

# Προσομοίωση του Υδατικού Συστήματος της Βόρειας Ρόδου

---

**Βακαλάς Π. Ιωάννης**

## **Εισαγωγή**

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση του υδατικού συστήματος της Βόρειας Ρόδου. Η Βόρεια Ρόδος καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος των υδατικών αναγκών της με την αξιοποίηση του υπόγειου υδατικού δυναμικού του ενιαίου υδροφόρου συστήματος που αναπτύσσεται στο τμήμα αυτό (Υδροέρευνα, 1999; Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου, 2005). Η αξιοποίηση αυτή στηρίζεται στην χρήση μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων και σε μικρότερο βαθμό στην εκμετάλλευση του πηγαίου δυναμικού. Τα τελευταία χρόνια επιχειρείται επίσης και η αξιοποίηση των επιφανειακών απορροών με την κατασκευή λιμνοδεξαμενών, καθώς και του σημαντικού έργου του φράγματος του Γαδουρά. Από άποψης επάρκειας του υδατικού δυναμικού, η σημερινή κατάσταση κρίνεται ως ικανοποιητική με κάλυψη των αναγκών χωρίς την ανάπτυξη ιδιαίτερων πιέσεων, πλην αυτών που ανέφεραν ορισμένοι δήμοι κατά τα ξηρά έτη. Παρόλα αυτά οι αυξανόμενοι ρυθμοί τουριστικής ανάπτυξης και κατ'επέκταση η αύξηση της ζήτησης για νερό θέτουν ένα ζήτημα εκτίμησης της μελλοντικής επάρκειας τους συστήματος. Η εκτίμηση αυτή αποτελεί και τον κυριότερο στόχο της παρούσης εργασίας.

## **Μεθοδολογία**

Αρχικά συλλέχθηκαν τα διαθέσιμα υδρολογικά και υδρογεωλογικά δεδομένα με βασικότερες πηγές τις μελέτες της Υδροέρευνας (1991) και της Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου (2005). Στη συνέχεια έγινε η επεξεργασία των δεδομένων η οποία περιελάμβανε τα ακόλουθα στάδια:

- Ενοποίηση των υδρολογικών λεκανών σε ευρύτερες ενότητες για λόγους απλοποίησης της προσομοίωσης, με κριτήριο τον παρόμοιο υδρολιθολογικό χαρακτήρα.
- Επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών βροχοπτώσεων στις ενοποιημένες λεκάνες με τη μέθοδο Thiessen (Thiessen, 1911)
- Υπολογισμό της δυνητικής εξατμοδιαπνοής με τη μέθοδο Thornthwaite (Thornthwaite, 1948)

Ακολούθως, αναπτύχθηκε το μοντέλο βροχής απορροής στη λεκάνη του Γαδουρά, όπου και υπήρχαν τα μοναδικά διαθέσιμα δεδομένα υδρομετρήσεων. Η ανάπτυξη του μοντέλου έγινε σε λογιστικό φύλλο EXCEL. Παράλληλα κατασκευάστηκαν συνθετικές χρονοσειρές βροχοπτώσεων (μήκους 1000 ετών) με τη χρήση του λογισμικού «Κασταλία» και με δεδομένα εισόδου της διαθέσιμες σημειακές χρονοσειρές των βροχοπτώσεων, οι οποίες ολοκληρώθηκαν επιφανειακά με τη χρήση των συντελεστών βάρους κατά Thiessen όπως αυτοί είχαν υπολογιστεί σε προηγούμενο στάδιο. Ακολούθως, εφαρμόστηκε το μοντέλο βροχής απορροής στις ενοποιημένες λεκάνες, θέτωντας ως δεδομένα εισόδου τις επιφανειακά ολοκληρωμένες βροχοπτώσεις και τις μέσες μηνιαίες τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και λαμβάνοντας ως δεδομένα εξόδου τις χρονοσειρές κατεΐσδυσης και επιφανειακής απορροής.

Η ανάλυση της ζήτησης περιελάμβανε την εκτίμηση των αναγκών για την κάλυψη: α) της ύδρευσης του μόνιμου πληθυσμού, β) του εποχικού πληθυσμού, γ) της κτηνοτροφίας και πτηνοτροφίας, δ) της βιομηχανίας, ε) της άρδευσης και στ) του μεταφερόμενου νερού για την ύδρευση των άνυδρων νήσων.

Τελικά, τα παραπάνω δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό Υδρονομίας όπου και έγινε η προσομοίωση του υδατικού συστήματος, με βασικό χαρακτηριστικό την αναπαράσταση των υπόγειων υδροφορέων με όρους επιφανειακών ταμιευτήρων. Εξετάστηκαν πέντε σενάρια τα οποία συμπεριελάμβαναν αύξηση της ζήτησης κατά 30% και εισαγωγή στο σύστημα του φράγματος του Γαδουρά.

### **Επεξεργασία Υδρολογικών και Υδρολογικών δεδομένων**

Η Βόρεια Ρόδος περιλαμβάνει συνολικά 28 υδρολογικές λεκάνες. Οι λεκάνες αυτές ενοποιήθηκαν σε 7 ευρύτερες λεκάνες με κριτήριο τον παρόμοιο υδρολιθολογικό χαρακτήρα, καθώς κάλυψη των αναγκών βασίζεται στο μεγαλύτερο μέρος στον ενιαίο υδροφόρα που αναπτύσσεται στην περιοχή μελέτης. Η ενοποίηση των λεκανών βασίστηκε στην ακόλουθη διαδικασία:

- Ψηφιοποιήθηκε ο γεωλογικός χάρτης της νήσου Ρόδου.
- Σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό δόθηκε μία ονομαστική τιμή του συντελεστή κατείσδυσης
- Τα ψηφιοποιημένα διανυσματικά δεδομένα (vector) μετατράπηκαν σε δεδομένα ψηφιδωτής διαμέρισης (raster) όπου σε κάθε κύτταρο του κανάβου αντιστοιχούσε και η ονομαστική τιμή του συντελεστή κατείσδυσης, αναλόγως του σχηματισμού.
- Υπολογίστηκε ο σταθμισμένος μέσος συντελεστής κατείσδυσης κάθε ενοποιημένης λεκάνης.

Προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα (πίνακας 1):

Πίνακας 1

Ονομασία ενοποιημένης λεκάνης	Μέσος συντελεστής κατείσδυσης
Αρχαγγελος	14,71
Ατταβυρος	9,98
Καλλιθέα	16,52
Κάμειρος	16,49
Πεταλούδες	16,09
Ρόδος	13,47

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η απόκριση των λεκανών ως προς τον υδρολιθολογικό χαρακτήρα δεν διαφέρει σημαντικά, επιτρέποντας την εφαρμογή του μοντέλου βροχής – απορροής το οποίο θα αναπτυχθεί και θα βαθμονομηθεί σε μία από αυτές και στις υπόλοιπες.

Στη συνέχεια οι διαθέσιμες σημειακές βροχοπτώσεις ολοκληρώθηκαν επιφανειακά σε κάθε ενοποιημένη λεκάνη χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen (Thiessen, 1911) και το λογισμικό Arc Gis 9.1. Στις χρονοσειρές που προέκυψε συνυπολογίστηκε η επίδραση του υψομέτρου με τον υπολογισμό της βροχοβαθμίδας, η οποία έλαβε τιμή  $\beta=0.45$ .

Για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), καθώς απαιτεί τα λιγότερα διαθέσιμα δεδομένα (μόνο τις χρονοσειρές θερμοκρασίας). Οι υπολογισμένες χρονοσειρές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής διορθώθηκαν με τη χρήση τυπικών συντελεστών θερμοβαθμίδας (Dingman, 1994).

## **Μοντέλο βροχής – απορροής**

### *A. Γενικά*

Το μοντέλο βροχής – απορροής που αναπτύχθηκε αποτελεί ουσιαστικά τροποποίηση του μοντέλου «Ζυγός» (Kozanis & Efstratiadis, 2006). Αναπτύχθηκε σε περιβάλλον λογιστικού φύλλου Excel και η κυριότερη διαφορά του από τον «Ζυγό» είναι ο διαχωρισμός της εδαφικής δεξαμενής σε ανώτερη και κατώτερη, με σκοπό την αύξηση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής.

### *B. Παράμετροι μοντέλου*

Οι παράμετροι του μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

**κ:** Ποσοστό της περίσσειας βροχόπτωσης που εμφανίζεται ως άμεση απορροή (αδιάστατο)

**K1, K2:** Οι χωρητικές της ανώτερης και της κατώτερης εδαφικής δεξαμενής αντίστοιχα (L)

**Sinit:** Η αρχική εδαφική αποθήκευση ως ποσοστό της δυνητικής εδαφικής αποθήκευσης (αδιάστατο)

**λ:** Ρυθμός εκφόρτισης δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για παραγωγή υποδερμικής ροής (αδιάστατο)

**μ:** Ρυθμός εκφόρτισης δεξαμενής εδαφικής Υγρασίας για παραγωγή κατείσδυσης (αδιάστατο)

**Yb:** Κατώφλι αποθέματος δεξαμενής υπόγειου νερού για παραγωγή βασικής ροής (L)

**ξ:** Ρυθμός εκφόρτισης δεξαμενής υπόγειου νερού για παραγωγή βασικής ροής (αδιάστατο)

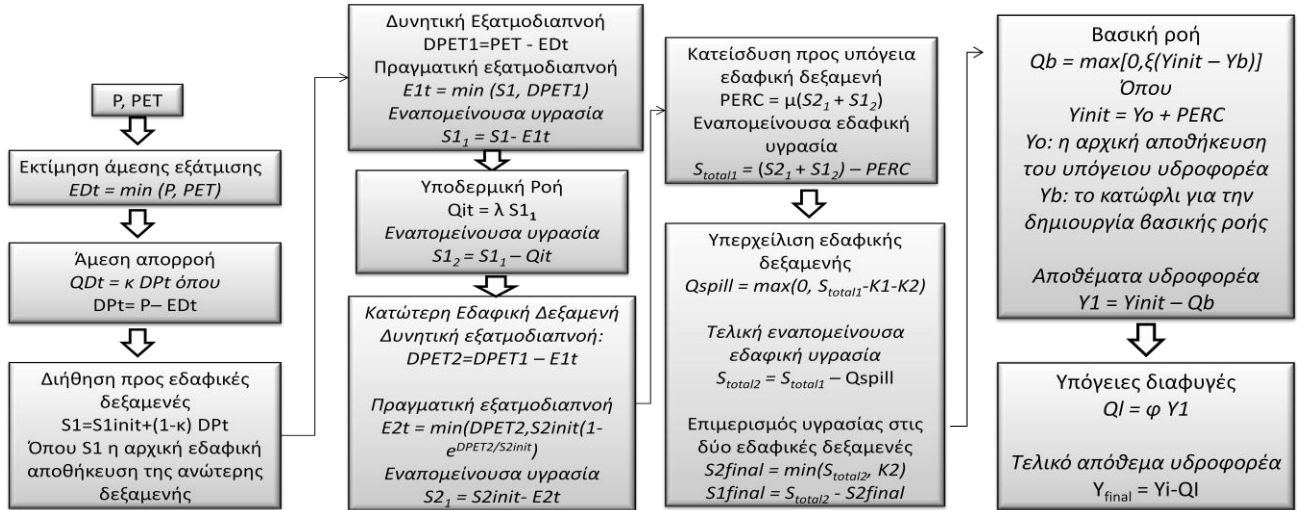
**φ:** Ρυθμός εκφόρτισης δεξαμενής υπόγειου νερού για παραγωγή υπόγειας διαφυγής (αδιάστατο)

**Yo:** Αρχικό απόθεμα δεξαμενής υπογείου νερού (L)

### *Γ. Λειτουργία μοντέλου*

Το μοντέλο χρησιμοποιεί ως χρονοσειρές εισόδου την βροχόπτωση και την δυνητική εξατμοδιαπνοή. Αρχικά εκτιμάται η απευθείας εξάτμιση της κατακρήμνισης και εν συνεχεία καλύπτεται η άμεση απορροή. Η εναπομείνουσα υγρασία διηθείται προς την ανώτερη εδαφική δεξαμενή όπου εκτιμάται η πραγματική εξατμοδιαπνοή. Μέρος του νερού που απομένει δίδει την υποδερμική ροή. Εν συνεχεία το μοντέλο εκτιμά την πραγματική εξατμοδιαπνοή από την κατώτερη εδαφική δεξαμενή. Ποσοστό της συνολικής εδαφικής υγρασίας κατεισδύει προς την υπόγεια εδαφική δεξαμενή. Ακολουθεί ο έλεγχος της υπερχείλισης της εδαφικής δεξαμενής και τελικά ο επιμερισμός της εναπομείνουσας υγρασίας στην ανώτερη και στην κατώτερη εδαφική δεξαμενή.

Από την υπόγεια δεξαμενή μέρος του νερού εκρέει δίδοντας την βασική ροή και κάποια άλλο χάνεται από το σύστημα, αναπαριστώντας τις απώλειες (είτε προς τη θάλασσα, είτε προς γειτονικές λεκάνες). Η υπολογιστική διαδικασία του μοντέλου καθώς και οι διαδικασίες που την διέπουν παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα (διάγραμμα 1):



Διάγραμμα 1

Από την εφαρμογή του μοντέλου λαμβάνονται ως χρονοσειρές εξόδου η επιφανειακή απορροή, η πραγματική εξατμοδιαπνοή και η καθαρή κατεΐσδυση προς την υπόγεια δεξαμενή.

#### Δ. Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση του μοντέλου απαιτεί την χρήση μίας συνάρτησης σφάλματος η οποία συγκρίνει την προσαρμογή των μετρημένων απορροών (στην συγκεκριμένη εφαρμογή από τον υδρομετρικό σταθμό του Γαδουρά) σε σχέση με τις υπολογισμένες από το μοντέλο. Στην παρούσα εφαρμογή η συνάρτηση σφάλματος έχει την ακόλουθη μορφή:

$$R' = \alpha R - \beta \text{GPEN} - \text{BIAS} - \text{NFP} - \text{FP}$$

Όπου:

**R**: ο συντελεστής προσδιορισμού (Nash and Sutcliffe, 1970) Του συντελεστή προσδιορισμού R

**BIAS**: η συνάρτησης μεροληψίας

**NFP**: συνάρτηση ποινής η οποία εφαρμόζεται όταν η πραγματική ροή είναι μηδενική και το μοντέλο δίδει ροή (NFP: No flow penalty).

**FP**: συνάρτηση ποινής η οποία εφαρμόζεται όταν υπάρχει πραγματική ροή ενώ το μοντέλο δίδει μηδενική ροή (FP : flow penalty).

**GPEN**: συνάρτηση ποινής η οποία εφαρμόστηκε για να περιορίσει την τάση της χρονοσειράς κατεΐσδυσης να ακολουθεί έντονα αυξητικό ρυθμό.

$\alpha$ ,  $\beta$ : συντελεστές βάρους με τιμές 100 και 0.01 αντίστοιχα.

Η αντικειμενική συνάρτηση η οποία χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων είχε την ακόλουθη μορφή:

$$\text{maximize } (R')$$

Ως αλγόριθμος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ο εξελικτικός αλγόριθμος (evolutionary algorithm) και η επίλυση έγινε με τη χρήση του επιλυτή (SOLVER) του EXCEL.

#### *Ε. Αποτελέσματα του μοντέλου στη λεκάνη του Γαδουρά*

Κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου στη λεκάνη του Γαδουρά πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές, οι οποίες διέφεραν ως προς την χρονοσειρά δυνητικής εξατμοδιαπνοής η οποία χρησιμοποιήθηκε. Στην πρώτη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε η υπολογισμένη χρονοσειρά δυνητικής εξατμοδιαπνοής κατά Thornthwaite, στην δεύτερη η μετρημένη χρονοσειρά εξάτμισης από τον μετεωρολογικό σταθμό του Γαδουρά, και στην τρίτη η υπολογισμένη χρονοσειρά δυνητικής εξατμοδιαπνοής κατά Thornthwaite προσαυξημένη επί 1.3. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 2):

Πίνακας 2

Παράμετρος	Α' ΔΟΚΙΜΗ	Β' ΔΟΚΙΜΗ	Γ' ΔΟΚΙΜΗ
$\kappa$	0,00	0,00	0,00
K1	400	376	400
K2	100	119	100
sinit	0,27	0,30	0,1
$\lambda$	0,063	0,087	0,07
$\mu$	0,175	0,132	0,165
$\gamma_b$	81	82	81
$\xi$	0,00	0,00	0,00
$\phi$	0,153	0,16	0,146
$\gamma_o$	48	49	48
Τιμή Αντικειμενικής συνάρτησης R'	1,185	2,030	-1,644
Τιμή συντελεστή προσδιορισμού R	0.798	0,799	0,795

Σε σχέση με το υδατικό ισοζύγιο αυτό διαμορφώνεται ως ακολούθως (πίνακας 3):

Πίνακας 3

	Α' ΔΟΚΙΜΗ	Β' ΔΟΚΙΜΗ	Γ' ΔΟΚΙΜΗ
Βροχόπτωση (P) (%)	100	100	100
Απορροή (Q) (%)	12,9	13,0	13,0
Εξατμοδιαπνοή (ET) (%)	48,5	63,8	52,6
Κατείδυση & Εδαφική Αποθήκευση (%)	39,4	26,6	33,1
Έξοδος λεκάνης (%)	2,2	2,2	2,2

Από τις τρεις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, ως η πλέον αποδεκτή για την χρήση των τιμών των παραμέτρων της στις λεκάνες όπου δεν είναι δυνατή η βαθμονόμηση, κρίνεται η τρίτη καθώς:

α) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η δυνητική εξατμισοδιαπνοή όπως αυτή υπολογίζεται με τη μέθοδο Thornthwaite, έστω και με συντελεστή προσαύξησης.

β) Οι τιμές των παραμέτρων κρίνονται ως αποδεκτές με βάση το φυσικό πλαίσιο της περιοχής.

γ) Η αρχική εδαφική υγρασία στην αρχή της προσομοίωσης λαμβάνει χαμηλή τιμή, σε σχέση με τις άλλες δοκιμές, αποδίδοντας καλύτερα τις φυσικές συνθήκες σε αυτό το χρονικό σημείο.

δ) Το υδατικό ισοζύγιο που προκύπτει είναι εντός των αναμενόμενων τιμών.

*ΣΤ. Εφαρμογή του μοντέλου στις ενοποιημένες λεκάνες*

Η εφαρμογή του μοντέλου στις ενοποιημένες υδρολογικές λεκάνες έδωσε τιμές υδατικού ισοζυγίου ελαφρώς διαφοροποιημένες σε σχέση με αυτές κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου

*Πραγματική εξατμισοδιαπνοή: 61.1-65.2%*

*Επιφανειακή απορροή: 7.6-8.6%.*

*Κατέισδυση και η εδαφική αποθήκευση: 27.9% έως 30.7%.*

Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι στις ενοποιημένες λεκάνες οι διαθέσιμες χρονοσειρές εισόδου είχαν μεγαλύτερο χρονικό μήκος (13 έτη) συμπεριλαμβάνοντας έτσι μεγαλύτερη υδρολογική πληροφορία η οποία προφανώς δεν μπορούσε να αξιοποιηθεί στην 4 ετή χρονοσειρά που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση του μοντέλου.

### **Κατασκευή συνθετικών χρονοσειρών**

Η κατασκευή των συνθετικών χρονοσειρών στηρίχθηκε στο λογισμικό «Κασταλία» (Eftratiadis et al., 2006). Ως δεδομένα εισόδου εισήχθησαν οι διαθέσιμες σημειακές χρονοσειρές βροχοπτώσεων. Κατασκευάστηκαν συνθετικές σημειακές χρονοσειρές μήκους 12000 μήνων (1000 έτη).

### **Ανάλυση ζήτησης**

#### *Α. Υφιστάμενη κατάσταση*

Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία (Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου, 2005) δεν αναφέρονται ιδιαίτερα πιεστικά προβλήματα επάρκειας υδατικών πόρων. Αναλυτικά η κατάσταση ανά δήμο έχει ως ακολούθως:

Ο Δήμος Ρόδου χρησιμοποιεί γεωτρήσεις κυρίως στην περιοχή της Καλλιθέας (5000000κ.μ./έτος) αλλά και από τις παλαιές του γεωτρήσεις εντός του Δήμου, καθώς και από δύο πηγές στην περιοχή του Δ.Καμείρου. Δεν έχει παρατηρηθεί σημαντική πτώση στάθμης σε υπερετήσιο επίπεδο των γεωτρήσεων, ενώ διαθέτει και εφεδρικές γεωτρήσεις από τις οποίες δεν αντλεί. Αναφέρθηκαν μεμονωμένες περιπτώσεις γεωτρήσεων που εγκαταλείφθηκαν λόγω κακής ποιότητας νερού, ανάμεσα σε άλλες αποδοτικές γεωτρήσεις.

Ο Δήμος Καλλιθέας διαθέτει σημαντικά αποθέματα υπόγειου νερού και τροφοδοτεί τη Ρόδο, ενώ υπάρχουν σκέψεις και για ενίσχυση άλλων Δήμων.

Οι Δήμοι Ιαλυσού, Αφάντου και Αρχαγγέλου αναφέρουν μεγαλύτερα προβλήματα στην κάλυψη των αναγκών τους, καθώς και περιπτώσεις ταπείνωσης της στάθμης άντλησης στις

υφιστάμενες γεωτρήσεις τους. Παρόλα αυτά, δεν αναφέρθηκε έως τώρα έλλειψη διαθεσιμότητας νερού.

Οι Δήμοι Καμείρου και Ατταβύρου δεν αντιμετωπίζουν μακροχρόνια πιεστικά προβλήματα και αναφέρουν μεμονωμένα ποιοτικά προβλήματα σε γεωτρήσεις τους. Δεν έχει απαιτηθεί ο καταβίβασμός της στάθμης άντλησης λόγω πτώσης του ορίζοντα.

Ο Δήμος Πεταλουδών έχει επάρκεια νερού και δεν έχουν αναφερθεί έντονα προβλήματα έλλειψης ακόμα και σε περιόδους αιχμής.

#### *B. Εκτίμηση αναγκών*

Η εκτίμηση των αναγκών αναλύθηκε στους ακόλουθους άξονες: α) ύδρευση μόνιμου πληθυσμού, β) ύδρευση του εποχικού πληθυσμού, γ) ανάγκες ζώων και πτηνών, δ) ανάγκες βιομηχανίας, ε) ανάγκες άρδευσης και στ) μεταφερόμενο νερό για την ύδρευση των άνυδρων νήσων. Για την ύδρευση του μόνιμου πληθυσμού χρησιμοποιήθηκε τιμή κατανάλωσης κατά άτομο 150 λίτρα/ημέρα. Η τιμή αυτή προσαυξήθηκε κατά 20% για τους θερινούς μήνες και μειώθηκε κατά 20% τους θερινούς μήνες. Ο υπολογισμός έγινε σε μηνιαίο βήμα χρησιμοποιώντας τα στοιχεία πληθυσμού όπως αυτά δίδονται από την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία κατά την απογραφή του 2001. Για τον εποχικό πληθυσμό χρησιμοποιήθηκε τιμή κατανάλωσης κατά άτομο ίση με 250 λίτρα/ημέρα. Ο υπολογισμός του εποχικού πληθυσμού εκτιμήθηκε με βάση τον αριθμό των μέσων μηνιαίων διανυκτερεύσεων (Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου, 2005). Για τις ανάγκες της βιομηχανίας, της άρδευσης και του μεταφερόμενου νερού χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που δίδονται στην μελέτη της (Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου, 2005).

### **Προσομοίωση Υδατικού Συστήματος**

#### *A. Γενικά*

Για την εφαρμογή της προσομοίωσης του υδατικού συστήματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό «Υδρονομέας» (Efstratiadis et al., 2005).

Το λογισμικό αυτό έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει κυρίως επιφανειακά συστήματα, ωστόσο στην παρούσα μελέτη η χρήση του επεκτάθηκε, με την συμμετοχή και υπόγειων υδροφορέων.

Οι συνιστώσες με τις οποίες προσομοιώθηκε το υδατικό σύστημα είναι οι ακόλουθες:

- Κόμβοι ζήτησης.
- Ταμιευτήρες (αναπαριστούν τον υπόγειο υδροφόρα κάθε ενοποιημένης λεκάνης).
- Υδραγωγεία (αναπαριστούν τους αγωγούς μεταφοράς από τους ταμιευτήρες προς τους κόμβους ζήτησης).

#### *B. Ανάλυση συνιστωσών*

Τα δεδομένα που απαιτούνται για να αναπαρασταθεί η λειτουργία ενός επιφανειακού ταμιευτήρα από τον «Υδρονομέα» είναι:

- Η χρονοσειρά των εισροών επιφανειακού ύδατος, η χρονοσειρά των βροχοπτώσεων, η χρονοσειρά της εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια

- Τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ταμιευτήρα (ωφέλιμος όγκος, ανώτερη στάθμη αποθήκευσης, κατώτερη στάθμη απωθήκευσης κτλ.)

Η αναπαράσταση του υπόγειου υδροφορέα χρησιμοποιώντας όρους επιφανειακού ταμιευτήρα έγινε με τις ακόλουθες παραδοχές:

- Ως χρονοσειρά εισροής χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά της καθαρής κατείδυσης όπως αυτή προέκυψε από την εφαρμογή του μοντέλου βροχής – απορροής για τις συνθετικές βροχοπτώσεις.
- Θεωρήθηκε ότι η ανώτερη και η κατώτερη στάθμη του υδροφόρου λαμβάνουν τις τιμές 100 και 0 αντίστοιχα.
- Η καμπύλη στάθμης – όγκου αποθήκευσης θεωρήθηκε ως γραμμική.
- Στη στάθμη 100 ο όγκος λαμβάνει τιμή η οποία προκύπτει από την μετατροπή της μέγιστης τιμής της χρονοσειράς κατείδυσης (κάθε υδροφορέα) από ισοδύναμο ύψος σε  $hm^3$ . Η χρήση της μέγιστης τιμής της χρονοσειράς κατείδυσης εξασφαλίζει ότι ο υπόγειος ταμιευτήρας δεν υπερχειλίζει καθώς αυτό θα ήταν σε αντίθεση με το μοντέλο βροχής – απορροής.

Για την εκτίμηση του «ωφέλιμου όγκου» του υδροφόρου ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία:

- Προβολή των διαθέσιμων υδροσημείων σε Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Arc Gis 9.1)
- Σχεδίαση ζώνης επίδρασης υδροσημείου βάση του πίνακα 4 από τον οποίο επιλέχθησαν οι τιμές 300 και 500 μέτρα.

Πίνακας 4

Υλικά Υδροφόρου	Ακτίνα επίδρασης $r_0$ σε m	
	Ελεύθεροι Υδροφόροι	Αρτεσιανοί Υδροφόροι
Λεπτόκοκκοι και μεσόκοκκοι άμμοι	100-200	250-500
Χονδρόκοκοι άμμοι	300-500	750 -1500
Υδροφόροι με δευτερογενές πορώδες	500-1000	1000-1500

- Υπολογισμός της συνολικής επιφάνειας των ζωνών επίδρασης σε κάθε ενοποιημένη λεκάνη και πολλαπλασιασμός αυτής με τη μέγιστη τιμή της χρονοσειράς κατεισχύσεων.

Προέκυψαν οι ακόλουθοι ωφέλιμοι όγκοι για κάθε υδροφορέα οι οποίοι εκφράζουν τη μέγιστη δυνατή αποθήκευση κάθε υδροφορέα (πίνακας 5):

Πίνακας 5

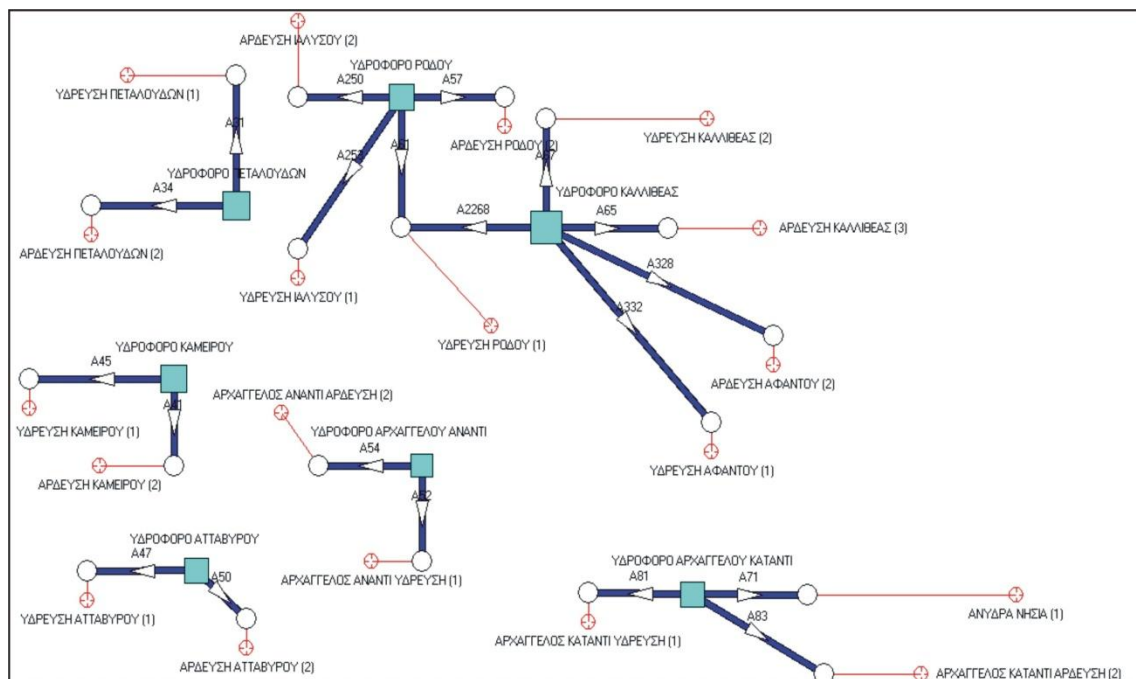
Ενοποιημένη λεκάνη	Ατταβυρός	Αρχάγγελος ανάντη	Αρχάγγελος κατάντη	Κάμειρος	Καλλιθέα	Πεταλούδες	Ρόδος
Όγκος ( $hm^3$ )	2,872381	1,144384	2,946913	5,20984	20,63917	8,69397	6,404576



Σε σχέση με τους κόμβους ζήτησης, εισήχθησαν στο μοντέλο οι τιμές οι οποίες είχαν υπολογιστεί σε προηγούμενο βήμα, ομαδοποιώντας την ύδρευση (μόνιμου, εποχικού πληθυσμού, βιομηχανίας και κτηνοτροφίας). Σε σχέση με τα υδραγωγεία δόθηκε η τιμή της παροχρητευτικότητας τέθηκε στα 10m<sup>3</sup>/sec με συντελεστή απωλειών 0.5 για τα αρδευτικά δίκτυα και 0.2 για τα υδρευτικά. Σε σχέση με την προτεραιότητα κάλυψης της ζήτησης δόθηκε η τιμή 1 στην ύδρευση και η τιμή 2 στην άρδευση.

### Γ. Σχηματοποίηση

Ακολουθήθηκε η σχηματοποίηση του σχήματος 1 στην οποία αναπαριστώνται οι υπόγειοι υδροφορείς (μπλε πλαίσια) οι κόμβοι ζήτησης με τους στόχους που αφορούν την ικανοποίηση της ζήτησης και τα υδραγωγεία.



Σχήμα 1

### Δ. Αποτελέσματα προσομοίωσης

#### Σενάριο 1 – Παρούσα κατάσταση

Η προσομοίωση του υδατικού συστήματος όπως αυτό διαμορφώνεται σήμερα έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Οι δήμοι Καλλιθέας, Πεταλούδων, Αφάντου και Καμείρου δεν παρουσιάζουν προβλήματα στην διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων καθώς η μέση ετήσια αστοχία λαμβάνει μηδενική τιμή.
- Οι δήμοι Ρόδου και Ιαλυσού παρουσιάζουν μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας τόσο στην ύδρευση όσο και στην άρδευση 0.2%. Η πιθανότητα αυτή ασφαλώς δεν καταδεικνύει πρόβλημα διαθεσιμότητας υδατικών πόρων, ωστόσο δεν πρέπει να αγνοείται η συμμετοχή των γεωτρήσεων του Δήμου Καλλιθέας στην κάλυψη των αναγκών.

- Ο δήμος Αρχαγγέλου παρουσιάζει την χαμηλότερη αξιοπιστία τόσο στην ύδρευση (η κατάντι λεκάνη με 0.8%) όσο και στην άρδευση (ανάντι 10.9% και κατάντι 18.7%). Κατά τα ξηρά έτη παρουσιάστηκε καταβιβασμός στάθμης και ανάγκη τοποθέτησης των αντλιών σε μεγαλύτερα βάθη.
- Ο δήμος Ατταβυρού παρουσιάζει μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας 0.1% στην άρδευση, δίδοντας έτσι ενδείξεις για πιθανή εμφάνιση πιέσεων τα επόμενα χρόνια.

#### *Σενάριο 2 – Εκτίμηση επάρκειας υδατικών πόρων λεκάνης Ρόδου*

Στο δεύτερο σενάριο εκτιμήθηκε η επάρκεια των υδατικών πόρων της λεκάνης της Ρόδου αφαιρώντας από το σύστημα τη σύνδεση του κόμβου ύδρευσης του Δήμου Ρόδου με το υδροφόρο της Καλλιθέας.

Από την προσομοίωση προέκυψε ότι οι δήμοι Ρόδου και Ιαλυσού παρουσιάζουν μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας στην ύδρευση 5.0% και 7.9% αντίστοιχα και στην άρδευση 4.4% και 5.1%. Η πιθανότητα αυτή καταδεικνύει την ανεπάρκεια σε υδατικό δυναμικό της λεκάνης της Ρόδου, εξηγώντας έτσι και την αναγκαιότητα κάλυψης αναγκών από την πλεονάζουσα λεκάνη της Καλλιθέας.

#### *Σενάριο 3 – Αύξηση της ζήτησης κατά 30%*

Στο τρίτο σενάριο χρησιμοποιήθηκε η σχηματοποίηση του πρώτου σεναρίου αυξάνοντας την υδρευτική ζήτηση κατά 30%. Προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Οι δήμοι Καλλιθέας, Πεταλούδων, Αφάντου και Καμείρου δεν αναμένεται να παρουσιάζουν προβλήματα στην διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων καθώς η μέση ετήσια αστοχία λαμβάνει μηδενική τιμή.
- Οι δήμοι Ρόδου και Ιαλυσού παρουσιάζουν μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας στην ύδρευση 1.2% και 2.3% αντίστοιχα. Η πιθανότητα αυτή αποτελεί ένδειξη ότι ακόμα και με τη χρήση των γεωτρήσεων του Δήμου Καλλιθέας η κάλυψη των υδρευτικών αναγκών θα αρχίσει να υφίσταται πιέσεις. Στην άρδευση η πιθανότητα αστοχίας διαμορφώνεται στο 0.6% και 0.8% αντίστοιχα.
- Ο δήμος Αρχαγγέλου παρουσιάζει πιθανότητα αστοχίας 20.9% και 12.6% στην άρδευση (ανάντι και κατάντι λεκάνες αντίστοιχα) και 0.1% και 1.8% στην ύδρευση. Το αποτέλεσμα αυτό της προσομοίωσης αιτιολογεί την μελλοντική κάλυψη μέρους των αναγκών από το Φράγμα του Γαδουρά.

#### *Σενάριο 4 - Εκτίμηση επάρκειας υδατικών πόρων λεκάνης Ρόδου με αύξηση στη ζήτηση κατά 30%*

Στο τέταρτο σενάριο εκτιμήθηκε η επάρκεια των υδατικών πόρων της λεκάνης της Ρόδου με αύξηση στην υδρευτική ζήτηση κατά 30%, αφαιρώντας από το σύστημα τη σύνδεση του κόμβου ύδρευσης του Δήμου Ρόδου με το υδροφόρο της Καλλιθέας.

Από την προσομοίωση προέκυψε ότι οι δήμοι Ρόδου και Ιαλυσού παρουσιάζουν μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας στην ύδρευση 19.1% και 28.8% αντίστοιχα και στην άρδευση 15.0% και 16.9%. Η εικόνα αυτή κρίνεται ως ιδιαίτερα δυσμενής και λαμβάνοντας υπόψη και την περιορισμένη αξιοπιστία των υπόγειων υδροληπτικών έργων (γεωτρήσεις) καθίσταται αναγκαία η εισαγωγή στο σύστημα του επιφανειακού ταμιευτήρα του Γαδουρά, ιδιαίτερα για την κάλυψη των αναγκών όπως αυτές θα διαμορφωθούν τα επόμενα χρόνια.

Σενάριο 5 - Αύξηση της ζήτησης στην ύδρευση κατά 30% - εισαγωγή στο σύστημα του φράγματος Γαδουρά.

Στο τελευταίο σενάριο μελετήθηκε το σύστημα με αυξημένη ζήτηση κατά 30% εισάγοντας σε αυτό το φράγμα του Γαδουρά. Ως χαρακτηριστικά μεγέθη του φράγματος χρησιμοποιήθηκαν αυτά που δίδει ο Κουτσογιάννης (1998). Στην παροχετευτικότητα του αγωγού μεταφοράς δόθηκε τιμή  $1\text{m}^3/\text{sec}$  και στην περιβαλλοντική παροχή  $0.1\text{m}^3/\text{sec}$ . Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψε ότι η μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας των δήμων Ρόδου και Ιαλυσού μειώνεται σημαντικά φθάνοντας στην ύδρευση 0.1% και 0.5% αντίστοιχα και στην άρδευση το 0.3%. Από το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται ότι η εισαγωγή του φράγματος στο υδροσύστημα θα αυξήσει σημαντικά την αξιοπιστία του τόσο με βάση τα σημερινά δεδομένα όσο και για τα επόμενα χρόνια.

## **Συμπεράσματα**

### *A. Μοντέλο βροχής - απορροής*

Σε γενικές γραμμές το φυσικό πλαίσιο της περιοχής προσομοιώνεται ικανοποιητικά από το μοντέλο με εξαίρεση την αδυναμία δημιουργίας πηγαιού δυναμικού το οποίο αν και σε μικρό ποσοστό εμφανίζεται σε ορισμένες λεκάνες (π.χ Ρόδου).

### *B. Προσομοίωση υδατικού συστήματος*

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη σημερινή κατάσταση, προκύπτει ότι το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του συστήματος υδατικών πόρων, με εξαίρεση το Δήμο Αφάντου ο οποίος εμφανίζεται με μεγάλη αξιοπιστία ενώ στην πραγματικότητα εμφανίζονται πιέσεις κατά τα ξηρά έτη. Η αστοχία αυτή στην προσομοίωση οφείλεται στο ότι ο δήμος Αφάντου συμπεριλήφθηκε στον πλεονασματικό υδροφορέα της λεκάνης της Καλλιθέας, πρόκειται δηλαδή για σφάλμα στη σχηματοποίηση.

Σχετικά με το λογισμικό «Υδρονομέας» και λαμβάνοντας υπόψη ότι αυτό προορίζεται για επιφανειακά συστήματα, το όλο εγχείρημα της χρήσης του για συστήματα που περιλαμβάνουν υπόγειους υδροφορείς κρίνεται ως επιτυχές, όπως έδειξαν άλλωστε και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και το πως αυτά αντανακλούν την πραγματική εικόνα.

Προτείνεται ένας συνδυασμός σε πραγματικό χρόνο του «Υδρονομέα» με το μοντέλο βροχής – απορροής ώστε η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου, να βελτιστοποιείται λαμβάνοντας υπόψη και τις χρονοσειρές ζήτησης, οι οποίες σαφώς και επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος και το οποίο δεν ελήφθη υπόψη.

### *Γ. Επάρκεια δεδομένων*

Σχετικά με την επάρκεια των δεδομένων θεωρήθηκε ευτυχές το γεγονός ότι υπήρχε διαθέσιμη χρονοσειρά υδρομετρήσεων από αυτόματο σταθμό μέτρησης, έστω και με μικρό μήκος (4 ετών). Αναφορικά με τα υπόγεια ύδατα και τα διαθέσιμα δεδομένα των υδροληψιών:

- Οι δήμοι δίδουν στοιχεία με διαφορετική προσέγγιση (στοιχεία σε χιλιάδες κυβικά μέτρα/ έτος ή σε μέση ωριαία παροχή ή ίσως και καθόλου στοιχεία)
- Για τα ιδιωτικά έργα υπάρχουν ελάχιστα στοιχεία τα οποία πολλές φορές είναι και πλασματικά

- Είναι άγνωστος ο αριθμός των παράνομων υδροληψιών.
- Οι πλειονότητα των γεωτρήσεων δεν διαθέτει πιεζόμετρα και υδρομετρητές

Με όλα τα παραπάνω προκύπτει η διαπίστωση ότι μέχρις ώτου υπάρξει ειλικρινής βούληση για ορθολογική αξιοποίηση των υδατικών πόρων με την λήψη πρωτοβουλιών που θα υπερβαίνουν τα όρια απλών διοικητικών πράξεων, η μελέτη των υδατικών πόρων ελλείψει δεδομένων μετρήσεων θα στηρίζεται κυρίως σε παραδοχές και στην κρίση του μελετητή.