πλείστον, στο βορειοδυτικό τμήμα του νησιού. Η χιονόπτωση είναι σπάνια στις πεδινές εκτάσεις, αλλά αρκετά συχνή στις ορεινές. Η νότια ακτή, συμπεριλαμβανομένης της πεδιάδας της Μεσσαράς και των Αστερουσίων ορέων, απολαμβάνει περισσότερες ηλιόλουστες ημέρες και υψηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού σε σχέση με την υπόλοιπη μεγαλόνησο.

Ο νομός Ηρακλείου περικλείεται στις δύο πλευρές του από τη Δίκτη ανατολικά και την Ίδη (Ψηλορείτη) δυτικά και στο νότιο τμήμα του νομού, παράλληλα προς την ακτή του Λιβυκού, εκτείνεται μέχρι το ακρωτήριο Λίθινο η δυτική συνέχεια της Δίκτης, τα Αστερούσια όρη. Το έδαφος είναι ορεινό, με πεδινά τμήματα στο βόρειο και στο νοτιοδυτικό τμήμα. Βόρεια του Κόφινα βρίσκεται η πεδιάδα της Μεσσαράς, η μεγαλύτερη της Κρήτης. Η άλλη πεδιάδα του νομού είναι στη βόρεια παραλιακή ζώνη, η πεδιάδα Ηρακλείου Μαλίων, που απλώνεται σε όλο το παράκτιο τμήμα και σε ορισμένα σημεία συνεχίζεται με κοιλάδες στο εσωτερικό. Η ακτή του νομού στο Κρητικό πέλαγος έχει αρκετούς όρμους και ακρωτήρια στα δυτικά του Ηρακλείου και από εκεί συνεχίζεται μονότονη μέχρι τον κόλπο των Μαλίων. Η ακτή του Λιβυκού, χαμηλή και αραιοκατοικημένη, σχηματίζει μερικούς όρμους μέχρι το ακρωτήριο Λίθινο –το νοτιότερο της Κρήτης– και συνεχίζεται χαμηλή στον όρμο της Μεσσαράς. Μεταξύ των ακρωτηρίων Λίθινο (στο Λιβυκό) και Σταυρός (στο Κρητικό) βρίσκεται το πλατύτερο σημείο της Κρήτης: 60 χλμ. Το νότιο τμήμα του νομού αποχετεύουν ο Γεροπόταμος, που διαρρέει όλη την πεδιάδα της Μεσσαράς με κατεύθυνση ανατολικά προς δυτικά και εκβάλλει στον κόλπο της με δύο βραχίονες, και ο Αναποδάρης, ο μεγαλύτερος της Κρήτης (40 χλμ.), που πηγάζει από τη Δίκτη και εκβάλλει στο Λιβυκό. Το βόρειο τμήμα του νομού αποχετεύουν μικροί ποταμοί, που εκβάλλουν στο Κρητικό πέλαγος.

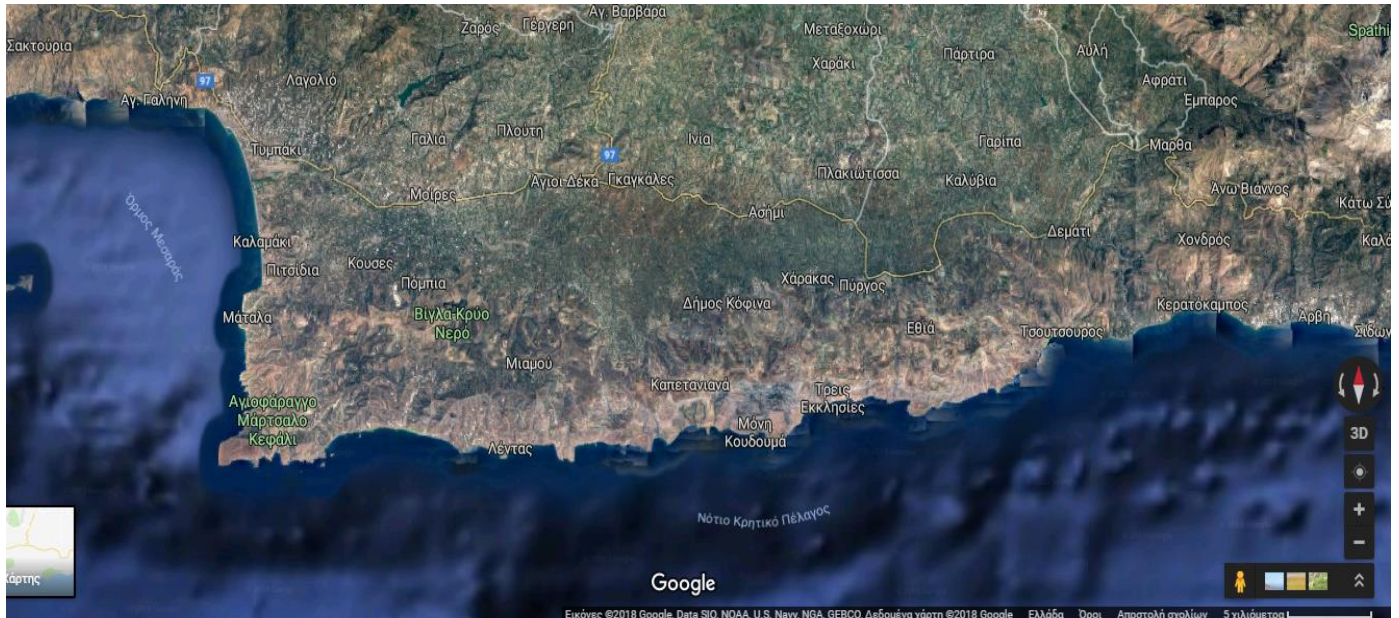
Το κλίμα του νομού Ηρακλείου παρουσιάζει σχετικά μεγάλες διαφορές μεταξύ των βορείων παραλίων, του κεντρικού ορεινού συγκροτήματος και των νοτίων παραλίων. Τα παράκτια τμήματα έχουν γενικά πολύ εύκρατο κλίμα, με ετήσιο θερμομετρικό εύρος περίπου 13°C. Στην πόλη του Ηρακλείου η μέση θερμοκρασία του ψυχρότερου μήνα – του Ιανουαρίου– είναι 12,4°C, του θερμότερου –του Ιουλίου– 25,8°C και η απόλυτα ελάχιστη θερμοκρασία έχει φτάσει μόνο τους 0,1°C. Το φαινόμενο, δηλαδή, του παγετού είναι σπάνιο. Φυσικά, οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες στα νότια παράλια, όπου δεν φτάνει η επίδραση των μετεωρίων. Οι θερμομετρικές συνθήκες μεταβάλλονται όσο προχωράμε προς τα ορεινά συγκροτήματα: τον χειμώνα, στις περιοχές με μεγάλο υψόμετρο, η θερμοκρασία φτάνει κάποτε πολλούς βαθμούς υπό το μηδέν. Από άποψη υγρασίας, το κλίμα της περιοχής μπορεί να θεωρηθεί ξηρό: μέση



σχετική ετήσια 6567,5 βαθμοί. Η νέφωση παρουσιάζεται μεγάλη (ετήσια τιμή 44,5 δέκατα), περιορίζεται όμως στους μήνες της ψυχρής εποχής και έτσι ο ετήσιος αριθμός των αίθριων ημερών υπερβαίνει τις 120. Μεγαλύτερη συχνότητα παρουσιάζει στην περιοχή ο βορειοδυτικός άνεμος και ιδίως κατά τους θερινούς μήνες, όταν στο Αιγαίο επικρατούν τα μελέμια. Χαρακτηριστικοί της περιοχής είναι οι άνεμοι που δημιουργούνται στις βόρειες και νότιες πλαγιές της Ίδης και πνέουν –αιφνίδιοι και ισχυρότατοι, αλλά με μικρή διάρκεια– προς τις ακτές. Τέτοιος άνεμος, που κατέβαινε από τις νότιες πλαγιές της Ίδης προς τον όρμο της Μεσσαράς, φαίνεται πως ήταν ο Ευροκλείδων των αρχαίων, ο οποίος κινούσε το πλοίο του Αποστόλου Παύλου. Το ετήσιο ύψος βροχής μόλις υπερβαίνει τα 500 χιλιοστά στα παράκτια τμήματα, ενώ στην Ίδη φτάνει πάνω από 1.200 χιλιοστά. Το χιόνι, σπάνιο στις παράκτιες περιοχές, γίνεται συχνότερο όσο ανεβαίνουμε στο βουνό Ίδη.

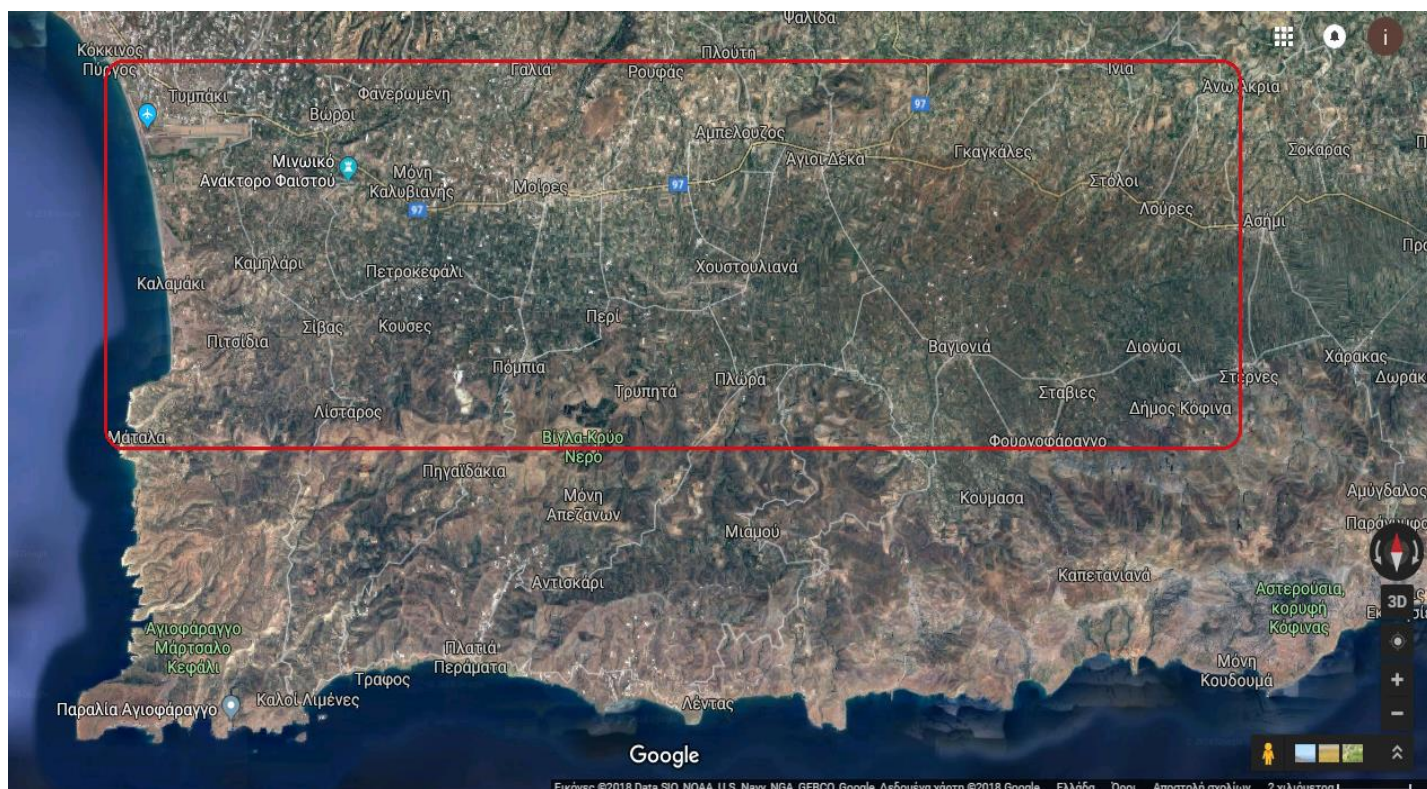
## 2.2. Γεωγραφική Θέση Περιοχής

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 εκτείνεται από ανατολικά προς δυτικά στη νότια ακτή της Κρήτης. Βόρεια συνορεύει με την οροσειρά του Ψηλορείτη, ενώ νότια με την οροσειρά των Αστερούσιων. Δυτικά βρέχεται από τον ομώνυμο κόλπο της Μεσσαράς, που αποτελεί τμήμα του Λιβυκού πελάγους και ανατολικά εκτείνεται ως τις παρυφές του όρους Δίκτη κοντά στη Βιάννο (Εικόνα 1).



Εικόνα 1. Πεδιάδα Μεσσαράς [Google Maps, 10/12/18]

Μια χαμηλή ανύψωση του εδάφους στο χωριό Ασήμι χωρίζει τη Μεσσαρά σε δυο λεκάνες ,την κάτω και την άνω ή δυτική και ανατολική. Η Άνω Μεσσαρά διαρρέεται από τον ποταμό Αναποδάρη στους παραποτάμους του οποίου υπάρχουν αρκετά μικρά φράγματα και λιμνοδεξαμενές. Ο Γεροπόταμος ξεκινάει λίγο δυτικά από το Ασήμι, διασχίζει την πεδιάδα και εκβάλλει στον κόλπο της Μεσσαράς λίγο πιο νότια από τον Κόκκινο Πύργο (Εικόνα 2).



**Εικόνα 2. Πεδιάδα Δυτικής Μεσσαράς [Google Maps, 10/12/2018]**

Μερικά από τα χωριά που είναι κτισμένα στην κοιλάδα της Μεσσαράς είναι οι Μοίρες, το Τυμπάκι, οι Άγιοι Δέκα, το Ασήμι, ο Πύργος που ήταν και έδρες δήμων, καθώς και η Πόμπια, το Πετροκεφάλι, τα Πιτσίδια, ο Χάρακας και άλλοι μικρότεροι οικισμοί. Η περιοχή μελέτης ανήκει πλέον στο δήμο Φαιστού σύμφωνα με το νόμο Καλλικράτη. Ο πληθυσμός της πεδιάδας της Μεσσαράς ανέρχεται περίπου σε 40.000 κατοίκους οι οποίοι ασχολούνται επί το πλείστον με την πρωτογενή αγροτική παραγωγή αφού από εκεί προέρχεται το μεγαλύτερο μέρος του ελαιόλαδου του νησιού.

### 2.3. Κλίμα Περιοχής

Οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα κυμαίνονται από 11,7 °C τον Ιανουάριο μέχρι 27,6 °C τον Ιούλιο. Η μέση μέγιστη θερμοκρασία του έτους είναι 31,6 °C, η μέση ελάχιστη 7,3 °C , η απολύτως μέγιστη 44,0 °C και η απολύτως ελάχιστη −0,3 °C. Το μέσο ετήσιο θερμομετρικό εύρος είναι 15,9 °C και η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι αντιστοίχως 18,9 °C.



Οι μέσες μηνιαίες υγρασίες αέρα κυμαίνονται από 72,5% τον Δεκέμβριο μέχρι 51,3% τον Ιούλιο. Το μέσο ετήσιο υγρασιακό εύρος είναι 21,2% και η μέση ετήσια υγρασία είναι αντιστοίχως 64,5%.

Το μέσο ετήσιο ύψος δυναμικής εξατμισοδιαπνοής υπολογίζεται ότι υπερβαίνει τα 900 mm. Το ύψος δυναμικής εξατμισοδιαπνοής υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου Απριλίου - Σεπτεμβρίου ότι φθάνει τα 741,5 mm ή σε ποσοστό το 82% του ετήσιου ύψους δυναμικής εξατμισοδιαπνοής. Αυτό δεν καλύπτεται από τις βροχοπτώσεις του αντίστοιχου χρονικού διαστήματος, ούτε από τις συνολικές ετήσιες βροχοπτώσεις που το μέσο ύψος τους φθάνει τα 479,3 mm και κάνει αναγκαία την εφαρμογή άρδευσης των ανοιξιάτικων και καλοκαιρινών καλλιεργειών.

Οι άνεμοι στην περιοχή είναι μεταβλητοί. Πνέουν σε ποσοστό 60% Δυτικοί, 30% Βόρειοι (Ετήσιες κατά τη διάρκεια του θέρους) και 10% Ανατολικοί. Η νηνεμία φθάνει σε ποσοστό το 23,7%. Οι ημέρες που η έντασή των ανέμων υπερβαίνει τα 6 B ετησίως είναι 51,4 και κατά την διάρκεια της αρδευτικής περιόδου 26,1. Οι ημέρες που η έντασή τους υπερβαίνει τα 8 B ετησίως είναι 4,7 και κατά την διάρκεια της αρδευτικής περιόδου 2,1.

#### 2.4. Περιβάλλον και Χρήσεις Γης

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 [Βαρουχάκης, 2015].

Η κύρια δραστηριότητα χρήσης γης της λεκάνης του Γεροπόταμου είναι η καλλιέργεια των ελαιόδεντρων και των αμπελιών, με την άρδευση νερού να έρχεται από τα υπόγεια νερά και τα φράγματα που έχουν κατασκευαστεί. 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.

#### 2.5. Υδρογεωλογικά Χαρακτηριστικά

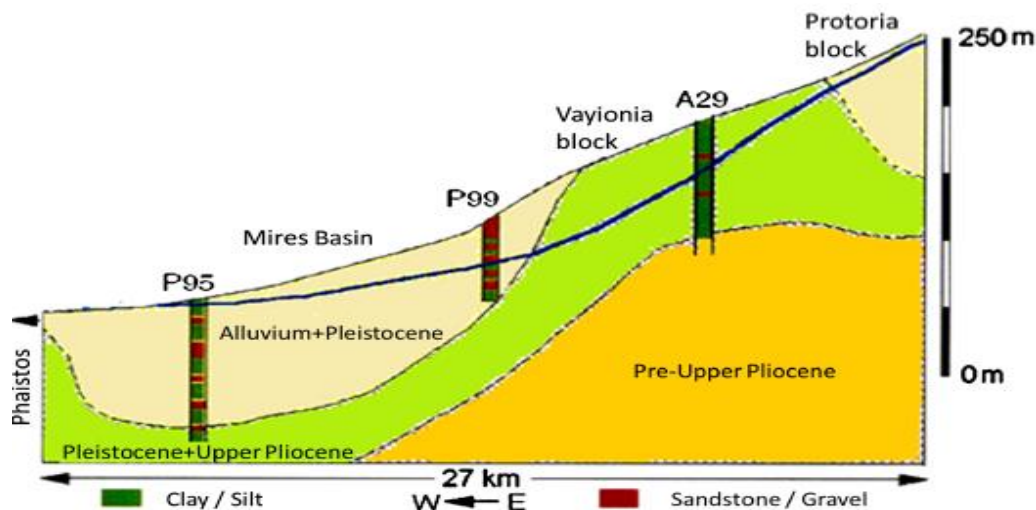
Η λεκάνη απορροής της Μεσσαράς περιλαμβάνει μια ανατολικής – δυτικής κατεύθυνσης πεδιάδα. Υπάρχουν απότομα βουνά στην βόρεια και δυτική πλευρά. Στα βόρεια, το χάσμα ποικίλει από 2200 έως 600 m από ανατολικά στα δυτικά, με το μεγαλύτερο σημείο να είναι μέρος της οροσειράς Ίδη (κορυφή στα 2540 m), η οποία είναι ένας ασβεστολιθικός όγκος. Στα νότια βρίσκονται τα Αστερούσια Όρη, τα οποία υψώνονται 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 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.

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].

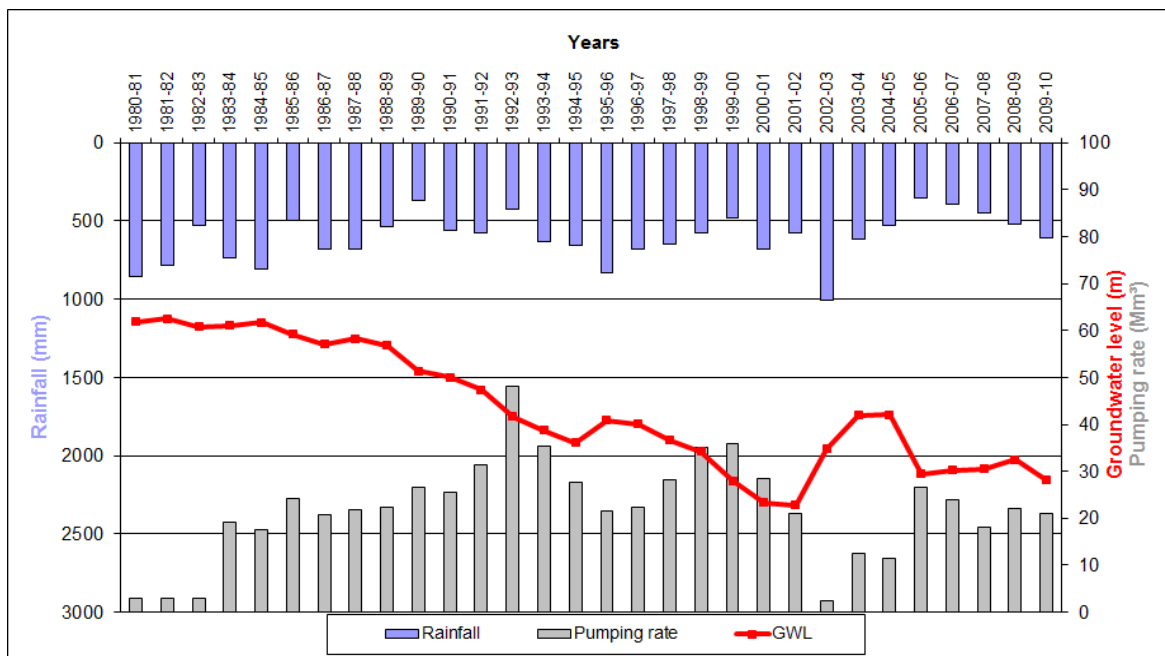


**Εικόνα 3. Απλοποιημένη γεωλογική δομή της λεκάνης των Μοιρών [Varouchakis, 2016 τροποποιημένο από Vardavas et al., 1996]**

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 Mm<sup>3</sup> 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 Mm<sup>3</sup> [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 δευτερεύον 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 m<sup>3</sup>/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 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.



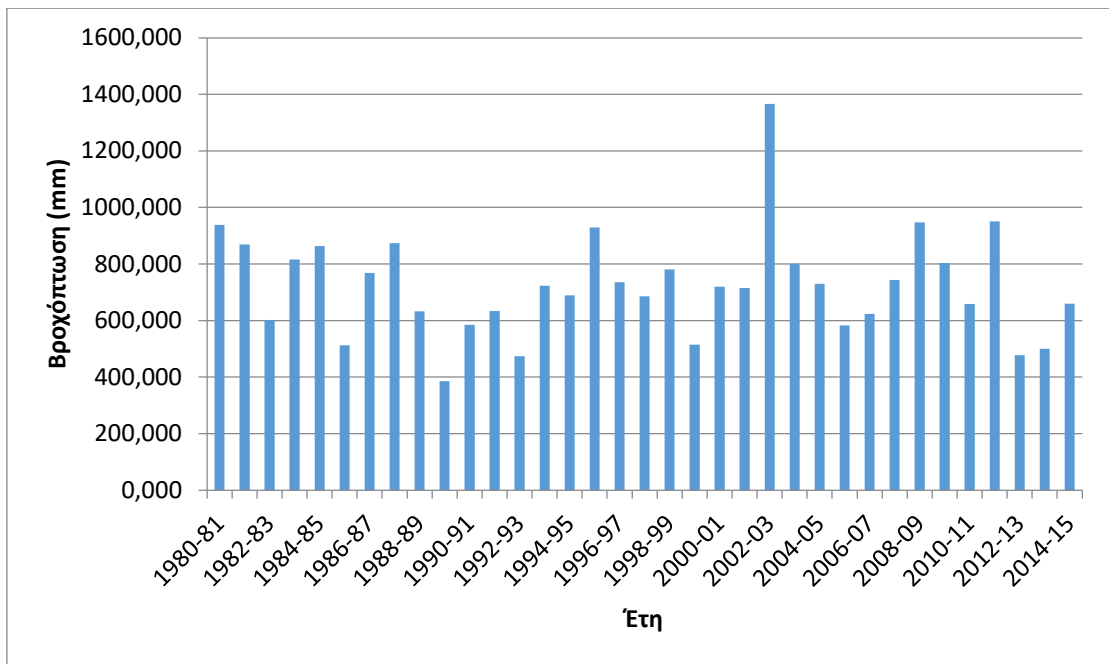
**Διάγραμμα 1.** Κατακρήνιση, επίπεδο υπογείων υδάτων και ρυθμός άντλησης τα έτη 1980-2010 [Varouchakis, 2015]

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. Η ταχεία μείωση του επιπέδου των υπογείων υδάτων έχει επηρεάσει τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

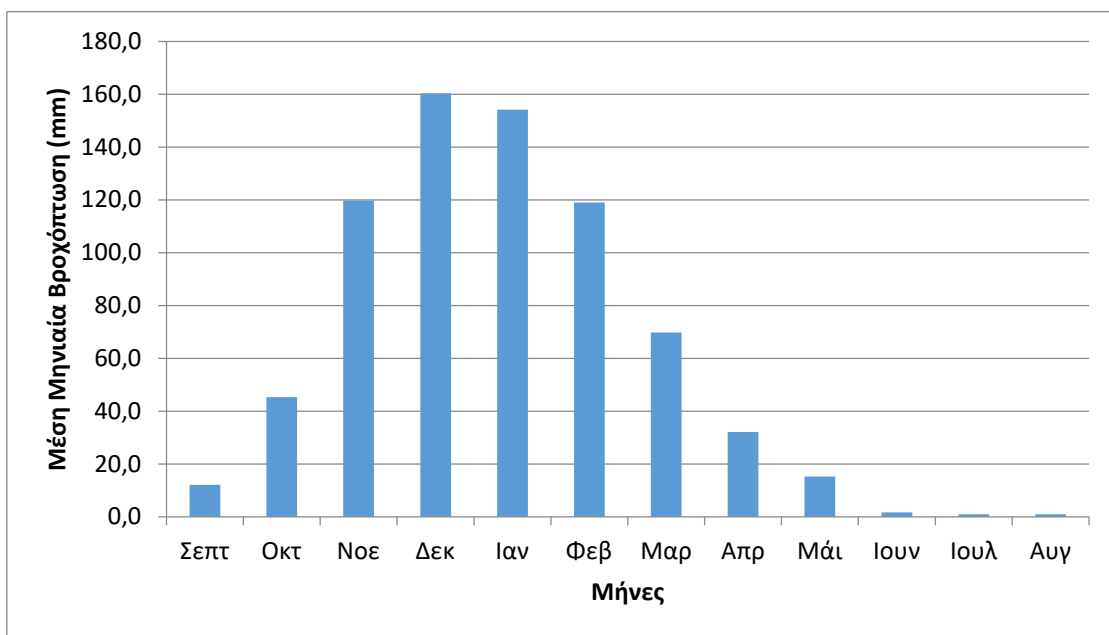
Ο υδροφορέας της λεκάνης χαρακτηρίζεται σύμφωνα με υδρογεωλογικές εκθέσεις ως μη περιορισμένος, και παρακολουθείται αραιά ως προς το επίπεδο των υπογείων υδάτων. Οι συντελεστές αποθήκευσης των υδροφορέων, που λαμβάνονται από τις δοκιμές άντλησης του FAO (1972), σε συνδυασμό με τη συμπεριφορά του υδροφόρου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

## 2.6. 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 στα Αστερούσια Όρη και πάνω από 2000 mm στο βουνό Ίδη. 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) (Διάγραμμα 2). 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 2. Μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις στην πεδιάδα της Μεσσαράς (1980-2015)**



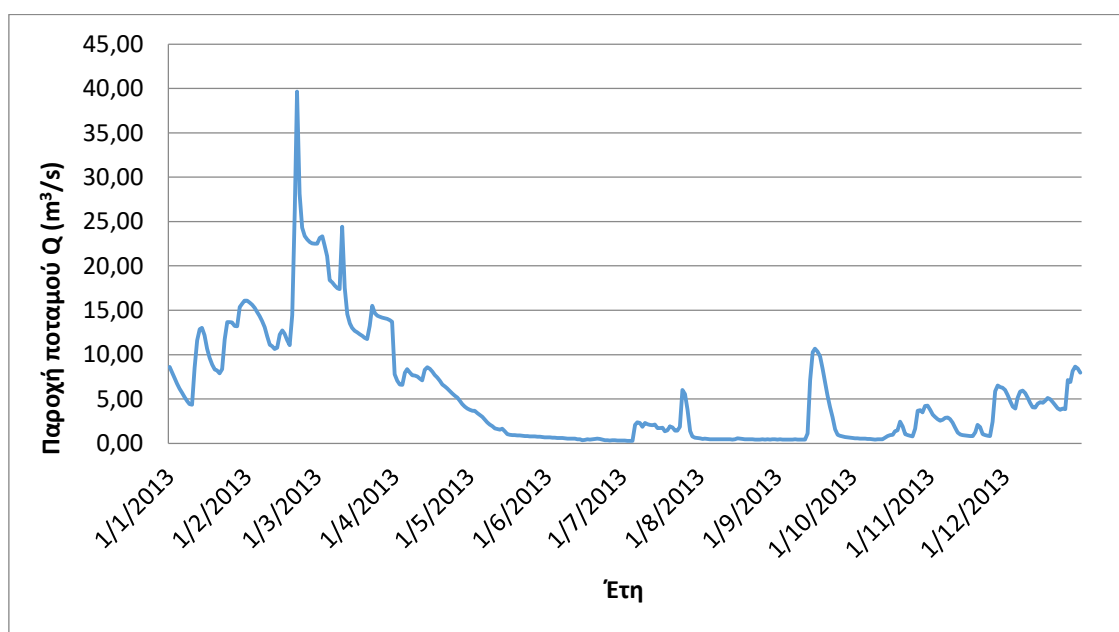
**Διάγραμμα 3. Μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις στην πεδιάδα της Μεσσαράς**

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 υγροτόπου 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.

Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3, η ροή του ποταμού μειώνεται εξαιρετικά τους θερινούς μήνες και ανεβαίνει στο μέγιστο σημείο της το μήνα Φεβρουάριο.



**Διάγραμμα 4. Ημερήσια παροχή ποταμού Γεροπόταμου για το έτος 2013**

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 m<sup>3</sup>/h και το επίπεδο των υπογείων υδάτων είναι λιγότερο από 10 μέτρα κάτω από την επιφάνεια. Στο ανατολικό μέρος, κοντά στο Ληθαίο ποταμό, το

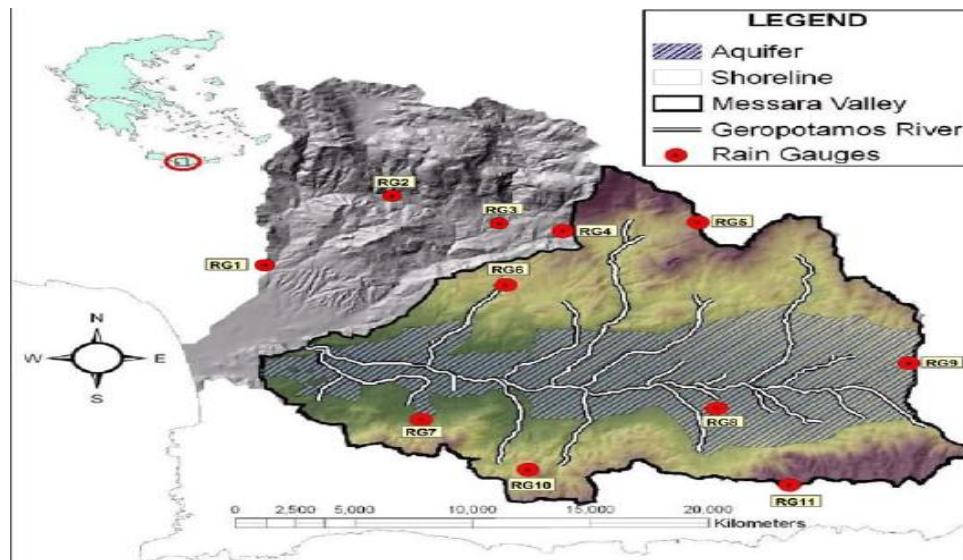
βάθος του υδροφόρου ορίζοντα είναι όμοιο αλλά τα ποσοστά άντλησης ποικίλουν σε 20-40 m<sup>3</sup>/h από τα νότια στα βόρεια.

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 mm<sup>3</sup> 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 Mm<sup>3</sup> (22 Mm<sup>3</sup> στη λεκάνη των Μοιρών) αντλούνται τώρα το χρόνο. Πριν την εγκατάσταση του συστήματος άντλησης των υπογείων υδάτων, λιγότερο από 10 Mm<sup>3</sup> το χρόνο αντλούνταν, κατά μέσο όρο η αποφόρτιση της κοιλάδας ήταν περίπου 20 Mm<sup>3</sup> 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 Mm<sup>3</sup> το χρόνο (150 mm) και οι απώλειες εξατμισοδιαπνοής ήταν περίπου 160 Mm<sup>3</sup> το χρόνο (400 mm). Στις μέρες μας, η επιφανειακή απορροή και οι παροχές των υπογείων 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 μετριέται 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 όπως φαίνονται και στην Εικόνα 3. 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 4. Πεδιάδα Μεσσαράς και χωροθέτηση των 11 βροχομετρικών σταθμών, RG1 Λαγόλιο, RG2 Βοριζία, RG3 Ζαρός, RG4 Γεργάρι, RG5 Αγία Βαρβάρα, RG6 Μορόνι, RG7 Πόμπια, RG8 Βαγιωνιά, RG9 Ασήμι, RG10 Άγιος Κύριλλος, RG11 Καπετανιανά [Tsanis and Apostolakis, 2009]

## 2.7. Άρδευση της περιοχής

Στην περιοχή έχουν ανορυχθεί και λειτουργούν πλήθος γεωτρήσεων οι οποίες είναι διάσπαρτες. Στις περιοχές των οργανωμένων συλλογικών δικτύων των ΤΟΕΒ Α , Β, και Γ ζώνης οι γεωτρήσεις έχουν διασυνδεθεί και τροφοδοτούν τα υπόγεια σωληνωτά δίκτυα ,οργανωμένες σε ομάδες καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε μια δεξαμενή. Καθεμία από τις γεωτρήσεις είναι εξοπλισμένη με τον απαραίτητο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό που στεγάζεται σε οικίσκο. Οι δεξαμενές έχουν κατασκευαστεί από οπλισμένο σκυρόδεμα και έχουν κυκλική κάτοψη. Η ευθύνη για τη λειτουργία, την παρακολούθηση και τη συντήρηση των γεωτρήσεων έχει ανατεθεί στους αντίστοιχους ΤΟΕΒ.

Για την κάλυψη της μεγάλης ανάγκης για άρδευση στην περιοχή μελέτης έχουν κατασκευαστεί φράγματα και λιμνοδεξαμενές σε όλη την πεδιάδα. Στην ανατολική Μεσσαρά στους παραπόταμους του ποταμού Αναποδάρη υπάρχουν τα φράγματα Παρτίρων, Αμουργέλων, Δαμανιών, Αρμανωγείων και Ινίου καθώς και οι λιμνοδεξαμενές Καραβάδο και Σκινιά. Επίσης υπό κατασκευή βρίσκεται το φράγμα της Πλακιώτισσας. Στη δυτική Μεσσαρά υπάρχει το φράγμα Φανερωμένης και για την ενίσχυσή του προγραμματίζεται εκτροπή του Πλατύ Ποταμού.

Το φράγμα της Φανερωμένης έχει ήδη περατωθεί από κατασκευαστική εταιρία, με προκήρυξη διαγωνισμού του Δήμου Φαιστού και χρηματοδότηση κατά 25% από δημοσίους πόρους και κατά 75% από επιχορηγήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης [3ο ΚΠΣ-Επιχειρησιακό Πρόγραμμα ΠΕΠ Κρήτης, 2000-2006]. Φορέας του έργου ήταν η Διεύθυνση τεχνικών Μελετών και Κατασκευών της γενικής διεύθυνσης

εγγειοβελτιωτικών έργων και γεωργικών διαρθρώσεων του πρώην Υπουργείου Γεωργίας και νυν Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων.

Το έργο βρίσκεται στα νοτιοδυτικά του Νομού Ηρακλείου της Κρήτης. Κατασκευάστηκε σε έκταση της κοινότητας Γαλιάς αλλά πλησιέστερα στον οικισμό των Σκουρβούλων και βορείως του οικισμού της Φανερωμένης. Βρίσκεται νοτίως του ορεινού όγκου του Ψηλορείτη και βορειοδυτικά της πεδιάδας της Μεσσαράς.

Το φράγμα ολοκληρώθηκε το 2005 και είναι ένα καθαρά αρδευτικό έργο που τροφοδοτεί τις 3 ζώνες Μεσσαράς μέσω των αντίστοιχων αρδευτικών δικτύων. Το νερό του φράγματος αρδεύει συνολική έκταση 26.580 στρεμμάτων. Πριν το έργο η τροφοδοσία των αρδευόμενων εκτάσεων γινόταν αποκλειστικά από γεωτρήσεις.

Λόγω της ανομβρίας των τελευταίων ετών το φράγμα της Φανερωμένης άρχισε να στερεύει και το νερό από τα 19 Mm<sup>3</sup> έχει φτάσει κατά καιρούς στα 0,8 Mm<sup>3</sup>. Αυτό, σε συνδυασμό με την πτώση του υπόγειου υδροφορέα λόγω υπεράντλησης και ανομβρίας οδηγεί στην έντονη έλλειψη νερού για την άρδευση και είναι ορατός ο κίνδυνος να καταστραφούν δεκάδες χιλιάδες στρέμματα με καλλιέργειες, θερμοκήπια και ελαιόδεντρα στην ευρύτερη περιοχή του κάμπου της Μεσσαράς.



Εικόνα 5. Τεχνητή λίμνη Φανερωμένης (πάνω: 2016, κάτω: 2018)



### 3. ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

#### 3.1. Στατιστική Θεωρία

Οι βασικότερες κατανομές είναι οι εξής:

Διακριτές κατανομές

- Bernoulli
- Διωνυμική
- Αρνητική διωνυμική
- Γεωμετρική
- Υπεργεωμετρική
- Poisson

Συνεχείς κατανομές

- Ομοιόμορφη
- Κανονική
- Εκθετική
- Γάμμα
- Βήτα
- Cauchy
- Weibull

##### 3.1.1. Διωνυμική Κατανομή

Η διωνυμική κατανομή (binomial distribution) προκύπτει στην ανάλυση ενδεχομένων που χαρακτηρίζονται από δύο δυνατές καταστάσεις, τις οποίες θα ονομάσουμε A και B. Έστω ότι η κατάσταση A πραγματοποιείται με πιθανότητα  $p$  και η κατάσταση B με πιθανότητα  $q = 1-p$ . Έστω επίσης ότι η μεταβλητή  $X$  αντιπροσωπεύει τη συχνότητα, δηλαδή το πλήθος των επαναλήψεων της κατάστασης A σε μια ακολουθία  $N$  καταστάσεων. Η πιθανότητα να προκύψει  $x$  φορές η κατάσταση A σε  $N$  επαναλήψεις δίνεται από την επόμενη εξίσωση

$$P(X = x) = \binom{N}{x} p^x (1 - p)^{N-x} = \frac{N!}{x! (N - x)!} p^x (1 - p)^{N-x}$$

Η μέση τιμή και η διασπορά της διωνυμικής κατανομής δίνονται από τους τύπους:

$$E(Y) = N\theta$$

$$\text{Var}(Y) = N\theta(1-\theta)$$

Η διωνυμική κατανομή είναι εκ κατασκευής διακριτή, επειδή ορίζεται βάσει μιας μετρήσιμης ακολουθίας ενδεχομένων.

### 3.1.2. Κατανομή Βήτα

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, χρησιμοποιούμε απόλυτα συνεχείς τυχαίες μεταβλητές, των οποίων το εύρος των τιμών είναι το διάστημα  $(0,1)$ . Συχνά, η ακριβής μορφή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας δεν είναι γνωστή, αλλά υπάρχουν ορισμένες ενδείξεις ότι η πυκνότητα παρουσιάζει μέγιστο κοντά σε κάποια τιμή. Η κατανομή Βήτα, η οποία έχει δύο θετικές παραμέτρους, έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας η οποία μπορεί να έχει μία ποικιλία μορφών ανάλογα με την επιλογή των τιμών των παραμέτρων.

Επομένως, είναι δυνατόν σε πολλές περιπτώσεις να προσαρμοσθεί η κατάλληλη θεωρητική πυκνότητα στα εμπειρικά δεδομένα.

Ορισμός: Η (απόλυτα) συνεχής τυχαία μεταβλητή  $X$ , με εύρος τιμών  $(0,1)$ , ακολουθεί την κατανομή Βήτα με θετικές παραμέτρους  $(\alpha, \beta)$  και συμβολίζουμε με  $X \sim \text{beta}(\alpha, \beta)$ , αν

$$f(x) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad 0 < x < 1, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0$$

Η μέση τιμή και η διασπορά της κατανομής Βήτα δίνονται από τους τύπους:

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

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

Σχέση μεταξύ της κατανομής Βήτα και της Διωνυμικής κατανομής:

Μπορεί να αποδειχθεί ότι αν η τυχαία μεταβλητή  $Y$  έχει την κατανομή Βήτα με παραμέτρους  $r$  και  $s$ , όπου  $r$  και  $s$  είναι θετικοί ακέραιοι και η τυχαία μεταβλητή  $X$  ακολουθεί την διωνυμική κατανομή με παραμέτρους  $n = r + s - 1$  και  $p = y$ , τότε για  $0 \leq y \leq 1$ ,

$$F_Y(y) = P\{r \leq X \leq r + s - 1\} = 1 - F_X(r - 1)$$

Η ιδιότητα αυτή έχει πολλές εφαρμογές.

### 3.2. Θεωρία Λήψης Αποφάσεων

Η θεωρία αποφάσεων ασχολείται με προβλήματα κατά τα οποία καλούμαστε να επιλέξουμε τη βέλτιστη λύση μέσα από ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων. Κατά πόσο μία απόφαση θεωρείται βέλτιστη εξαρτάται από τα καθορισμένα κριτήρια τα οποία συνήθως είναι οικονομικά. Για τη λήψη μιας απόφασης γίνεται χρήση δεδομένων από το παρελθόν και το αποτέλεσμα που προβλέπεται ονομάζεται επακόλουθο. Αποτελεί μια ορθολογική και ολοκληρωμένη προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων με γερά θεμέλια στα μαθηματικά και στη στατιστική. Ως βασικά της στοιχεία η Θεωρία Ανάλυσης Αποφάσεων περιλαμβάνει: Τη γραφική απεικόνιση σύνθετων, πολυδιάστατων αποφάσεων με δέντρα αποφάσεως, τη χρήση της Θεωρίας Πιθανοτήτων για τη μοντελοποίηση της αβεβαιότητας, τη χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας για τη μοντελοποίηση προτιμήσεων κινδύνου, προεκτάσεις των συναρτήσεων χρησιμότητας για ανάλυση αποφάσεων με πολλαπλά και αντικρουόμενα κριτήρια απόφασης [Κυριάκος Βλάχος, 2004].

Λόγω της μεγάλης πληθώρας πληροφοριών και των διαφορετικών κριτηρίων που ορίζουν τη βέλτιστη λύση υπάρχει πιθανότητα η απόφαση να είναι υποκειμενική ή να παρουσιάζει αβεβαιότητες. Γι' αυτό η Θεωρία Αποφάσεων στοχεύει στη δημιουργία ορθολογικών επακόλουθων με χρήση δεξιοτήτων λήψης αποφάσεων όπως: Επικοινωνία, ανάλυση, σύνθεση, εκτίμηση και εκτέλεση [J. P. Sampson et al, 1996].

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).

Οι κυριότερες τεχνικές λήψης αποφάσεων είναι οι εξής:

- Επιχειρησιακή Έρευνα (Operations Research)

Αυτή πρωτοχρησιμοποιήθηκε στη Μεγάλη Βρετανία στη διάρκεια του Β' Παγκόσμιου Πολέμου και έλυσε πολλά προβλήματα στρατηγικής. Προϋποθέτει τη συγκρότηση ομάδας (Team) ειδικών, από διάφορες ειδικότητες (μαθηματικός, στατιστικός, οικονομολόγος, κοινωνιολόγος, βιολόγος, οργανωτής). Σκοπός είναι η θέση του προβλήματος που παίρνει τη μορφή μαθηματικού υποδείγματος –«μοντέλου»– και ο καθορισμός των μεταβλητών από τις οποίες εξαρτάται η λύση του. Με τις διάφορες τιμές των μεταβλητών και τη χρήση κομπιούτερ προκύπτουν οι διάφορες εναλλακτικές λύσεις και προκρίνεται η καλύτερη, που αποτελεί και την απόφαση.

- Θεωρία ή λογισμός των πιθανοτήτων

Η πιθανότητα είναι ένας βαθμός βεβαιότητας στην βασίζεται σε διάφορα δεδομένα, στα οποία αντιτίθενται άλλα και πρέπει, τόσο τα πρώτα, όσο και τα δεύτερα να λαμβάνονται υπόψη για τον καθορισμό του βαθμού της πιθανότητας. Ο λογισμός των πιθανοτήτων στηρίζεται στην αρχή σύμφωνα με την οποία, αν σ' ένα πλήθος πιθανοτήτων είναι  $n$  και  $k$  οι επιθυμητές απ' αυτές, ο λόγος  $k/n$  δίνει την πιθανότητα των επιθυμητών περιπτώσεων. Επομένως, για κάθε περίπτωση πρέπει να προσδιορίζεται το σύνολο των δυνατοτήτων που μπορεί να προκύψουν. Αυτό γίνεται με το διαφορικό και τον ολοκληρωτικό λογισμό και με τη χρήση κομπιούτερ. Με το λογισμό των πιθανοτήτων βρίσκονται οι διάφορες εναλλακτικές λύσεις σ' ένα πρόβλημα και επιλέγεται η πιο ικανοποιητική.

- Γραμμικός προγραμματισμός (Linear Programming)

Είναι μαθηματική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίτευξη της μέγιστης τιμής μιας γραμμικής συνάρτησης, υποκείμενης σε περιορισμούς, που παίρνουν τη μορφή γραμμικών ανισοτήτων. Η μέγιστη τιμή της γραμμικής συνάρτησης είναι η πιο πρόσφορη λύση σ' ένα πρόβλημα.

- Μη γραμμικός προγραμματισμός (Non Linear Programming)

Αυτός αφορά στα μη γραμμικά υποδείγματα, που αντιστοιχούν σε περιπτώσεις όπου, οι τιμές των συντελεστών των μεταβλητών είναι συναρτήσεις αυτών και όχι σταθερές, όπως στο γραμμικό προγραμματισμό.

- Δυναμικός προγραμματισμός

Αντίθετα με τα γραμμικά και τα μη γραμμικά, τα δυναμικά προγράμματα έχουν πολυσταδιακό χαρακτήρα. Με το δυναμικό προγραμματισμό εξετάζεται η εξέλιξη κάθε συστήματος, της οποίας η κάθε φάση είναι δυνατό να υπόκειται στην τύχη ή να ελέγχεται από τον άνθρωπο. Το σύστημα περιγράφεται σε κάθε φάση του με ένα σύνολο παραμέτρων που λέγονται «μεταβλητές κατάστασης» του. Σε κάθε φάση του

συστήματος αντιστοιχεί μια επιλογή αποφάσεων, και το αποτέλεσμα μιας απόφασης είναι ένας μετασχηματισμός των μεταβλητών κατάστασης. Σκοπός της διαδικασίας του δυναμικού προγραμματισμού είναι η εύρεση της άριστης τιμής συναρτήσεων των «μεταβλητών κατάστασης». Και άριστη απόφαση είναι εκείνη που αριστοποιεί τη συνάρτηση των «μεταβλητών κατάστασης».

- Θεωρία της αναμονής ή της ουράς (Waiting Theory)

Μ' αυτήν επιλύονται διάφορα προβλήματα αναμονής. Το πρόβλημα έγκειται στον υπολογισμό της πιθανότητας με την οποία παίρνει ορισμένο μήκος (χρόνο) η αναμονή, σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα. Η λύση δίνεται με την κατάρτιση ενός «μαθηματικού μοντέλου».

- Θεωρία των παιχνιδιών (Theory of Games)

Εφαρμόζεται κυρίως σε «παιχνίδια» στρατηγικής. Για έναν παίκτη Α υπάρχει μια άριστη μεικτή στρατηγική, για την οποία, το μέσο κέρδος του είναι μεγαλύτερο ή ίσο μιας ποσότητας  $v$  (τιμής του παιχνιδιού). Για έναν άλλο παίκτη Β, υπάρχει μια άριστη μεικτή στρατηγική για την οποία, η μέση ζημία είναι μικρότερη ή ίση με  $v$ . Σκοπός του Α είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους του, ενώ του Β η ελαχιστοποίηση της ζημίας του. Το αποτέλεσμα εξαρτάται από τις κινήσεις των παικτών. Γι' αυτό καταρτίζεται ένα «μαθηματικό μοντέλο» που δίνει διάφορες εναλλακτικές λύσεις.

- Διοικητικό παιχνίδι (Management Game)

Συγκροτούνται ομάδες που εναντιώνονται μεταξύ τους και με βάση ορισμένα δεδομένα πρέπει να αντιμετωπίσουν τον ανταγωνισμό μέσα σε μια υποθετική αγορά. Σκοπός του παιχνιδιού είναι να προκαλέσει ορθές ή και λανθασμένες αποφάσεις και να υπολογιστούν οι συνέπειές τους. Κι εδώ καταρτίζονται μαθηματικά μοντέλα και οι εναλλακτικές λύσεις προκύπτουν με τη χρήση κομπιούτερ.

- Τεχνική Μόντε - Κάρλο (Monte - Carlo Technique)

Πήρε το όνομά της από το μεγάλο καζίνο του Μόντε Κάρλο και αποτελεί επίσης παραλλαγή της θεωρίας των παιχνιδιών. Χρησιμοποιούνται και σ' αυτήν, ο λογισμός των πιθανοτήτων, η στατιστική μέθοδος και κομπιούτερ. Η άριστη λύση σ' ένα πρόβλημα συνίσταται στην εφαρμογή του πειραματισμού, σ' ένα μεγάλο αριθμό δυναμικών δοκιμασιών και στην επαλήθευση ότι αυτές συγκλίνουν μακροχρόνια στο ίδιο αποτέλεσμα.

- Μέθοδος των Δελφών (Delphi Method)

Αυτή ονομάστηκε έτσι από το Μαντείο των Δελφών της αρχαιότητας. Η εφαρμογή της στην πράξη ακολουθεί την εξής πορεία:

- 1) ορίζεται ένας αριθμός ειδικών για το πρόβλημα, που θεωρούνται κατάλληλοι για τη διατύπωση προβλέψεων,
- 2) καθένας απ' αυτούς εργάζεται ανεξάρτητα από τους άλλους για την αποφυγή αλληλεπιδράσεων,
- 3) κάθε ειδικός παίρνει διάφορες χρήσιμες πληροφορίες μέσα από την επιχείρηση ή έξω απ' αυτή,
- 4) με βάση αυτές τις πληροφορίες, τις οποίες επεξεργάζεται σε κομπιούτερ, συντάσσει μια έκθεση με τις απόψεις του για τη λύση του προβλήματος,
- 5) καθένας παίρνει τις εκθέσεις όλων, χωρίς να γνωρίζει το όνομα του συντάκτη τους, και χωρίς να διατυπώνει τις παρατηρήσεις του,
- 6) με τη σύνθεση και την αλληλοσυμπλήρωση των εκθέσεων διαμορφώνεται ένα κείμενο με το σύνολο των προβλέψεων όλων των ειδικών,
- 7) το κείμενο αυτό επεξεργάζεται η ομάδα ή η υπηρεσία ανάλυσης και προγραμματισμού της επιχείρησης, η οποία καταλήγει σε ορισμένα συμπεράσματα και
- 8) η διοίκηση της επιχείρησης αξιολογεί τα συμπεράσματα (εναλλακτικές λύσεις) και επιλέγει το προσφορότερο (ικανοποιητική λύση).

- Εξομοίωση ή Προσομοίωση (Simulation)

Συγγενεύει με τη θεωρία των παιχνιδιών και με το διοικητικό παιχνίδι. Καταρτίζεται ένα μαθηματικό μοντέλο με στοιχεία που μοιάζουν με την επιχειρησιακή πραγματικότητα, και με βάση αυτό ερευνώνται διάφορες εναλλακτικές λύσεις που αντιστοιχούν σε αποφάσεις, κι απ' αυτές επιλέγεται εκείνη που θεωρείται η πιο ικανοποιητική.

- Ανάλυση κόστους - ωφέλειας (Cost – Benefit Analysis)

Πρόκειται για μια συγκριτική ανάλυση δυναμικής μορφής (γιατί αναφέρεται σε χρονική εξέλιξη) και για την αξιολόγηση, αφενός των μέσων (θυσιών - κόστους) και αφετέρου της ωφέλειας (κέρδους) που συνδέονται με τη λήψη μιας απόφασης. Καταρτίζεται βάσει των δεδομένων μαθηματικού μοντέλου. Με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή προβάλλουν όλες οι εναλλακτικές λύσεις και προκρίνεται η ικανοποιητική λύση που αντιστοιχεί στην ευνοϊκότερη δυνατή σχέση ανάμεσα στο κόστος και στο κέρδος της επιχείρησης.

### 3.3. Λήψη Αποφάσεων κατά Bayes

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.

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, άλλα 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.

Τα μοντέλα λήψης αποφάσεων εμπεριέχουν πληροφορία (γνώση), σε διάφορες μορφές, μέρος της οποίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αυτά για την πραγματοποίηση της λήψης, ή όχι, μιας απόφασης. Ένα μοντέλο λήψης αποφάσεων συνδυάζει την πληροφορία μέσα από στατιστική γνώση και το κατάλληλο σύστημα παραγωγής συμπεράσματος ώστε μέσα από μια διαδικασία που είναι βασισμένη σε συναρτήσεις απώλειας (Loss function), χρησιμότητας (Utility function) ή προτίμησης (preference) να πολιτικοποιήσει κάθε εναλλακτική απόφαση και να τη συγκρίνει με τις υπόλοιπες. Η διαδικασία αυτή ορίζεται ως «Στατιστική Θεωρία Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes». Υπό το πρίσμα της συγκεκριμένης προσέγγισης, ως βέλτιστη απόφαση είναι αυτή που μεγιστοποιεί την αναμενόμενη χρησιμότητα ή, αντίστοιχα, ελαχιστοποιεί την αναμενόμενη απώλεια.

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).

### 3.4. Το πρόβλημα με Bayes

Εξετάζεται το ενδεχόμενο κατασκευής ενός ταμιευτήρα, ο οποίος θα συγκεντρώνει από βροχοπτώσεις νερό για άρδευση, ή άντλησης νερού από τον υπόγειο υδροφόρο και η επιβολή προστίμων σε περιπτώσεις υπεράντλησης.

Η περιοχή που θα εφαρμοστεί αυτό το δίλημμα είναι η Μεσσαρά, στις Μοίρες Ηρακλείου Κρήτης όπου το όριο του υδροφόρου ορίζοντα έχει οριστεί στα 38m πάνω από τη θάλασσα. Όταν η στάθμη κατέβει λόγω γεώτρησης τότε θεωρείται συμβάν υπεράντλησης και επιβάλλεται πρόστιμο. Για τον υπολογισμό αυτής της πιθανότητας χρησιμοποιούμε τις στάθμες του υδροφόρου της περιοχής και τα συμβάντα υπεράντλησης.

Επίσης λαμβάνεται υπόψη η χαμένη αξία του υπόγειου νερού καθώς ενώ είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί για ύδρευση υποβαθμίζεται σε νερό άρδευσης.

Όσον αφορά τον ταμιευτήρα, εξετάζεται το ενδεχόμενο μη πλήρωσης σύμφωνα με τα βροχομετρικά δεδομένα της περιοχής και στην περίπτωση αυτή η μεταφορά ή η αγορά νερού για να καλυφτούν οι ανάγκες.



Εφαρμόζεται, λοιπόν, ένα στοχαστικό μοντέλο που μπορεί να προβλέπει, βάσει της προγενέστερης πληροφορίας, αν ένας αριθμός  $Y$  γεγονότων υπεράντλησης σε χρονικό διάστημα  $N$  ετών για μηνιαίους ελέγχους, συμφέρει περισσότερο, από πλευράς κόστους, σε σχέση με το να κατασκευαστεί το έργο του ταμιευτήρα.

Άρα οι αποφάσεις που προκύπτουν είναι οι εξής:

- **Απόφαση  $A(0)$ : Να μην κατασκευαστεί ταμιευτήρας**
- **Απόφαση  $A(1)$ : Να κατασκευαστεί ταμιευτήρας.**

#### 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ BAYES

Στην προκειμένη περίπτωση μελετήθηκε ένα πρόβλημα λήψης απόφασης που περιλαμβάνει δύο πιθανές λύσεις. Η πρώτη είναι η συνέχιση της ίδιας πολιτικής για άρδευση με αποτέλεσμα την υποβάθμιση του υπόγειου νερού και την πιθανότητα πληρωμής προστίμων λόγω υπεράντλησης του υδροφορέα. Η δεύτερη είναι η αλλαγή της υπάρχουσας κατάστασης κατασκευάζοντας ένα ταμιευτήρα που θα συγκεντρώνει νερό από τις βροχοπτώσεις με σκοπό τη χρήση του ως αρδευτικό.

Επομένως, οι αρχές θα πρέπει να εξετάσουν μια περιβαλλοντική πολιτική βασισμένη σε ποινές υπεράντλησης. Αν, δηλαδή, θα εφαρμοστεί η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει» ή αν θα προστατευτούν τα υπόγεια ύδατα της περιοχής.

##### 4.1. 1<sup>ο</sup> Σενάριο

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

Η συνάρτηση απώλειας (Loss Function) για την ενέργεια  $A(0)$  εκφράζεται ως εξής:

$$L(A(0), Y) = KY^2 + GC + LGV, \quad 0 \leq Y \leq n \quad (4.1)$$

- $KY^2$  είναι το πρόστιμο λόγω υπεράντλησης. Όπου  $K$  είναι το πρόστιμο που θα πληρωθεί για κάθε παράβαση,  $n$  είναι ο αριθμός των ελέγχων της στάθμης του υδροφορέα σε κάποιο χρονικό διάστημα και το  $Y$  υποδηλώνει τον άγνωστο αριθμό των παραβιάσεων υπεράντλησης.
- $GC$  (Groundwater Cost) είναι το κόστος του υπόγειου νερού και προκύπτει από το κόστος άντλησης και κατασκευής της γεώτρησης ανάλογα με τον όγκο του νερού.
- $LGV$  (Lost Value of Groundwater) είναι η χαμένη αξία του υπόγειου νερού. Δηλαδή η υποβάθμιση της αξίας των υδάτων λόγω της διαφορετικής χρήσης τους (αντί για ύρδευση χρησιμοποιούνται για άδρευση) ανάλογα με τον όγκο του νερού.

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

$$G(A(0), \theta_0) = E[L(A(0), Y)] \quad (4.2)$$

Η αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης απώλειας δίνεται στην επόμενη σχέση:

$$E[L(A(0), Y)] = \sum_{Y=0}^N L(A(0), Y)f(Y) \quad (4.3)$$

Όπου  $f(Y)$ , υποδηλώνει τη διακριτή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των  $Y$  παραβάσεων για  $N$  ελέγχους του υδροφορέα,

και το  $L(A(0), Y)$  υποδηλώνει τη συνάρτηση απώλειας της απόφασης  $A(0)$ .

Επεξεργάζοντας τις σχέσεις (4.1), (4.2) και (4.3) με την κατάλληλη παραγοντοποίηση, προκύπτει η επόμενη έκφραση για την Συνάρτηση Επιδίωξης:

$$G(A(0), \theta_0) = K \sum_{Y=0}^N Y^2 f(Y) + GC + LGV \quad (4.4)$$

$$\text{όπου } K \sum_0^N Y^2 f(Y) = E[KY^2] = KE[Y^2] \quad (4.5)$$

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  $N$  επιτυχών ελέγχων ακολουθεί τη διωνυμική κατανομή, και εκφράζεται από τη σχέση:

$$f(Y) = \binom{N}{Y} \theta_0^Y (1 - \theta_0)^{N-Y} = \frac{N!}{Y!(N-Y)!} \theta_0^Y (1 - \theta_0)^{N-Y} \quad (4.6)$$

$$E[Y] = N\theta_0 \quad (4.7)$$

$$\sigma^2 = N\theta(1 - \theta_0) \quad (4.8)$$

Σύμφωνα με τις στατιστικές ιδιότητες της διακύμανσης χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.7) και (4.8), έχουμε:

$$E[Y^2] = (E[Y])^2 + \sigma^2 = N^2\theta_0^2 + N\theta_0(1 - \theta_0) \quad (4.9)$$

Συνδυάζοντας, τώρα, τις σχέσεις (4.4), (4.5) και (4.9), ο τελικός τύπος της Συνάρτησης Επιδίωξης για την ενέργεια  $A(0)$  είναι:

$$G(A(0), \theta_0) = m(N, \theta_0) + GC + LGV \quad (4.10)$$

$$\text{όπου } m(N, \theta_0) = K(N^2\theta_0^2 + N\theta_0(1 - \theta_0)) \quad (4.11)$$

Η πιθανότητα  $\theta_0$  θεωρείται μια άγνωστη ποσότητα. Έτσι, η υποκειμενική προγενέστερη κατανομή  $\pi(\theta_0)$  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 οποια 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 Επικινδυνότητας (Risk Function) για την ενέργεια  $A(0)$  σχηματίζεται ως η αναμενόμενη τιμή της Συνάρτησης Επιδίωξης από (4.10) και (4.11) όπως φαίνεται στη συνέχεια:

$$R(A(0)) = E[G(A(0), \theta_0)] \rightarrow$$

$$R(A(0)) = K(N^2\theta_0^2 + N\theta_0(1 - \theta_0)) + GC + LGV \quad (4.12)$$

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

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

$$L(A(1), \theta_1) = C + AC + M\theta_1 \quad (4.13)$$

- $C$  είναι το ολικό κόστος κατασκευής του ταμιευτήρα.
- $AC$  είναι το ετήσιο κόστος για τη λειτουργία και τη συντήρηση του ταμιευτήρα.
- $M\theta_1$  είναι το κόστος του εφοδιασμού νερού σε περίπτωση μη συλλογής του απαραίτητου νερού στον ταμιευτήρα. Όπου  $M$  είναι το κόστος μεταφοράς νερού και  $\theta_1$  είναι η πιθανότητα ξηρού έτους.

Η μεταβλητή  $\theta_1$  εκφράζει την άγνωστη ποσότητα να έχουμε ένα ξηρό έτος. Η πιθανότητα να υπάρξει ξηρό έτος θα χαρακτηρίζεται ως "επιτυχία". Από την άλλη μεριά, η "αποτυχία" αναφέρεται στην πιθανότητα να υπάρξει 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 (Goal Function) εκφράζεται από τη σχέση:

$$G(A(1), \theta_1) = E[L(A(1), Y)] = E[C + AC + ME[Y_1]] \rightarrow$$

$$G(A(1), \theta_1) = C + AC + MN\theta_1 \quad (4.14)$$

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 (Risk Function) κατά Bayes μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί εφαρμόζοντας τις στατιστικές ιδιότητες της αναμενόμενης τιμής για ένα γραμμικό τύπο συνάρτησης απώλειας.

$$R(A(1)) = E^{\pi(\theta_1)}[G(A(1), \theta_1)] = E^{\pi(\theta_1)}[C + AC + MN\theta_1] \rightarrow$$

$$R(A(1)) = C + AC + MNE^{\pi(\theta_1)}[\theta_1] \quad (4.15)$$

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 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.

Η ανισότητα εκφράζεται ως εξής:

$$R(A(1)) > R(A(0))$$

$$\rightarrow C + AC + MN_1\theta_1 > K(N^2\theta_0^2 + N\theta_0(1 - \theta_0)) + GC + LGV \quad (4.16)$$

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.

#### 4.2. 2<sup>ο</sup> Σενάριο

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

Στο δεύτερο σενάριο εφαρμόζεται μια κλιμακωτή γραμμική και παραβολική συνάρτηση καθώς σε περιβαλλοντικά προβλήματα, εφαρμόζεται συχνά ένας συνδυασμός κλιμακούμενων συναρτήσεων απώλειας για να εκφράσει αρχικά ελαφρές και στη συνέχεια δριμύς ποινές. Έτσι η συνάρτηση απώλειας (Loss Function) για την ενέργεια  $A(0)$  εκφράζεται ως εξής:

$$L(A(0), Y) = \begin{cases} K_1 Y + GC + LGV, & 0 \leq Y \leq n_1 \\ K_2 Y^2 + GC + LGV, & n_1 < Y \leq n \end{cases} \quad (4.17)$$

$$K_1 < K_2$$

Η μόνη διαφοροποίηση από το 1<sup>ο</sup> σενάριο είναι ο πρώτος όρος. Όπου  $K_v$  είναι τα πρόστιμα που θα πληρωθούν ( $v = 1, 2$ ),  $n$  είναι ο αριθμός των ελέγχων της στάθμης του υδροφορέα,  $n_1$  είναι ο αριθμός ελέγχων που αν ξεπεραστεί οι αλλάζει η συνάρτηση απώλειας και το  $Y$  υποδηλώνει τον άγνωστο αριθμό των παραβιάσεων υπεράντλησης. Άρα όμοια προκύπτει η Συνάρτηση Επιδίωξης (Goal Function) για την ενέργεια  $A(0)$ :

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

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

$$G(A(0), \theta_0) = K_1 \sum_{Y=0}^{n_1} Y f(Y) + K_2 \sum_{n_1+1}^N Y^2 f(Y) + GC + LGV \quad (4.18)$$

$$\text{Όπου: } K_1 \sum_{Y=0}^{n_1} Y f(Y) = K_1 E[Y] \quad (4.19)$$

$$K_2 \sum_{n_1+1}^N Y^2 f(Y) = K_2 E[Y^2] \quad (4.20)$$

Εφαρμόζοντας ξανά το «πείραμα Bernoulli» για πιθανότητα  $\theta_0$  ότι θα συμβεί υπεράντληση και δεδομένου ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας εκφράζει μια τέτοια περίπτωση όπου ο αριθμός των  $N$  ελέγχων ακολουθεί τη διωνυμική κατανομή:

$$f(Y) = \binom{N}{Y} \theta_0^Y (1 - \theta_0)^{N-Y} = \frac{N!}{Y!(N-Y)!} \theta_0^Y (1 - \theta_0)^{N-Y} \quad (4.21)$$

$$E[Y] = N\theta_0 \quad (4.22)$$

$$\sigma^2 = N\theta(1 - \theta_0) \quad (4.23)$$

Σύμφωνα με τις στατιστικές ιδιότητες της διακύμανσης χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.22) και (4.23), έχουμε:

$$E[Y^2] = (E[Y])^2 + \sigma^2 = N^2\theta_0^2 + N\theta_0(1 - \theta_0) \quad (4.24)$$

Έτσι καταλήγει ο τελικός τύπος της Συνάρτησης Επιδίωξης για την ενέργεια  $A(0)$ :

$$G(A(0), \theta_0) = m(N, \theta_0) + GC + LGV, \quad (4.25)$$

$$\text{όπου } m(N, \theta_0) = K_1 N \theta_0 + K_2 N (\theta_0 + (N-1) \theta_0^2) \quad (4.26)$$

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:

$$R(A(0)) = \int_0^1 G(A(0), \theta_0) \pi(\theta_0) d\theta_0. \quad (4.27)$$

Όπως αναφέρθηκε η κατανομή Βήτα χρησιμοποιείται ως η προγενέστερη κατανομή για διωνυμικές κατανομές στην ανάλυση Bayes. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Βήτα είναι:

$$\text{Beta}(\theta_0, \alpha, \beta) = \frac{\theta_0^{\alpha-1} (1-\theta_0)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}, \quad (4.28)$$

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:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt. \quad (4.29)$$

Όπως φαίνεται και στη σχέση (4.28), 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:

$$E(x) = \frac{\alpha}{\alpha+\beta} \quad (4.30)$$

$$\text{Var}(x) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)} \quad (4.31)$$

και

$$E^\pi[Y] = E(x) \quad (4.32)$$

$$E^\pi[Y^2] = E^2(x) + \text{Var}(x) \quad (4.33)$$

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

$$R(A(0)) = K_1 n_1 E(x) + K_2 (N - n_1) [E(x) + (N - n_1 - 1) (E^2(x) + \text{Var}(x))] + GC + LGV$$

$$R(A(0)) = K_1 n_1 E(x) + K_2 (N - n_1) [E(x) + (N - n_1 - 1) (E^2(x) + \text{Var}(x))] + GC + LGV \quad (4.34)$$

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

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

Είναι ίδια με το 1<sup>ο</sup> σενάριο. Άρα:

$$R(A(1)) = C + AC + MN_1 \theta_1$$

Συγκρίνοντας ομοίως με το πρώτο σενάριο τις δύο αποφάσεις:

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.



## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1. Υπολογισμοί Παραμέτρων

#### ➤ V

Αρχικά πρέπει να προσδιορίσουμε τον όγκο νερού που χρειάζεται για την άρδευση της περιοχής κάθε χρόνο.

Έχει υπολογιστεί ότι για την περιοχή της δυτικής Μεσσαράς απαιτείται νερό όγκου  **$V = 5.000.000 \text{ m}^3$**  κάθε χρόνο για άρδευση.

#### ➤ GC

Το κόστος υπόγειου νερού περιλαμβάνει το κόστος άντλησης ανάλογα με τον όγκο του και το κόστος κατασκευής της γεώτρησης.

Θεωρείται ότι στοιχίζει  $0,08 \text{ €/m}^3$ .

Για 2 χρόνια παρακολούθησης:  $GC = 0,08 * 5 * 10^6 * 2 = \mathbf{800.000 \text{ €}}$

Για 4 χρόνια παρακολούθησης:  $GC = 0,08 * 5 * 10^6 * 4 = \mathbf{1.600.000 \text{ €}}$

#### ➤ LGV

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να υπολογιστεί η χαμένη αξία του υπόγειου νερού. Γενικά στην ανάλυση αποφάσεων έχει επικρατήσει ότι το κόστος ρύπανσης ισούται με το κόστος αποκατάστασης. Αλλά σε πολλές περιπτώσεις η αποκατάσταση των ζημιών δεν επιστρέφει πάντα την πλήρη αξία του αγαθού που έχει επηρεαστεί. Το ίδιο ισχύει φυσικά και για το νερό σαν αγαθό. Στα υπόγεια ύδατα, ακόμη και μετά από τέλειο καθαρισμό, το πόσιμο νερό υψηλής ποιότητας επιστρέφεται, μετά την αποκατάσταση από ένα φαινόμενο ρύπανσης, ως αρδευτικό νερό. Αυτό το νερό άρδευσης θα επιστρέψει τελικά στον υδροφόρο ορίζοντα και ως αποτέλεσμα της διάχυσής του στο εδάφους θα φτάσει την αρχική του ποιότητα. Ωστόσο, η πλήρης αποκατάσταση χρειάζεται πολύ χρόνο (της τάξης των δεκαετιών ή αιώνες) και τα αρχικά υπόγεια ύδατα υποβαθμίζονται. Άρα μπορούμε να υπολογίσουμε τη χαμένη αξία ως τη διαφορά της αξίας του πόσιμου και αρδευτικού νερού. [Παλαιολόγος, 2008]

Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται όγκος νερού  $V = 20.000.000 \text{ m}^3$

- Με βάση τις τιμές του δημόσιου τιμολογίου:

Η τιμή του νερού που παρέχεται από δημόσια δίκτυα στην Ελλάδα διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και ανάλογα το είδος και το μέγεθος της κατανάλωσης. Ενδεικτικά:

Πόσιμο νερό  $= 0,38 \text{ €/m}^3$  [Φαφούτης, 2006] και Αρδευτικό νερό  $= 0,08 \text{ €/m}^3$  [Λατινόπουλος, 2005].

Άρα  $LGV = (0,38 - 0,08) * 20 * 10^6 \text{ €} = \mathbf{6.000.000 \text{ €}}$

Άλλες τιμές του νερού προκύπτουν από διαφορετικά βιβλιογραφικά δεδομένα [Ντανάση Κωνσταντίνα, 2011]:

Πόσιμο νερό=0,93€/m<sup>3</sup> και Αρδευτικό νερό=0,18€/m<sup>3</sup>

Άρα LGV=(0,93-0,18)\*20\*10<sup>6</sup> € = **15.000.000 €**

- Με βάση την τιμή του εμφιαλωμένου:

Στο άλλο άκρο, από την αντιμετώπιση του νερού σε αφθονία, είναι η προσέγγισή του ως αγαθό σε ανεπάρκεια. Σε αυτήν την περίπτωση η αξία του νερού υπολογίζεται μέσω του κόστους αντικατάστασης και καταλήγει σε υπέρογκα ποσά. Αυτό συμβαίνει γιατί αν θεωρήσουμε ότι σε μία περιοχή ο υπόγειος υδροφόρος δεν μπορεί να προσφέρει πόσιμο νερό στους κατοίκους και δεν μπορούν να γίνουν έργα μεταφοράς από άλλες περιοχές, τότε η μόνη δυνατότητα είναι η αγορά εμφιαλωμένου νερού.

Κόστος εμφιαλωμένου νερού = 665€/m<sup>3</sup>.

Άρα LGV=665\*20\*10<sup>6</sup> € = 13.300.000.000 €

Αυτή είναι προφανώς μια υπερβολική αντιμετώπιση του προβλήματος και δεν θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς μας.

#### ➤ C

Το κόστος κατασκευής του ταμιευτήρα σε μορφή λιμνοδεξαμενής είναι δύσκολο να υπολογιστεί ακριβώς καθώς εξαρτάται από πολλές παραμέτρους.

Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί ο ωφέλιμος όγκος της δεξαμενής σύμφωνα με Varouchakis et al. 2016:

Ο βασικός σκοπός της κατασκευής ενός επιφανειακού ταμιευτήρα είναι η συλλογή νερού από βροχοπτώσεις, ποτάμια και απορροές με στόχο να καλύψει τις ανάγκες για ύδρευση ή άρδευση. Η ποσότητα νερού που θα χρησιμοποιηθεί και είναι αποθηκευμένη στον ταμιευτήρα ονομάζεται ωφέλιμος όγκος,  $V_D$ . Είναι σημαντικό να προσδιοριστεί το ποσοστό εκμετάλλευσης  $\alpha$ , το οποίο υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\alpha = \frac{V_D}{V_{runoff}} \quad (5.1)$$

Όπου,  $V_D$ , είναι ο όγκος νερού που απαιτείται για μία χρονική περίοδο  $t$  και  $V_{runoff}$ , είναι ο όγκος νερού από τις απορροές για την ίδια χρονική περίοδο.

Η ισότητα που υπολογίζει τον ωφέλιμο όγκο του ταμιευτήρα είναι:

$$V_D = \bar{Q} \left[ \frac{Z_p^2}{4(1-D)} \right] CV^2 \quad (5.2)$$

Όπου,

$V_{\Omega}$ , είναι ο ωφέλιμος όγκος ( $m^3$ )

$\bar{Q}$ , είναι η μέση ετήσια ποσότητα νερού από απορροές ( $m^3$ )

D, είναι ο λόγος  $V_D/\bar{Q}$  ( $m^3$ )

CV, είναι ο συντελεστής μεταβολής των ετήσιων απορροών.

$Z_p$ , είναι η κανονικοποιημένη τυχαία μεταβλητή μετά την κανονική κατανομή  $N(0,1)$  για πιθανότητες  $p$

$p$ , είναι η πιθανότητα να μπορέσει ο ταμιευτήρα να καλύψει της ανάγκες.

Για να υπολογιστεί ο ωφέλιμος όγκος της λιμνοδεξαμενής, γίνεται χρήση ιστορικών βροχομετρικών δεδομένων για την περιοχή Μεσσαρά Κρήτης.

Year	V ( Mm <sup>3</sup> )	Year	V( Mm <sup>3</sup> )
1967-68	32	1987-88	20.442
1968-69	13.07	1988-89	11.741
1969-70	11.84	1989-90	4.511
1970-71	11.84	1990-91	5.211
1971-72	9.199	1991-92	2.618
1972-73	7.646	1992-93	0
1973-74	4.315	1993-94	7.067
1974-75	4.797	1994-95	4.926
1975-76	23.612	1995-96	11.995
1976-77	6.016	1996-97	2.387
1977-78	60.622	1997-98	0.8803
1978-79	21.005	1998-99	1.3315
1979-80	26.33	1999-00	0.025
1980-81	65.901	2000-01	0.995
1981-82	46.457	2001-02	1.52
1982-83	19.165	2002-03	12.025

1983-84	29.619	2003-04	3.52
1984-85	48.742	2004-05	0.14
1985-86	13.93	2005-06	0.12
1986-87	10.951	2006-07	0.27
		<b>Total</b>	<b>558.78</b>

**Πίνακας 1. Ετήσιες απορροές Μεσσαράς για τα έτη 1967-2007**

Έχει υπολογιστεί ότι απαιτείται νερό όγκου  $V_D = 5.000.000 \text{ m}^3$ .

Το ποσοστό  $\alpha$  υπολογίστηκε για μία χρονική περίοδο  $t=41\text{years}$ . Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται όλες οι στατιστικές και σχεδιαστικές παράμετροι σύμφωνα με τα δεδομένα:

min	Max	max	$\alpha$ (%)	D	Average	CV
0.00	65.90Mm <sup>3</sup>	65.90Mm <sup>3</sup>	36.69	0.36	13.97Mm <sup>3</sup>	1.19

**Πίνακας 2. Στατιστικές και σχεδιαστικές παράμετροι**

Έτσι καταλήγει η παρακάτω ισότητα για τον ωφέλιμο όγκο σαν συνάρτηση του D και του  $Z_p$ .

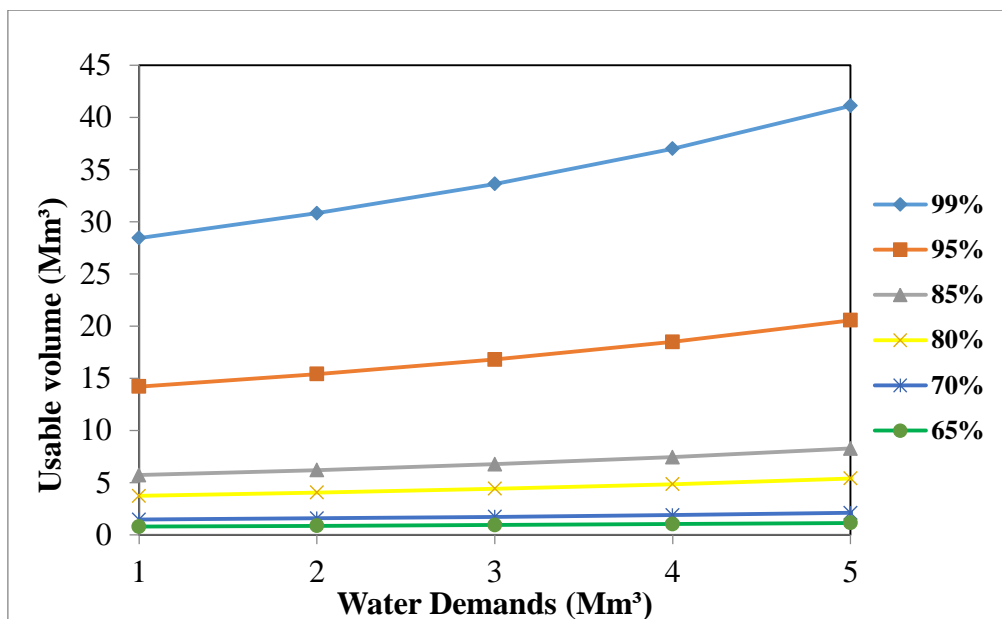
$$V_{\Omega} = \frac{4.95Z_p^2}{(1-D)} \quad (5.3)$$

Οι τιμές του  $Z_p$ , για πιθανότητες  $p$ , δίνονται στον Πίνακα 3.

Probability, $p$ (%)	99	95	85	80	70	65
$Z_p$	2.326	1.645	1.036	0.842	0.524	0.39

**Πίνακας 3. Τιμές της τυχαίας μεταβλητής  $Z_p$  για διάφορα ποσοστά πιθανότητας κάλυψης αναγκών για νερό**

Στο Διάγραμμα 6 οι υπολογισμένες τιμές του  $V_{\Omega}$  παρουσιάζονται για κάθε πιθανότητα  $p$  να καλυφθούν οι ανάγκες για νερό σαν συνάρτηση των αναγκών για άρδευση.

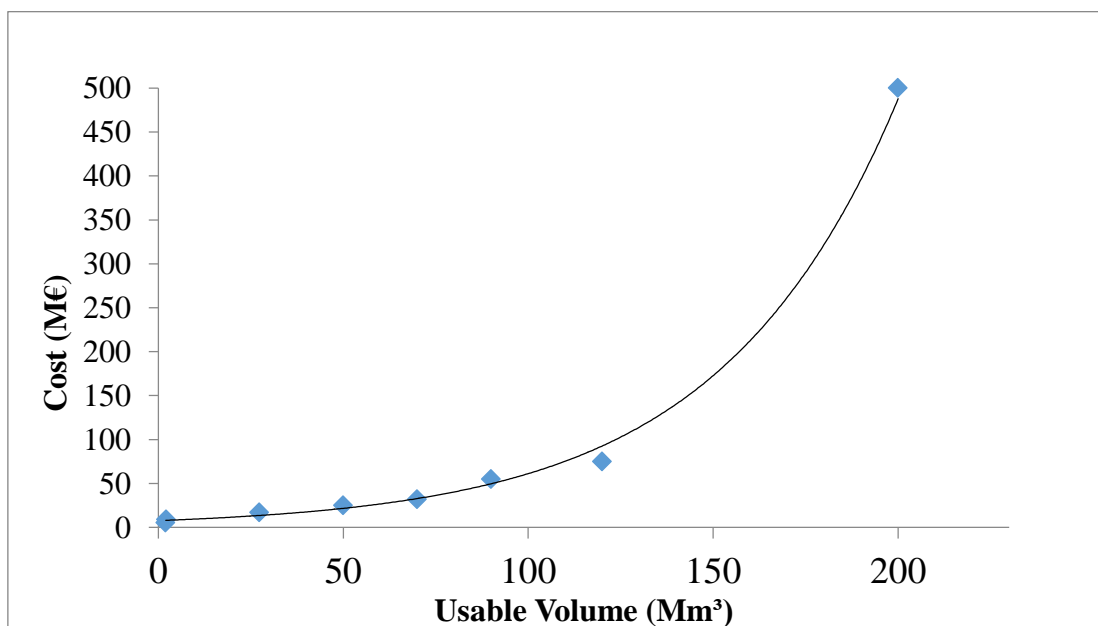


**Διάγραμμα 5. Ωφέλιμος όγκος σαν συνάρτηση των αναγκών για νερό για διάφορα ποσοστά πιθανότητας κάλυψή τους**

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα επιλέχθηκε να κατασκευαστεί λιμνοδεξαμενή με  $V_{\Omega} = 2 \text{ Mm}^3$ , με πιθανότητα 70% να καλυφθούν οι ανάγκες.

1<sup>ος</sup> τρόπος:

Ένας τρόπος να υπολογιστεί το κόστος κατασκευής του ταμιευτήρα είναι μέσω του παρακάτω διαγράμματος, ανάλογα με τον ωφέλιμο όγκο που επιδιώκουμε. Σαν δεδομένα του διαγράμματος χρησιμοποιήθηκαν παραδείγματα κατασκευών ανά την Ευρώπη.



**Διάγραμμα 6. Κόστος κατασκευής ταμιευτήρα ως προς τον ωφέλιμο όγκο του**

Η σχέση που προκύπτει και συνδέει το κόστος  $C$  με τον όγκο  $V_{\Omega}$  είναι η εξής: ( $R^2=0.94$ ).

$$C = 8.9886 \cdot e^{0.0179V_{\Omega}} \quad (5.4)$$

Όπου,  $C$  είναι το κόστος του ταμιευτήρα σε Μ€ και  $V_{\Omega}$  είναι ο ωφέλιμος όγκος σε  $Mm^3$

Άρα για  $V_{\Omega} = 2 Mm^3$  με αντικατάσταση:

$$C = 9.020.836 \text{ €}$$

Το αποτέλεσμα είναι αρκετά μεγάλο και αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι σαν δεδομένα στο Διάγραμμα 7 υπάρχουν κάποιες λιμνοδεξαμενές πολύ μεγάλου μεγέθους. Επίσης τα δεδομένα αυτά αφορούν κατασκευές στην Ευρώπη και όχι συγκεκριμένα στην Ελλάδα και δεν είναι γνωστό αν έχουν συμπεριληφθεί και άλλα κόστη εκτός από τα κατασκευαστικά ή τι τεχνολογίες έχουν χρησιμοποιηθεί. Άρα δεν θεωρείται ότι το αποτέλεσμα είναι πλήρως αντιπροσωπευτικό.

2<sup>ος</sup> τρόπος:

Αν θεωρηθούν σαν δεδομένα οι λιμνοδεξαμενές που έχουν κατασκευαστεί στην Ελλάδα την περίοδο 1994-2005 σύμφωνα με το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων και κατασκευαστεί πίνακας με το κόστος τους και τον ωφέλιμο όγκο τους προκύπτει ο Πίνακας 4:

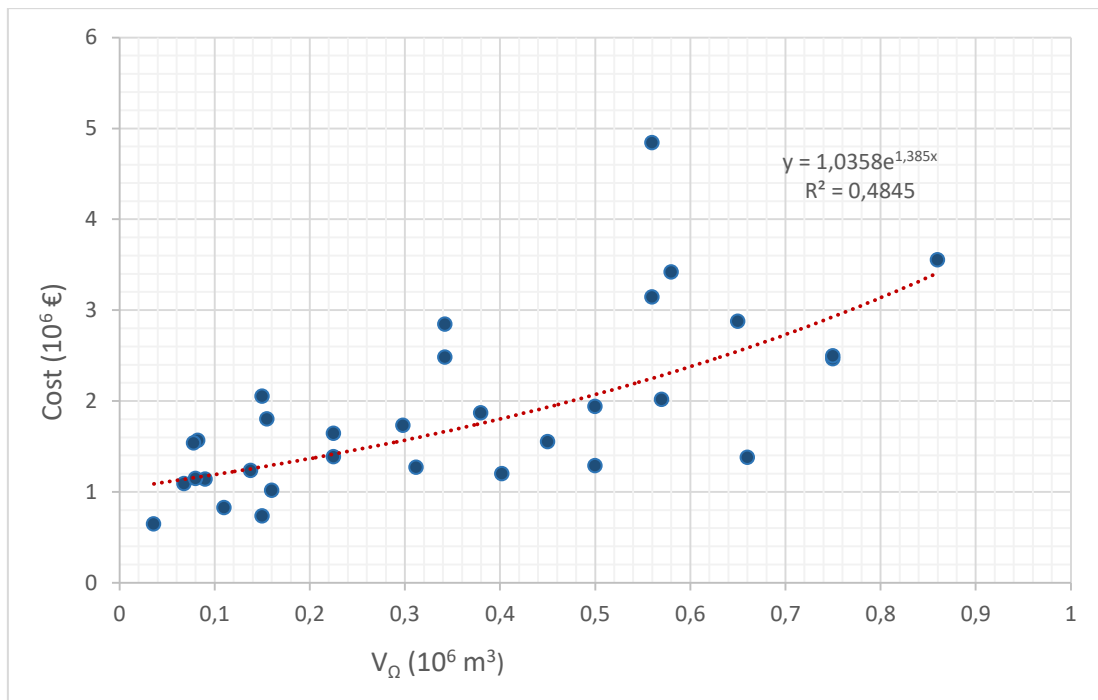
Όγκος ( $m^3$ )	Κόστος ( $10^6 \text{ €}$ )	Περιοχή
0,068	1,0885	Παξοί
0,57	2,01615	Νάξος
0,66	1,3793	Ρέθυμνο
0,342	2,4798	Σάμος
0,45	1,5495	Ρόδος
0,5	1,9369	Κεφαλονιά
0,15	0,7322	Σάμος
0,86	3,551	Λασιθί
0,225	1,3852	Κως
0,58	3,4189	Λέσβος
0,56	3,143	Λέσβος
0,036	0,64563	Λειψοί
0,11	0,8264	Ηράκλειο
0,38	1,86647	Ηράκλειο

0,09	1,1372	Λήμνος
0,138	1,2325	Παξοί
0,65	2,876	Χανιά
0,15	2,0524	Χίος
0,08	1,1469	Ικαρία
0,225	1,6434	Ηράκλειο
0,16	1,0154	Κέρκυρα
0,0825	1,5642	Καστελόριζο
0,75	2,4622	Ανώγια
0,75	2,4945	Δράμα
0,342	2,84373	Κως
0,402	1,19883	Λευκάδα
0,155	1,8005	Κάλυμνος
0,312	1,27	Τήλος
0,5	1,28855	Κεφαλλονιά
0,298	1,732	Τήνος
0,078	1,5378	Νίσυρος
0,56	4,8423	Χανιά

**Πίνακας 4. Κόστος και όγκος λιμνοδεξαμενών στην Ελλάδα**

Έτσι κατασκευάζεται και το Διάγραμμα 8:





**Διάγραμμα 7. Κόστος λιμνοδεξαμενών ως προς τον ωφέλιμο όγκο τους στην Ελλάδα**

Αν αντικατασταθεί στην σχέση που προκύπτει το  $V_{\Omega} = 2 \text{ Mm}^3$ , υπολογίζεται το κόστος:

$$C = 16.529.953 \text{ €}$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση το αποτέλεσμα είναι ένα ακόμα μεγαλύτερο κόστος που δεν μπορεί να είναι ρεαλιστικό. Στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνονται έργα που κατασκευάστηκαν προ δεκαετίας κάτι που τα κάνει πιο κοστοβόρα αν αναλογιστεί κανείς την εξέλιξη της τεχνολογίας. Επίσης όλες οι λιμνοδεξαμενές είχαν όγκο μικρότερο από  $V_{\Omega} = 1 \text{ Mm}^3$  και περιλαμβάνουν επιπλέον έξοδα εκτός από τα κατασκευαστικά.

3<sup>ος</sup> τρόπος:

Αν ληφθεί σαν παράδειγμα η λιμνοδεξαμενή Αγίου Γεωργίου στο Οροπεδίου Λασιθίου. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Ανάπτυξης Κρήτης ΑΕ, κόστισε 7.611.879,31 € (χωρίς απαλλοτριώσεις & ΌΚΩ) και περιλαμβάνει:

- Ταμιευτήρα χωρητικότητας  $2.150.000 \text{ m}^3$  ο οποίος είναι στεγανοποιημένος με μεμβράνη πολυαιθυλενίου. Ο χώρος που καταλαμβάνει ο ταμιευτήρας είναι 300 στρέμματα περίπου και το ύψος νερού σε αυτόν είναι 10,50 m όταν είναι πλήρης.
- Δύο τεχνικών έργων εισόδου, το έργο υπερχειλιστή και το έργο υδροληψίας-εκκένωσης.
- Ο αγωγός μεταφοράς μήκους 1.080 m ο οποίος είναι από εγκιβωτισμένες τσιμεντοσωλήνες Φ1600 και το έργο μερισμού.

- Εκτός των παραπάνω βασικών εργασιών κατασκευάστηκαν η οδός στέψης του ταμιευτήρα, η περιμετρική οδός στον πόδα του ταμιευτήρα, η αποκατάσταση του αγροτικού οδικού δικτύου, περίφραξη και φύτευση χώρου λιμνοδεξαμενής,
- Η σύνταξη όλων των απαραίτητων μελετών για την κατασκευή του δικτύου άρδευσης της λιμνοδεξαμενής.

Παρατηρείται ότι το συνολικό κόστος περιλαμβάνει έργα όπως αγωγούς μεταφοράς, δίκτυα μελέτες κ.ά., άρα και σε αυτήν την περίπτωση το κόστος είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό

Συμπερασματικά, η πιο ρεαλιστική επιλογή είναι να γίνουν δοκιμές για **C=2-6.000.000 €**

#### ➤ AC

Το ετήσιο κόστος περιλαμβάνει το κόστος συντήρησης και λειτουργίας της δεξαμενής και άλλα ετήσια κόστη. Ανέρχεται συνήθως στο 1/10 του κόστους κατασκευής περίπου:

$$AC = \frac{C}{10}$$

#### ➤ M

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 (A) για την εκπόνηση μελέτης αγωγού εξωτερικού υδραγωγείου ύδρευσης υπολογίζεται συναρτήσει του μήκους του αγωγού και της εσωτερικής διαμέτρου βάσει του τύπου:

$$A = (8 \cdot D^{1/2} + \beta / L^{1/3}) \cdot L \quad (5.5)$$

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 μεταφοράς νερού ισούται με την κατασκευή του αγωγού μεταφοράς, που προσδιορίστηκε περίπου στα **88.068 €**

#### ➤ Κ

Όσον αφορά τα πρόστιμα, στο πρώτο σενάριο εφαρμόστηκε **K=15.000 €** για κάθε περιστατικό υπεραντλήσης.

Ενώ στο δεύτερο, εφαρμόστηκε κλιμακωτή συνάρτηση προστίμου:

K= **8.000 €** αν οι υπεραντλήσεις είναι μέχρι 12 ( $N \leq 12$ )

K= **15.000 €** αν οι υπεραντλήσεις είναι 13-24 ( $12 < N \leq 24$ )

Για μηνιαίους ελέγχους σε χρονικό διάστημα 2 ετών.

#### ➤ Υ, Υ<sup>2</sup>

1<sup>ο</sup> Σενάριο:

Γνωρίζουμε ότι για 12 μηνιαίους ελέγχους θα παρατηρείται παράβαση στην άντληση νερού 5 φορές για τους μήνες Μάιο-Σεπτέμβρη λόγω της αυξημένης ζήτησης τους καλοκαιρινούς μήνες. Οι παράμετροι της κατανομής Βήτα είναι  $r=5$ ,  $t=12$ .

Η μέση τιμή και η διασπορά της κατανομής Βήτα δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$$E([Y]) = \frac{r}{t} = \frac{5}{12} = \mathbf{0,4167}$$

$$\sigma^2 = \frac{r(t-r)}{t^2(t+1)} = \frac{5(12-5)}{12^2(12+1)} = 0,018697$$

Και

$$E[Y^2] = (E[Y])^2 + \sigma^2 = \mathbf{0,192307692}$$

2<sup>ο</sup> Σενάριο

Αρχικά πρέπει να υπολογιστούν οι παράμετροι  $\alpha, \beta$  της κατανομής Βήτα προσαρμόζοντας τα δεδομένα της μέσης στάθμης υπόγειου υδροφορέα στην περιοχή για τα έτη 1980-2009 στη Βήτα συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Θεωρείται ότι φαινόμενο υπεραντλήσης υπάρχει όταν η στάθμη είναι λιγότερο από 38 m και αφού πρώτα κανονικοποιηθούν οι μετρήσεις προκύπτει ότι  $\alpha = 1,29$  και  $\beta = 0,71$ . Τα δεδομένα ελήφθησαν από τη δημοσιευμένη εργασία των Varouchakis et al. (2016).

$B(\alpha, \beta)$  είναι η εξίσωση της Βήτα συνάρτησης, δηλαδή:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt = \int_0^1 t^{0,29} (1-t)^{0,71} dt = 3,12665$$

Η μέση τιμή και η διασπορά της κατανομής Βήτα δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$$E[Y] = \frac{\alpha}{\alpha+\beta} = \mathbf{0,645}$$

$$\text{Var}[Y] = \frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)} = 0,076325$$

Και

$$E^\pi [Y^2] = E^2[Y] + \text{Var}[Y] = \mathbf{0,49235}$$

➤  $\theta_1$

Στην περιοχή της Μεσσαράς υπάρχουν έντεκα σταθμοί που καταγράφουν το ύψος βροχόπτωσης. Ο πρώτος από αυτούς ξεκίνησε να λειτουργεί το 1945 και σταδιακά δημιουργήθηκαν και οι υπόλοιποι με συστηματική παρακολούθηση από το 1969.

Αρχικά βρέθηκε ο μέση ετήσια βροχόπτωση της περιοχής από το μέσο όρο των ετήσιων συνολικών βροχοπτώσεων των 11 σταθμών της Μεσσαράς για τις χρονιές 1980-2015.

Χαρακτηρίζονται υγρά έτη εκείνα που η ετήσια βροχόπτωσή τους ξεπερνά τα 816mm και ξηρά έτη εκείνα που η ετήσια βροχόπτωσή τους είναι κάτω από 602mm. Έτσι, βρέθηκαν 9 υγρά έτη και 8 ξηρά κατά την περίοδο 1980-2015.

Αν για  $N$  χρόνια μελέτης βρεθούν  $m$  ξηρά έτη, τότε η πιθανότητα να υπάρξει ξηρό έτος υπολογίζεται ως εξής:

$$E^{\pi(\theta_1)}[\theta_1] = \frac{m}{N} = \frac{8}{35} = \mathbf{0,2285}$$

Δηλαδή υπάρχει πιθανότητα 22,85% για ξηρό έτος.

## 5.2. Δοκιμές

Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον excel (Πίνακας 5) ως εξής:

- Αρχικά μοντελοποιήθηκε το πρόβλημα που μελετάμε με βάση το θεώρημα Bayes όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.
- Έγινε εισαγωγή των παραμέτρων σύμφωνα με τα βιβλιογραφικά δεδομένα.
- Οι δοκιμές ξεκινάνε εισάγοντας την τιμή 0 στους πετυχημένους ελέγχους N και για όσο  $R(0)/R(1) < 1$  (Δηλαδή η ενέργεια 0 είναι πιο συμφέρουσα από την 1), τότε γίνεται αύξηση της τιμής N ακέραια μέχρι την τιμή n των ελέγχων αυξάνοντας το λόγο  $R(0)/R(1)$ .
- Σε περίπτωση που  $R(0)/R(1) \geq 1$ , η τιμή N είναι η οριακή τιμή των υπεραντλήσεων που η ενέργεια 0 σταματάει να είναι η πιο συμφέρουσα.
- Αν για κάθε τιμή N από 0 έως n ισχύει  $R(0)/R(1) \geq 1$  τότε η ενέργεια 1 είναι η πιο συμφέρουσα.
- Η δοκιμή σταματά όταν  $R(0)/R(1) \geq 1$ .

Επειδή σε κάποιες παραμέτρους υπάρχουν πάνω από μία πιθανές επιλογές, έγινε εφαρμογή 4 δοκιμών για κάθε σενάριο. Οι δοκιμές διαφοροποιούνται ως προς τις παραμέτρους C, LGV, Έλεγχοι n και τα σενάρια διαφοροποιούνται ως προς το ύψος του προστίμου K και την πιθανότητα υπεραντλήσης  $\theta_0$  αφού χρησιμοποιήσαμε διαφορετική κατανομή για να την υπολογίσουμε.

Όγκος V (m <sup>3</sup> )	5000000	GC	400000	KY <sup>2</sup>	455769,23	R(0)	7255769,23
Ωφέλιμος Όγκος V <sub>Ω</sub> (m <sup>3</sup> )	2000000	LGV	6000000	GC*N	800000		
Όγκος V (m <sup>3</sup> ) για LGV	20000000	C	6000000	LGV	6000000		
Πρόστιμο K (€)	15000	AC	600000				
Γεγονότα Υπεράντλησης r	5	$\theta_1$	0,228571	C	6000000	R(1)	7240259,28
Έλεγχοι Υπεράντλησης t	12	$\theta_0$	0,416667	AC*N	1200000		
Ξηρά Έτη (years)	8	$\theta_0^2 + \sigma^2$	0,192308	M* $\theta_1$ *N	40259,28		
Έτη παρακολούθησης (years)	35	$\sigma^2$	0,018697			R(0)/R(1)	1,00214
Κόστος Μεταφ Νερού M (€)	88067,18						
N (έως 24)	12						
N (years)	2						

Πίνακας 5. Υπολογισμοί σε Excel για Δοκιμή 1-Σενάριο 1 και C=6.000.000€

➤ Δοκιμή 1

Θεωρείται **LGV=6.000.000€** και γίνεται εφαρμογή για  $C=2 \cdot 6.000.000€$  για **24 ελέγχους** (2 χρόνια).

Αν ο ταμιευτήρας κοστίζει 2-5.000.000€, συμφέρει η ενέργεια της κατασκευής του.

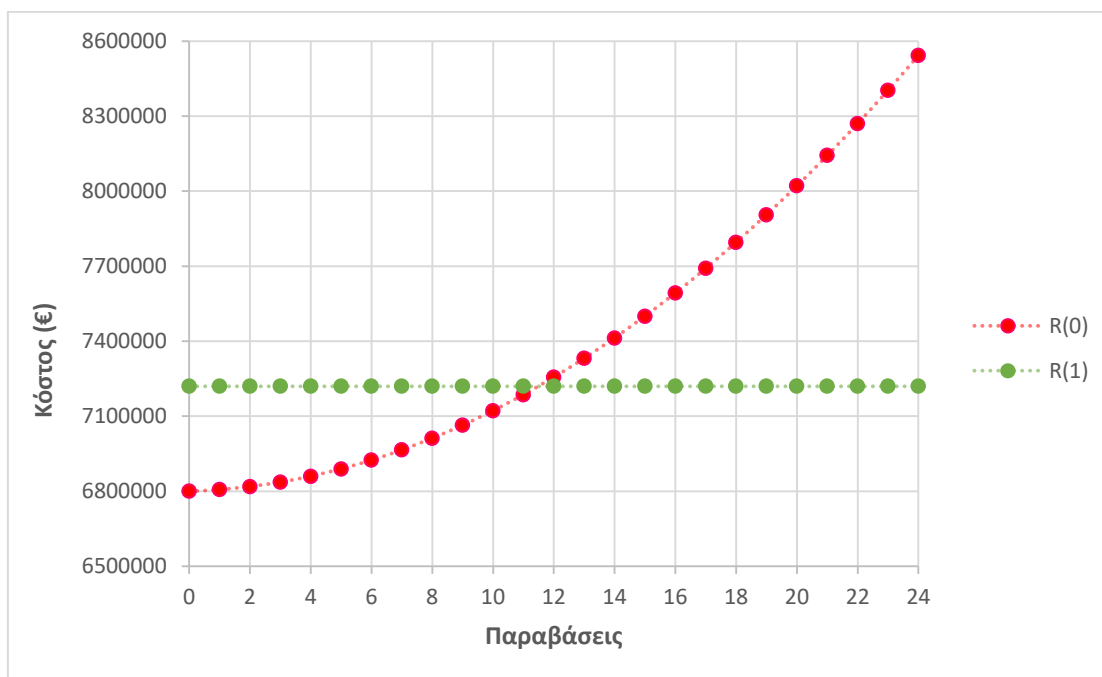
Αν **C=6.000.000€**:

1<sup>ο</sup> σενάριο: Συμφέρει η ενέργεια πληρωμής προστίμων για μέχρι **11 υπεραντλήσεις**.

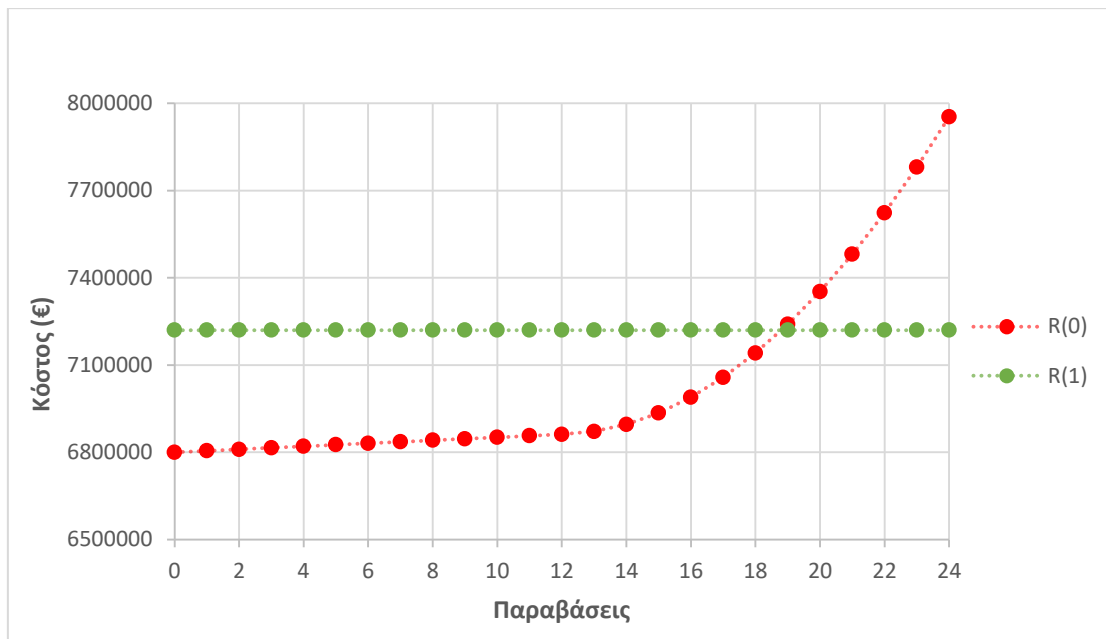
2<sup>ο</sup> σενάριο: Συμφέρει η ενέργεια πληρωμής προστίμων για μέχρι **18 υπεραντλήσεις**.

Αν ξεπεραστούν οι υπεραντλήσεις αυτές τότε συμφέρει και πάλι η κατασκευή ταμιευτήρα.

Παρακάτω παρουσιάζεται σε διάγραμμα η μεταβολή του κόστους των 2 ενεργειών όσο αυξάνονται οι παραβάσεις υπεράντλησης και για τα 2 σενάρια επιβολής προστίμων:



**Διάγραμμα 8. Κόστος ενεργειών 0 και 1 ως προς τις παραβάσεις για Δοκιμή 1-Σενάριο 1**



**Διάγραμμα 9. Κόστος ενεργειών 0 και 1 ως προς τις παραβάσεις για Δοκιμή 1-Σενάριο 2**

#### ➤ Δοκιμή 2

Θεωρείται **LGV=15.000.000€** και γίνεται εφαρμογή για  $C=2-6.000.000€$  για **24 ελέγχους** (2 χρόνια). Τότε συμφέρει η ενέργεια κατασκευής ταμειυτήρα και για τα 2 σενάρια.

Συνεχίζοντας τις δοκιμές και για μεγαλύτερες τιμές  $C$  βρίσκουμε για ποια τιμή  $C$  θα μπορούσαμε να καταλήξουμε στην ενέργεια πληρωμής προστίμων και αυτή είναι η  $C=14.000.000€$ .

Αν  **$C=14.000.000€$** :

1<sup>ο</sup> σενάριο: Συμφέρει η ενέργεια πληρωμής προστίμων για μέχρι **18 υπεραντλήσεις**.

2<sup>ο</sup> σενάριο: Συμφέρει η ενέργεια πληρωμής προστίμων για μέχρι **23 υπεραντλήσεις**.

Αν ξεπεραστούν οι υπεραντλήσεις αυτές τότε συμφέρει και πάλι η κατασκευή ταμειυτήρα.

#### ➤ Δοκιμή 3

Θεωρείται  **$C=16.529.953€$**  και γίνεται εφαρμογή για  $LGV=6.000.000€$  και  $LGV=15.000.000€$  για **48 ελέγχους** (4 χρόνια).

Αν  $LGV=6.000.000€$  συμφέρει η ενέργεια της πληρωμής προστίμων για όλους τους ελέγχους.



Αν **LGV=15.000.000€**:

1<sup>ο</sup> σενάριο: Συμφέρει η ενέργεια πληρωμής προστίμων για μέχρι **47 υπεραντλήσεις**.

2<sup>ο</sup> σενάριο: Συμφέρει η ενέργεια πληρωμής προστίμων για μέχρι **41 υπεραντλήσεις**.

Αν ξεπεραστούν οι υπεραντλήσεις αυτές τότε συμφέρει η κατασκευή ταμιευτήρα.

➤ Δοκιμή 4

Θεωρείται **C=9.020.836€** και γίνεται εφαρμογή για LGV=6.000.000€ και LGV=15.000.000€ για **48 ελέγχους** (4 χρόνια).

Αν LGV=15.000.000€ συμφέρει η ενέργεια της κατασκευής ταμιευτήρα για όλους τους ελέγχους.

Αν **LGV=6.000.000€**:

1<sup>ο</sup> σενάριο: Συμφέρει η ενέργεια πληρωμής προστίμων για μέχρι **41 υπεραντλήσεις**.

2<sup>ο</sup> σενάριο: Συμφέρει η ενέργεια πληρωμής προστίμων για μέχρι **37 υπεραντλήσεις**.

Αν ξεπεραστούν οι υπεραντλήσεις αυτές τότε συμφέρει και πάλι η κατασκευή ταμιευτήρα.

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι που αλλάζουν στις δοκιμές (LGV, C, Έλεγχοι) και τα αποτελέσματα που δίνουν. Δηλ για πόσες υπεραντλήσεις N από τους μηνιαίους ελέγχους συμφέρει να συνεχιστεί η παράβαση. Όταν ξεπεραστεί το N θεωρείται ότι συμφέρει η κατασκευή ταμιευτήρα.

Δοκιμή	LGV (€)	C (€)	Έλεγχοι	N (Σενάριο 1)	N (Σενάριο 2)
1	6000000	6000000	24	12	19
2	15000000	14000000	24	19	24
3	15000000	16529953	48	48	42
4	6000000	9020836	48	42	38

**Πίνακας 6. Παράμετροι και αποτελέσματα για κάθε δοκιμή**

## 6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η απόφαση για την πιο συμφέρουσα λύση εξαρτάται πάρα πολύ από το κόστος κατασκευής του ταμιευτήρα. Συγκεκριμένα για τις περιπτώσεις που το κόστος είναι μικρό, δηλαδή έως 5.000.000€, βέλτιστη λύση είναι η κατασκευή από την αρχή. Σε περίπτωση που το κόστος ανέλθει στα 6.000.000€ υπάρχει περιθώριο αναβολής του έργου για ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο μπορεί να γίνεται υπεράντληση του υδροφορέα. Όσο αυξάνεται το κόστος κατασκευής αυξάνεται και το περιθώριο αναβολής του καθώς είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα λύση η πληρωμή προστίμων για την υπεράντληση. Η πιο ρεαλιστική κοστολόγηση είναι αυτή που καταλήγει στα 6.000.000€ αφού βασίζεται σε παρόμοιο έργο λιμνοδεξαμενής ενώ οι υπόλοιπες βασίζονται σε έργα διαφορετικού μεγέθους ή εκτός Ελλάδας. Γι' αυτό η δοκιμή 1 θεωρείται ότι είναι αυτή που ανταποκρίνεται παραπάνω στην πραγματικότητα.

Σημαντικό ρόλο στην απόφαση παίζει επίσης η χαμένη αξία του υπόγειου νερού. Όσο πιο αυστηρά κοστολογηθεί η χαμένη αξία, δηλαδή όσο πιο ακριβό είναι το πόσιμο νερό σε σχέση με το αρδευτικό στην περιοχή που μελετάται, τόσο θεωρείται ότι υποβαθμίζεται το νερό που χρησιμοποιείται για άρδευση. Σε περιοχές με αυξημένες ανάγκες για άρδευση αλλά περιορισμένο απόθεμα νερού λόγω περιβαλλοντικών προβλημάτων η κοστολόγηση του πόσιμου νερού είναι πιο αυστηρή. Η μεγάλη οικονομική υποβάθμιση του νερού κατά τη χρήση του ως αρδευτικό οδηγεί στο γεγονός ότι η άντλησή του από τον υπόγειο υδροφορέα δεν είναι συμφέρουσα λύση όταν υπάρχουν εναλλακτικές όπως αυτές που προτείνονται στην παρούσα εργασία. Η μεγάλη υποβάθμιση επιλέχθηκε να συγκριθεί με ακριβές κατασκευές παρόλο που θεωρούνται μη ρεαλιστικές για το μέγεθος της περιοχής και τις ανάγκες της.

Το ύψος του προστίμου και η μεταβολή του με την αύξηση των παραβάσεων επηρεάζει εξίσου σημαντικά το αποτέλεσμα. Αν επιβάλλεται αυστηρό πρόστιμο και η μεταβολή του ως προς τις παραβάσεις αυξάνεται παραβολικά αντί για γραμμικά, μειώνεται η παραβατικότητα. Σε περιοχές όπου υπάρχει ανάγκη για αποφυγή υπεράντλησης προτιμώνται αυστηρές ποινές στους παραβάτες όπως στην περίπτωση που μελετήθηκε. Ακόμα ένας τρόπος να οδηγηθούν οι παραβάτες σε περιβαλλοντική ενέργεια είναι η κλιμακωτή επιβολή προστίμων σύμφωνα με το οποίο υπάρχει ελαστικότητα στις πρώτες παραβάσεις ώστε να δοθεί χρόνος για να ληφθεί η απόφαση κατασκευής περιβαλλοντικού έργου. Στη συνέχεια όμως το πρόστιμο αυξάνεται και μεταβάλλεται πιο απότομα όσο υπάρχουν παραβάσεις με σκοπό την αναγκαστική επιλογή εναλλακτικής λύσης.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση το 1<sup>ο</sup> σενάριο επιβάλλει υψηλό πρόστιμο το οποίο αυξάνεται παραβολικά ως προς τις παραβάσεις ενώ το 2<sup>ο</sup> επιβάλλει χαμηλό πρόστιμο το οποίο αυξάνεται γραμμικά ως προς τις παραβάσεις αλλά μόλις οι παραβάσεις ξεπεράσουν κάποιο ορισμένο όριο το πρόστιμο γίνεται πιο αυστηρό και μεταβάλλεται παραβολικά. Έτσι παρατηρείται ότι στη δοκιμή 1 το 2<sup>ο</sup> σενάριο αφήνει παραπάνω περιθώρια παραβατικότητας από το 1<sup>ο</sup>. Αυτό μπορεί να φαίνεται ότι δεν είναι περιβαλλοντικά ορθό όσον αφορά τα υπόγεια ύδατα αλλά μακροχρόνια ίσως συμφέρει παραπάνω καθώς αυτή κλιμακωτή επιβολή προστίμου οδηγεί τον παραβάτη πιο ομαλά στην περιβαλλοντική λύση.

Συνεπώς οι παραβάσεις πολλές φορές δεν αντιμετωπίζονται μόνο με αυστηρές ποινές, λιγότερο ακριβές εναλλακτικές λύσεις ή μεγάλη κοστολογική υποβάθμιση του υπόγειου υδροφορέα. Ο τρόπος που θα επιβληθεί το πρόστιμο και ο χρόνος προσαρμογής είναι εξίσου σημαντικοί στην απόφαση που θα πάρει ο παραβάτης. Άρα μια στρατηγική που αρχικά φαίνεται πιο επιβλαβής για τον υπόγειο υδροφορέα μπορεί να έχει τελικά καλύτερα αποτελέσματα.

Στην περιοχή της δυτικής Μεσσαράς είναι γνωστό ότι υπάρχει αυξημένη ανάγκη για άρδευση λόγω των αγροτικών εκτάσεων και ότι η στάθμη του υπόγειου υδροφορέα έχει παρουσιάσει πτώση κυρίως από την υπεράντληση. Οι δρυείς ποινές στους παραβάτες είναι ένας τρόπος να αποφευχθεί το φαινόμενο της υπερβολικής άντλησης υπόγειου νερού αλλά μια διαφορετική στρατηγική μπορεί να έχει καλύτερα αποτελέσματα. Η κατασκευή λιμνοδεξαμενής που συγκεντρώνει το επιφανειακό νερό είναι μια εναλλακτική λύση άρδευσης η οποία είναι ορθή περιβαλλοντικά αλλά κρύβει τον κίνδυνο του ενδεχομένου μη πλήρωσής της. Σε αυτήν την περίπτωση είναι αναγκαστική η μεταφορά νερού με επιπλέον έξοδα από την ήδη ακριβή κατασκευή της.

Εάν, λοιπόν, γίνει ο κατάλληλος συνδυασμός άντλησης υπόγειου νερού και υδροδότησης από τον ταμιευτήρα θα μπορέσουν να καλυφθούν οι ανάγκες της περιοχής. Κατάλληλος θεωρείται ο συνδυασμός που δεν επιβαρύνει τον υπόγειο υδροφορέα, δεν είναι ακριβός οικονομικά και είναι και ομαλός ως προς την εφαρμογή του ώστε να είναι πιο προσιτός ως προς τους παραβάτες. Υπολογίζεται ότι αν κατασκευαστεί ένα περιβαλλοντικό έργο και γίνει ορθή διαχείριση υπόγειων υδάτινων πόρων θα υπάρξει επαρκής ποσότητα αρδευτικού νερού για να καλύψει την αγροτική παραγωγή. Έτσι η περιοχή που μελετήθηκε θα ακμάσει οικονομικά προστατεύοντας το περιβάλλον και τους υδάτινους πόρους.

Η εργασία εστιάζει κυρίως στη μέθοδο Bayes σαν εργαλείο αποφάσεων και στο στατιστικό και υδρολογικό κομμάτι του προβλήματος. Άρα παρουσιάζονται αδυναμίες στον υπολογισμό του κόστους κατασκευής του ταμιευτήρα και της μεταφοράς νερού σε περίπτωση μη πλήρωσής του. Για να υπολογιστούν με ακρίβεια χρειάζεται πιο ολοκληρωμένη μελέτη και πιο εξειδικευμένη στο αντικείμενο αυτό. Επίσης μπορεί να προκύπτουν επιπρόσθετα έξοδα που δεν έχουν ληφθεί υπόψη. Γι' αυτό έχει γίνει μια προεκτίμηση του κόστους ανάλογα με τον όγκο νερού που χρειάζεται ώστε να μπορέσει να βγει ένα σχετικά ρεαλιστικό αποτέλεσμα.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε τέτοιου είδους προβλήματα όπου έχουμε πολλές παραμέτρους και πολύ σημαντικές επιπτώσεις η διαδικασία λήψης μιας απόφασης είναι πολύπλοκη. Κάθε παράμετρος μπορεί να επηρεάσει πολύ το αποτέλεσμα γι' αυτό και η λύση που φαίνεται αρχικά ως βέλτιστη μπορεί στη συνέχεια να ανατραπεί. Τα περισσότερα προβλήματα λήψης αποφάσεων σχετίζονται με την αβεβαιότητα, η οποία προσδιορίζεται με χρήση προγενέστερων πληροφοριών που λαμβάνονται από δεδομένα και μετρήσεις. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα παρουσιάστηκε η αβεβαιότητα να γεμίσει η λιμνοδεξαμενή και η άγνωστη πιθανότητα υπεράντλησης κάτι που προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας βροχομετρικά δεδομένα και μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα αντίστοιχα. Για το ενδεχόμενο υπεράντλησης έγινε χρήση της διωνυμικής κατανομής και υπολογίστηκε η προγενέστερη πιθανότητα χρησιμοποιώντας τους τύπους της κατανομής Βήτα. Η πιθανότητα να μη γεμίσει η δεξαμενή υπολογίστηκε με χρήση των στατιστικών ιδιοτήτων της αναμενόμενης τιμής για ένα γραμμικό τύπο συνάρτησης απώλειας.

Τα 2 σενάρια διαφοροποιήθηκαν όσον αφορά τη συνάρτηση απώλειας για την επιβολή προστίμου. Στο 1<sup>ο</sup> το πρόστιμο αυξάνεται παραβολικά ως προς τις παραβάσεις και στο 2<sup>ο</sup> κλιμακωτά με γραμμική αύξηση και στη συνέχεια παραβολική ως προς τις παραβάσεις. Γενικά χρησιμοποιούνται και οι 2 τρόποι επιβολής προστίμου αλλά σε περιβαλλοντικά προβλήματα είναι πιο κοινό το δεύτερο σενάριο. Στην αρχή οι κανόνες περιβαλλοντικής συμπεριφοράς είναι πιο ελαστικοί καθώς οι επιβαρύνσεις είναι μικρότερες από τα οικονομικά οφέλη της δραστηριότητας. Όταν όμως συνεχίζονται οι παραβάσεις και αυξάνονται οι επιβαρύνσεις τα πρόστιμα γίνονται πιο αυστηρά και η κλιμάκωσή τους πιο έντονη ώστε να οδηγηθούν οι παραβάτες σε περιβαλλοντική πολιτική. Η δημόσια αρχή που είναι υπεύθυνη για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις εκτιμά τον τρόπο που θα επιβληθούν πρόστιμα ανάλογα με τις ανάγκες της περιοχής και τη σοβαρότητα του προβλήματος.

Η τελική απόφαση που θα πάρει ο αρμόδιος για το έργο εξαρτάται από οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Γι' αυτό και οι παράγοντες προσδιορίζονται σύμφωνα με τις προτεραιότητες που θέτει ο αρμόδιος και τις ανάγκες της περιοχής. Έτσι η διαδικασία λήψης αποφάσεων μπορεί να γίνει μια υποκειμενική διαδικασία και τα αποτελέσματα που δίνει να είναι εντελώς διαφορετικά αναλόγως τον αρμόδιο και την περιοχή. Σχετικά με την περίπτωση που μελετήσαμε σίγουρα η πιο περιβαλλοντική λύση είναι η κατασκευή της λιμνοδεξαμενής ώστε να μην επιβαρύνεται ο υπόγειος υδροφορέας. Αν λάβουμε υπόψη όμως και οικονομικούς παράγοντες, η πιο συμφέρουσα λύση είναι ο συνδυασμός των δύο ενεργειών καθώς λόγω της μείωσης των βροχοπτώσεων υπάρχει κίνδυνος η δεξαμενή να μη γεμίσει και η μεταφορά νερού δημιουργεί επιπλέον έξοδα.

Μελλοντική έρευνα που θα μπορούσε να γίνει πάνω σε αυτό το αντικείμενο αφορά κυρίως τους παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Αυτοί οι παράγοντες σχετίζονται με την ορθή κοστολόγηση του ταμιευτήρα και της μεταφοράς νερού και τον υπολογισμό επιπρόσθετων εξόδων. Επίσης θα μπορούσε να προταθεί κάποια άλλη περιβαλλοντική λύση που ίσως να είναι πιο οικονομική ή να μελετηθεί η περίπτωση κατασκευής πολλών μικρών λιμνοδεξαμενών στην περιοχή. Η τελευταία πρόταση θα αντιμετώπιζε το πρόβλημα που θα προέκυπτε σε περίπτωση έλλειψης βροχοπτώσεων αφού οι μεγάλες κατασκευές όπως το φράγμα Φανερωμένης στην περιοχή είναι ακριβά έργα με μεγάλο κίνδυνο να μη γεμίσουν σε σχέση με πολλά μικρότερα έργα.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bear, J. (1979), *Hydraulics of groundwater*, McGraw-Hill, New York.

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.

Eirini S. Papadaki (2014), Monitoring subsidence at Messara basin using radar  
European Commission (1996), *Groundwater Action Programme*, COM 1996/0355

European Communities (2008), *Groundwater Protection in Europe*, European Commission, 7, 10

Fafoutis C., Mylopoulos N., Vagiona D., Liakopoulos A. (2006), Water pricing and public participation in water resources management: Towards the Implementation of the EU Water Framework Directive, *Proceedings of the International Conference Protection and Restoration of the Environment VIII*

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

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.

G.W. Peterson, J.P. Sampson Jr., R.C. Reardon, J.G. Lenz (1996), *Becoming career problem solvers and decision makers: A cognitive information processing approach* D. Brown, L. Brooks (Eds.), *Career choice and development*, Jossey-Bass, San Francisco, 423-475

*Interferometry*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

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

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.

Latinopoulos P. (2005), Valuation and pricing of irrigation water: An analysis in Greek agricultural areas, *Global NEST Journal*, Vol. 7(3), 323-335

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

Population Reference Bureau (2017), 2017 World Population Data Sheet

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

Tsanis, I. K., Koutroulis, A. G., Daliakopoulos, I. N., and Jacob, D. (2011), Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete, *Clim. Change*, 106(4), 667–677.

UNCED (United Nations Convention on Desertification) (1994), United Nations convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa., New York

Vardavas, I. M., Bolle, H.-J., Bromley, J., de Bruin, H., Devereux, B., and Prastacos, P. (1996), An integrated monitoring and modelling study of desertification and climatic change impacts in the Messara Valley of Crete. EU DGXII, environment and climate change programme, Final Rep. EV5 V-CT94-0466, Heraklion, Greece, 143

Varouchakis E. A., Apostolakis A., Siaka M., Vasilopoulos K., Tasiopoulos A. (2017), Alternatives for domestic water tariff policy in the municipality of Chania, Greece, toward water saving using game theory, *Water Policy*, 20 (1): 175-188  
<https://doi.org/10.2166/wp.2017.182>

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>

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)

## ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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'-ΝΕΑ ΕΡΓΑ, Υπ.Α.Α.Τ. Ειδική Γραμματεία Γ' Κ.Π.Σ. Φεβρουάριος 2006

Βλάχος Κ. (2004), Η Ανάλυση του Επιχειρηματικού Ρίσκου, Οικονομικός Ταχυδρόμος 5/2/04, 53-59

Λουπασάκης Κ., Τεχνική Γεωλογία Ι-Εδαφικές Υποχωρήσεις, Προπτυχιακές Σημειώσεις, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2013

Λυμπέρη Ο., Διπλωματική Εργασία: Εφαρμογή της Θεωρία Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes σε Θέματα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2016

Ντανάση Κ., Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία: Κοστολόγηση αρδευτικού νερού στην περιοχή Μεσσαρά του Νομού Ηρακλείου Κρήτης, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2012

Οργάνωση και Διοίκηση Επιχειρήσεων, Κέντρα Εκπαίδευσης Ενηλίκων, Ζιγκιρίδης Ευθύμιος, 2008

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

#### ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

<https://oakae.gr/i-etairia/>

<https://oakae.gr/erga-ypodomon/ydravlika-erga/limnodeksameni-ag-georgiou-oropediou-lasithiou/>

<http://www.minagric.gr/index.php/el/for-farmer-2/eggeiesbeltioseis/1457-kataskevasthenta-erga>

<https://www.fao.org>

<http://www.meteo-news.gr/2014/01/to-klima-tis-kritis.html>

<http://diocles.civil.duth.gr/links/home/database/iraklio/pr18ge.pdf>

<https://www.elter.gr/default.asp?pid=15&la=1&ct=28&proID=91>

<http://www2.stat-athens.aueb.gr/~jpan/statistiki-skepsi-II/chapter8.pdf>

<https://repository.edulll.gr/edulll/retrieve/3102/906.pdf>



## 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm) στους 12 σταθμούς για τα υδρολογικά έτη 1945-2016:

				ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ									
Υδρολογικό έτος					Σταθμοί								
	ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ	ΑΓΙΟΣ ΚΥΡΙΛΛΟΣ	ΑΣΗΜΙ	ΒΑΓΙΩΝΙΑ	ΒΟΡΙΖΙΑ	ΓΕΡΓΕΡΗ	ΖΑΡΟΣ	ΚΑΠΕΤΑΝΙΑΝΑ	ΛΑΓΟΛΙΟ	ΜΟΡΟΝΙ	ΠΟΜΠΙΑ	ΜΟΙΡΕΣ	
1945-46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500.000	-	
1946-47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	527.000	-	
1947-48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	525.500	-	
1948-49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	372.000	-	
1949-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	455.000	-	
1950-51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	393.000	-	
1951-52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	594.000	-	
1952-53	-	-	-	-	-	-	783.400	-	-	-	481.000	-	
1953-54	-	-	-	-	-	-	829.000	-	-	-	681.400	-	
1954-55	-	-	-	-	-	-	803.700	-	-	-	637.900	-	
1955-56	-	-	-	-	-	-	613.700	-	-	-	457.500	-	
1956-57	-	-	-	-	-	-	654.500	-	-	-	362.800	-	
1957-58	-	-	-	-	-	-	669.000	-	-	-	416.000	-	
1958-59	-	-	-	-	-	-	573.500	-	-	-	387.700	-	
1959-60	-	-	-	-	-	-	746.700	-	-	-	410.900	-	
1960-61	-	-	-	-	-	-	845.400	-	-	-	466.500	-	
1961-62	-	506.000	697.000	-	-	-	838.500	-	-	-	512.000	-	
1962-63	-	727.000	873.000	-	-	-	1125.000	-	-	-	696.200	-	
1963-64	-	451.000	587.000	-	872.500	708.000	705.500	-	-	-	479.400	-	
1964-65	-	555.000	910.000	-	1645.000	1174.500	1305.000	-	-	-	681.600	-	
1965-66	711.301	402.000	426.000	-	870.000	617.000	673.500	-	-	-	349.200	-	
1966-67	772.800	494.000	678.200	-	1221.500	784.000	922.000	-	-	-	573.000	-	
1967-68	1110.200	608.000	792.700	-	1296.000	1058.000	1163.000	-	-	-	681.000	-	
1968-69	834.400	501.000	580.300	-	1082.000	704.000	840.000	-	-	-	434.000	-	
1969-70	680.100	476.800	428.100	437.300	744.000	598.000	614.000	548.300	417.100	436.000	434.400	-	
1970-71	975.900	511.500	588.000	520.600	1086.400	841.500	901.100	644.400	610.600	604.000	517.400	-	
1971-72	705.100	470.800	410.600	426.600	958.900	665.600	619.000	588.600	450.000	462.000	450.100	-	
1972-73	772.100	474.600	442.600	450.000	821.900	646.100	645.000	696.100	520.300	561.000	476.100	-	
1973-74	746.300	389.600	450.000	366.400	788.700	704.200	628.000	560.100	444.400	468.000	385.000	-	
1974-75	1037.500	572.700	615.500	520.000	1027.700	852.000	838.000	727.700	496.500	660.000	589.500	-	
1975-76	1107.100	676.900	734.500	618.400	1116.400	1035.500	902.000	918.100	676.000	738.000	566.500	-	
1976-77	628.700	325.800	380.500	347.500	784.300	570.500	593.000	393.200	394.400	445.000	218.500	-	
1977-78	1301.000	837.700	1105.500	1107.500	1751.000	1230.000	1301.000	1441.200	916.400	1014.000	777.000	-	
1978-79	937.000	601.800	717.500	647.000	1058.400	772.000	795.000	784.700	564.900	710.000	515.800	-	
1979-80	911.900	630.500	697.500	708.200	1076.500	739.500	673.000	762.900	554.600	631.000	499.500	-	

1980-81	1283.700	651.800	751.500	836.600	1430.900	1120.000	1109.000	737.600	782.400	947.000	672.500	-
1981-82	1116.700	721.600	673.500	736.000	1318.800	939.500	964.000	885.000	680.700	831.000	699.000	-
1982-83	877.100	397.400	546.800	384.000	1216.200	664.500	688.000	717.900	417.700	430.200	282.500	-
1983-84	1205.900	642.800	669.650	535.800	1162.400	962.500	878.000	800.000	644.300	869.000	607.900	-
1984-85	1257.600	645.800	792.500	619.200	1325.100	1026.500	957.000	799.700	677.400	754.800	646.400	-
1985-86	730.500	448.900	475.500	399.800	665.500	653.500	499.000	554.500	365.800	482.000	363.000	-
1986-87	1141.600	504.000	636.500	534.000	1380.100	1033.400	742.000	716.800	632.600	672.000	466.000	-
1987-88	1179.100	634.800	552.500	588.900	2076.800	952.500	933.000	727.200	630.800	786.000	553.000	-
1988-89	810.000	494.300	481.500	424.600	1446.400	692.000	648.200	597.400	429.100	514.500	423.500	-
1989-90	551.800	251.100	349.500	310.700	588.100	465.000	416.500	352.000	344.800	363.000	255.000	-
1990-91	711.900	592.100	499.000	494.500	803.500	596.500	592.200	627.800	466.100	592.000	456.000	-
1991-92	888.500	363.300	546.500	396.900	1133.600	784.000	726.700	781.000	462.500	552.000	330.500	-
1992-93	634.400	318.600	341.600	284.500	811.500	713.000	590.500	341.800	388.100	446.000	344.500	-
1993-94	987.000	468.700	492.500	458.900	1195.500	981.200	942.000	584.700	506.200	838.400	505.900	-
1994-95	808.300	460.800	556.800	436.900	1192.500	1047.300	950.500	518.100	440.100	675.800	488.700	-
1995-96	1122.900	644.700	772.300	663.000	1511.500	1286.300	1109.000	834.200	639.100	959.100	679.900	-
1996-97	1237.800	512.700	562.300	527.500	1073.600	976.100	945.500	580.700	488.100	708.500	483.500	-
1997-98	937.000	451.500	579.500	432.500	1023.500	915.900	854.000	653.500	502.900	722.700	472.200	-
1998-99	1011.000	-	-	-	1063.000	871.800	-	-	474.300	733.700	528.600	-
1999-00	814.000	272.200	406.400	278.600	710.600	714.800	604.900	500.600	425.400	612.100	328.900	-
2000-01	921.500	507.000	553.400	561.000	1067.700	968.700	835.300	616.200	551.800	828.000	512.500	-
2001-02	959.300	389.000	495.500	387.200	1217.900	1048.000	1003.500	624.800	644.200	702.100	396.000	-
2002-03	1112.500	1230.800	971.800	1094.300	2162.000	1696.900	1602.500	1442.000	1235.100	1339.900	1135.400	-
2003-04	880.300	732.100	644.800	617.700	1264.700	885.000	972.500	604.600	789.500	762.000	662.000	-
2004-05	752.400	606.700	580.000	667.100	1002.500	943.800	959.500	720.800	573.900	642.500	575.200	-
2005-06	732.600	462.800	450.200	-	680.600	641.000	724.000	532.800	479.700	609.900	516.900	-
2006-07	933.600	344.680	453.200	405.150	855.700	864.500	893.500	639.300	507.900	591.200	370.300	-
2007-08	937.800	562.000	550.700	-	928.700	828.800	807.000	691.700	642.000	746.900	-	-
2008-09	1058.900	-	561.900	-	1375.400	1038.300	1004.000	812.500	773.300	957.800	-	-
2009-10	984.200	-	-	-	1145.900	-	-	-	757.100	822.200	-	305.8
2010-11	-	-	-	-	1000.300	-	-	-	574.500	677.000	-	380.8
2011-12	-	-	-	-	1583.300	-	-	-	825.700	974.700	-	418.5
2012-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	477.2
2013-14	695.400	-	-	-	-	-	-	-	455.500	543.600	-	306
2014-15	-	-	-	759.4	-	-	-	-	-	-	-	559.2
2015-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	660.6

Μέση στάθμη υπόγειου υδροφορέα στη λεκάνη των Μοιρών Ηρακλείου για τα έτη 1980-2009:

Year	Water table level (m)	Year	Water table level (m)	Year	Water table level (m)
1980–81	61.83	1990–91	49.97	2000–01	23.29
1981–82	62.49	1991–92	47.17	2001–02	22.75
1982–83	60.86	1992–93	41.68	2002–03	34.75
1983–84	61	1993–94	38.7	2003–04	41.87
1984–85	61.68	1994–95	36.09	2004–05	42.1
1985–86	59.23	1995–96	40.87	2005–06	17.5
1986–87	57.1	1996–97	40.11	2006–07	9.75
1987–88	58.26	1997–98	36.66	2007–08	10.25
1988–89	56.77	1998–99	34.18	2008–09	11.4
1989–90	51.43	1999–00	27.98	2009–10	12