



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ**

Κατερίνα Κ. Μάζη

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ
&
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Ιούνιος 2000

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Επ. Καθηγητής

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω για την συμβολή τους,

Τον **Δρ. Δημήτρη Κουτσογιάννη, Επίκ. Καθηγητή Ε.Μ.Π.** επιβλέποντα της εργασίας, για την παρότρυνσή του στην ανάληψη του θέματος, την συνεχή επιστημονική του υποστήριξη και την εποικοδομητική κριτική του για την βελτιστοποίηση της εργασίας.

Τον **Δρ. Αντώνη Κούση, Γενικό Διευθυντή Ι.Γ.Μ.Ε. και Ερευνητή του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών**, για την επιστημονική του υποστήριξη σε επιστημονικά και πρακτικά ζητήματα. Η εργασία χρηματοδοτήθηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα *WASSER: Utilisation of groundwater Desalination and Wastewater Reuse in the Water Supply of Seasonally-Stressed Regions*, χρηματοδοτούμενο από την Ε.Ε., του οποίου επιστημονικός υπεύθυνος είναι ο Δρ. Κούσης.

Τον **Dr. Pedro Restrepo-Posada** για την παραχώρηση και εγκατάσταση του μοντέλου PRMS και την εισαγωγή σ' αυτό ρουτινών για την καλύτερη απεικόνιση των διεργασιών στον υπόγειο ταμιευτήρα.

Τους **κ. Άδωνι Γεωργίου** και **κ. Χρίστο Ιωάννου**, του Τμήματος Αναπτύξεως Υδάτων του Υπουργείου Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Κυπριακής Δημοκρατίας, για την παροχή δεδομένων από την περιοχή του Ακρωτηρίου της Κύπρου και την διατύπωση των απόψεών τους όσον αφορά την αξιολόγηση και ερμηνεία των δεδομένων.

Τον **κ. Οδυσσέα Χρίστου**, Διευθυντή της εταιρείας Geoinfo για την παραχώρηση ψηφιακού υλικού που αφορά την περιοχή μελέτης.

Το **Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών**, για την άδεια χρήσης των υπολογιστικών συστημάτων και των λοιπών τεχνολογικών διευκολύνσεων που μου παρείχε.

Τους **γονείς μου**, για όλα όσα μου έχουν προσφέρει.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
EXTENDED ABSTRACT	ii
1. Introduction	ii
2. Methodology	iii
3. Results and Discussion	vii
4. Summary and Conclusions	xii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Ορισμός προβλήματος	1
1.2 Στόχος της εργασίας - Μεθοδολογία	1
1.3 Συμβολή της εργασίας – Πρωτότυπα σημεία	3
1.4 Διάρθρωση εργασίας	4
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	5
2.1 Γενικά περί Υδατικού Ισοζυγίου	5
2.2 Γενικά περί Μεθόδων Προσομοίωσης	6
2.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση	8
2.3.1 Συνοπτική περιγραφή του MMS (Modular Modeling System)	12
2.4 Επιλογή Υδρολογικού Μοντέλου	13
2.4.1 Εννοιολογικό σύστημα λεκάνης απορροής	13
2.4.2 Διάρθρωση σε υδρολογικές ενότητες (HRU)	17
2.4.3 Επέκταση / προσαρμογή του μοντέλου PRMS	18
2.5 Βελτιστοποίηση	18
2.5.1 Βελτιστοποίηση στο υπολογιστικό πλαίσιο MMS	19
2.5.1.1 Μέθοδος Rosenbrock (1960)	20
2.5.1.1α Περιγραφή λειτουργίας της μεθόδου	23
2.5.1.1β Βελτιστοποίηση κατά Rosenbrock στο υπολογιστικό πλαίσιο MMS	24
2.5.1.2 Βελτιστοποίηση κατά Hyper Tunnel	25
2.5.1.2α Διαδικασία βελτιστοποίησης με την Hyper Tunnel	26
2.5.1.2β Βελτιστοποίηση κατά Hyper Tunnel στο υπολογιστικό πλαίσιο MMS	27

3.	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	28
3.1	Εισαγωγή	28
3.2	Σημασία υδροφορέα	29
3.3	Υφιστάμενη κατάσταση	30
3.4	Θέση και Φυσικό περιβάλλον	31
3.5	Γεωλογία	36
3.6	Υδρογεωλογία	43
3.7	Κλιματικά δεδομένα	46
3.7.1	Κατακρημνίσματα	46
3.7.2	Θερμοκρασία	46
3.7.3	Εξάτμιση	47
3.8	Ο υδροφορέας του Ακρωτηρίου	48
3.8.1	Υδατικό Ισοζύγιο στον Υδροφορέα προ της κατασκευής του φράγματος	48
3.8.2	Εκμετάλλευση του υδροφορέα	49
3.8.3	Διαχείριση του υδροφορέα	51
3.8.4	Κύμανση στάθμης στον υδροφορέα	53
4.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PRMS ΣΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΑΚΡΩΤΗΡΙΟΥ	55
4.1	Αντιμετώπιση του προβλήματος	55
4.1.1	Υδρολογικές ενότητες	56
4.2	Δεδομένα και επεξεργασία τους	62
4.3	Δεδομένα εισόδου στο PRMS	67
4.4	Παράμετροι	68
4.4.1α	Παράμετροι που εκτιμήθηκαν	69
4.4.1β	Παράμετροι που βελτιστοποιήθηκαν	71
5.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ - ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	74
5.1	Προσομοίωση	74
5.1.1	Προσομοίωση με τις τιμές παραμέτρων που προτείνει το πρόγραμμα	75
5.1.2	Προσομοίωση με τις τιμές παραμέτρων που προτείνει το	

	πρόγραμμα και πορώδες 14%	75
5.2	Βελτιστοποίηση	78
5.2.1	Μέθοδος Rosenbrock	78
5.2.2	Μέθοδος Hyper Tunnel	78
5.3	Βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων πλην της gwres_sink (βλ. §5.1)	79
5.3.1	Βελτιστοποίηση παραμέτρων soil2_gwmax κατά Rosenbrock	79
5.3.2	Βελτιστοποίηση παραμέτρων των SSR2 και GWR2 κατά Rosenbrock	80
5.3.3	Βελτιστοποίηση παραμέτρων soil2_gwmax κατά Hyper Tunnel	82
5.3.4	Βελτιστοποίηση παραμέτρων των SSR2 και GWR2 κατά Hyper Tunnel	82
5.4	Βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων και της gwres_sink (βλ. §5.1)	89
5.4.1	Βελτιστοποίηση παραμέτρων soil2_gwmax κατά Rosenbrock	89
5.4.2	Βελτιστοποίηση παραμέτρων των SSR2 και GWR2 κατά Rosenbrock	90
5.4.3	Βελτιστοποίηση παραμέτρων των SSR2 και GWR2 κατά Hyper Tunnel	90
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ	98
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	101
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	104
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	122

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου *Precipitation Runoff Modeling System* (PRMS) (Leavesley et al., 1983), όπως αυτό είναι ενσωματωμένο στο υπολογιστικό πλαίσιο *Modular Modeling System* (MMS) (Leavesley et al., 1993), το οποίο εμπεριέχει μεθόδους βελτιστοποίησης, για την προσομοίωση υδρολογικής λεκάνης και κατάρτισης του υδρολογικού της ισοζυγίου, η οποία στερείται μετρημένων επιφανειακών απορροών. Η βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται με την χρήση δεδομένων υπογείων υδάτων για τα υδρολογικά έτη 1989-1999.

Η περιοχή μελέτης είναι η υδρολογική λεκάνη του Ακρωτηρίου της Κύπρου, περιοχή με ημιορεινό κλίμα και πολύ περατούς σχηματισμούς. Στο νότιο τμήμα της αναπτύσσεται ο Υδροφορέας του Ακρωτηρίου, που υφίσταται συστηματικής διαχείρισης τα τελευταία 30 έτη.

Αρχικά περιγράφονται υδρολογικά μοντέλα και μέθοδοι βελτιστοποίησης, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικότερα το μοντέλο PRMS που θα χρησιμοποιηθεί και οι μέθοδοι βελτιστοποίησης Rosenbrock και Hyper Tunnel που θα εφαρμοστούν.

Η υδρολογική λεκάνη χωρίστηκε σε υδρολογικές ενότητες κάθε μία από τις οποίες είναι ομογενής όσον αφορά συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Για την καλύτερη αναπαράσταση του φυσικού πλαισίου ήταν απαραίτητη η χρησιμοποίηση τεχνασμάτων και παραδοχών, η μεθοδολογία για την εισαγωγή των οποίων περιγράφεται λεπτομερώς.

Για την καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου έγινε βελτιστοποίηση κάποιων από τις παραμέτρους του και μάλιστα αυτών που έχουν άμεση σχέση με τον υπόγειο υδροφορέα. Η επιτυχής βαθμονόμηση του μοντέλου επιβεβαιώνεται με την σύγκριση της υπολογισμένης και παρατηρημένης κύμανσης της στάθμης στον υδροφορέα.

Τελικά καταρτίστηκε το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης και του υδροφορέα.

EXTENDED ABSTRACT

1. Introduction

This thesis examines the feasibility of calibrating the hydrologic model of a basin on the basis of hydraulic head observations in the aquifer underlying the basin, in the absence of stream gauging data. The scarcity of stream flow measurements is common in semi-arid regions. A strong indication of a good simulation is the model's success in reproducing the historical trends of the observed groundwater level fluctuations.

The approach is evaluated with data (1989-1999) from the Akrotiri basin and aquifer in Southern Cyprus (Figure 1.1), using the *US Geological Survey's* PRMS model (*Precipitation Runoff Modeling System*) and the parameter optimisation capabilities of the MMS (*Modular Modeling System*) framework, in which PRMS is embedded. The climate of the Akrotiri peninsula is semi-arid and the basin does not have a developed hydrographic network. The Akrotiri aquifer is mostly coincident with the hydrologic basin and is under continuous investigation and exploitation over the last 30 years.

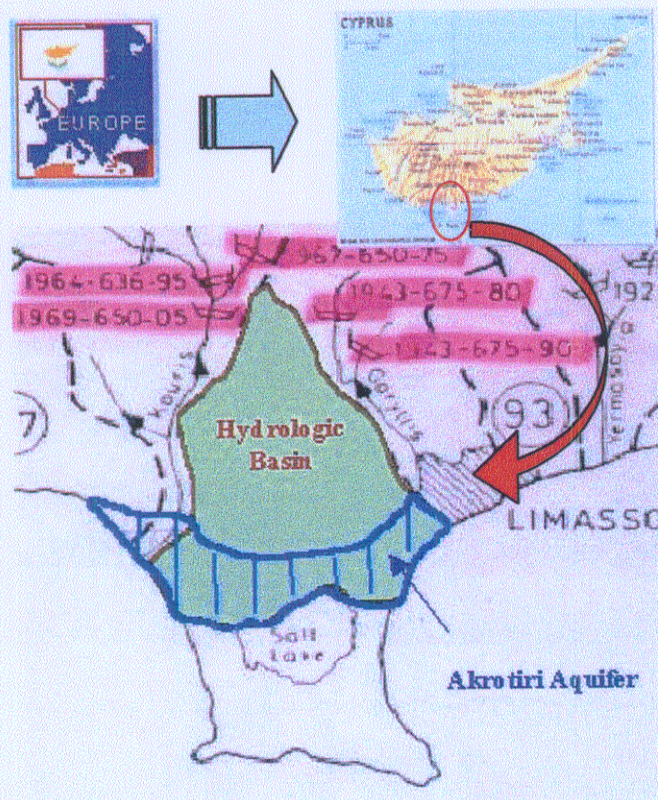


Figure 1.1: Location of the Akrotiri basin and aquifer

The work done is organised in six chapters, each one of them dealing with a different aspect of the problem.

Chapter 1, *Introduction*, describes the scope of the study and outlines the solution methodology.

Chapter 2, *Methodology*, presents general information on the hydrologic balance and on the classification of simulation methods, outlines two widely used hydrologic models and presents the PRMS model in detail, which has been selected for the research reported in this thesis. A brief review of the optimisation methods included in the MMS framework and applied in the Akrotiri modelling study is also given.

Chapter 3, *Study Area*, gives a detailed presentation of the application area, including condition of the aquifer, recent climatological trends, geology, hydrogeology and aquifer management.

Chapter 4, *Application of the model to the hydrologic basin*, presents the available data and explains the modelling assumptions.

Chapter 5, *Simulation – Optimisation*, contains the calibration of the model. The simulation results and the validation of the model are also presented in this chapter.

Chapter 6, *Conclusions and Recommendations*, comprises the conclusions drawn from the study and suggestions for further investigations.

Annex A gives a detailed presentation of the model components and simulation options.

Annex B contains geologic cross-sections of the Akrotiri aquifer area.

2. Methodology

The methodology applied in this thesis differs from the usual one in that it uses groundwater level data to calibrate a hydrologic model.

In its present form, MMS combines the semi-distributed hydrologic model PRMS with the Rosenbrock (Rosenbrock, 1960) and Hyper Tunnel (Restrepo-Posada and Bras, 1982) optimisation methods.

However, PRMS (Figure 2.1) is relatively crude with respect to the groundwater simulation part. Aquifer portions are treated as linear reservoirs that are not

hydraulically connected with each other; obviously, this is an over-simplification of the behaviour of the natural systems. Furthermore, no abstractions from the aquifer are foreseen. For these reasons, and in order to serve better the purposes of our application, the PRMS code needed certain modifications. These relate to the introduction in the model of routines that calculate the abstractions from the aquifer and the groundwater level.

The hydrologic basin has been divided into 11 Hydrologic Response Units (HRUs), modelling elements that are homogeneous with respect to their hydrologic response. Some of the HRUs are natural and some artificial. The artificial HRUs, five in total, were introduced in order to be able to account for the artificial recharge and for the inflows to the aquifer.

The input data needed extended modifications, verifications (quality control) and adjustments prior to their use by the model. Differences in time scale between the raw data and the required model inputs have been handled using reasonable assumptions and simplifications. Thus, irrigation rates, artificial recharge, dam leakage and flows from adjacent areas into the aquifer have been represented as rainfall measured at respective artificial rain gauging stations. These stations are referenced to corresponding artificial HRUs.

Two sub-surface and two groundwater reservoirs have been assumed. One of the groundwater reservoirs coincides with the Akrotiri aquifer.

Some parameters of the model were known (from easily observable data), others were estimated according to literature values, some were assigned their default values and the remaining ones were determined by optimising the model.

The automatic optimisation methods Rosenbrock and Hyper Tunnel were used to fit the model to the real data. Both these methods are gradient based non-linear optimisation methods. The parameters optimised were the ones related to the sub-surface processes and, more specifically, to the processes of routing water

- ↳ from the soil zone to the sub-surface and groundwater reservoir
- ↳ from the sub-surface to the groundwater reservoir
- ↳ from the sub-surface to stream flow
- ↳ from the groundwater reservoir to base flow and to a groundwater sink¹.

¹ The movement of water through the groundwater reservoir to points beyond the area of interest or measurement is treated using a groundwater sink.

PRECIPITATION-RUNOFF MODELING SYSTEM

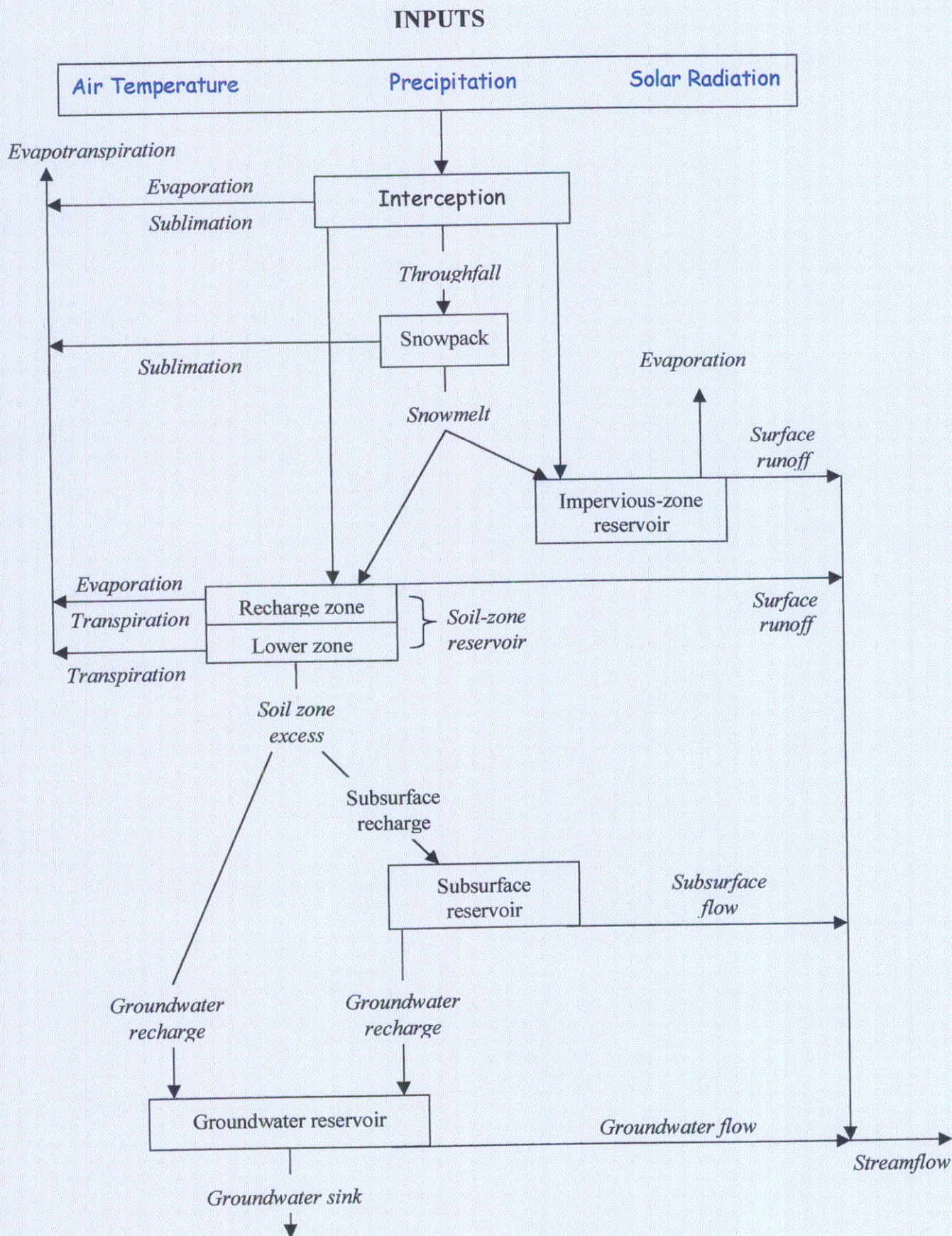


Figure 2.1: Schematic of the PRMS model (Leavesley et al., 1983)

The values and ranges of the parameters optimised are listed in the following table.

Parameter	Value	Range
soil2gw_max (inches)	<i>Depends on the HRU</i>	0 – 5
gw_depth_datum (m)	0	-1.000 – 1.000
gw_porosity	0.36	0 – 1
gwflow_coef (1/day)	0.015	0 – 1
gwsink_coef (1/day)	0	0 – 1
gwstor_init (inches)	0.1	0 – 20
ssr2gw_exp (1/day)	1	0 – 3
ssr2gw_rate (1/day)	0.1	0 – 1
ssrcoef_lin (1/day)	0.1	0 – 1
ssrcoef_sq	0.1	0 – 1
ssrmax_coef	1	0 – 20
ssstor_init (inches)	0	0 – 20

The equations relating the above parameters are shown in Figure 2.2.

Finally, the calculated groundwater level fluctuations were compared and the observed groundwater level in the aquifer and the mean square error (rms error) between observed and calculated water levels was computed. The rms error was minimised and the optimal set of parameters was determined.

The hydrologic balances of the basin and of the aquifer were calculated for the simulation with the optimal set of parameters.

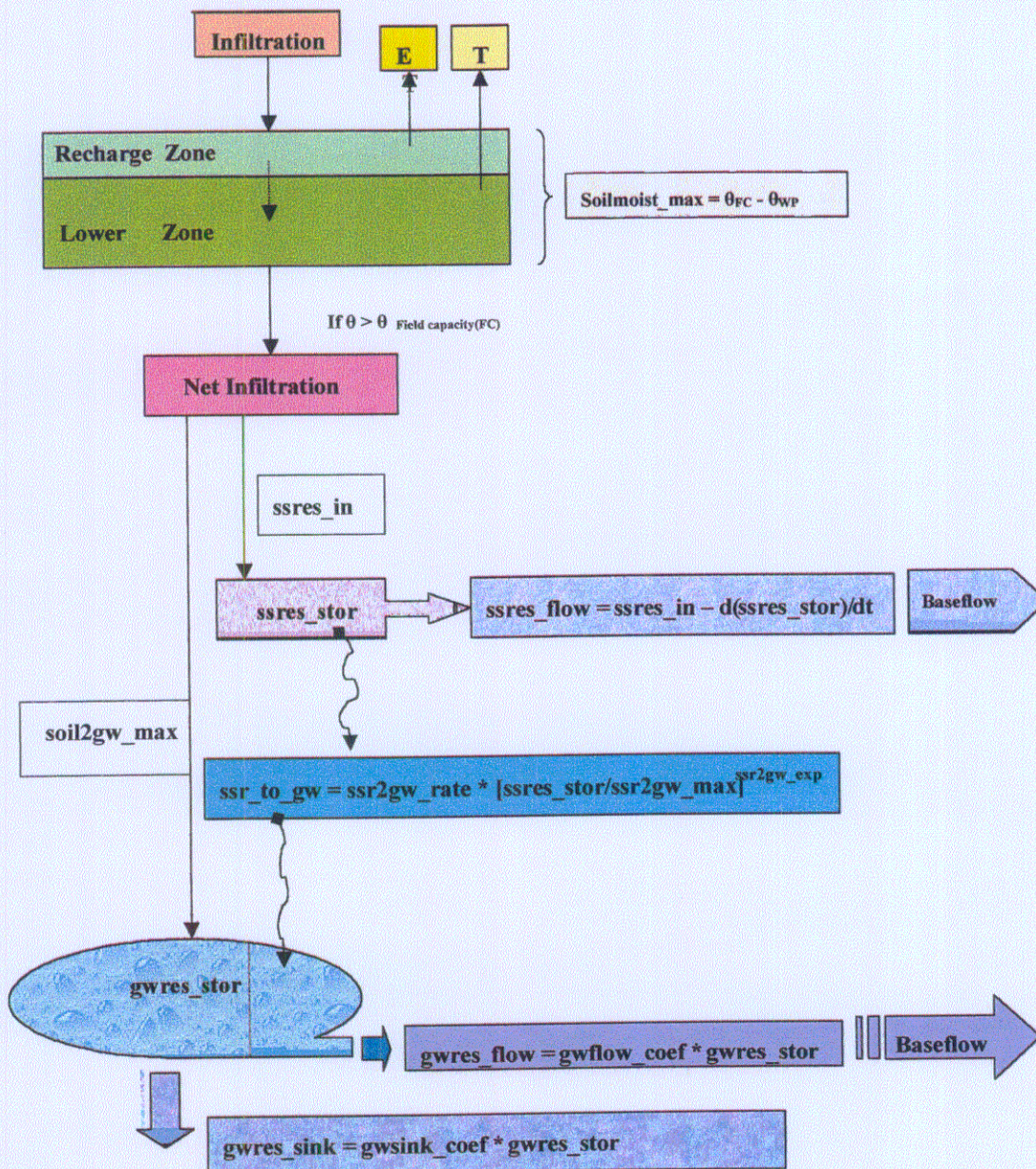


Figure 2.2: Governing equations for the sub-surface simulation in PRMS

3. Results and Discussion

Simulation period covers the years 1989-1999.

Input data were:

- Daily rainfall from two rain gauging stations.
- Daily temperature from one temperature station.
- Daily Class A pan evaporation data.

- Monthly water volumes used for irrigation.
- Monthly water volumes for artificial recharge.
- Monthly water volumes calculated as flow into the aquifer from adjacent areas.
- Monthly water volumes abstracted from the aquifer for several uses.
- Monthly groundwater level data from boreholes and wells in the aquifer.

Input data were properly converted to daily values in order to fit the daily time step of the simulation. Thus monthly values were equally distributed over a month's time. This causes a data filtering (smoothing) that precludes modelling of maximum and minimum values with high accuracy.

The model was run several times with and without the use of the optimisation methods. Figures 3.1 – 3.6 show the calculated and observed groundwater levels for the following cases:

1. *Figure 3.1:* Simulation without parameter optimisation and for the default value of porosity (36%).
2. *Figure 3.2:* Simulation without parameter optimisation and for porosity 14% (estimated from well pumping tests in the area of the aquifer).
3. *Figure 3.3:* Simulation with parameters optimised by application of the Rosenbrock method. The parameters optimised relate to the soil zone, unsaturated zone and groundwater zone, except for the parameter `gwres_sink`, which was set to the default value (zero).
4. *Figure 3.4:* Simulation with parameters optimised by application of the Hyper Tunnel method, except for the parameter `gwres_sink`, which was set to the default value (zero).
5. *Figure 3.5:* Simulation with parameters optimised by application of the Rosenbrock method. The parameters optimised relate to the soil zone, unsaturated zone and groundwater zone.
6. *Figure 3.6:* Simulation with parameters optimised by application of the Hyper Tunnel method, except for the optimisation for the parameters of soil zone, which were optimised according to the Rosenbrock method.

Table 3.1 and *Table 3.2* give the calculated hydrologic balance for the basin and the water balance for the aquifer respectively, for the aforementioned case 4.

Table 3.3 and *Table 3.4* give the calculated hydrologic balance for the basin and the water balance for the aquifer respectively, for the aforementioned case 6.

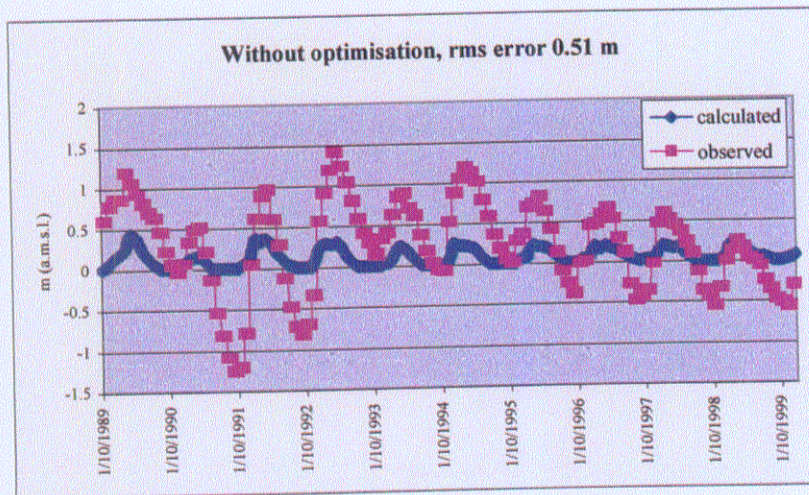


Figure 3.1: *Simulation without parameter optimisation and porosity 36% (default value of the model)*

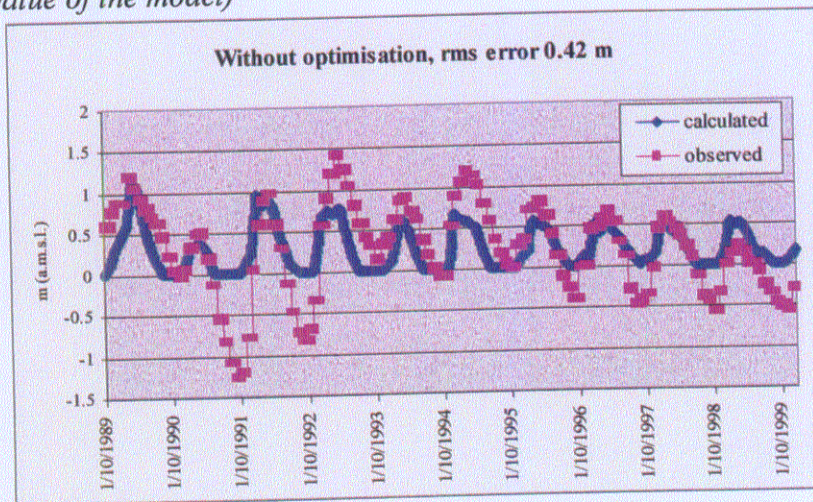


Figure 3.2: *Simulation without parameter optimisation and porosity 14% (estimated from well pumping tests in the area of the aquifer)*

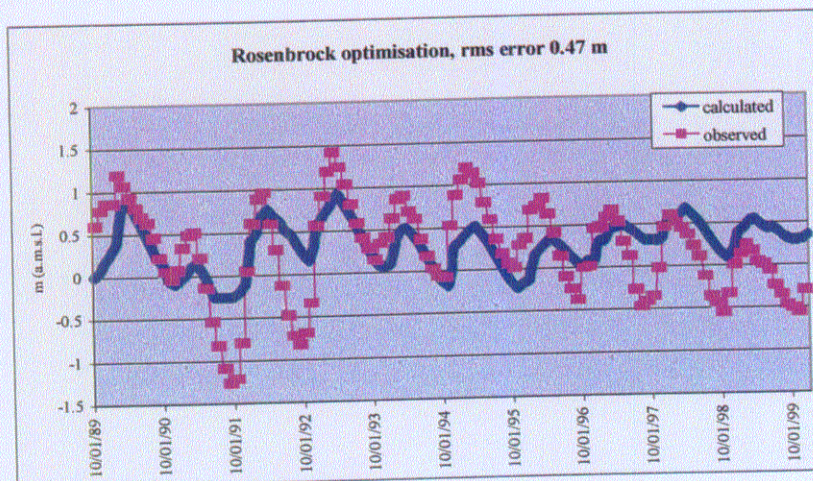


Figure 3.3: *Simulation with parameters optimised according to the Rosenbrock method porosity 24% and gwres_sink parameter value = 0*

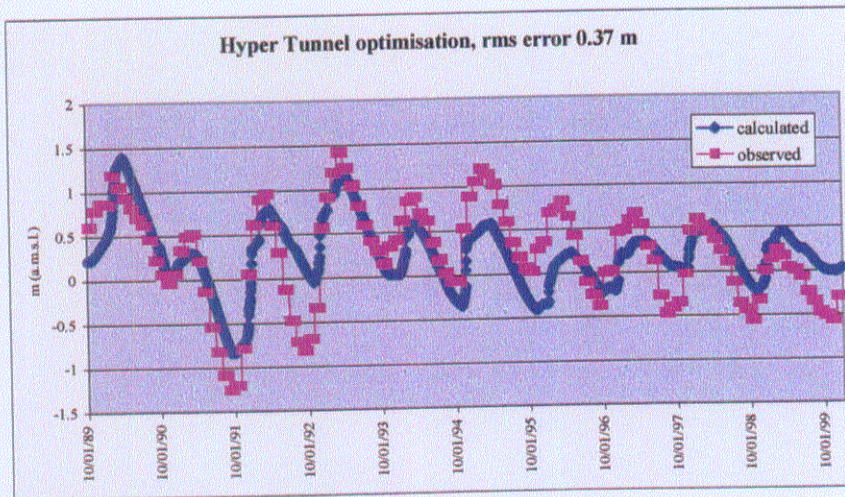


Figure 3.4: *Simulation with optimised parameters according to the Hyper Tunnel method, porosity 21% and gwres_sink parameter value = 0*

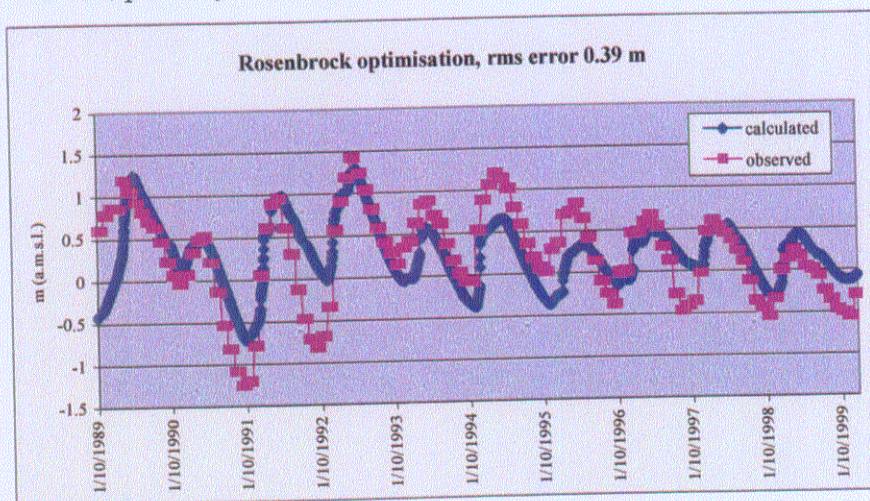


Figure 3.5: *Simulation with optimised parameters according to the Rosenbrock method, porosity 21% and gwres_sink parameter value = 0.00217*

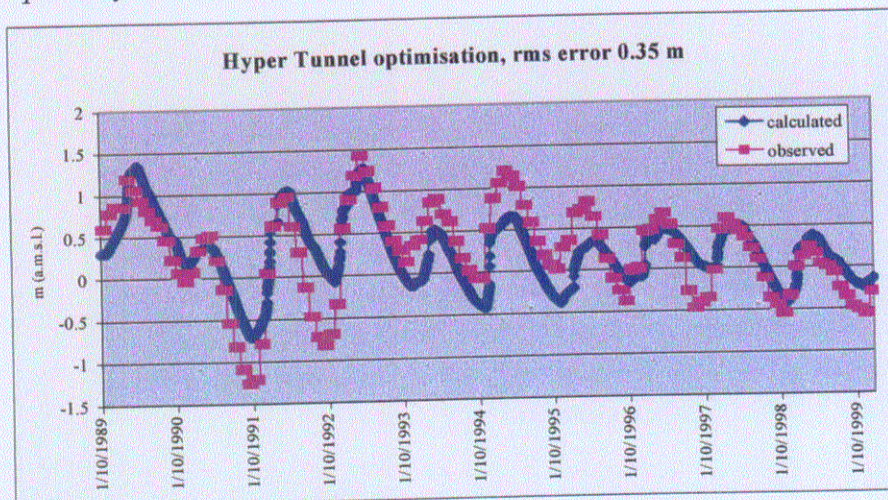


Figure 3.6: *Simulation with optimised parameters according to the Hyper Tunnel method, porosity 20% and gwres_sink parameter value = 0.00255*

4. Summary and Conclusions

The following paragraphs summarise the main points of this study and the conclusions derived.

- ✓ It was shown that the semi-distributed hydrologic model PRMS can be calibrated using groundwater level data. The simulated and observed water levels appear to be in good agreement and the simulation results reflect the historical trend of the aquifer level fluctuations.
- ✓ The PRMS model operates on a daily basis and calculates the major components of the hydrologic cycle. It is a rather simple to understand and straightforward to use model that, by virtue of its modular structure, can be relatively easily modified by an experienced programmer. It is incorporated in the MMS framework, which gives the opportunity to use optimisation methods for the parameter estimation procedure.
- ✓ The non-linear optimisation methods, with constrains, Rosenbrock and Hyper Tunnel, achieve comparable accuracy. The objective function for minimisation is the error between observed and calculated levels in the aquifer.
- ✓ The Rosenbrock method, as it was applied in this study, minimises the absolute error between observed and calculated levels in the aquifer. This method is rather fast, while giving the option to initialise the parameter values to be optimised and thus reduce the impact of the user estimations in the model, but it can be trapped in a local minimum. Hyper Tunnel method minimises the square error (rms error) between observed and calculated levels in the aquifer, takes more time to converge, but gives higher modelling accuracy (smaller error) than the Rosenbrock method. This is due to the global search procedure that it applies.
- ✓ The influence of the `gwres_sink` parameter value is rather important in the simulation, which reflects to the calculation of the hydrologic balance. When it is greater than zero the balance does not close, but at the same time, the approximation between the calculated and the observed groundwater levels is better, as proven by the decline of the value of the rms error.
- ✓ The calculated groundwater levels are smoothed compared to the measured ones, mainly due to the uniform-assumed daily volumes of pumping, recharge and

irrigation over the period of a month. The simplified representation of the aquifer processes is also contributing to a less responsive behaviour of the system.

- ✓ The ranges of values for the porosity (20 - 24%) estimated with the optimisation methods is greater than the one estimated from pumping tests at specific sites of the Akrotiri aquifer (14%). This is, most probably, due to the fact that pumping tests yield localised values, while the model's results reflect the mean condition of the entire aquifer.
- ✓ The outcome of the simulation exercise indicates that the assumptions made in estimating certain parameter values and the artifices used to introduce in the model irrigation, artificial recharge, sub-surface inflows from adjacent areas (via additional HRUs and the use of artificial rain gauging stations), pumping etc., allow a reasonable approximation of the natural system.

A more detailed simulation of the Akrotiri aquifer should follow the present study, with the use of a simple hydraulic model that will permit hydraulic connections between the groundwater reservoirs.

Table 3.1: Annual hydrologic balance of the Akrotiri basin (in million m³)

Year	PPT	IRR	TE	IN	ACTET	SMAV	GWST	SSST	GWFL	SSFL	SROFF	P	B	% TI
1990	32.5	6.2	21.9	12.1	29.6	-0.7	0.5	0.0	11.6	15.5	4.5	13.5	-2	-2
1991	22.3	5.9	9.6	4.3	23.0	0.0	-8.6	0.0	5.0	7.2	3.0	14.6	-2	-5
1992	44.4	5.8	3.9	14.3	27.3	0.0	6.4	0.0	15.2	4.1	6.1	10.5	-1	-2
1993	40.5	6.4	4.6	11.3	25.9	0.0	0.9	0.0	15.5	4.5	5.9	11.2	-1	-2
1994	32.1	5.1	3.7	9.2	24.1	0.9	-3.2	0.0	10.0	3.3	4.6	11.5	-1	-2
1995	33.1	5.2	5.1	10.7	23.0	-0.8	-0.2	0.0	11.8	5.0	4.6	12.1	-1	-2
1996	30.1	6.6	3.5	9.9	25.7	0.0	0.7	0.0	8.5	4.0	3.9	8.0	-1	-2
1997	36.1	12.4	2.6	9.5	34.5	1.4	2.0	0.0	9.0	3.7	5.1	5.5	-1	-1
1998	31.4	17.1	0.8	7.0	37.4	-1.1	-1.4	0.0	9.1	2.1	4.5	6.1	0	-1
1999	32.1	14.5	0.0	8.4	33.0	-0.2	1.2	0.0	9.5	2.1	4.5	5.7	-1	-1

where

PPT Volume of rainfall over the basin surface
IRR Volume of water used for irrigation
TE Volume of artificial recharge
IN Volume of sub-surface inflows and dam leakage
ACTET Volume of actual evapotranspiration
SMAV Difference in soil moisture
GWST Difference of storage in the aquifers
SSST Difference of storage in the unsaturated zone

GWFL Volume of groundwater flows
SSFL Volume of sub-surface flows
SROFF Volume of surface flows
P Volume of water pumped
B Difference in water balance
% TI Percentage of B to total volume of inflows

Table 3.2: Hydrologic balance of the Akrotiri aquifer (in million m³)

Inflows in the ground surface related to the aquifer

Year	PPT	IRR	TE	IN	OE
1990	13.8	6.2	21.9	12.1	54.1
1991	9.4	5.9	9.6	4.3	29.2
1992	17.9	5.8	3.9	14.3	41.9
1993	17.3	6.4	4.6	11.3	39.7
1994	13.4	5.1	3.7	9.2	31.3
1995	13.4	5.2	5.1	10.7	34.5
1996	11.7	6.6	3.5	9.9	31.7
1997	14.9	12.4	2.6	9.5	39.3
1998	13.0	17.1	0.8	7.0	37.9
1999	13.0	14.5	0.0	8.4	36.0

Inflows in the aquifer

SZR_GW	SZR_SSR	SSR_GW
16.2	24.0	7.1
5.8	9.9	2.4
22.1	3.7	0.4
19.3	4.2	0.3
13.2	2.8	0.1
16.3	5.7	0.7
13.2	4.5	0.1
11.9	4.9	0.8
10.5	2.1	0.0
11.6	2.3	0.2

Table 3.2 (continue): Hydrologic balance of the Akrotiri aquifer (in million m³)

Year	ACTET	SMAV	GWST	SSST	GWFL	SSFL	SROFF	P	ΣYNOAO
1990	10.9	-0.5	1.2	0.0	8.4	16.6	1.3	13.5	51.5
1991	7.8	0.0	-9.5	-0.1	4.4	7.6	0.9	14.6	25.7
1992	8.6	0.0	7.0	0.0	5.4	3.2	1.9	10.5	36.7
1993	8.8	0.0	0.9	0.0	8.0	3.9	1.9	11.2	34.6
1994	8.8	0.4	-3.6	0.0	5.2	2.9	1.4	11.5	26.6
1995	7.4	-0.3	-0.2	0.0	5.6	4.7	1.4	12.1	30.6
1996	9.0	0.0	0.8	0.0	4.5	4.3	1.2	8	27.9
1997	15.1	0.6	2.2	0.0	5.7	3.8	1.7	5.5	34.6
1998	18.1	-0.4	-1.6	0.0	5.7	2.2	1.6	6.1	31.7
1999	14.9	-0.3	1.3	0.0	5.7	2.0	1.5	5.7	30.8

*Abbreviations are the same as in Table 3.1

where

- TI Total volume of inflows on the surface of the aquifer
- SZR_GW Total volume of inflows from soil to groundwater reservoir
- SZR_SSR Total volume of inflows from soil to subsurface reservoir
- SSR_GW Total volume of inflows from subsurface reservoir to groundwater reservoir

Table 3.3: Annual hydrologic balance of the Akrotiri basin (in million m³)

Year	PPT	IRR	TE	IN	ACTET	SMAV	GWST	SSST	GWFL	SSFL	SROFF	GWSI	P	B	% TI
1990	32.6	6.2	21.9	12.1	23.4	-0.7	0.4	-0.1	7.6	10	4.5	10.5	13.5	3.7	5
1991	22.4	5.9	9.6	4.3	17.1	0	-7.9	0	3.1	3.3	3	5.2	14.6	3.8	9
1992	44.7	5.8	3.9	14.3	20	0	5	0	12.7	1	6	7.7	10.5	5.8	8
1993	40.7	6.4	4.6	11.3	18.8	0	-0.3	0	11.6	1	5.9	9.4	11.2	5.4	9
1994	32.2	5.1	3.7	9.2	18.3	0.9	-2.5	0	6.9	0.6	4.5	5.4	11.5	4.6	9
1995	33.3	5.2	5.1	10.7	16.9	-0.8	0.5	0	9	1.1	4.5	6.9	12.1	4.1	8
1996	30.3	6.6	3.5	9.9	19.3	0	1.1	0	6.6	0.7	3.9	5.5	8	5.2	10
1997	36.3	12.4	2.6	9.5	27.4	1.4	1.2	0	6.5	0.7	5.1	6.2	5.5	6.8	11
1998	31.5	17.1	0.8	7.0	30	-1.1	-2.5	0	6	0.5	4.5	5.8	6.1	7.1	13
1999	32.3	14.5	0	8.4	25.8	-0.2	1	0	6.4	0.6	4.5	5.4	5.7	6.0	11

where

PPT	Volume of rainfall over the basin surface
IRR	Volume of water used for irrigation
TE	Volume of artificial recharge
IN	Volume of sub-surface inflows and dam leakage
ACTET	Volume of actual evapotranspiration
SMAV	Difference in soil moisture
GWST	Difference of storage in the aquifers
SSST	Difference of storage in the unsaturated zone

GWFL	Volume of groundwater flows
SSFL	Volume of sub-surface flows
SROFF	Volume of surface flows
GWSI	Volume of water routed to a sink
P	Volume of water pumped
B	Difference in water balance
% TI	Percentage of B to total volume of inflows

Table 3.4: Hydrologic balance of the Akrotiri aquifer (in million m³)

<i>Inflows in the ground surface related to the aquifer</i>						
Year	PPT	IRR	TE	IN	OE	
1990	13.8	6.2	21.9	12.1	54.1	
1991	9.4	5.9	9.6	4.3	29.2	
1992	17.9	5.8	3.9	14.3	41.9	
1993	17.3	6.4	4.6	11.3	39.6	
1994	13.4	5.1	3.7	9.2	31.4	
1995	13.4	5.2	5.1	10.7	34.4	
1996	11.7	6.6	3.5	9.9	31.7	
1997	14.9	12.4	2.6	9.5	39.4	
1998	13	17.1	0.8	7.0	37.9	
1999	13	14.5	0	8.4	35.9	

<i>Inflows in the aquifer</i>			
SZR_GW	SZR_SSR	SSR_GW	
14.4	22.1	13.7	
5.4	9.5	6.5	
21.7	3.4	2.9	
18.7	4.2	3.6	
12.4	2.9	2.5	
16.2	4.5	4.3	
11.8	3.8	4.0	
11.8	3.5	3.7	
9.5	2.1	1.8	
11.5	1.9	1.8	

Table 3.4 (continue): Outflows from the groundwater reservoir*

Year	ACTET	SMAV	GWST	SSST	GWFL	SSFL	SROFF	GWSI	P	TOTAL	B	% TI
1990	10.9	-0.5	1.1	0	4.1	11	0.8	10.5	13.5	51.4	2.7	5
1991	7.8	0	-8.8	0	2.4	3.5	0.5	5.2	14.6	25.2	4.0	14
1992	8.6	0	5.5	0	2.8	0	1.1	7.7	10.5	36.2	5.7	14
1993	8.8	0	-0.3	0	3.8	0.2	1.1	9.4	11.2	34.2	5.4	14
1994	8.8	0.4	-2.8	0	2.3	0	0.8	5.3	11.5	26.3	5.1	16
1995	7.4	-0.3	0.5	0	2.5	0.2	0.8	6.9	12.1	30.1	4.3	13
1996	9	0	1.3	0	2.3	0.2	0.7	5.4	8	26.9	4.8	15
1997	15.1	0.6	1.4	0	3.2	0.3	0.9	6.2	5.5	33.2	6.2	16
1998	18.1	-0.4	-2.7	0	2.9	0.2	0.8	5.8	6.1	30.8	7.1	19
1999	14.9	-0.3	1.1	0	2.3	0.3	0.8	5.4	5.7	30.2	5.7	16

*Abbreviations are the same as in Table 3.3

where

- TI Total volume of inflows on the surface of the aquifer
- SZR_GW Total volume of inflows from soil to groundwater reservoir
- SZR_SSR Total volume of inflows from soil to subsurface reservoir
- SSR_GW Total volume of inflows from subsurface reservoir to groundwater reservoir

1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Εισαγωγή

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ορισμός προβλήματος

Κάθε σχέδιο διαχείρισης του υδατικού δυναμικού μιας περιοχής προϋποθέτει τον υπολογισμό του υδρολογικού της ισοζυγίου. Πολλά μαθηματικά μοντέλα υδρολογικής λεκάνης έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου, τα οποία έχουν σύνθετη δομή. Η σύνθετη αυτή δομή οδηγεί στην παρουσία πολλών παραμέτρων, μεγάλο μέρος των οποίων συχνά δεν μπορεί να υπολογιστεί εκ των προτέρων βάσει γνωστών πρωτογενών χαρακτηριστικών.

Η βαθμονόμηση των μοντέλων προσομοίωσης του υδρολογικού ισοζυγίου γίνεται κατά κανόνα με την σύγκριση των χρονοσειρών της παρατηρημένης επιφανειακής απορροής με την χρονοσειρά της υπολογισμένης επιφανειακής απορροής που προκύπτει από το μοντέλο. Αντικειμενικές μέθοδοι βελτιστοποίησης παραμέτρων καλούνται να βοηθήσουν τον – λιγότερο ή περισσότερο έμπειρο – χρήστη στην επιτυχή βαθμονόμηση τέτοιων σύνθετων μοντέλων.

Το πρόβλημα ρύθμισης όμως των παραμέτρων ενός μοντέλου υδρολογικού ισοζυγίου γίνεται πιο δυσεπίλυτο σε εφαρμογές που αφορούν περιοχές χωρίς μετρημένες επιφανειακές απορροές, όπως συμβαίνει σε πολλές περιπτώσεις υδρολογικών λεκανών στον Μεσογειακό χώρο που έχουν ημιερημικό κλίμα και στις οποίες το υδρογραφικό δίκτυο δεν είναι ανεπτυγμένο. Ελλείψει επιφανειακών απορροών, προτείνεται, όπως αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 1.2 Στόχος της εργασίας – Μεθοδολογία, η χρήση μετρημένων σταθμών στον υποκείμενο υδροφορέα.

1.2 Στόχος της εργασίας – Μεθοδολογία

Η παρούσα μελέτη πραγματεύεται το πρόβλημα της προσομοίωσης και κατάρτισης του υδατικού ισοζυγίου υδρολογικής λεκάνης, η οποία στερείται ανεπτυγμένου υδρογραφικού δικτύου με διαμορφωμένες κοίτες και ως εκ τούτου, μετρήσιμων επιφανειακών απορροών, με την επικουρία μεθόδων βελτιστοποίησης και τη χρήση δεδομένων κύμανσης της στάθμης στον υπόγειο υδροφορέα.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου και ο υπολογισμός των υδρολογικών ισοζυγίων της λεκάνης και του υδροφορέα βασίζεται στις μετρήσεις της στάθμης στον υδροφορέα της λεκάνης, σε σημεία μετρήσεων που κατανέμονται ομοιόμορφα στην επιφάνεια

του υδροφορέα και έχουν συνεχείς και αξιόπιστες καταγραφές. Κριτήριο για την επιτυχία της μεθοδολογίας της εργασίας αυτής αποτελεί η επίτευξη της αναπαραγωγής των γενικών ιστορικών τάσεων της κύμανσης της στάθμης του υδροφορέα, στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Για την προσομοίωση της λεκάνης χρησιμοποιήθηκε το σύνθετο υδρολογικό μοντέλο **Precipitation Runoff Modeling System** (PRMS) (Leavesley et al., 1983). Το μοντέλο είναι ημι-κατανεμημένων παραμέτρων, διότι λαμβάνει υπόψη του την μεταβολή των φυσικών χαρακτηριστικών στο χώρο με την χρήση πολλών υδρολογικών μονάδων, κάθε μία εκ των οποίων έχει ομοιόμορφα χαρακτηριστικά. Ο σχεδιασμός του μοντέλου έχει γίνει στην βάση των modules. Το PRMS είναι ενταγμένο στο περιβάλλον **Modular Modeling System** (MMS) (Leavesley et al., 1993), το οποίο αποτελεί υπολογιστικό πλαίσιο και χρησιμοποιείται ώστε να αναπτύσσει, να υποστηρίζει και να εφαρμόζει κάθε μοντέλο. Το MMS διευκολύνει την εισαγωγή των στοιχείων εισόδου στο PRMS, παρέχει την δυνατότητα γραφικής παράστασης των αποτελεσμάτων, διαθέτει ενσωματωμένες δυνατότητες βελτιστοποίησης παραμέτρων και ανάλυσης ευαισθησίας για την καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου που εφαρμόζεται, καθώς και διεπιφάνεια με το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) **Geographical Resources Analysis Support System** (GRASS) (U.S. Corps of Engineers, 1991).

Περιοχή εφαρμογής και αξιολόγησης της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η υδρολογική λεκάνη του Ακρωτηρίου της Κύπρου. Το κλίμα είναι ημερημικό, τα πετρώματα πολύ περατά στο μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης, το υδρογραφικό δίκτυο δεν είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένο και δεν έχει διαμορφωμένες κοίτες και ως εκ τούτου, δεν υπάρχουν μετρημένες επιφανειακές απορροές. Ο υδροφορέας του Ακρωτηρίου, που μερικώς συμπίπτει με την λεκάνη, τυγχάνει συστηματικής παρακολούθησης και διαχείρισης.

Τα δεδομένα εισόδου, απαραίτητα για την λειτουργία του μοντέλου, χρειάστηκαν εκτεταμένες μετατροπές, ελέγχους και ταυτοποιήσεις, ώστε να βρεθούν στην ίδια χρονική κλίμακα και να μπορούν να αξιοποιηθούν.

1.3 Συμβολή της εργασίας – Πρωτότυπα σημεία

Η διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής απαιτεί την γνώση της ποσότητας του κατάλληλου προς χρήση νερού που μπορεί να παραχθεί. Ο υπολογισμός των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου είναι προϋπόθεση για τον καθορισμό των ποσοτήτων του νερού που μπορεί να διατεθεί εποχιακά – με σχετική ασφάλεια – για διάφορες χρήσεις. Οι συνήθεις μέθοδοι υπολογισμού του υδατικού ισοζυγίου με τη χρήση εννοιολογικών (conceptual) υδρολογικών μοντέλων, απαιτούν την ύπαρξη μετρήσεων επιφανειακών απορροών για την βαθμονόμηση των μοντέλων. Όμως για πολλές περιοχές της Μεσογείου, οι οποίες έχουν ημιερημικό κλίμα, δεν υπάρχουν δεδομένα επιφανειακών απορροών.

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία παρέχει ένα εργαλείο για τον ακριβή υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου υδρολογικής λεκάνης με χρήση αριθμητικού υδρολογικού μοντέλου για τις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις επιφανειακής απορροής, διότι επιτρέπει την βαθμονόμηση του μοντέλου με δεδομένα κύμανσης στάθμης υπογείων υδάτων.

Όπως είναι βέβαια αυτονόητο, τα λεπτομερή υδραυλικά μοντέλα υπογείων νερών λαμβάνουν απόλυτα υπόψη τα δεδομένα κύμανσης της στάθμης υπογείων υδάτων στη βαθμονόμησή τους. Ωστόσο σε αρχικές εκτιμήσεις, πριν την εφαρμογή ενός λεπτομερούς υδραυλικού μοντέλου, μπορεί να είναι χρήσιμη η προσαρμογή ενός αδρομερέστερου εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου.

1.4 Διάρθρωση εργασίας

Η εργασία χωρίζεται σε έξι κεφάλαια, στα οποία παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, οι ανάγκες που οδήγησαν στην εφαρμογή της, το πλαίσιο στο οποίο κινήθηκε η έρευνα και τα αποτελέσματα και συμπεράσματα.

Στο πρώτο κεφάλαιο (παρούσα εισαγωγή) ορίστηκε το πρόβλημα και σκιαγραφήθηκε η μεθοδολογία επίλυσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται λόγος περί υδατικού ισοζυγίου και περί μεθόδων προσομοίωσης, αναπτύσσεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε σε αυτήν την εργασία, γίνεται συνοπτική παρουσίαση γνωστών υδρολογικών μοντέλων και περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο PRMS που τελικά επελέγη να χρησιμοποιηθεί και οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκαν.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η περιοχή μελέτης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα, οι παραδοχές που έγιναν και η προσαρμογή του μοντέλου στην περιοχή μελέτης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται η βαθμονόμηση του μοντέλου, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και η αξιολόγησή τους.

Στο έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα της μελέτης, καθώς και εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα.

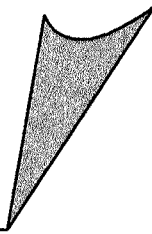
Το Παράρτημα Α, περιλαμβάνει την αναλυτική περιγραφή των συνιστωσών και επιλογών προσομοίωσης του μοντέλου PRMS.

Το Παράρτημα Β, συγκεντρώνει γεωλογικές τομές του Υδροφορέα του Ακρωτηρίου της Κύπρου.

2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

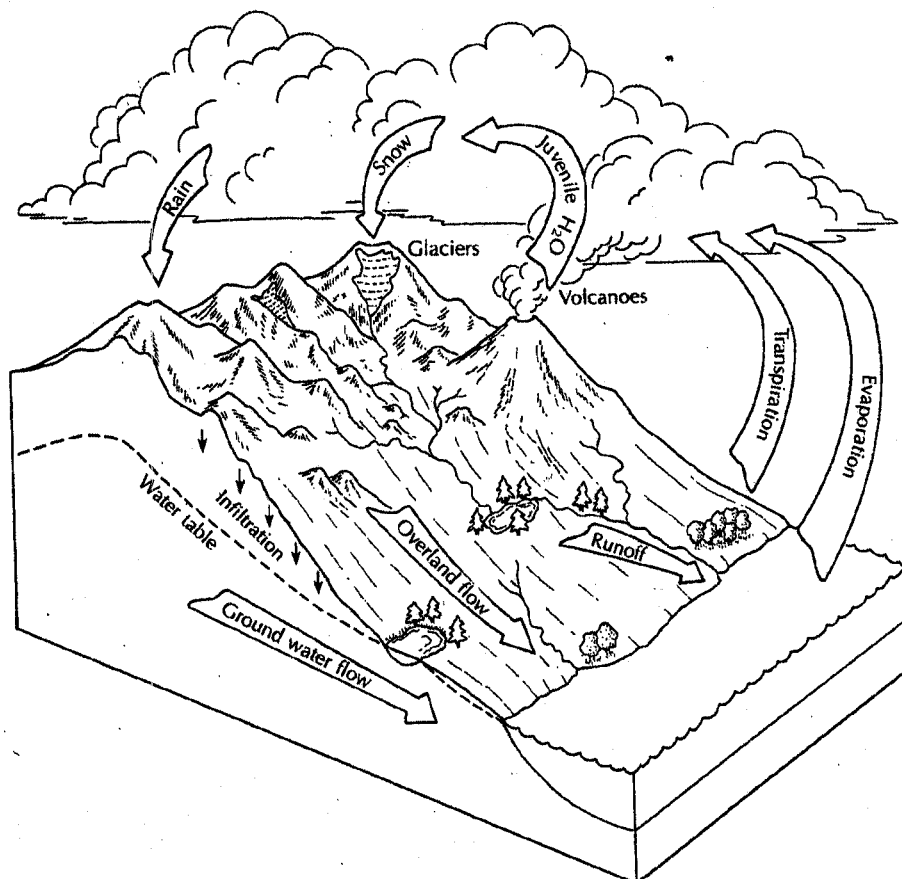
Μεθοδολογία



2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Γενικά περί Υδατικού Ισοζυγίου

Ο υδρολογικός κύκλος, η αέναη κίνηση του νερού, που τροφοδοτείται ενεργειακά από τον ήλιο και οδηγείται από την βαρύτητα, είναι πρωταρχική έννοια στην υδρολογία (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1997). Το νερό εξατμίζεται από τους ωκεανούς και την επιφάνεια του εδάφους, μεταφέρεται ως ατμός με την ατμοσφαιρική κυκλοφορία, κατακρημνίζεται πάλι ως βροχή ή χιόνι, κατακρατείται και απορροφάται από τα δέντρα και την βλάστηση, απορρέει επιφανειακά, κατεισδύει στο έδαφος, τροφοδοτεί τα υπόγεια νερά, εκφορτίζεται στα ρέματα και τελικά ρέει προς την θάλασσα (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Υδρολογικό ισοζύγιο (Fetter, 1994)

Το υδρολογικό ισοζύγιο είναι η εφαρμογή του νόμου της διατήρησης της μάζας σε ένα όγκο ελέγχου λεκάνης απορροής και είναι η βάση κάθε σχεδίου διαχείρισης του υδατικού δυναμικού.

Τα χαρακτηριστικά του υδρολογικού κύκλου διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή και μπορούν να εκφραστούν ποσοτικά, σαν όροι του υδατικού της ισοζυγίου. Αν P τα κατακρημνίσματα κάθε μορφής που φθάνουν στην επιφάνεια του εδάφους κατά την διάρκεια κάποιας χρονικής περιόδου Δt , τότε

$$P - (E + R + M) = \Delta V$$

όπου:

- E** Απώλειες εξάτμισοδιαπνοής για την ίδια περίοδο από τις εδαφικές, τις υδάτινες και τις φυτικές επιφάνειες που αναπτύσσονται στην περιοχή
- R** Ποσότητα νερού που απομακρύνεται με την επιφανειακή και υπόγεια απορροή προς γειτονικές περιοχές, προς επιφανειακούς και υπόγειους στραγγιστικούς αγωγούς ή προς τη θάλασσα
- M** Το νερό που καταναλώνεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες
- V** Το νερό που αποθηκεύεται πάνω και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους
- ΔV** Πιθανές μεταβολές στην αποθήκευση

2.2 Γενικά περί Μεθόδων Προσομοίωσης

Η ανάγκη της χρήσης αριθμητικών μεθόδων προέκυψε από τις αδυναμίες των αναλυτικών λύσεων σε πρακτικά προβλήματα εφαρμογής. Ακανόνιστα γεωμετρικά όρια, πολύπλοκοι συνδυασμοί αρχικών και οριακών συνθηκών, η μη γραμμικότητα των διεργασιών, η ανομοιογένεια και ανισοτροπία των υδροφορέων, αλλά και έντονες μεταβολές στις φορτίσεις του κάθε συστήματος, είτε φυσικές (βροχοπτώσεις), είτε τεχνητές (αντλήσεις), είναι αδύνατο να συνυπάρξουν κάτω από μια σειρά απλουστευτικών υποθέσεων που απαιτείται συνήθως για τον υπολογισμό μιας αναλυτικής λύσης.

Τα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση των υπόγειων υδατικών πόρων και στην καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών ροής των υδροφορέων.

Ένας βασικός τρόπος κατηγοριοποίησης των μοντέλων είναι

- Φυσικά θεμελιωμένα μοντέλα που προσομοιώνουν τις διεργασίες στην βάση των θεμελιωδών εξισώσεων διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας.

- Εννοιολογικά (conceptual) μοντέλα που περιγράφουν προσεγγιστικά τις διεργασίες, ικανοποιώντας πάντα την διατήρηση της μάζας και περιγράφοντας την δυναμική συμπεριφορά του συστήματος με απλοποιημένες παραδοχές.
- Μοντέλα μαύρου κουτιού (black box) που παρέχουν την σύνδεση των δεδομένων εισόδου με τα αποτελέσματα με μία μαθηματική συνάρτηση.

Εξάλλου τα μοντέλα μπορεί να είναι:

1. Ντετερμινιστικά, τα οποία δεν εξετάζουν τυχαιότητα στην υδρολογική προσομοίωση.
2. Στοχαστικά, των οποίων τα αποτελέσματα είναι τουλάχιστον μερικώς, τυχαία.

Τέλος ως προς τη χωρική τους διάσταση τα μοντέλα μπορεί να είναι:

1. Συγκεντρωμένων (lumped) παραμέτρων, που περιγράφουν ένα σύστημα ως μοναδικό σημείο στο χώρο και οι τιμές των παραμέτρων προκύπτουν με εξαγωγή του μέσου όρου των μετρημένων τιμών σε διάφορα σημεία.
2. Κατανεμημένων (distributed) παραμέτρων, που ορίζουν τις μεταβλητές τους και τις παραμέτρους τους ως συναρτήσεις των διαστάσεων στον χώρο.
3. Ημικατανεμημένων παραμέτρων (semi-distributed) παραμέτρων που προσεγγίζουν την περιοχή μελέτης ως ένα σύνολο διασυνδεδεμένων επι μέρους μοντέλων συγκεντρωμένων παραμέτρων.

Η ακρίβεια της προσομοίωσης εξαρτάται από τυχόν ελαττώματα στην δομή του μοντέλου, από ανακρίβειες στα δεδομένα εισόδου και από μεροληπτικές εκτιμήσεις των παραμέτρων του μοντέλου. Η παρέμβαση του χρήστη όσον αφορά την επιλογή των τιμών των παραμέτρων μπορεί να αντιμετωπιστεί με εφαρμογή μεθόδων αυτόματης βελτιστοποίησης, οι οποίες μπορούν να εκτιμούν τις τιμές των παραμέτρων ώστε να επιτυγχάνεται – με βάση κάποιους περιορισμούς – η βέλτιστη τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης.

Ένα μοντέλο που φαίνεται να δίνει τέλεια αποτελέσματα σε μία υδρολογική λεκάνη, μπορεί να μην ανταποκρίνεται καλά σε μία άλλη, είτε επειδή τα δεδομένα εισόδου στην δεύτερη λεκάνη δεν είναι αρκετά, είτε επειδή το μοντέλο δεν είναι αρκετά γενικό ώστε να ανταποκρίνεται το ίδιο καλά σε όλες τις συνθήκες που είναι δυνατόν να επικρατούν στη φύση.

Πάντως η χρησιμοποίηση αριθμητικών μοντέλων υδρολογικού ισοζυγίου είναι πιο ακριβής από τις απλές προσεγγίσεις αυτού που βασίζονται σε παραδοχές, όπως $\Delta V=0$, και αν αυτά βαθμονομηθούν κατάλληλα, παρέχουν αποτελέσματα, τα οποία έχουν βαθμό ακριβείας ανάλογο με την ακρίβεια των δεδομένων.

Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου επιτυγχάνεται με την εύρεση ενός συνόλου τιμών παραμέτρων, ώστε το μοντέλο να παράγει αποτελέσματα που να προσεγγίζουν τις μετρημένες τιμές και τις γενικές ιστορικές τάσεις αυτών, με μία αποδεκτή απόκλιση (Anderson & Woessner, 1992). Η βαθμονόμηση του μοντέλου προϋποθέτει ένα αρχικό σύνολο τιμών των παραμέτρων, μερικές των οποίων μπορούν να εξαχθούν από χάρτες ή από μελέτες που προϋπάρχουν. Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης για την περίοδο βαθμονόμησης, συγκρίνονται οι παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές των συνιστωσών του ισοζυγίου που είναι γνωστές (επιφανειακή απορροή ή στην παρούσα περίπτωση, στάθμες του υπόγειου υδροφορέα) και ακολουθεί προσαρμογή των παραμέτρων, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη συμφωνία μεταξύ παρατηρημένων και υπολογισμένων τιμών.

Η αυτόματη βελτιστοποίηση των παραμέτρων απαιτεί συνεχείς επαναλήψεις των υπολογισμών, ώστε να εντοπιστούν οι καλύτερες παράμετροι. Όσο πιο αναλυτικό και περίπλοκο είναι το μοντέλο τόσο «ακριβή» η βελτιστοποίηση από άποψη υπολογιστικού χρόνου και κόπου.

2.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Ακολούθως γίνεται αναφορά σε τέσσερα γνωστά μοντέλα που αποτελούν τυπικούς εκπροσώπους των παραπάνω κατηγοριών. Οι διαφορές μεταξύ τους εντοπίζονται στην πολυπλοκότητα της δομής τους και στην απαιτητικότητά τους για ακριβή και ποικίλα δεδομένα.

Φυσικά θεμελιωμένο κατανεμημένων παραμέτρων:

SHE (Abbott et al., 1986) – European Hydrologic System Model

Το SHE είναι ένα μοντέλο φυσικής θεμελίωσης που περιγράφει τις υδρολογικές διεργασίες σε λεκάνη χρησιμοποιώντας κατανεμημένες παραμέτρους. Οι σημαντικότερες υδρολογικές διεργασίες που περιγράφει είναι αυτές οι οποίες διέπουν την κίνηση του νερού σε μία υδρολογική λεκάνη, δηλαδή: η τήξη του χιονιού, η

προσρόφηση από το ριζικό σύστημα των φυτών, η εξατμισοδιαπνοή, η επιφανειακή απορροή, η ποτάμια απορροή και η υπόγεια ροή δια μέσου της ακόρεστης και της κορεσμένης ζώνης. Η χωρική μεταβλητότητα των υδρολογικών διεργασιών περιγράφεται με την χρήση ενός τετραγωνικού πλέγματος (x,y) σημείων στο οριζόντιο επίπεδο. Η κατακόρυφη μεταβολή των ιδιοτήτων του υπεδάφους αντιπροσωπεύεται από μια σειρά οριζοντίων επιπέδων σε διάφορα βάθη.

Το SHE χρησιμοποιείται για την επίλυση διαφόρων υδρολογικών προβλημάτων, όπως είναι ο σχεδιασμός της άρδευσης, ο προσδιορισμός των αλλαγών σε χρήσεις γης, οι μελέτες ανάπτυξης υδάτων, η μόλυνση υπογείων υδάτων, η διάβρωση και μεταφορά ιζημάτων και η πρόβλεψη πλημμυρών.

Οι περισσότερες από τις παραμέτρους του προγράμματος θέτονται με βάση μετρήσεις και παρατηρήσεις, σε συγκεκριμένα σημεία δειγματοληψίας και ως εκ τούτου δεν επιδέχονται ρύθμισης και βελτιστοποίησης. Το μοντέλο απαιτεί για την λειτουργία του πολλά δεδομένα και υπολογισμούς, που δεν ήταν διαθέσιμα στην παρούσα περίπτωση· ως εκ τούτου δεν θεωρήθηκε κατάλληλο για τους σκοπούς της μελέτης μας.

Συνδυασμός εννοιολογικού και φυσικής βάσης:

SWAT (Arnold et al., 1993) – Soil and Water Assessment Tool

Το SWAT είναι ένα μοντέλο μερικώς φυσικής βάσης και μερικώς εννοιολογικό (conceptual), που έχει την δυνατότητα να συνδέει την απόκριση της επιφάνειας και του υπεδάφους. Ο αρχικός αντικειμενικός στόχος του προγράμματος ήταν να προβλέψει το αποτέλεσμα των αποφάσεων διαχείρισης του εδάφους στο νερό, στα ιζήματα και χημικά φορτία από αγροτικές εφαρμογές, σε μεγάλες σύνθετες υδρολογικές λεκάνες με ποικιλία σε εδάφη, χρήσεις γης και διαχείρισης για μεγάλες χρονικές περιόδους. Οι κύριες διεργασίες του είναι: 1. Βροχή, 2. Τήξη χιονιού, 3. Διήθηση, 4. Εξατμισοδιαπνοή, 5. Επιφανειακή απορροή, 6. Διόδευση, 7. Διάβρωση, 8. Χημική μετακίνηση, 9. Υπόγεια ροή και οριζόντια ροή, μεταφορά νερού άρδευσης, 11. Ποιότητα υδάτων λιμνών, 12. Συνιστώσα ταμιευτήρα (ή λιμνοδεξαμενής).

Το SWAT αναπτύχθηκε με την πρόσθεση κάποιων συνιστωσών - υπόγεια απορροή - στο χωρικά λεπτομερές, συνεχούς χρόνου μοντέλο SWRRB, το οποίο με τη σειρά του

είχε αναπτυχθεί με την μετατροπή του μοντέλου CREAMS (ημερήσιας βροχόπτωσης) για εφαρμογή σε μεγάλες, σύνθετες, αγροτικές λεκάνες.

Το μοντέλο επιτρέπει σημαντική ελευθερία στον ορισμό και διαχωρισμό των λεκανών και υπολεκανών και λειτουργεί συνεχώς, με ημερήσιο/μηνιαίο βήμα. Χρησιμοποιείται για την μελέτη επιπτώσεων μακράς διάρκειας στην λεκάνη και για την μελέτη μεταφοράς βακτηρίων. Έχει ακόμα εφαρμοστεί με επιτυχία στην εφαρμογή κλιματικών σεναρίων για την πρόβλεψη κλιματικών αλλαγών σε κλίμακα λεκάνης (Τσοτσώνης, 2000).

Το SWAT απαιτεί λεπτομέρεια στα δεδομένα εισόδου, ειδικότερα σε ότι αφορά δεδομένα του υδρογραφικού δικτύου και μετρήσεις απορροών σε αυτό, απαραίτητα για την βαθμονόμηση του μοντέλου. Εδαφολογικά στοιχεία και στοιχεία καλλιεργειών ήταν στην δική μας περίπτωση γνωστά χωρίς ιδιαίτερη λεπτομέρεια, ενώ απουσίαζαν και αρκετά ψηφιοποιημένα γεωγραφικά στοιχεία. Εξάλλου, ο σκοπός της εργασίας αυτής δεν ήταν η προσομοίωση των διαχειριστικών σεναρίων στην συγκεκριμένη λεκάνη.

Εννοιολογικό:

Conceptual Water Balance Model (Mimikou et al., 1990)

Το συγκεκριμένο μοντέλο υδρολογικού ισοζυγίου αναπτύχθηκε ώστε να παρέχει δεδομένα για την πραγματοποίηση αναλύσεων ευαισθησίας των υδατικών πόρων μιας περιοχής κάτω από μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες και να κάνει βέλτιστη χρήση της υπάρχουσας πληροφορίας από την περιοχή μελέτης. Το μοντέλο λειτουργεί σε μηνιαία κλίμακα, γεγονός που το κάνει προτιμητέο σε περιπτώσεις όπου οι κλιματικές μεταβλητές εισόδου (π.χ. σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου) μπορούν να εκτιμηθούν χονδρικά σε μηνιαία κλίμακα. Μεταβλητές εισόδου στο μοντέλο (σε μηνιαίες τιμές) είναι 1. η βροχόπτωση, 2. η θερμοκρασία, 3. η μέση ελάχιστη σχετική υγρασία, 4. η μέση σχετική διάρκεια ηλιοφάνειας και 6. η μέση τιμή ημερήσιου ανέμου.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί ενδιάμεσες μεταβλητές, όπως απορροή καταιγίδας, αποθήκευση χιονιού, τήξη χιονιού, ολική βροχόπτωση, πραγματική εξατμισοδιαπνοή, εδαφική υγρασία, πλεόνασμα νερού (water surplus) που είναι η πηγή της εδαφικής υγρασίας, αποθήκευση στον υπόγειο υδροφόρα, καθώς και παραμέτρους, οι τιμές

κάποιων από τις οποίες εκτιμούνται κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου. Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου εκτιμούνται είτε από την μελέτη των δεδομένων της περιοχής, είτε από την βιβλιογραφία.

Η βαθμονόμηση επιτυγχάνεται με την σύγκριση της υπολογισμένης και της παρατηρημένης επιφανειακής απορροής. Στην περιοχή μελέτης όμως που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία οι μετρήσεις επιφανειακής απορροής που είναι απαραίτητες για την σωστή εφαρμογή του μοντέλου, δεν ήταν διαθέσιμες.

Εννοιολογικό ημικατανεμημένων παραμέτρων:

PRMS (Leavesley et al., 1983) – Precipitation Runoff Modeling System

Το PRMS είναι ένα μοντέλο ημι-κατανεμημένων παραμέτρων, ενώ ο σχεδιασμός του έχει γίνει στην βάση των modules. Το μοντέλο αναπτύχθηκε ώστε να εκτιμά την επίδραση των διαφόρων συνδυασμών της βροχόπτωσης, του κλίματος και της χρήσης γης στην απόκριση της λεκάνης. Η απόκριση της λεκάνης σε κανονική και ραγδαία βροχόπτωση και τήξη χιονιού, μπορούν να προσομοιωθούν ώστε να εκτιμηθούν οι αλλαγές στις σχέσεις του υδατικού ισοζυγίου, καθεστώτα ροής, παροχές και όγκοι πλημμυρών, σχέσεις εδάφους-νερού, φορτία στερεοπαροχής και εμπλουτισμός των υπογείων υδροφορέων.

Το μοντέλο έχει ενταχθεί στο υπολογιστικό πλαίσιο *Modular Modeling System* (MMS) (Leavesley et al., 1996), στο οποίο συνδυάζονται δυνατότητες βελτιστοποίησης παραμέτρων και ανάλυσης ευαισθησίας, ώστε να προσαρμόζονται οι επιλεγμένες παράμετροι του μοντέλου και να εκτιμάται η επίδρασή τους – κοινή ή κατά μονάδες – στα αποτελέσματα του μοντέλου, καθώς και το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) *Geographical Resources Analysis Support System* (GRASS) (U.S. Army Corps of Engineers) για διευκόλυνση στην ανάπτυξη του μοντέλου, στην εφαρμογή, ανάλυση και οπτικοποίηση πληροφοριών χάρτη σε ένα χωρικά κατανεμημένο σύστημα.

Η απόκριση της λεκάνης μπορεί να προσομοιωθεί με το PRMS είτε σε ημερήσια χρονική κλίμακα, είτε σε κλίμακα καταιγίδας.

Με την ημερήσια χρονική κλίμακα οι υδρολογικές συνιστώσες υπολογίζονται ως ημερήσιοι μέσοι όροι ή ολικές τιμές. Η ροή σε ρέματα υπολογίζεται σαν μέση ημερήσια ροή.

Στην κλίμακα καταιγίδας, προσομοιώνονται επιλεγμένες υδρολογικές συνιστώσες σε χρονικά διαστήματα προσομοίωσης μικρότερα της ημέρας (ελάχιστο διάστημα 1 min). Σε αυτήν την περίπτωση, υπολογίζεται το υδρογράφημα της καταιγίδας και η στερεοπαροχή. Η δυνατότητα προσομοίωσης της στερεοπαροχής παρέχεται μόνο στην περίπτωση της κλίμακας της καταιγίδας.

Το PRMS είναι σχετικά απλό, κάνει χρήση παραμέτρων οι οποίες μπορούν να εκτιμηθούν με σχετική ακρίβεια από τα διαθέσιμα δεδομένα, είναι ενσωματωμένο στο MMS που παρέχει την δυνατότητα βελτιστοποίησης παραμέτρων με δύο μεθόδους. Εξάλλου στα πλαίσια της εργασίας αυτής υπήρχε η δυνατότητα υποστήριξης από την ομάδα της USGS που το ανέπτυξε, για τη συμπλήρωση ή μεταβολή ρουτινών στον κώδικα του προγράμματος.

2.3.1 Συνοπτική περιγραφή του σκοπού ανάπτυξης του MMS (Leavesley et al., 1983)

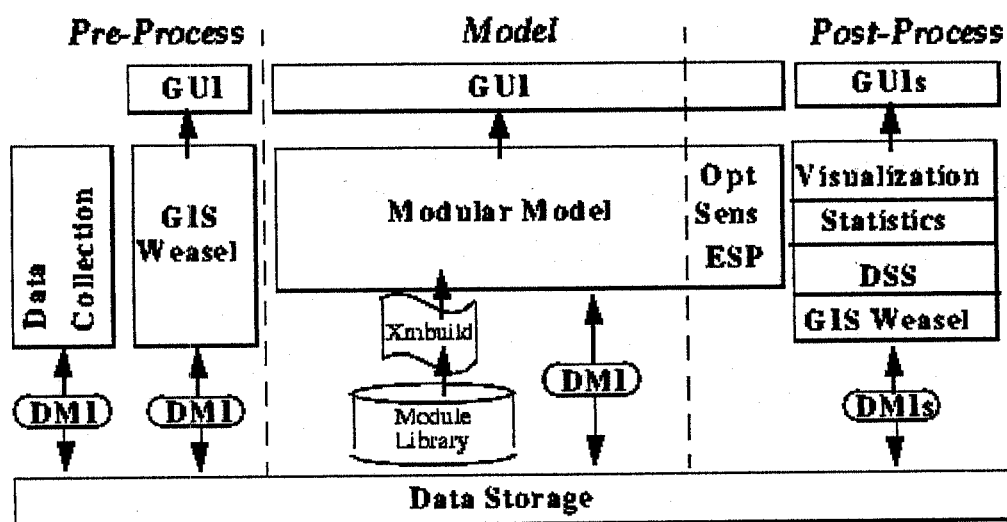
Modular Modeling System

Το MMS είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα λογισμικού, που αναπτύχθηκε ώστε να

- Παρέχει το πλαίσιο έρευνας και λειτουργίας που είναι απαραίτητο ώστε να ενισχυθεί η ανάπτυξη, ο έλεγχος και η αξιολόγηση των φυσικών αλγορίθμων.
- Διευκολύνει την ολοκλήρωση αλγορίθμων που επιλέγονται από τον χρήστη σε λειτουργικά μοντέλα φυσικών διεργασιών.
- Παρέχει ένα κοινό πλαίσιο, στο οποίο να εφαρμόζονται νέα ή υπάρχοντα μοντέλα και να αναλύονται τα αποτελέσματά τους.

Στο Σχήμα 2.3.1 παρουσιάζονται οι ακόλουθες τρεις κύριες συνιστώσες του υπολογιστικού πλαισίου MMS:

- i. *Pre-Process component*, που περιλαμβάνει την παρασκευή των δεδομένων, την παραμετροποίηση και τις συναρτήσεις ανάλυσης.
- ii. *Model component*, που αποτελεί τον πυρήνα του MMS και περιλαμβάνει τα εργαλεία ώστε να συνδέονται επιλεγμένες modules και να χτίζεται ένα πρόγραμμα.
- iii. *Post-Process component*, που παρέχει τα εργαλεία για την ανάλυση και εφαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου.



Σχήμα 2.3.1: Σχηματική παράσταση του MMS (Leavesley et al, 1993)

2.4 Επιλογή Υδρολογικού Μοντέλου

Λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων του επελέγη να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο PRMS (Σχήμα 2.4.1), όπως αυτό είναι ενταγμένο στο MMS, για την προσομοίωση της υδρολογικής λεκάνης του Ακρωτηρίου της Κύπρου. (Αναλυτική περιγραφή της περιοχής μελέτης γίνεται στο Κεφάλαιο 3).

Ακολουθεί μία αναλυτική παρουσίαση του μοντέλου, των συνιστωσών και των διεργασιών του.

2.4.1 Εννοιολογικό σύστημα λεκάνης απορροής

Δεδομένα εισόδου του μοντέλου PRMS αποτελούν η ημερήσια κατακρήμνιση, η μέγιστη και ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα και η ηλιακή ακτινοβολία. Τα ημερήσια κατακρημνίσματα είτε πρόκειται για βροχή ή χιόνι, είτε για μίγμα αυτών,

μειώνονται κατά ένα ποσοστό από την κατακράτηση και το υπόλοιπο είναι η καθαρή βροχόπτωση, η οποία φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Τα ενεργειακά δεδομένα της θερμοκρασίας αέρα και της ηλιακής ακτινοβολίας, αξιοποιούνται κατά τον υπολογισμό της εξάτμισης, της διαπνοής και της τήξης του χιονιού.

Το σύστημα της λεκάνης απορροής σχηματοποιείται σαν μια σειρά από ταμιευτήρες, των οποίων οι έξοδοι συνεισφέρουν στην συνολική απόκριση του συστήματος. Οι ταμιευτήρες αντιστοιχούν σε ζώνες κατακόρυφης διαίρεσης του εδάφους - υπεδάφους, ως εξής:

Ο ταμιευτήρας αδιαπέρατης ζώνης αντιπροσωπεύει μια περιοχή με μηδενική διήθηση. Ο ταμιευτήρας έχει μία μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης και η οποία θα πρέπει να ικανοποιηθεί πριν ξεκινήσει η επιφανειακή απορροή. Η αποθήκευση της κατακράτησης ελαττώνεται κατά την εξάτμιση, όταν η επιφάνεια δεν καλύπτεται από χιόνι.

Ο ταμιευτήρας εδαφικής ζώνης αντιπροσωπεύει εκείνο το τμήμα του εδαφικού μανδύα, το οποίο υφίσταται εξάτμιση και διαπνοή. Το μέσο βάθος του ριζοστρώματος της επικρατέστερης καλλιέργειας, το οποίο και καλύπτει τον εδαφικό μανδύα, αντιπροσωπεύει το βάθος αυτής της ζώνης. Η αποθήκευση νερού στην εδαφική ζώνη αυξάνεται από την διήθηση νερού βροχής ή τηγμένου χιονιού και μειώνεται κατά την εξατμισοδιαπνοή. Η μέγιστη δυνατότητα κατακράτησης παρατηρείται στην υδατοϊκανότητα, ενώ η ελάχιστη (ίση με το μηδέν) στο σημείο μαρασμού. Η εδαφική ζώνη αντιμετωπίζεται σαν ένα σύστημα με δύο στρώματα. Το ανώτερο στρώμα είναι η ζώνη τροφοδοσίας και είναι οριζόμενο από τον χρήστη όσον αφορά το βάθος του και την ικανότητα αποθήκευσης σε αυτό. Οι απώλειες από την ζώνη τροφοδοσίας θεωρείται ότι οφείλονται τόσο σε εξάτμιση όσο και σε διαπνοή. Οι απώλειες από την κατώτερη ζώνη οφείλονται μόνο στην διαπνοή. Ο υπολογισμός της διήθησης στην εδαφική ζώνη εξαρτάται από την μορφή των κατακρημνισμάτων (τήξη χιονιού ή βροχή). Όλο το λιωμένο χιόνι θεωρείται ότι διηθείται έως ότου φτάσει στην υδατοϊκανότητα. Στην υδατοϊκανότητα, κάθε περαιτέρω τήξη μοιράζεται μεταξύ διήθησης και επιφανειακής απορροής. Στην υδατοϊκανότητα η εδαφική ζώνη θεωρείται ότι έχει μία μέγιστη τιμή ημερήσιας χωρητικότητας. Όλη η τήξη που υπερβαίνει την μέγιστη αυτή τιμή, συνεισφέρει στην επιφανειακή απορροή. Η διήθηση σε υπέρβαση της υδατοϊκανότητας, αρχικά χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση της επαναφόρτισης του υπογείου υδροφορέα. Η επαναφόρτιση του

υδροφορέα θεωρείται ότι έχει ένα μέγιστο ημερήσιο όριο. Η υπόλοιπη διήθηση αφού ικανοποιηθεί η υπόγεια τροφοδοσία, γίνεται τροφοδοσία στον υποδερμικό ταμιευτήρα. Νερό διαθέσιμο για διήθηση που προκύπτει σε μία μέρα όπου έχουμε επεισόδιο βροχής επί χιονιού, αντιμετωπίζεται ως τήξη χιονιού αν το πάχος χιονιού δεν μειώνεται, και ως βροχή, αν μειώνεται.

Για βροχή σε μη χιονοσκεπή επιφάνεια, ο όγκος που διηθείται στην εδαφική ζώνη υπολογίζεται σαν συνάρτηση των χαρακτηριστικών του εδάφους, της περιεχόμενης υγρασίας και της έντασης της καταιγίδας. Για υπολογισμούς των ημερήσιων ροών, ο όγκος της βροχής που γίνεται επιφανειακή απορροή υπολογίζεται με την χρήση της αρχής της «συνεισφέρουσας επιφάνειας». Η ημερήσια διήθηση υπολογίζεται σαν «καθαρή βροχή – επιφανειακή απορροή».

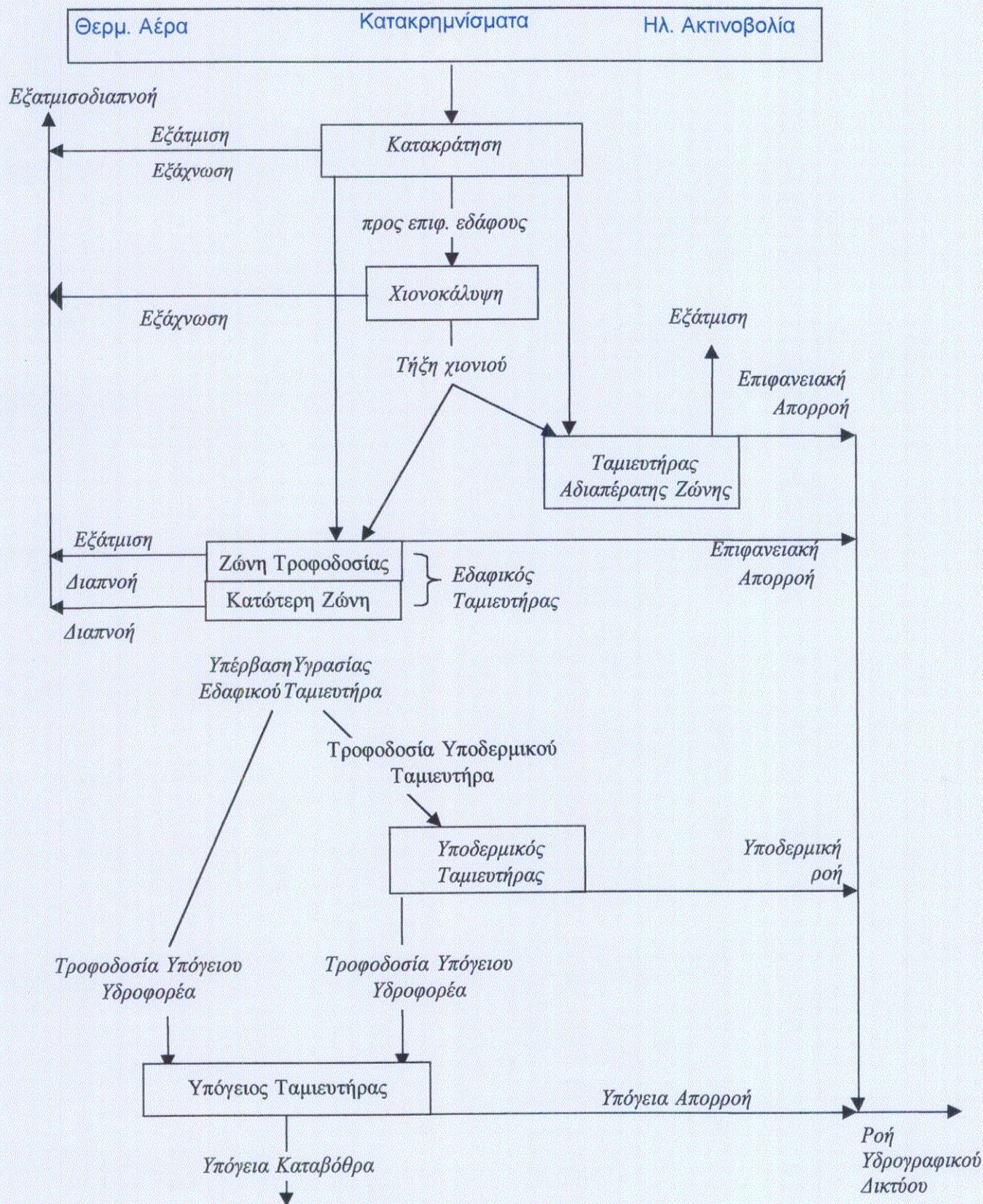
Για την δημιουργία υετογραφήματος-πλημμυρογραφήματος, η διήθηση υπολογίζεται με χρήση μιας μορφής της εξίσωσης Green and Ampt (Philip, 1954). Η επιφανειακή απορροή για αυτά τα γεγονότα είναι η καθαρή βροχή μείον την υπολογισμένη διήθηση. Η διήθηση που υπερβαίνει την υδατοϊκανότητα, αντιμετωπίζεται όμοια με την ημερήσια διήθηση.

Ο υποδερμικός ταμιευτήρας (ακόρεστη ζώνη) προσομοιώνει την σχετικά γρήγορη κίνηση του νερού από την ακόρεστη ζώνη στο υδρογραφικό δίκτυο. Η υποδερμική απορροή συμβαίνει κατά την διάρκεια περιόδων βροχής ή τήξης χιονιού, ή και αμέσως μετά. Πηγή της υποδερμικής ροής είναι η επιπλέον ποσότητα νερού που υπερβαίνει την υδατοϊκανότητα του εδάφους. Ο υποδερμικός ταμιευτήρας μπορεί να οριστεί ως γραμμικός ή μη γραμμικός.

Η τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα γίνεται από την εδαφική ζώνη και τον υποδερμικό ταμιευτήρα. Η ροή από την εδαφική ζώνη στον υδροφορέα έχει ένα άνω όριο και συμβαίνει μόνο όταν η υδατοϊκανότητα του εδαφικού στρώματος ξεπερνιέται. Η τροφοδοσία από τον υποδερμικό υδροφορέα υπολογίζεται σε ημερήσια βάση ως συνάρτηση του συντελεστή επαναφόρτισης και του όγκου του νερού που αποθηκεύθηκε στον υποδερμικό ταμιευτήρα. Ο υπόγειος ταμιευτήρας είναι γραμμικός και είναι η πηγή της βασικής απορροής. Η κίνηση του νερού μέσω του υπόγειου υδροφορέα σε σημεία εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος ή μέτρησης, μπορεί να ρυθμιστεί με μία ροή προς μία υπόγεια καταβόθρα, η οποία κίνηση υπολογίζεται ως συνάρτηση της αποθήκευσης στον υπόγειο ταμιευτήρα.

PRECIPITATION RUNOFF MODELING SYSTEM

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ



Σχήμα 2.4.1: Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου PRMS

Η ροή στα ρέματα είναι το άθροισμα της επιφανειακής, της υποδερμικής και της βασικής απορροής. Για προσομοιώσεις ημερήσιων ροών δεν γίνεται διόδευση κύματος.

2.4.2 Διαίρεση σε υδρολογικές ενότητες (HRU)

Η δυνατότητα μοντελοποίησης με ημικατανεμημένες παραμέτρους παρέχεται με τον χωρισμό της υδρολογικής λεκάνης σε ομογενείς ενότητες. Ο χωρισμός σε ενότητες μπορεί να γίνει με βάση χαρακτηριστικά όπως η κλίση, ο προσανατολισμός, το υψόμετρο, η φυτοκάλυψη, ο εδαφικός τύπος και η κατανομή της βροχόπτωσης. Κάθε ενότητα που χωρίζεται, θεωρείται ότι είναι ομοιογενής ως προς αυτά τα χαρακτηριστικά. Ο χωρισμός παρέχει την δυνατότητα αντιμετωπίζονται χωρικές και χρονικές μεταβολές των φυσικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης, κλιματικές μεταβλητές και αποκρίσεις του συστήματος. Ακόμη παρέχει την δυνατότητα να εισέρχονται χρήσεις γης ή κλιματικές αλλαγές σε τμήματα της περιοχής, ή σε όλη. Μπορούν να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις στην υδρολογία κάθε ενότητας και σε ολόκληρη την περιοχή.

Δύο επίπεδα διάκρισης είναι διαθέσιμα. Το πρώτο χωρίζει την λεκάνη στη βάση κάποιου ή κάποιων από τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν. Οι προκύπτουσες ενότητες ονομάζονται «ενότητες υδρολογικής απόκρισης» – Hydrologic Response Units (HRU) και κάθε μία θεωρείται ομογενής ως προς την υδραυλική απόκριση. Το υδρολογικό και ενεργειακό ισοζύγιο υπολογίζονται σε ημερήσια βάση για κάθε HRU. Το άθροισμα των αποκρίσεων των HRU, ανηγμένων στην μοναδιαία ενότητα, παράγει την ημερήσια απόκριση του συστήματος και της απορροής από την υδρολογική λεκάνη.

Το εννοιολογικό σύστημα λεκάνης απορροής του Σχήματος 2.4.1, μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε HRU. Όμως για μικρές λεκάνες, μόνο ένας εδαφικός ταμιευτήρας ορίζεται για κάθε HRU, ενώ ένας υπόγειος ταμιευτήρας ορίζεται για όλη την λεκάνη. Ένας ή περισσότεροι υποδερμικοί και υπόγειοι υδροφορείς μπορούν να οριστούν, σε συνάρτηση με τις διαφοροποιήσεις στα εδάφη και στην γεωλογία.

Το PRMS μπορεί να δεχθεί μέχρι και 50 HRU. Το μέγεθος και η θέση της κάθε HRU είναι συνάρτηση του αριθμού των φυσικών χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν για την διαίρεση, τον αριθμό και την θέση των σταθμών βροχής που υπάρχουν και το

πρόβλημα που θέλουμε να λύσουμε με το μοντέλο. Δεν υπάρχουν τρόποι για άμεσο και ταχύ χωρισμό σε ενότητες (προς το παρόν). Αυτό αποτελεί αντικείμενο προς διερεύνηση. Παρόλα αυτά ο αριθμός των HRU επηρεάζει την βαθμονόμηση και την προσαρμογή πολλών από τις συνιστώσες του μοντέλου (Leavesley and Stiffler, 1978).

Το δεύτερο επίπεδο χωρικής διαίρεσης χρησιμοποιείται για υπολογισμούς διάρκειας καταιγίδας. Η υδρολογική λεκάνη αντιμετωπίζεται ως μια σειρά διασυνδεδεμένων πλημμυροπεδιάδων και καναλιών. Κάθε HRU μπορεί να θεωρείται ως ενιαία πλημμυροπεδιάδα, ή μπορεί να χωρίζεται σε ένα πλήθος από πλημμυροπεδιάδες.

Οι συνιστώσες του υδρολογικού ισοζυγίου όπως έχουν εισαχθεί και υπολογίζονται στο μοντέλο PRMS παρουσιάζονται, μεταξύ άλλων στοιχείων της λειτουργίας του μοντέλου, στο **Παράρτημα Α**.

2.4.3 Επέκταση / προσαρμογή του μοντέλου PRMS

Λόγω της φτωχής δυνατότητας προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα στο αρχικό μοντέλο και λόγω των ελλείψεων μετρημένων απορροών στην περιοχή μελέτης, η βαθμονόμηση του μοντέλου δεν μπορούσε να γίνει με τον διαθέσιμο (στο αρχικό PRMS) κώδικα και τις υπορουτίνες του. Ως εκ τούτου, το μοντέλο προσαρμόστηκε και επεκτάθηκε για τις ανάγκες της εφαρμογής, ώστε να συνυπολογίζονται οι αντλήσεις από τον υδροφορέα και η στάθμη του του υπογείου νερού σε αυτόν.

2.5 Βελτιστοποίηση

Οι μέθοδοι αυτόματης βελτιστοποίησης έχουν ως σκοπό, με την χρήση μαθηματικών, να διευκολύνουν την εύρεση παραμέτρων κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος.

Το πρόβλημα της μη γραμμικής βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς ορίζεται ως

$$\text{Min } z = f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Η λύση των προβλημάτων αυτών ορίζονται με αλγόριθμο, ο οποίος περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Επιλογή αρχικού σημείου εκκίνησης $\mathbf{x}^{k=0} = (x_1^0, x_2^0, x_3^0, \dots, x_n^0)$.
2. Ορισμός διεύθυνσης αναζήτησης, $\mathbf{d}^k$.

3. Εύρεση νέου σημείου $\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \beta^k \mathbf{d}^k$, όπου β^k είναι το μέγεθος του βήματος που ελαχιστοποιεί την $f(\mathbf{x}^k + \beta^k \mathbf{d}^k)$.
4. Έλεγχος των κριτηρίων σύγκλισης για τερματισμό. Αν αυτά δεν πληρούνται, τότε προχωρούμε στην επόμενη δοκιμή $k+1$ επιστρέφοντας στο βήμα 1.

Οι διάφορες μέθοδοι μη γραμμικής βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον καθορισμό των διευθύνσεων αναζήτησης $\mathbf{d}^k$.

Οι βασικές κατηγορίες ορισμού της διεύθυνσης αναζήτησης, είναι

- ⊗ *Η μέθοδος της πιο απότομης κατάβασης (steepest descent).* Στην μέθοδο της πιο απότομης κατάβασης η πορεία σύγκλισης είναι αργή και η διεύθυνση μετακίνησης σε κάθε βήμα είναι κάθετη στην αντίστοιχη διεύθυνση του προηγούμενου βήματος. Η διεύθυνση αναζήτησης είναι η $-\nabla f(\mathbf{x})$.
- ⊗ *Η μέθοδος των συζυγών κλίσεων (conjugate gradient).* Στην μέθοδο των συζυγών κλίσεων για τον ορισμό της διεύθυνσης αναζήτησης σε κάθε βήμα, λαμβάνονται υπόψη και οι διευθύνσεις των προηγούμενων βημάτων (π.χ. η μέθοδος Fletcher-Reeves).
- ⊗ *Η μέθοδος Newton.* Η μέθοδος Newton συγκλίνει γρηγορότερα από όλες τις άλλες, αλλά το μειονέκτημά της είναι ότι απαιτεί την αντιστροφή του Εσσιανού μητρώου σε κάθε ολοκλήρωση, που είναι ένα υπολογιστικά δύσκολο έργο.
- ⊗ *Οι μέθοδοι quasi-Newton.* Οι μέθοδοι quasi-Newton αναπτύχθηκαν στην προσπάθεια να αποφευχθεί η αντιστροφή του Εσσιανού μητρώου, που γίνεται στην μέθοδο Newton και είναι διαφορετικές προσεγγίσεις του αντίστροφου Εσσιανού, κάθε μία από αυτές με διαφορετική μέθοδο (π.χ. η μέθοδος Davidon-Fletcher-Powell).

2.5.1 Βελτιστοποίηση στο υπολογιστικό πλαίσιο MMS

Οι μη γραμμικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης βασίζονται στην συστηματική αναζήτηση του μεγίστου/ελαχίστου της αντικειμενικής συνάρτησης κατά μήκος μιας σειράς αναζητήσεων σε ευθείες γραμμές. Σε κάθε μια από αυτές τις αναζητήσεις λύνεται ένα μονοδιάστατο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η νέα διεύθυνση αναζήτησης επιλέγεται κάθε φορά που βρίσκεται ένα βέλτιστο στο μονοδιάστατο πρόβλημα, όπως προαναφέρθηκε. Η κατεύθυνση προς την οποία η φορά αναζήτησης αυτών των

γραμμών επιλέγεται, ορίζει την διαφορά μεταξύ των διάφορων μη γραμμικών μεθόδων βελτιστοποίησης.

Η ικανότητα ενός αλγορίθμου μη γραμμικής βελτιστοποίησης μετριέται στα πλαίσια του ρυθμού σύγκλισης της διαδικασίας επίλυσης προς το βέλτιστο σημείο.

Ως παράμετρος του μοντέλου, με την ευρεία έννοια του όρου, ορίζεται ως τιμή η οποία αντιπροσωπεύει ένα χαρακτηριστικό μιας διαδικασίας και η οποία τιμή διατηρείται σταθερή κατά την διάρκεια ενός τρεξίματος προσομοίωσης.

Το μοντέλο παρέχει την δυνατότητα βελτιστοποίησης παραμέτρων με δύο μεθόδους:

1. Η πρώτη τεχνική βελτιστοποίησης είναι η Rosenbrock (Rosenbrock, 1960) όπως εισήχθη στο PRMS από τους Leavesley and others (1983).
2. Η δεύτερη τεχνική είναι η Hyper Tunnel από τους Restrepo-Posada and Bras (1982).

2.5.1.1 Μέθοδος Rosenbrock (1960)

Η μέθοδος βελτιστοποίησης του Rosenbrock αναπτύχθηκε ώστε να αντιμετωπιστούν τα ακόλουθα ζητήματα που δεν μπορούσαν να λύσουν οι παλιότερες μέθοδοι βελτιστοποίησης:

1. Βελτιστοποίηση μίας παραμέτρου κάθε φορά.
2. Δυσκολίες στην σύγκλιση, ιδίως όταν υπάρχει ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα στις διαφορετικές παραμέτρους.

Πρόκειται για μία παραλλαγή/συνδυασμό των μεθόδων της πιο απότομης κατάβασης και των συζυγών κλίσεων, με την οποία αποφεύγεται ο αριθμητικός υπολογισμός των μερικών παράγωγων της προς βελτιστοποίηση συνάρτησης στην αρχή κάθε βήματος. Η μέθοδος αυτή μπορεί να αντιμετωπίσει και περιορισμούς στις μεταβλητές (π.χ. ανισότητες).

Η μεθοδολογία Rosenbrock

Ορισμός του βήματος

Με την υπόθεση ότι η διεύθυνση μετακίνησης είναι γνωστή, το αρχικό βήμα παίρνει μια τυχαία τιμή λ και εφαρμόζεται για μια διεύθυνση, η οποία θεωρείται γνωστή. Αν η τιμή της συνάρτησης στο νέο σημείο είναι μικρότερη ή ίση από την αρχική, τότε το

βήμα θεωρείται επιτυχές και το λ πολλαπλασιάζεται με αριθμό $\alpha > 1$. Αν το βήμα είναι ανεπιτυχές, η τιμή του λ πολλαπλασιάζεται με αριθμό $-\beta$, με $0 < \beta < 1$. Αν δεν υπάρχει μεγάλη μεταβολή στην τιμή της συνάρτησης το βήμα αυξάνεται στην επόμενη προσπάθεια.

Ορισμός της διεύθυνσης

Η μέθοδος προτείνει την ταυτόχρονη αναζήτηση σε n ορθογώνιες διευθύνσεις $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$. Με τον τρόπο αυτό εξετάζονται γειτονικά σημεία σε κάθε μία από τις διευθύνσεις, ώστε να οριστεί εκ των προτέρων η καλύτερη διεύθυνση. Αν ένα από τα εξεταζόμενα σημεία κάνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης u μικρότερη από την προηγούμενη, το σημείο αυτό λαμβάνεται ως το νέο σημείο εκκίνησης.

Η μέθοδος για την εύρεση των νέων διευθύνσεων του ξ , περιληπτικά, έχει ως εξής:

Θέτουμε d_1 το αλγεβρικό άθροισμα όλων των επιτυχών βημάτων λ_1 στην διεύθυνση ξ_1 κ.λ.π. και

$$A_1 = d_1^0 \xi_1^0 + d_2^0 \xi_2^0 + \dots + d_n^0 \xi_n^0$$

$$A_2 = d_2^0 \xi_2^0 + \dots + d_n^0 \xi_n^0$$

.....

$$A_n = d_n^0 \xi_n^0$$

Το A_1 είναι το διάνυσμα που ενώνει τα αρχικά και τελικά σημεία που πήραμε με την χρήση των διανυσμάτων $\xi_1^0, \xi_2^0, \dots, \xi_n^0$, A_2 το άθροισμα όλων των προόδων σε όλες τις διευθύνσεις πλην της αρχικής κ.λ.π.

Στην συνέχεια υπολογίζονται τα ορθογώνια διανύσματα $\xi_1^1, \xi_2^1, \dots, \xi_n^1$, ως εξής:

$$B_1 = A_1$$

$$\xi_1^1 = B_1 / |B_1|$$

$$B_2 = A_2 - A_1 \cdot \xi_1^1 \xi_1^1$$

$$\xi_2^1 = B_2 / |B_2|$$

.....

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, κανένα d δεν είναι μηδενικό. Το αποτέλεσμα είναι ότι το ξ_1 βρίσκεται κατά μήκος της διεύθυνσης της πιο γρήγορης προόδου και το ξ_2 κατά μήκος της καλύτερης διεύθυνσης που μπορεί να βρεθεί κάθετα στην ξ_1 κλπ.

Εισαγωγή περιορισμών

Η λύση που δόθηκε στο πρόβλημα της εισαγωγής των περιορισμών ήταν να πολλαπλασιαστεί η τιμή της u με λ συναρτήσεις ($\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_\lambda$) κάθε μία από τις οποίες σχετίζεται με μεταβλητή και έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Είναι ίση με 0 αν η τιμή της σχετιζόμενης μεταβλητής είναι εκτός των περιορισμών.
- Είναι ίση με 1, αν η τιμή της μεταβλητής είναι εντός της περιοχής που ορίζουν οι περιορισμοί. [Το εύρος της περιοχής αυτής είναι λίγο μικρότερο από αυτό που ορίζουν οι περιορισμοί, διότι εκατέρωθεν των πλευρών της ορίζονται δύο ζώνες με μικρό πλάτος που ονομάζονται οριακές ζώνες (boundary regions)].
- Εντός των οριακών ζωνών, η τιμή των συναρτήσεων κινείται παραβολικά από το 0 έως το 1.

Για παράδειγμα, αν η οριακή ζώνη για το x_i εκτείνεται από το g_λ στο $g_{\lambda+1}$ και από το $h_{\lambda+1}$ στο h_λ , η συνάρτηση είναι

$$\phi_i = 0, \quad x_i < g_\lambda$$

$$\phi_i = 1 - \left(\frac{g_{\lambda+1} - x_i}{g_{\lambda+1} - g_\lambda} \right)^2, \quad g_\lambda < x_i < g_{\lambda+1}$$

$$\phi_i = 1 - \left(\frac{x_i - h_{\lambda+1}}{h_\lambda - h_{\lambda+1}} \right)^2, \quad h_{\lambda+1} < x_i < h_\lambda$$

$$\phi_i = 1, \quad g_{i+\lambda} < x_i < h_{\lambda+1}$$

$$\phi_i = 0, \quad h_\lambda < x_i$$

Το αποτέλεσμα

$$u' = \phi_1 \phi_2 \dots \phi_\lambda u$$

θα είναι μηδέν, αν κάποια από τις μεταβλητές δεν ικανοποιήσουν τα όρια, και θα είναι ίση με την u , αν όλες οι μεταβλητές κυμαίνονται εντός των περιορισμών και εντός των οριακών ζωνών. Μέσα στην οριακή ζώνη, η u' κυμαίνεται από u στο 0. Αν η οριακή ζώνη είναι αρκετά στενή, η μέγιστη τιμή της u' θα είναι πολύ καλή προσέγγιση του ζητούμενου.

2.5.1.1α Περιγραφή λειτουργίας μεθόδου

Για να ξεκινήσει η διαδικασία προσαρμογής, στο μοντέλο μπαίνουν ένα αρχικό σύνολο τιμών παραμέτρων καθώς και άνω (HU) και κάτω (GU) όρια για κάθε παράμετρο. Το μοντέλο τρέχει και η αντικειμενική συνάρτηση (OBF) υπολογίζεται και αποθηκεύεται σαν τιμή αναφοράς. Κάθε παράμετρος αντιπροσωπεύει έναν άξονα σε ένα ορθογώνιο σύστημα με NV διευθύνσεις αναζήτησης.

Ένα βήμα με μέγεθος που ορίζεται από τον χρήστη (ως ποσοστό της τιμής της παραμέτρου) γίνεται κατά την πρώτη διεύθυνση της αναζήτησης και το μοντέλο τρέχει πάλι με την νέα τιμή της παραμέτρου. Αν η προκύπτουσα τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μικρότερη ή ίση με την τιμή αναφοράς, η προσπάθεια καταμετράται ως επιτυχία και το κατάλληλο μέγεθος βήματος για κάθε παράμετρο πολλαπλασιάζεται με το 3 για την νέα τροποποίηση κατά μήκος αυτού του άξονα. Αν έχουμε αποτυχία, το βήμα δεν επιτρέπεται και το μέγεθός του πολλαπλασιάζεται με το $-1/2$. Αυτό σημαίνει ότι η νέα τροποποίηση κατά μήκος αυτού του άξονα θα γίνει προς την αντίθετη κατεύθυνση και μόνο με το μισό του υπάρχοντος μέγεθους βήματος. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια.

Σε αυτό το σημείο, ορίζεται μία νέα ορθογώνια διεύθυνση αναζήτησης με βάση την εμπειρία της μετακίνησης των παραμέτρων κατά το προηγούμενο στάδιο και ξεκινά ένα άλλο στάδιο βελτιστοποίησης. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και οι σχετικές τιμές των παραμέτρων τυπώνονται για κάθε προσπάθεια.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται και συνεχίζεται, έως ότου να επιτευχθεί η σύγκλιση ή έως να ολοκληρωθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός προσαρμογών ($NV \times NTRY$, όπου NTRY ο αριθμός των προσαρμογών ανά παράμετρο).

Το κύριο χαρακτηριστικό της διαδικασίας αυτής είναι ότι μετά το πρώτο στάδιο, ο ένας άξονας διευθύνεται κατά μια κατεύθυνση η οποία αντανακλά την καθαρή μετακίνηση των παραμέτρων που φάνηκε στο προηγούμενο στάδιο.

2.5.1.1β Βελτιστοποίηση κατά Rosenbrock στο υπολογιστικό πλαίσιο MMS

Με την επιλογή της μεθόδου Rosenbrock από το μενού, ενεργοποιείται το παράθυρο της βελτιστοποίησης Rosenbrock. Ορίζεται μία περίοδος αρχικοποίησης (initialisation) η χρησιμότητά της οποίας είναι ότι επιτρέπει στο μοντέλο να τρέξει μερικές φορές ώστε να απαλειφθεί το αποτέλεσμα των αρχικών τιμών που ορίστηκαν από τον χρήστη για τις μεταβλητές κατάστασης κατά το ξεκίνημα του μοντέλου. Το μοντέλο θα τρέξει μία φορά για την χρονική διάρκεια αρχικοποίησης και μετά θα τρέξει επαναληπτικά για την διάρκεια βελτιστοποίησης με χρήση των τιμών των παραμέτρων κατάστασης που βρέθηκαν κατά το τρέξιμο της αρχικοποίησης, ως αρχικές συνθήκες για την πλήρη βελτιστοποίηση. Αν στις επιλογές της περιόδου αρχικοποίησης τεθούν όλα μηδέν, τότε καταργείται η χρήση της περιόδου αυτής.

Το μοντέλο μπορεί να τρέχει για μία περίοδο, αλλά η αντικειμενική συνάρτηση να υπολογίζεται για ένα υπο-διάστημα αυτής της περιόδου. Έτσι μπορεί να τεθεί κι ο πρώτος και τελευταίος μήνας του διαστήματος που θέλουμε να βελτιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση, στα αντίστοιχα πεδία.

Οι επιλογές της βελτιστοποίησης επιτρέπουν να ορίζεται η αντικειμενική συνάρτηση και οι παράμετροι. Η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζεται ως συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ παρατηρημένων και υπολογισμένων τιμών. Η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να είναι ή όχι μετασχηματισμένη (λογαριθμικά) και το άθροισμα της αντικειμενικής συναρτησης να είναι απόλυτο σφάλμα ή τετραγωνικό σφάλμα.

Οι μεταβλητές της αντικειμενικής συνάρτησης επιλέγονται από το σχετικό μενού και προέρχονται από όλες τις μεταβλητές του μοντέλου. Οι παράμετροι επιλέγονται από το σχετικό μενού και μεταξύ όλων των παραμέτρων του μοντέλου. Για κατανεμημένες παραμέτρους πρέπει να οριστούν οι αντίστοιχοι δείκτες. Τα πρόσθετα στοιχεία που πρέπει να οριστούν είναι το αρχικό μέγεθος του βήματος για την προσαρμογή των παραμέτρων, και τα άνω και κάτω όρια τιμών τους. Το αρχικό μέγεθος βήματος ορίζεται ως δεκαδικό ποσοστό του μεγέθους της παραμέτρου. Η τιμή 0.1 θα οδηγήσει την παράμετρο να αυξηθεί κατά 10 % στην πρώτη ολοκλήρωση της διαδικασίας προσαρμογής. Οι άνω και κάτω περιορισμοί, εκφράζονται στις μονάδες της παραμέτρου και ορίζουν την περιοχή στην οποία κυμαίνεται η παράμετρος.

Στην βελτιστοποίηση κατανεμημένης παραμέτρου, όλες οι τιμές της ή μόνο ένα επιλεγμένο σύνολο αντιμετωπίζονται συνολικά. Δηλαδή όλες αυξάνονται ή μειώνονται κατά το ίδιο ποσοστό. Ο χρήστης μπορεί να επιλέγει τον τρόπο με τον οποίο γίνονται οι αλλαγές στις κατανεμημένες παραμέτρους. Μία επιλογή είναι να αλλάζουν όλες κατά το ίδιο μέγεθος και η άλλη είναι να αλλάζουν κατά το ίδιο ποσοστό των αρχικών τους τιμών.

Οι επαναλήψεις για τις οποίες τρέχει το μοντέλο ορίζονται και αυτές από τον χρήστη. Σε κάθε επανάληψη, όλες οι παράμετροι αλλάζουν.

Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης εξάγεται σε δύο αρχεία. Ένα περιλαμβάνει τα αποτελέσματα του μοντέλου και το άλλο τις αρχικές και τελικές τιμές των παραμέτρων και την αρχική και τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και την τιμή της στις ενδιάμεσες ολοκληρώσεις.

Οι νέες τιμές των παραμέτρων ενημερώνουν αυτόματα το αρχείο των παραμέτρων.

2.5.1.2 Βελτιστοποίηση κατά Hyper Tunnel

Η μέθοδος βελτιστοποίησης Hyper Tunnel είναι μία παραλλαγή της διαδικασίας βελτιστοποίησης DFP, των Davidon, 1959 - Fletcher-Powell, 1963 (βλ. Luenberger, 1973). Η DFP είναι διαδικασία μη γραμμικής βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, η οποία προσεγγίζει το Εσσιανό μητρώο ή το αντίστροφό του χρησιμοποιώντας πληροφορίες που προκύπτουν από τις πρώτες παραγώγους της αντικειμενικής συνάρτησης.

Ένα σύνηθες πρόβλημα στη εκτίμηση παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων είναι η αδυναμία τους να συγκλίνουν σε ένα σύνολο εφικτών παραμέτρων. Αυτό μπορεί να συμβαίνει είτε λόγω των προβλημάτων στην διαδικασία αναζήτησης του βελτίστου, είτε σε δομικά λάθη του μοντέλου. Για την λύση αυτού του προβλήματος προτάθηκε η εισαγωγή γραμμικών περιορισμών στην διαδικασία βελτιστοποίησης.

Ένα δεύτερο πρόβλημα είναι ο υπολογιστικός χρόνος για την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης. Οι πιο ικανοί αλγόριθμοι είναι ταυτόχρονα και οι πιο αργοί.

Η μέθοδος Hyper Tunnel περιέχει τις δύο μεταβολές που έγιναν στην DFP: Χρήση περιορισμών για την δυνατότητα εισαγωγής μέγιστων και ελάχιστων τιμών παραμέτρων και ο αποκλεισμός από την αντικειμενική συνάρτηση των παραμέτρων,

στις οποίες αυτή είναι λιγότερο ευαίσθητη, έτσι ώστε ο χρόνος βελτιστοποίησης να ελαττωθεί.

Ακολουθεί η περιγραφή της μεθόδου βελτιστοποίησης.

2.5.1.2α Διαδικασία βελτιστοποίησης με την Hyper Tunnel

Ένας τυπικός αλγόριθμος είναι αυτός των Davidon-Fletcher-Powell (DFP) (βλ. Luenberger, 1973). Τα βήματα που ακολουθούνται είναι:

1. Ξεκινούμε με ένα συμμετρικό θετικά ορισμένο μητρώο $\mathbf{H}_0$ (Εσσιανό), και διάνυσμα απόφασης, $\mathbf{x}_0$.
2. Θέτουμε $\mathbf{d}^k = -\mathbf{H}^k \nabla f(\mathbf{x}^k)$, όπου $\mathbf{H}^k$ είναι η προσέγγιση στο αντίστροφο Εσσιανό και $\mathbf{d}^k$ είναι η κατεύθυνση αναζήτησης.
3. Επιλέγουμε το β^k ώστε να ελαχιστοποιείται η $f(\mathbf{x}^k + \beta^k \mathbf{d}^k)$ έτσι υπολογίζουμε το $f(\mathbf{x}^{k+1})$. Θέτουμε $\mathbf{p}^k = \beta^k \mathbf{d}^k$ και $\mathbf{q}^k = \nabla f(\mathbf{x}^{k+1}) - \nabla f(\mathbf{x}^k)$.
4. Βελτιώνουμε των προσέγγιση στο αντίστροφο Εσσιανό ως προς

$$\mathbf{H}^{k+1} = \mathbf{H}^k + \frac{\mathbf{p}^k \mathbf{p}^{kT}}{\mathbf{p}^{kT} \mathbf{q}^k} - \frac{\mathbf{H}^k \mathbf{q}^k \mathbf{q}^{kT} \mathbf{H}^k}{\mathbf{q}^{kT} \mathbf{H}^k \mathbf{q}^k}$$

όπου ο εκθέτης T συμβολίζει το ανάστροφο μητρώο

Η βελτιστοποίηση σταματά, όταν με αξιολόγηση της διεύθυνσης αναζήτησης ή του $\beta_k \mathbf{d}_k$, συμβαίνει ένα από τα ακόλουθα:

- Κάθε συνιστώσα της $\mathbf{d}_k$ ή $\beta_k \mathbf{d}_k$ είναι μικρότερη από μία προκαθορισμένη τιμή.
- Το υπολογισμένο μήκος για κάθε ένα από τα διανύσματα από το ελάχιστο είναι μικρότερο μιας προκαθορισμένης τιμής.

Η προσθήκη της μεθόδου Hyper Tunnel είναι η εισαγωγή γραμμικών περιορισμών στην μέθοδο DFP, καθώς και η απόρριψη από την βελτιστοποίηση εκείνων των παραμέτρων, οι οποίες είναι κάθετες προς την διεύθυνση αναζήτησης, ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος. Όταν αυτές οι παράμετροι βγαίνουν από τον χώρο αναζήτησης, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων που απομένουν προχωρά με μεγάλη ταχύτητα, σαν να έχει οριστεί ένας δισδιάστατος υπερ-διάυλος (Hyper Tunnel - από αυτό έχει προκύψει και το όνομα της μεθόδου).

Επειδή όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, συχνά η εκτίμηση παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων δεν συγκλίνει σε ένα σύνολο εφικτών παραμέτρων, λόγω ασυμβατότητας μεταξύ μοντέλου και δεδομένων, η βέλτιστη παράμετρος μπορεί να ανήκει ένα μη εφικτό σύνολο. Η λύση είναι, από ανάγκη, μια προσέγγιση βελτιστοποίησης με περιορισμούς.

2.5.1.2β Βελτιστοποίηση κατά *Hyper Tunnel* στο υπολογιστικό πλαίσιο *MMS*

Η κατεύθυνση αναζήτησης υπολογίζεται με βάση την πρόσφατη βαθμίδα και τον Εσσιανό πίνακα και προχωρούμε κατά αυτήν την διεύθυνση. Σε αυτό το σημείο το Εσσιανό ξαναυπολογίζεται και ορίζεται μία νέα κατεύθυνση αναζήτησης. Το σύνολο των παραμέτρων αναθεωρείται, ώστε να αποκλειστούν οι παράμετροι που δεν έχουν ευαισθησία και να περιληφθούν αυτές που έχουν την μέγιστη.

Η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση ορίζεται ως το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ παρατηρημένων και μετρημένων τιμών των μεταβλητών (στην περίπτωση μας, παρατηρημένης και μετρημένης στάθμης στον υδροφορέα). Το κριτήριο σύγκλισης βασίζεται στην αλλαγή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Όλα τα στοιχεία της βελτιστοποίησης αυτής είναι τα ίδια με της Rosenbrock που αναφέρθηκε παραπάνω.

Έως δέκα παράμετροι μπορούν να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα και τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης ενημερώνουν το αρχείο των παραμέτρων, ταυτόχρονα με την δημιουργία των δύο αρχείων με τα αποτελέσματα του μοντέλου και την πορεία της βελτιστοποίησης.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μία σύντομη παρουσίαση της περιοχής, η οποία θα προσομοιωθεί με το υδρολογικό μοντέλο PRMS. Τα δεδομένα που παρουσιάζονται εδώ προέρχονται ως επί το πλείστον από τις μελέτες που αναφέρονται στην Εισαγωγή που ακολουθεί.

3.1 Εισαγωγή

Στην Κύπρο (Σχήμα 3.1.1) η συλλογή υδρολογικών και μετεωρολογικών δεδομένων ξεκίνησαν το έτος 1881. Σήμερα οι υδρολογικές μετρήσεις και οι σχετικές μελέτες πραγματοποιούνται από το τμήμα Ανάπτυξης Υδάτων και οι μετεωρολογικές από την Μετεωρολογική Υπηρεσία. Και τα δύο τμήματα ανήκουν στο Υπουργείο Γεωργίας, Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.



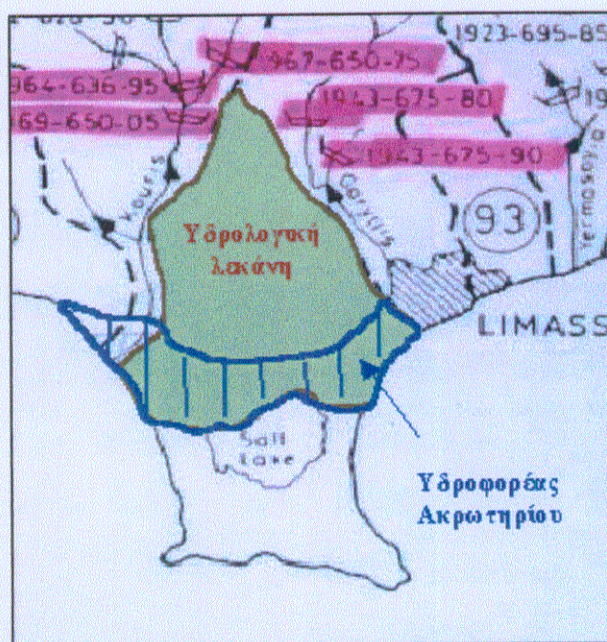
Σχήμα 3.1.1: Γενικός χάρτης της Κύπρου

Ο Υδροφορέας του Ακρωτηρίου (διαγραμμισμένη περιοχή στο Σχήμα 3.1.2) βρίσκεται υπό συνεχή έρευνα και εκτεταμένη εκμετάλλευση τα τελευταία 30 χρόνια. Η πρώτη επιχείρηση να υπολογιστεί ένα υδατικό ισοζύγιο είχε γίνει από την TAHAL (Fink, 1965), ενώ συμπληρωματικές πληροφορίες για τις ιδιότητες του υδροφορέα συγκεντρώθηκαν κατά την διάρκεια του “Akrotiri Irrigation Project” το 1970 (δημοσίευση των Humphreys & Sons, et al. το 1972). Ένα μοντέλο υπόγειου νερού βαθμονομήθηκε μεταξύ 1967-1972 (Ιακωβίδης, 1973 and Kitching, 1975). Λόγω της απόκτησης συνεχώς νέων στοιχείων και μεταβολής τόσο των ποσοτήτων, όσο και του σχεδίου απόληψης του υπόγειου νερού του υδροφορέα (εισαγωγή νερού από τα

φράγματα της Γερμασόγειας και του Γαρύλλη στα NE), το μοντέλο αναθεωρήθηκε από το Πρόγραμμα του Νοτίου Αγωγού το 1977.

Η μελέτη “Environmental Study and Management plan for the Akrotiri Salt Lake and Wetlands – Annexes”, που πραγματοποιήθηκε από τους Balasha-Jalon Consultants & Engineers και Phedonos Consultants LTD (Ιούνιος 1992) εξετάζει μεταξύ άλλων, την επίδραση της κατασκευής του φράγματος του Κούρη στον Υδροφορέα του Ακρωτηρίου και τις δυνατότητες διαχείρισης του Βάλτου του Φασουρίου.

Η πιο πρόσφατη μελέτη του Υδροφορέα του Ακρωτηρίου – όσο είναι δυνατόν να γνωρίζουμε – πραγματοποιήθηκε από τους Νικολαΐδης & Co. (Μάρτιος 1999). Με τον τίτλο “Environmental Impact Assessment Study of the Recharge of the Akrotiri Aquifer with recycled water generated at the Lemessos Sewage Treatment Plant and its reuse for Agricultural purposes”, στην οποία όμως προσομοιώνεται μόνο το δυτικό τμήμα του υδροφορέα, με την χρήση του προγράμματος MODFLOW.



Σχήμα 3.1.2: Υδρολογική λεκάνη και υδροφορέας (Πηγή: Stream gauging stations location map, Department of Water Development, Cyprus)

3.2 Σημασία του υδροφορέα

Ο Υδροφορέας του Ακρωτηρίου είναι ο σημαντικότερος υδροφορέας στην χερσόνησο του Ακρωτηρίου. Βρίσκεται στα νότια της Λευκωσίας και στα δυτικά της Λεμεσού. Οι υπάρχουσες γεωτρήσεις και πηγάδια της περιοχής αριθμούνται από το

3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Περιοχή Μελέτης

1-1784, αλλά εκείνα που τυγχάνουν εκμετάλλευσης ανά έτος δεν είναι γνωστά με μεγάλη ακρίβεια. Από τα δεδομένα που είχαμε διαθέσιμα κατά τα έτη 1989-1999, υπολογίστηκε ένας μέσος αριθμός 263 γεωτρήσεων και πηγαδιών που χρησιμοποιούνται στην απόληψη του υπόγειου νερού. Το υπόγειο νερό χρησιμοποιείται για την ύδρευση των χωριών και των Βρετανικών Βάσεων της περιοχής και κατά ένα μικρό ποσοστό για την ύδρευση της Λεμεσού (έως το 1998), καθώς και για άρδευση των καλλιεργειών και για την βιομηχανία.

Η υδρολογική λεκάνη – που ορίζεται ως περιοχή 9.5 στο Σχήμα 3.1.2 – δεν συμπίπτει με τον υδροφορέα του Ακρωτηρίου, παρά μόνο σε κάποιο ποσοστό. Η λεκάνη έχει έκταση περίπου 78 km^2 (από το βόρειο σημείο της έως το νότιο άκρο του υδροφορέα), ενώ ο υδροφορέας μόνο 40 km^2 . Ο υδροφορέας καταλαμβάνει το νότιο άκρο της υδρολογικής λεκάνης, αλλά εκτείνεται στα δυτικά, εκτός των ορίων αυτής, δηλ. δυτικά του ποταμού Κούρη.

3.3 Υφιστάμενη κατάσταση

Λόγω του χαμηλού υψομέτρου της περιοχής, της μικρής υδραυλικής κλίσης στον υδροφορέα και της εκτεταμένης επαφής του με την θάλασσα, η εισροή της θάλασσας στον υπόγειο υδροφορέα είναι ήδη γεγονός στις παράκτιες περιοχές. Η δυτική παραλιακή περιοχή υφίσταται ήδη εισροή της θάλασσας σε μια απόσταση 1,2 km από την ακτή, ενώ η ζώνη μετάβασης είναι μάλλον απότομη, σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα (η συγκέντρωση των ολικών διαλελυμένων στερεών (TDS) στο υπόγειο νερό κυμαίνεται από 10.000 – 1000 ppm σε μία απόσταση 500m). Στο ανατολικό παραλιακό τμήμα οι συγκεντρώσεις TDS κυμαίνονται από 2000 ppm στην ακτή σε 1000 ppm προς τον βορρά, σε απόσταση 2 km.

Κατά την περασμένη δεκαετία (1987-1997) η μέση ετήσια πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα ήταν 0.09 m, το οποίο σημαίνει ότι τα υδατικά αποθέματα υφίσταντο «εξόρυξη». Κατά την προσπάθεια να μειωθεί το έλλειμμα σε υδατικούς όγκους, έγινε εισαγωγή νερού από επιφανειακές πηγές εκτός της λεκάνης απορροής, όταν αυτό ήταν εφικτό, και χρησιμοποιήθηκε ως τεχνητός εμπλουτισμός στον υδροφορέα (1988 – 1998). Ο εμπλουτισμός εφαρμόστηκε με δεξαμενές και σε κατάλληλα διαμορφωμένα εδάφη (spreading grounds). Τα δύο τελευταία χρόνια λόγω της συνεχούς ελάττωσης της ετήσιας βροχόπτωσης και της επακόλουθης μείωσης των

αποθεμάτων στα φράγματα, δεν υπήρχε διαθέσιμο νερό ώστε να χρησιμοποιηθεί για τεχνητό εμπλουτισμό.

Η μείωση των ετήσιων κατακρημνισμάτων τα δύο τελευταία χρόνια 1998-1999, προκάλεσε και μία άμεση ελάττωση των αντλούμενων όγκων του νερού από τον υδροφορέα. Κατά το 1997, ο ολικός όγκος του νερού που αντλήθηκε ήταν 7,6 εκατ. m^3 , το 1998 η άντληση περιορίστηκε στο 85% του 1997, και το 1999 περιορίστηκε πιο πολύ, στο 77% του 1997. Όμως ο πραγματικός όγκος των απολήψεων δεν είναι δυνατόν να γίνει γνωστός με ακρίβεια.

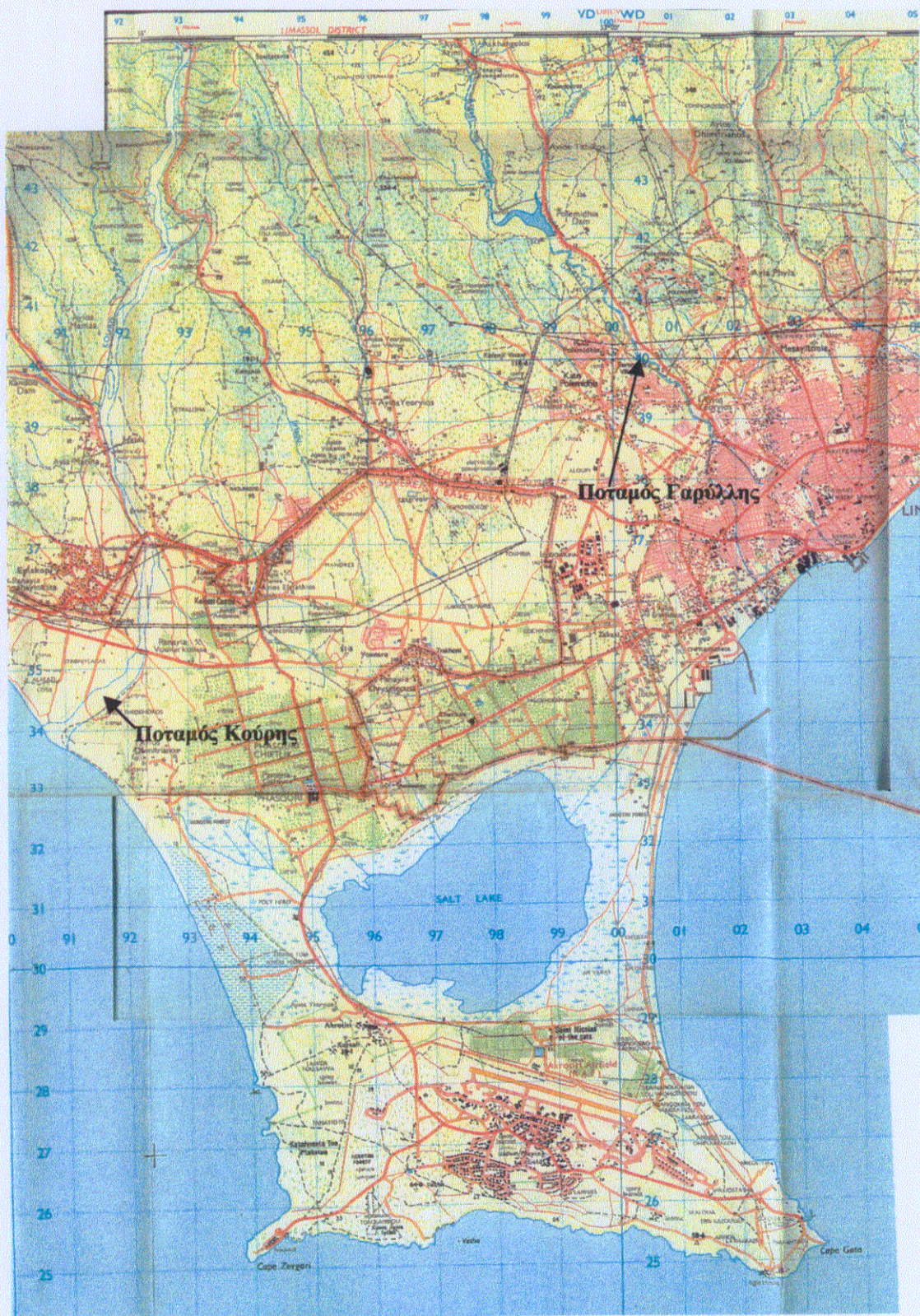
Ο μέσος όγκος αντλούμενων υδάτων για την τροφοδοσία της πόλης της Λεμεσού ήταν 3 εκατ. m^3 το 1991, 2.5 εκατ. m^3 το 1994 και μόνο 0.9 εκατ. m^3 το 1997. Οι γεωτρήσεις, οι οποίες προμήθευαν πόσιμο νερό στα χωριά και σε ένα ποσοστό και στην πόλη της Λεμεσού, πρακτικά σταμάτησαν το 1999 και η ζήτηση καλύφθηκε από το φράγμα του Κούρη. Ακόμα και οι καλλιέργειες δεν ποτίστηκαν με βάση τις ανάγκες τους, τόσο όσον αφορά την ποσότητα νερού όσο και τον χρόνο εφαρμογής του.

3.4 Θέση και φυσικό περιβάλλον

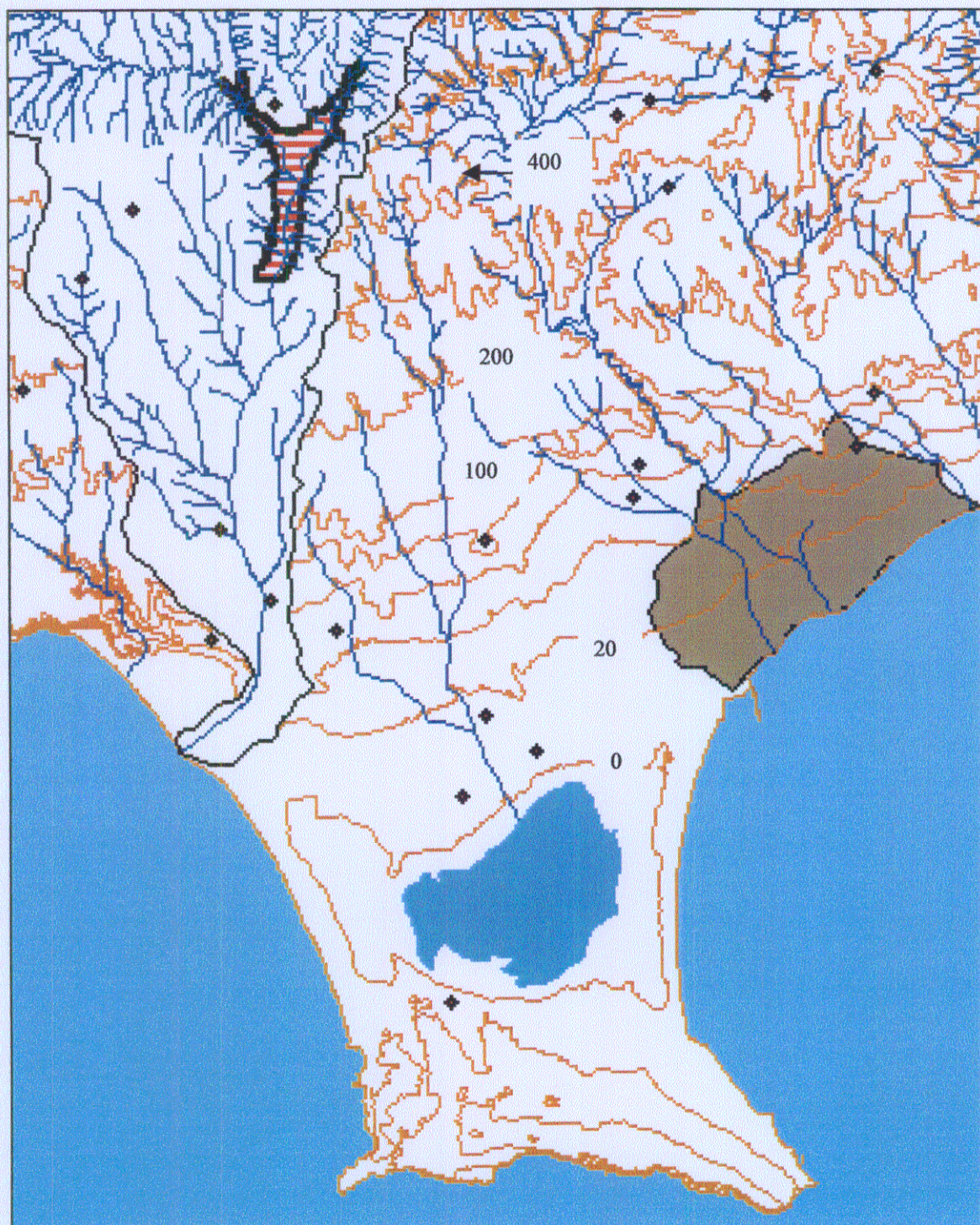
Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην χερσόνησο του Ακρωτηρίου στην νότια Κύπρο, (συντεταγμένες 39N88E - 39N01E και 31N88E - 31N01E). Η δυτική ακτή βρέχεται από τον κόλπο της Επισκοπής και η ανατολική από τον κόλπο του Ακρωτηρίου. Η πόλη της Λεμεσού βρίσκεται στα ανατολικά (Σχήμα 3.4.1).

Το ανάγλυφο της λεκάνης είναι ομαλό και λοφώδες (Σχήμα 3.4.2). Μόνο το βόρειο τμήμα της λεκάνης (περίπου το 1/3 αυτής) έχει μέσο υψόμετρο 200 m, ενώ το υψόμετρο της περιοχής του υδροφορέα, κυμαίνεται από 50 m στο βόρειο όριό του έως 0 m, στην ακτή.

Στο Σχήμα 3.4.3, το οποίο είναι αεροφωτογραφία της περιοχής του υδροφορέα διακρίνονται οι χρήσεις γης στην περιοχή, αγροτεμάχια, δρόμοι, οικισμοί καθώς και το ανάγλυφο.



Σχήμα 3.4.1: Γενικός χάρτης της περιοχής (Πηγή: Χάρτης Limassol, 1:50000, Series K717, Sheet 23, Edition 2-GSGS)



Σχήμα 3.4.2: Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής (Πηγή: Εταιρεία Geoinfo)



Σχήμα 3.4.3: Αεροφωτογραφία της περιοχής με εμφανείς τις χρήσεις γης

(Πηγή: Εταιρεία Geoinfo)

Η Αλμυρή Λίμνη, βρίσκεται στην μέση της χερσονήσου (ως λευκή περιοχή στο Σχήμα 3.4.3) και χωρίζεται από την θάλασσα με δύο χαμηλές και λεπτές λωρίδες. Ο πυθμένας της λίμνης καλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα πρόσφατων άμμων και πηλών. Η λίμνη περιέχει αλμυρό νερό από τον Δεκέμβριο έως την αρχή του καλοκαιριού, όταν ξηραίνεται εντελώς. Η μέγιστη στάθμη του υπόγειου νερού είναι σε αυτήν 1.7 m κάτω από την στάθμη της θάλασσας.

Η Αλμυρή Λίμνη – ως το χαμηλότερο υψομετρικά μέρος της περιοχής – λειτουργεί ως εσωτερική λεκάνης αποστράγγισης. Πηγές του νερού που απολήγει στην Λίμνη είναι:

1. Βροχόπτωση

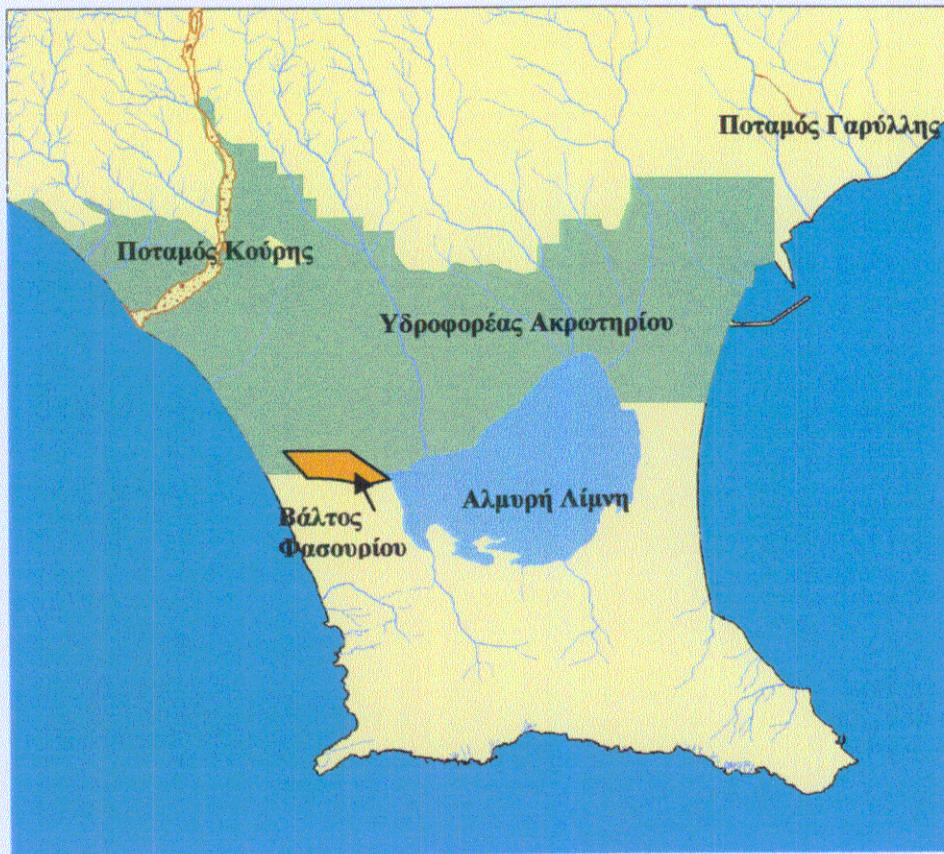
2. Επιφανειακή απορροή
3. Εισροές υπογείων νερών από τις γύρω περιοχές
4. Εισροή της θάλασσας κατά την διάρκεια καταιγίδων.

Στα ΒΔ της Αλμυρής Λίμνης βρίσκεται ο βάλτος του Φασουρίου (ή Λιβιάδι), επίπεδη έκταση 60 εκταρίων (0.6 km^2). Το οικολογικά σημαντικό τμήμα του βάλτου, περίπου 20 εκτάρια (0.2 km^2), καλύπτεται από πυκνή βλάστηση ευκαλύπτων και θάμνων. Πανίδα της περιοχής αποτελούν σπάνια είδη πουλιών, αμφίβια και έντομα. Η περιοχή κατακλύζεται κατά την διάρκεια της βροχερής περιόδου· τα νερά προέρχονται από άμεση βροχόπτωση και επιφανειακή απορροή από την γύρω περιοχή. Από τον βάλτο το πλεονάζον νερό απορρέει στην Αλμυρή Λίμνη με ένα σύστημα τεχνητών αποστραγγιστικών καναλιών. Η βιοποικιλία της χλωρίδας και πανίδας στην περιοχή είναι αξιοσημείωτη: περισσότερο από 50% των ειδών των πουλιών που απαντούνται στην Κύπρο, ζουν σε αυτόν τον υγροβιότοπο.

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής (Σχήμα 3.4.4) δεν είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένο και στα ρέματα δεν παρουσιάζεται μόνιμη ροή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μικρό ύψος και την ετήσια κατανομή των κατακρημνισμάτων και στην εδαφική σύσταση της περιοχής, όπου τα πετρώματα που απαντώνται είναι πολύ περατά ιζήματα όπως άμμοι, πηλοί και χαλίκια. Μόνο δύο ποταμοί της περιοχής έχουν μόνιμη ροή: Ο Κούρης στα δυτικά και ο Γαρύλλης στα ανατολικά. Και στους δύο έχουν κατασκευαστεί χωμάτινα φράγματα· στον Κούρη το φράγμα χτίστηκε το 1988 και έχει ύψος 110 m και χωρητικότητα 115 εκατ. m^3 . Το φράγμα Πολεμίδα, κατασκευάστηκε στον Γαρύλλη το 1965 – έχει ύψος 45 m και χωρητικότητα $3,864 \text{ εκατ. m}^3$.

Ο υδροφορέας του Ακρωτηρίου τροφοδοτείται από

- Άμεση βροχόπτωση.
- Απώλειες του φράγματος του ποταμού Κούρη, ανάλογες με το ύψος νερού σε αυτό.
- Υπόγειες εισροές από την περιοχή του ποταμού Κούρη στα ΒΔ της λεκάνης.
- Υπόγειες εισροές από το βόρειο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης.
- Επιστροφές της άρδευσης, και
- Τεχνητό εμπλουτισμό, ο οποίος εφαρμόστηκε για την προστασία του υδροφορέα από την θαλάσσια διείσδυση.



Σχήμα 3.4.4: Υδρογραφικό δίκτυο και περιοχή υδροφορέα (με πράσινο)

(Πηγή: Εταιρεία Geofinfo)

3.5 Γεωλογία

Ο υδροφορέας του Ακρωτηρίου εκτείνεται από τα δυτικά του ποταμού Κούρη, έως την περιοχή του Φασουρίου και ανατολικά του χωριού Ζακάκι. Το νότιο όριό του βρίσκεται κατά μήκος του βορείου ορίου της Αλμυρής Λίμνης και συνεχίζεται ανατολικά και δυτικά αυτής, έως την θάλασσα.

Η χερσόνησος του Ακρωτηρίου αποτελεί τμήμα ενός ρηχού συγκλίνου (Σχήμα 3.5.1), του οποίου ο άξονας έχει διεύθυνση Α-Δ και εντοπίζεται κάτω από την Αλμυρή Λίμνη (Fink, 1965). Η νότια πτέρυγα του συγκλίνου τερματίζεται σε μία αντικλινική ζώνη, παράλληλα με την ακτή στην νότια άκρη της χερσονήσου. Η βόρεια πτέρυγα τελειώνει σε μία ζώνη επώθησης, 6-7 km Β της Λεμεσού.

Σε αδρές γραμμές, η στρωματογραφία της λεκάνης είναι η ακόλουθη:

- | | |
|------------------------------------|---------------------|
| 1. Αλλούβια ιζήματα | Πρόσφατες αποθέσεις |
| 2. Ριτιδιοπαγής σειρά | Πλειστόκαινο |
| 3. Σχηματισμός Λευκωσίας - Άλασσας | Πλειόκαινο |

4. Σχηματισμός Πάχνας

Μειόκαινο

1. Αλλούβια ιζήματα

Τα αλλούβια ιζήματα αποτελούνται από ποτάμιες αποθέσεις άμμων και ιζήματα παράκτιας ζωνής, χαλίκια και πηλούς (Ιακωβίδης, 1982). Κατά το Πλειστόκαινο, στην περιοχή υπήρχαν τα δέλτα των ποταμών Κούρη και Γαρύλλη, δηλαδή η περιοχή ήταν κάτω από την μέση απόλυτη στάθμη της θάλασσας. Η διαμόρφωση της περιοχής προέκυψε από την διακοπτόμενη ανύψωση της ξηράς και την επακόλουθη απόσυρση της θάλασσας. Με την απόσυρση, ο κόλπος μεταξύ του νησιού που υπήρχε νοτίως της σημερινής Αλμυρής Λίμνης και της ξηράς άρχισε να κλείνει με την απόθεση ιζημάτων που μεταφέρονταν από τους δύο ποταμούς. Οι αποθέσεις άμμων και χαλίκων στα δέλτα των ποταμών, ένωσαν το νησί με την κυρίως ξηρά και απέκλεισαν ένα ρηχό τμήμα της θάλασσας που σχημάτισε την Αλμυρή Λίμνη, η οποία σήμερα αποτελεί μία εσωτερική λεκάνη αποστράγγισης.

2. Σειρές Ριπιδιοπαγών

Λόγω των Μειοκαινικών – Πλειστοκαινικών ανοδικών κινήσεων της ξηράς, οι οποίες συνοδεύτηκαν από ισχυρή διάβρωση, στις μεσόριες λεκάνες αποτέθηκαν piedmont ιζήματα. Τα ιζήματα που σχηματίστηκαν σε αυτό το περιβάλλον αποτελούνται από θαλάσσια ιζήματα – στρώματα βοτσάλων (παραθαλάσσιες αποθέσεις). Βρίσκονται κυρίως μεταξύ της βόρειας ακτής της Αλμυρής Λίμνης και της επαφής των κροκαλοπαγών με τον σχηματισμό της Πάχνας στα βόρεια. Σε αυτά βρίσκονται και αρχαία ρέματα που έχουν πληρωθεί με χαλίκια.

3. Σχηματισμός Λευκωσίας – Άλασσας:

Πάνω στον σχηματισμό της Πάχνας βρίσκονται τα ιζήματα της Λευκωσίας-Άλασσας. Επιφανειακές εκδηλώσεις των πετρωμάτων αυτού του σχηματισμού βρίσκονται στο νότιο άκρο της χερσονήσου του Ακρωτηρίου και σε απομονωμένους λόφους βορείως της Αλμυρής Λίμνης. Ο σχηματισμός αποτελείται από ασβεστούχους ψαμμίτες, αμμοχάλικα, λιθοκονίες (microbreccias) και αργίλους. Τα πετρώματα αυτά εμφανίζονται και νότια του χωρίου Τραχώνι, όπου σχηματίζουν λόφο. Το συνολικό πάχος της επιφανειακής εκδήλωσης στα νότια είναι 90 m.

Τα πετρώματα του σχηματισμού της Άλασσας εκτίθενται μόνο στο νότιο άκρο της

χερσονήσου. Αποτελούνται από απολιθωματοφόρα ασβεστούχα αμμοχάλικα με βότσαλα και φτάνουν σε πάχος τα 10m.

4. Ο σχηματισμός της Πάχνας

Τα πετρώματα της Πάχνας βγαίνουν στην επιφάνεια στο βόρειο τμήμα της λεκάνης και επίσης στο νότιο άκρο της χερσονήσου. Οι βόρειες κορυφές αποτελούνται από εναλλασσόμενες κρητίδες, κρητιδικές μάργες και μάργες με αμμοχάλικα στο ανώτερο τμήμα και γυψώδεις μάργες στην κορυφή (5 m)· το ολικό πάχος του σχηματισμού υπολογίζεται σε 1.150 m.

Ο αδιαπέρατος σχηματισμός της Λευκωσίας – Άλασσας των μαργών και αρενιτών, αποτελεί το αδιαπέρατο υπόβαθρο του υδροφορέα του Ακρωτηρίου. Η τοπογραφία του αδιαπέρατου υποβάθρου κλίνει προς τον κόλπο της Επισκοπής και προς το νότιο όριο του υδροφορέα, φτάνοντας σε βάθος τα 80-100 m στο δέλτα του Κούρη και περισσότερο από 100 m κοντά στην Αλμυρή Λίμνη (Χάρτης 3.5.2).

Ο υδροφορέας

Οι πρόσφατες αποθέσεις αποτελούνται από αμμώδεις θίνες και μαζώδη αλλουβιακά ιζήματα. Στην περιοχή έχουν πραγματοποιηθεί εκατοντάδες γεωτρήσεις και ο υδροφορέας έχει μελετηθεί διεξοδικά όσον αφορά την κατανομή των ιζημάτων του, το πάχος των στρωμάτων και την κοκκομετρία του υλικού. Από τις γεωλογικές τομές (Παράρτημα Β) φαίνεται ότι οι αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούνται από χαλίκια, με ενστρώσεις μαργών και φακούς αμμοδών μαργών, και κλίνουν προς τον νότο. Το πάχος τους κυμαίνεται από 10 m στα βόρεια, έως 110 m στα νότια.

Τα Πλειστοκαινικά ιζήματα είναι κυρίως χαλίκια, άμμοι και άργιλλοι, ενώ τα Πλειοκαινικά αποτελούνται από μάργες, υφαλογενείς ασβεστολίθους, ασβεστο-αρενίτες και ψαμμίτες. Οι αποθέσεις του Γαρύλλη περιέχουν περισσότερους οριζόντες μάργας και άμμων από του Κούρη.

Ο υδροφορέας αποτελείται από χαλίκια, άμμους και ογκόλιθους, ενδοστρωματωμένα με φακούς πηλών και αργίλων, των οποίων τόσο ο αριθμός όσο και το πάχος αυξάνει προς το ανατολικό και νότιο όριο. Στο ανατολικό τμήμα, βορείως του Ζακακίου τα χαλίκια περιορίζονται σε λεπτούς φακούς και τα κυρίαρχα υλικά του υδροφορέα είναι άμμοι, αμμώδεις μάργες και μάργες.

Με βάση το "SCP Feasibility report" (Ιακωβίδης, 1982, τρίτος τόμος), ο υδροφορέας του Ακρωτηρίου μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μεγάλες υδρολογικές ενότητες, που αντιπροσωπεύουν την γεωλογική ιστορία απόθεσης των ποταμών της περιοχής. Εκείνη η μελέτη θέτει το όριο κατά μήκος ευθείας που ενώνει τα χωριά Ασώματος και Τραχώνι. Το δυτικό τμήμα περιλαμβάνει τις αποθέσεις των καναλιών του Κούρη – του παλαιότερου και του σημερινού – που αποτελούνται από χαλίκια και άμμους, ενδοστρωματωμένα από αργίλους. Το ανατολικό τμήμα αποτελεί τις αποθέσεις του Γαρύλλη, που περιέχουν περισσότερη μάργα και αμμώδεις ορίζοντες από τις αποθέσεις του Κούρη. Γι' αυτό ο υδροφορέας παρουσιάζει μια μεταβολή φάσεων από δύση προς ανατολή. Αυτή η λιθολογική αλλαγή είναι εμφανής και επιδρά στην μεταφορικότητα και αποθηκευτικότητα του υδροφορέα.

Τεστ αντλήσεων που έχουν γίνει σε επιλεγμένα σημεία στον υδροφορέα, εκτιμούν το πορώδες του ως 14%.

Ο Βάλτος του Φασουρίου (ή Λιβάδι)

Ο Βάλτος του Φασουρίου είναι ένας υγρότοπος γλυκού νερού με έκταση 20 ha με υψόμερο κάτω από αυτό της θάλασσας. Αποτελεί την φυσική περιοχή εκφόρτισης του υδροφορέα. Μέχρι το 1988 ο βάλτος πλημμύριζε κατά την χειμερινή περίοδο. Σήμερα αποστραγγίζεται από 3 μεγάλα κανάλια στην Αλμυρή Λίμνη. Το νερό που φτάνει εκεί προέρχεται από επιφανειακή απορροή και επιστροφές από άρδευση, καθώς και από υπόγεια τροφοδοσία από τα βόρεια. Πριν την ολοκλήρωση του φράγματος του Κούρη προστιθόταν και νερό από τις υπόγειες απορροές του Κούρη.

Με βάση στοιχεία γεωτρήσεων, ο βάλτος καλύπτεται από μια σειρά περατών – ημιπερατών ιζημάτων πάχους περίπου 19 m, αποτελούμενων από οργανικές αργίλους, συγκεντρώσεις τύρφης και πηλώδεις αργίλους. Ο υποκείμενος υδροφορέας, έως το βάθος των 90 m αποτελείται από άμμους και χαλίκια, με φακούς από μάργες.

Το πάχος των στρωμάτων τύρφης και αργίλων δείχνουν ότι η επιφάνεια του εδάφους είναι υδραυλικά απομονωμένη από τον υδροφορέα. Παρατηρήσεις όμως που έγιναν κατά την διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων στο Λιβάδι, υποδεικνύουν ότι η ελεύθερη επιφάνεια του υδροφορέα φτάνει την επιφάνεια του εδάφους.

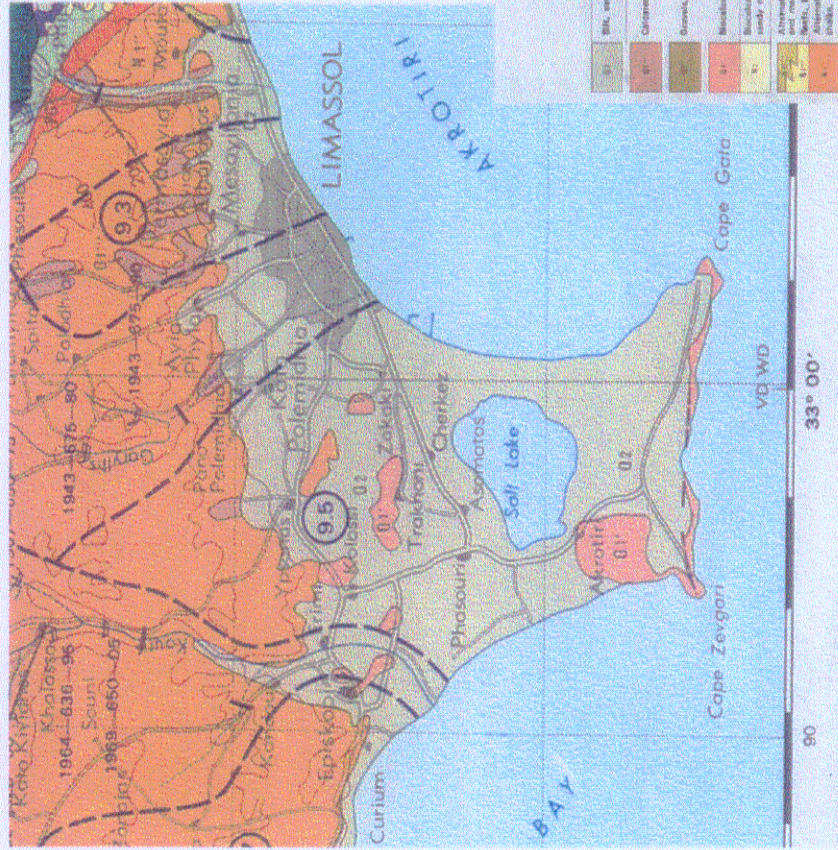
Αλμυρή Λίμνη

Μέχρι μερικές εκατοντάδες χρόνια πριν, ο ποταμός Κούρης είχε δύο εκβολές προς την θάλασσα. Σήμερα απομένει μόνο ο δυτικός κλάδος του ποταμού, ενώ ο ανατολικός με πυθμένα από χαλίκια και άμμους, που ξεκινούσε από την περιοχή της γέφυρας του χωριού Έρημη δεν υφίσταται πλέον, αφού επιχωματώθηκε και ενσωματώθηκε στον υδροφορέα του Ακρωτηρίου.

Ο ανατολικός κλάδος έρεε νοτιο-ανατολικά προς μια λιμνοθάλασσα, η οποία συνδεόταν με ένα στενό κανάλι με την θάλασσα, στην ανατολική ακτή της σημερινής χερσονήσου. Μετά από χρόνια η επικοινωνία αυτή έκλεισε λόγω πλήρωσης με φερτά υλικά. Ο πυθμένας της λιμνοθάλασσας έχει πλέον αποκοπεί από το κύριο κανάλι του Κούρη στα δυτικά και από μπάρες άμμων από την Μεσόγειο στα ανατολικά και διαμόρφωσε μια βύθιση κάτω από το επίπεδο της θάλασσας (ελάχιστο επίπεδο 2.7 masl). Το βύθισμα γεμίζει με νερό κατά την διάρκεια των βροχών και ξηραίνεται κατά το καλοκαίρι. Κατά την περίοδο που η περιοχή ξηραίνεται, ένα λεπτό στρώμα αλάτων καλύπτει τον πυθμένα της λίμνης. Η κρούστα αυτή διαλύεται με τις πρώτες βροχές, με αποτέλεσμα νερό υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα να συσσωρεύεται στα χαμηλότερα σημεία του βυθίσματος. Όσο το βύθισμα γεμίζει με νερό, η αλατότητα μειώνεται έως ένα ελάχιστο. Το ελάχιστο αυτό είναι συνάρτηση

1. Της ποσότητας και έντασης της βροχής που πέφτει απ' ευθείας στην λίμνη.
2. Της επιφανειακής απορροής προς την λίμνη. Αφού η λίμνη είναι το χαμηλότερο τοπογραφικά σημείο της περιοχής, λειτουργεί ως μια εσωτερική λεκάνη αποστράγγισης. Η επιφανειακή υδρολογική λεκάνη περιλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της χερσονήσου του Ακρωτηρίου, καθώς και την περιοχή που βρίσκεται μεταξύ των ποταμών Κούρη και Γαρύλλη.
3. Των υπογείων εισροών από την περιοχή βορείως της λίμνης. Το καλοκαίρι αν και η λίμνη ξηραίνεται, συνεχίζει να δέχεται υπόγειες εισροές από την περιοχή, ποσότητες ύδατος που πιθανότατα εξατμίζονται από τον πυθμένα της λίμνης.
4. Την εισχώρηση της θάλασσας κατά την διάρκεια καταιγίδων από την ανατολική πλευρά της λίμνης.

Μετά το τέλος της περιόδου των βροχών, περίπου Απρίλιο-Μάιο, το νερό εξατμίζεται με αποτέλεσμα μία σταδιακή αύξηση της αλατότητας έως τον κορεσμό του νερού και την απαρχή καθίζησης του άλατος.

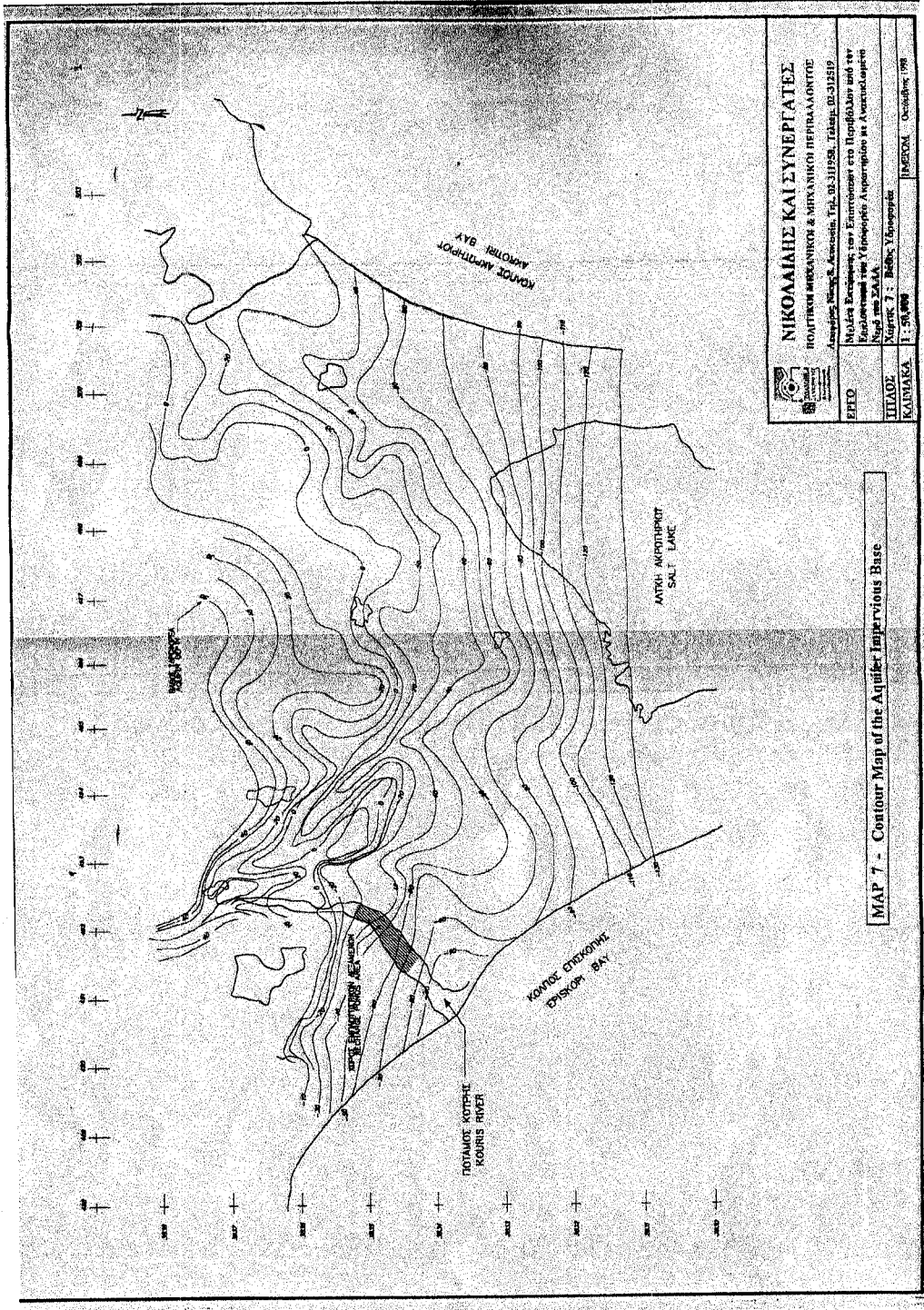


LEGEND

CIRCUM TROODOS SEDIMENTARY SUCCESSION

LITHOLOGY	FORMATIONS	PERIODS
31. Sil. sand, gravel	Alluvium	HOLOCENE
41. Gravelly sand, gravel	Terrace deposits	HOLOCENE
51. Sand, silt, silty sand, silty clay	Panglossville	PLEISTOCENE
61. Sandstone, sand, silty sand	Atholona	PLEISTOCENE
71. Sandstone, sand, gravel, pebbly sand, silty sand, silty clay	Nicosia	PLEISTOCENE
81. Alternating greenish with clay, marl, and many small pebbles and boulders	Kallitron	PLEISTOCENE
91. Alternating clay, marl, silty clay, silty sand and sand	Koronia	PLEISTOCENE
101. Alternating clay, marl, silty clay, silty sand and sand	Pachna	PLEISTOCENE
111. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Terra	PLEISTOCENE
121. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Lefkara	PLEISTOCENE
131. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Mesa	PLEISTOCENE
141. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Maestrichtian	PLEISTOCENE
151. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
161. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
171. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
181. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
191. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
201. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
211. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
221. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
231. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
241. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
251. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
261. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
271. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
281. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
291. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE
301. Sand, silt, silty sand, silty clay, silty sand, silty clay	Campanian	PLEISTOCENE

Σχήμα 3.5.1: Γεωλογικός χάρτης περιοχής Ακρωτηρίου (Πηγή: Geological Map of Cyprus, 1:250000, Geol. Survey Depart., Republic of Cyprus)



Σχήμα 3.5.2: Χάρτης ισοβαθών του αδιαπέρατου πυθμένα του υδροφορέα του Ακρωτηρίου (Πηγή: Νικολαΐδης & Συνεργάτες, 1998)

Δείγματα νερού που είχαν παρθεί από διαφορετικά σημεία της λίμνης τον Νοέμβριο 1963 (10 μέρες μετά από την έναρξη της υγρής περιόδου) είχαν αλατότητες που κυμαίνονταν από 8.000 έως 39.000 ppm Cl. Δείγματα εδάφους από τα ίδια σημεία και την ίδια χρονική στιγμή εκπλύθηκαν με απεσταγμένο νερό και η αλατότητα των δειγμάτων κυμαινόταν από 850 έως 18.000 ppm Cl. Δείγματα που πάρθηκαν από κανάλια αποστράγγισης γλυκού νερού στην λίμνη είχαν αλατότητες από 3.000 έως 6.000 mg/l Cl, όταν η στάθμη του νερού στην λίμνη ήταν στο μέγιστο και τα σημεία δειγματοληψίας ήταν βυθισμένα στο νερό της λίμνης· όταν η στάθμη του νερού στην λίμνη ήταν ελάχιστη και τα σημεία δειγματοληψίας δεν ήταν πλημμυρισμένα, οι αλατότητες που μετρήθηκαν ήταν 150-200 mg/l Cl (M. Fink, 1965).

3.6 Υδρογεωλογία (Fink, 1965)

Ο υδροφορέας χωρίστηκε σε ζώνες με βάση τα χαρακτηριστικά του (πάχος ιζημάτων, σύσταση, ελεύθερος/εγκλωβισμένος) (Σχήμα 3.6.1). Γεωλογικές τομές από όλες τις κατευθύνσεις (φαίνονται στο Σχήμα 3.6.1) παρέχουν την γενική άποψη της σύστασης του υδροφορέα και περιλαμβάνονται στο **Παράρτημα Β**.

Ζώνη 1:

Η ζώνη αυτή καλύπτεται από τα περατά θάλασσα κροκαλοπαγή που υπέρκεινται των μαργών του σχηματισμού της Πάχνας. Μόνο λίγες γεωτρήσεις υπάρχουν σε αυτή την ζώνη. Παρατηρήθηκαν δύο υδροφορίες: Η ανώτερη, ελεύθερη, φιλοξενείται σε χαλίκια, άμμους και ψαμμίτες. Αυτός ο υδροφορέας τελειώνει στην επαφή με την Ζώνη 2 και έχει πάχος περίπου 10 m. Ο κατώτερος εγκλωβισμένος υδροφορέας αποτελείται από άμμους και χαλίκια. Διακόπτεται κατά περιοχές από φακούς αργίλων και υπέρκεινται αργίλων. Το πάχος του είναι 10m και συνεχίζεται στην Ζώνη 2. Η Ζώνη 1 τροφοδοτείται κυρίως από τον Κούρη (κατά το παρελθόν) και δευτερευόντως από την άμεση βροχόπτωση. Οι διευθύνσεις ροής είναι από τα ΒΔ προς τα ΝΑ και Β-Ν. Η στάθμη πέφτει από τα 60 m στα βόρεια στα 3 m στα νότια με μία βαθμίδα 1.5-2% και η μεταφορικότητα (T) είναι περίπου 200-2000 m²/day.

Ζώνη 2:

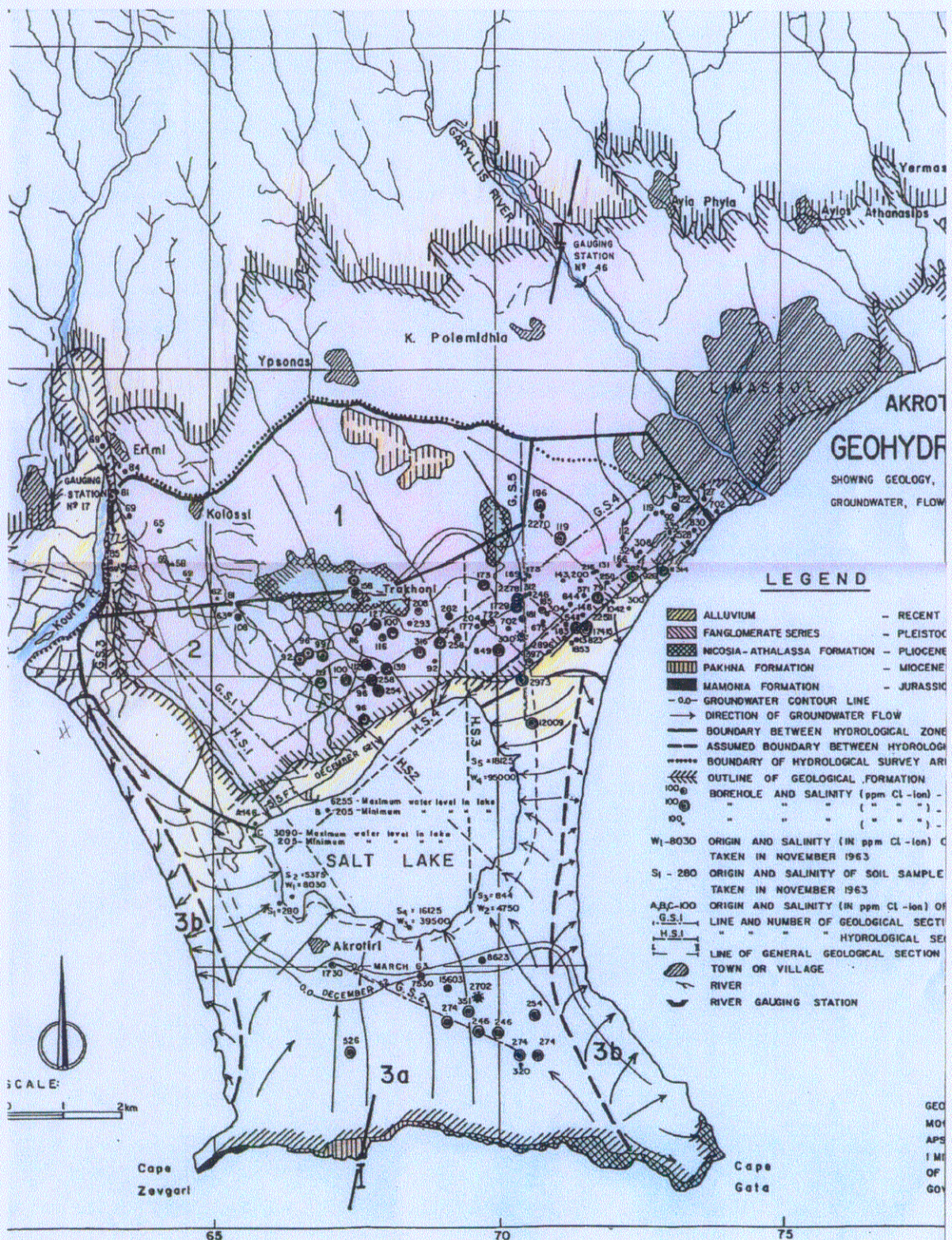
Η ζώνη αυτή καλύπτεται από την σειρά των κροκαλοπαγών που υπέρκειται του σχηματισμού της Λευκωσίας – Άλασσας, που βρίσκεται πάνω στον Σχηματισμό της

Πάχνας. Οι γεωτρήσεις είναι περισσότερες από αυτές της Ζώνης 1. Ο περιορισμένος υδροφορέας συνεχίζεται σε αυτή την Ζώνη και αποτελείται από χαλίκια με σποραδική την εμφάνιση ψαμμιτών και φακών αργίλων. Το πάχος του φτάνει τα 30 m. Στο βορειοανατολικό τμήμα της Ζώνης αυτής υπάρχει και ένας κατώτερος εγκλωβισμένος υδροφορέας. Αυτός τροφοδοτείται κυρίως από τον Γαρύλλη και από διήθηση από ημι-περατά στρώματα.

Από την ζώνη αυτή, το υπόγειο νερό εκφορτίζεται σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Το κεντρικό τμήμα αποστραγγίζεται στην Αλμυρή Λίμνη· στα δυτικά η κατεύθυνση ροής είναι από ΒΔ προς ΝΑ, και στα ανατολικά από ΒΑ προς ΝΔ. Το βορειοδυτικό τμήμα εκφορτίζεται στον Κόλπο της Επισκοπής και η διεύθυνση της ροής είναι ΒΑ – ΝΔ. Το ανατολικό τμήμα εκφορτίζεται στον Κόλπο του Ακρωτηρίου και η διεύθυνση κυμαίνεται μεταξύ ΒΑ-ΝΔ και ΒΒΔ-ΝΝΑ. Η υδραυλική κλίση σ' αυτήν την ζώνη είναι 0.1% και η μεταφορικότητα (T) 2000 m²/day.

Ζώνη 3:

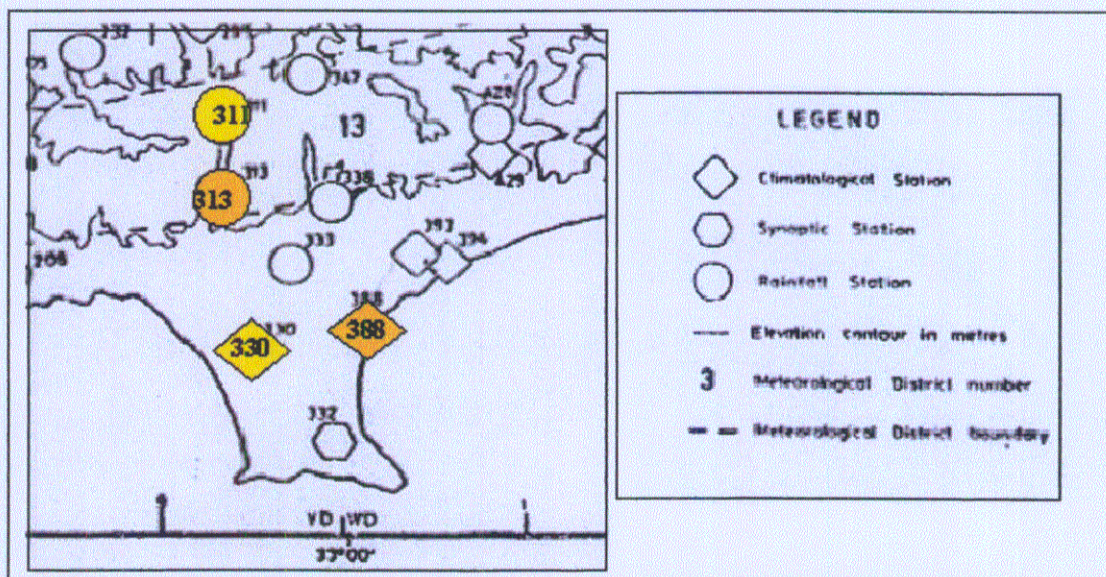
Λόγω έλλειψης στοιχείων κατά την εποχή εκπόνησης της υδρογεωλογικής μελέτης από τον Fink, η ζώνη αυτή θεωρούνταν ότι εκτεινόταν από την ακτή του κόλπου της Επισκοπής έως την ακτή του Κόλπου του Ακρωτηρίου στα ανατολικά και από την βόρεια ακτή της Αλμυρής Λίμνης, έως το νότιο άκρο της χερσονήσου. Το αδιαπέρατο υπόβαθρο του υδροφορέα σε αυτή την περιοχή είναι 80-100 m κάτω από την μέση στάθμη της θάλασσας και αντίστοιχο πάχος έχει και ο υδροφορέας.



Σχήμα 3.6.1: Υδρογεωλογικές ζώνες (Πηγή: Preliminary report on the hydrogeology of Akrotiri Peninsula, M. Fink, 1965)

3.7 Κλιματικά δεδομένα

Το κλίμα της περιοχής είναι ημιορημικό. Στην περιοχή υπάρχουν πολλοί μετεωρολογικοί σταθμοί κάποιοι από τους οποίους χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα μελέτη. Στον Σχήμα 3.7.1 φαίνονται οι σταθμοί.



Σχήμα 3.7.1: Χάρτης με θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών(Πηγή: Υπηρεσία Αναπτύξεως Υδάτων, Κύπρος)

3.7.1 Κατακρημνίσματα

Για τους σκοπούς της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα κατακρημνισμάτων από τους σταθμούς S330 (υψόμετρο: 8 m), στην περιοχή Φασουρίου κοντά στην Αλμυρή Λίμνη και S311 (υψόμετρο: 240 m), βόρεια στην περιοχή Άλασσα, εκτός των ορίων της λεκάνης.

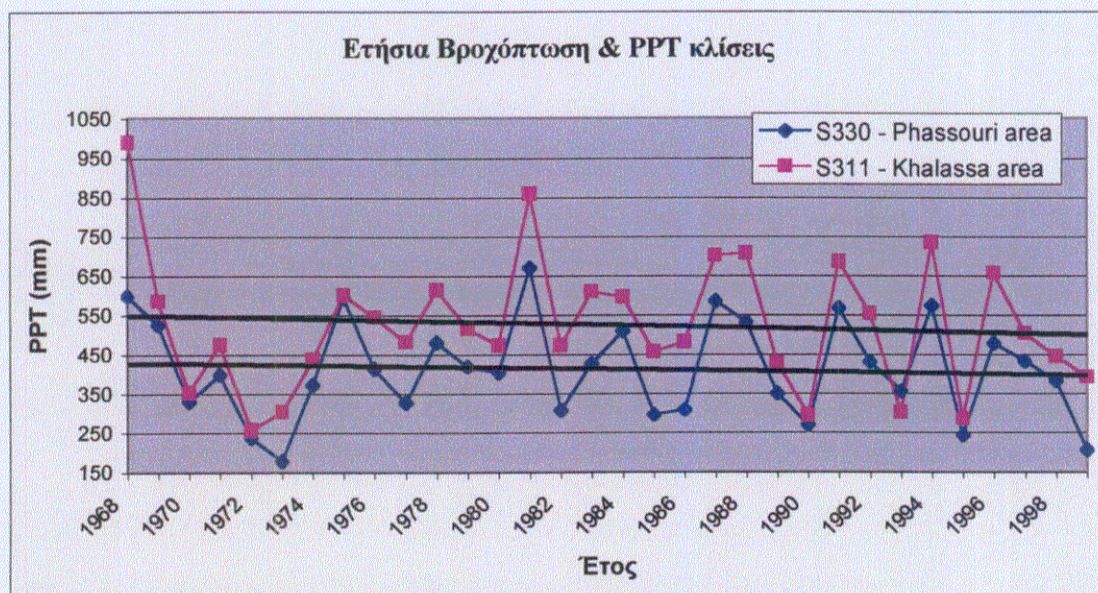
Οι χρονοσειρές των ετησίων κατακρημνισμάτων στους δύο αυτούς σταθμούς και οι κλίσεις τους φαίνονται στο Σχήμα 3.7.1. Πρέπει να σημειωθεί ότι το 65% της ετήσιας βροχόπτωσης πέφτει κατά την διάρκεια του χειμώνα, ενώ το 88% αυτού, από τον Οκτώβριο έως τον Μάρτιο.

3.7.2 Θερμοκρασία

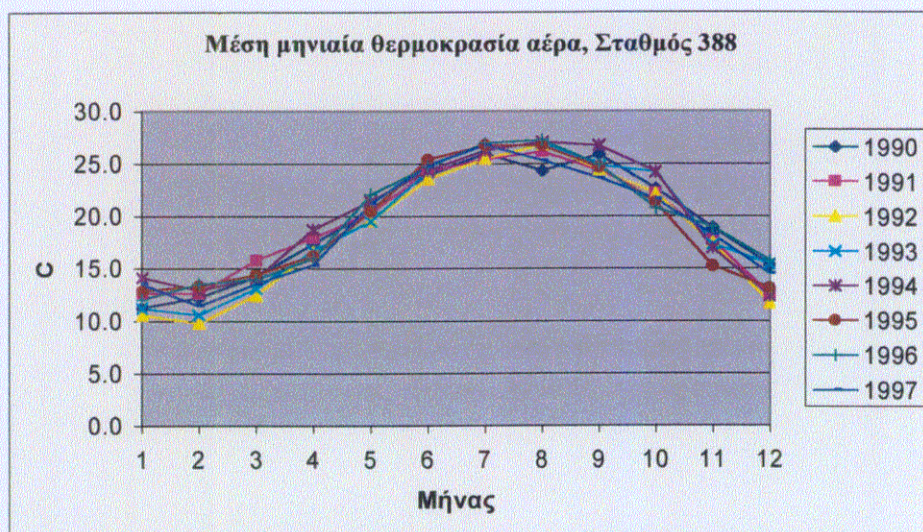
Τιμές θερμοκρασίας χρησιμοποιήσαμε από τον σταθμό S388 στην περιοχή της Λεμεσού στα ανατολικά της λεκάνης. Η ετήσιες διακυμάνσεις για τα έτη 1990-1997 φαίνονται στο Σχήμα 3.7.2.

3.7.3 Εξάτμιση

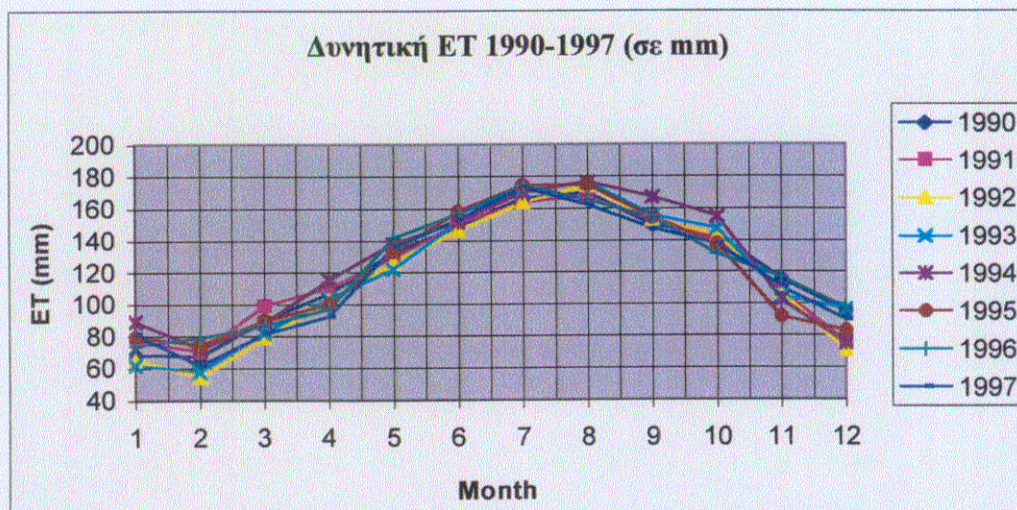
Μέσες ημερήσιες τιμές εξάτμισης από λεκάνη τύπου Α (σε mm) χρησιμοποιήθηκαν από τον σταθμό S313. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται ως το 80% των εγγραφών της λεκάνης και φαίνεται στο Σχήμα 3.7.3.



Σχήμα 3.7.1: Ετήσια βροχόπτωση (σε mm) στους σταθμούς S311 & S330



Σχήμα 3.7.2: Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα °C – Σταθμός S388



Σχήμα 3.7.3: PET (σε mm) – Σταθμός S313

3.8 Ο υδροφορέας του Ακρωτηρίου

Η μελέτη του υδροφορέα του Ακρωτηρίου πρέπει να χωριστεί σε δύο περιόδους.

1. Έως το 1988, η οποία αφορά την κατάσταση του υδροφορέα πριν την κατασκευή και λειτουργία του φράγματος του Κούρη, κατά την οποία ο υδροφορέας ήταν σε μία κατάσταση σχετικής ισορροπίας (steady state) και
2. Από το 1988 και μετά, η οποία αφορά την κατάσταση στον υδροφορέα όπως διαμορφώθηκε μετά την ανθρωπογενή αυτή παρέμβαση.

3.8.1 Υδατικό ισοζύγιο στον Υδροφορέα προ της κατασκευής του φράγματος

Κατά την Μελέτη Σκοπιμότητας του Νοτίου Αγωγού (1979-1982) υπολογίστηκε το υδατικό ισοζύγιο του υδροφορέα. Σύμφωνα με εκείνη την μελέτη, πηγές εμπλουτισμού του υδροφορέα του Ακρωτηρίου αποτελούν

1. Η άμεση βροχόπτωση.
2. Η κοίτη του ποταμού Κούρη και τα κανάλια εκτροπής της (πριν την κατασκευή του φράγματος).
3. Οι υπόγειες εισροές από το βόρειο όριο του υδροφορέα.
4. Οι επιστροφές από την άρδευση και την οικιακή χρήση.

Εκροές από τον υδροφορέα αποτελούν

1. Η άντληση (για οικιακή και αγροτική χρήση).
2. Η εξατμισοδιαπνοή (ET) από την περιοχή του Βάλτου Φασουρίου.
3. Εκροές προς την θάλασσα και την Αλμυρή Λίμνη.
4. Επιφανειακές απορροές στην περιοχή των βάλτων που εκφορτίζονται στην Αλμυρή Λίμνη.

Για την δεκαετία 1967-1977 εκτιμήθηκαν οι συνιστώσες του παραπάνω υδατικού ισοζυγίου, τόσο όσον αφορά τις εισροές, όσο και τις εκροές. Οι όγκοι του υδατικού εκείνου ισοζυγίου φαίνονται στον Πίνακα 3.8.1.

Μετά την κατασκευή του φράγματος, το ισοζύγιο στον υδροφορέα εκτιμήθηκε (1992) ότι μειώθηκε στο 66% του αρχικού, επειδή ο Κούρης δεν τροφοδοτεί πλέον τον υδροφορέα (*Balasha & Phedonos Consultants, 1992*).

3.8.2 Εκμετάλλευση του υδροφορέα

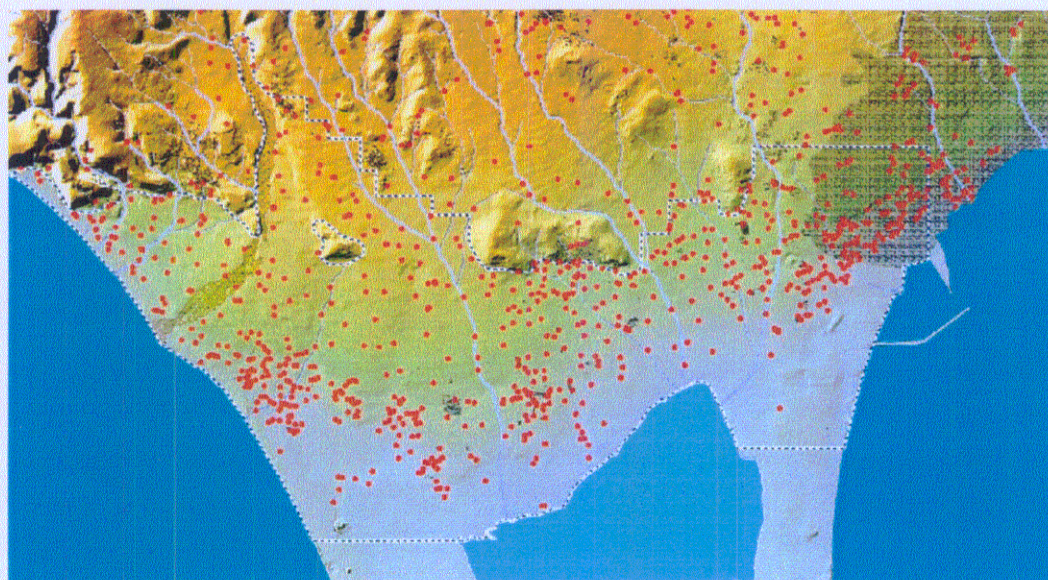
Η οικονομική δραστηριότητα της περιοχής είναι συγκεντρωμένη στην περιοχή του υδροφορέα λόγω των κατάλληλων χαρακτηριστικών της: προσβασιμότητα, ύπαρξη νερού, εδαφική σύσταση.

Το πλήθος των πηγαδιών και γεωτρήσεων που υπάρχουν στην περιοχή είναι αξιοσημείωτο. Η σειριακή αρίθμηση των γεωτρήσεων φτάνει έως το 1784. Περίπου 263 γεωτρήσεις/πηγάδια λειτουργούν σήμερα το έτος και προμηθεύουν με νερό τα χωριά της περιοχής, τις Βρετανικές βάσεις, την γεωργία και την βιομηχανία. Οι θέσεις των γεωτρήσεων φαίνονται στο Σχήμα 3.8.2.

Κατά την διάρκεια του 1997 ο ολικός όγκος νερού που αντλήθηκε ήταν 7.605.412 m³, που κατανεμήθηκε ως εξής: 35% για οικιακή χρήση, 49% για αρδευτικούς σκοπούς και 15% για βιομηχανική χρήση.

Πίνακας 3.8.1: Υδρολογικό ισοζύγιο του Υδροφορέα του Ακρωτηρίου 1967-1977
(*Southern Conveyor Feasibility Study – Groundwater resources, 1982*)

Εισροές (Mm³)	
Κατακρημνίσματα	6.332
Κοίτη του Κούρη	15.425
Εκτροπές κοίτης	3.242
Υπόγειες εισροές από βόρειο όριο	4.208
Επιστροφή από άρδεύσεις	4.658
Εισροή της θάλασσας	0.591
Ολικό	34.456
Εκροές (Mm³)	
Αντληση (αρδεύσεις)	13.295
Αντληση (οικιακή χρήση)	1.247
ET	2.454
Εκφορτίσεις σε βάλτους	2.198
Εκροές προς την θάλασσα και την Αλμυρή Λίμνη	16.212
Ολικό	35.406



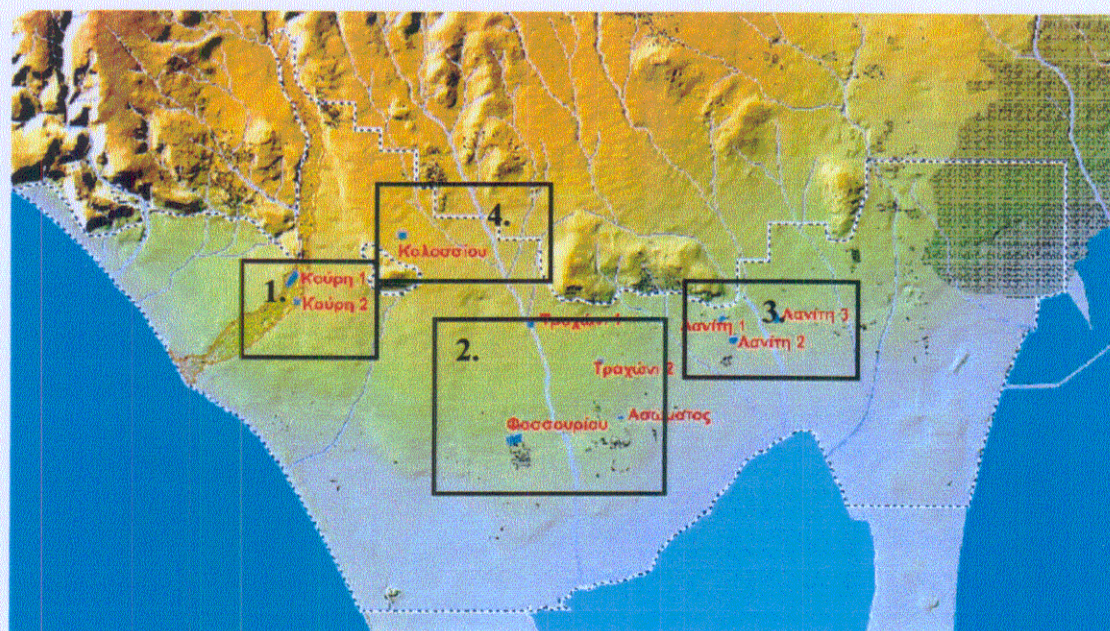
Σχήμα 3.8.2: Κατανομή των γεωτρήσεων/πηγαδιών στην περιοχή (Πηγή: Εταιρεία Geoinfo)

3.8.3 Διαχείριση του υδροφορέα μετά την κατασκευή του φράγματος

Λόγω της αλόγιστης εκμετάλλευσης του υδροφορέα και της μείωσης των εισροών σε αυτόν, ο υδροφορέας απειλείται από υφαλμύρυνση σε μεγάλη ακτίνα από την ακτή.

Την τελευταία δεκαετία, η Διεύθυνση Ανάπτυξης Υδάτων του Υπουργείου Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Κυπριακής Δημοκρατίας σχεδίασε και άρχισε να εφαρμόζει τον τεχνητό εμπλουτισμό του υδροφορέα, με αξιοποίηση του πλεονάζοντος νερού από τους ταμιευτήρες του Κούρη και του Γαρύλλη και με μεταφορά και διάθεση στην περιοχή των ανακυκλωμένων υδάτων του Εργοστασίου Επεξεργασίας Λυμάτων της πόλης της Λεμεσού. Ο τεχνητός εμπλουτισμός εφαρμόστηκε στην περιοχή της υδρολογικής λεκάνης με επιφανειακή διάθεση, στο έδαφος και σε δεξαμενές (Σχήμα 3.8.3.1) που έχουν τις ακόλουθες εκτάσεις:

Έδαφος	Έκταση σε m ²
1. Κούρης	4000 x 15
Δεξαμενές	
2. Φασσούρι	17500
3. Λανίτης	9460
4. Κολόσσι	10000



Σχήμα 3.8.3.1: Περιοχές τεχνητού εμπλουτισμού στο Ακρωτήρι (Πηγή: Εταιρεία Geoinfo)

Το ανακυκλωμένο νερό του εργοστασίου επεξεργασίας λυμάτων της Λεμεσού θα μεταφερθεί στην περιοχή του Ακρωτηρίου και θα διατεθεί σε 15, ειδικά διαμορφωμένες για τον σκοπό αυτό εκτάσεις, στην κοίτη του Κούρη κοντά στο δέλτα του. Οι χώροι κατάκλυσης έχουν έκταση 4000-5000 m² ο ένας. Μέχρι σήμερα, σε αυτά δεν έχει μεταφερθεί νερό από το εργοστάσιο επεξεργασίας λυμάτων. Στο μέλλον προβλέπεται οι εκτάσεις αυτές να λειτουργούν εκ περιτροπής.

Οι όγκοι νερού που χρησιμοποιήθηκαν για τεχνητό εμπλουτισμό κατά τα έτη 1989 – 1998 φαίνονται στον Πίνακα 3.8.3 (Σχήμα 3.8.3.2). Λόγω ιδιαίτερης μείωσης της βροχόπτωσης κατά τα δύο τελευταία έτη και της προκύπτουσας μείωσης των διαθεσίμων νερών για ύδρευση, δεν χρησιμοποιήθηκε νερό από τους ταμιευτήρες για τεχνητό εμπλουτισμό πρακτικά από το 1998 έως σήμερα.

Όλες οι σχεδιαζόμενες ενέργειες έχουν ως σκοπό την προστασία του υδροφορέα από την ρύπανση, την εξάντληση και την επακόλουθη διείσδυση της θάλασσας, η οποία υφίσταται ήδη σε μερικές περιοχές του υδροφορέα.

Πίνακας 3.8.3: Όγκοι νερού τεχνητού εμπλουτισμού στο Ακρωτήριο

Ολικός εμπλουτισμός (σε 1000 m³)

Μήνας	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
1	386	1671	401	472	472	148	626	164	289	145
2	570	2403	223	777	777	122	802	187	270	80
3	426	1958	388	771	771	147	540	248	237	96
4	6	193	299	65	65	148	206	255	212	4
5	3	1561	382	123	123	143	85	278	233	10
6	0	1454	380	65	65	168	49	279	208	0
7	29	1402	330	180	180	343	390	299	138	0
8	59	1201	444	191	191	429	369	299	113	0
9	63	682	395	380	380	400	388	285	48	0
10	389	598	431	459	459	418	390	284	202	0
11	340	471	326	432	432	487	372	285	74	0
12	658	2217	164	715	715	797	372	213	154	0
Total	2930	15812	4163	4631	4631	3750	4588	3076	2177	335

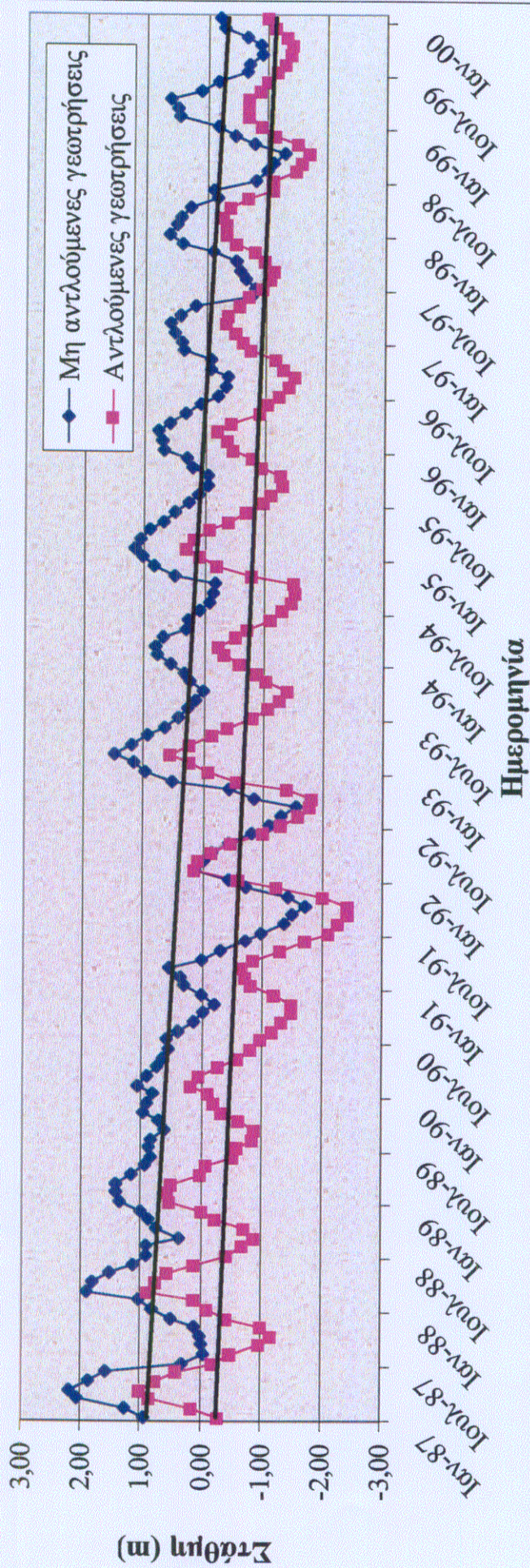


Σχήμα 3.8.3.2: Όγκος νερού που εμπλούτισε τεχνητά τον υδροφορέα

3.8.4 Κύμανση της στάθμης στον υδροφορέα

Μηνιαίες τιμές στάθμης του υδροφορέα του Ακρωτηρίου λαμβάνονται από διάφορα σημεία δειγματοληψίας για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του. Το Σχήμα 3.8.4 παρουσιάζει τις επιφανειακά μέσες διακυμάνσεις της, ως αποτέλεσμα των πολιτικών απόληψης και των κλιματικών συνθηκών.

Κύμανση στάθμης σε αντλούμενες & μη αντλούμενες γεωτρήσεις



Σχήμα 3.8.4: Επιφανειακά μέση κύμανση της στάθμης σε αντλούμενες και μη αντλούμενες γεωτρήσεις

4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

**Εφαρμογή Υδρολογικού Μοντέλου PRMS
στην Ασκήση Απορροής Ακρωτηρίου**

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PRMS ΣΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΑΚΡΩΤΗΡΙΟΥ

Κατά την προσομοίωση της λεκάνης απορροής του Ακρωτηρίου για τα έτη 1989 –1999, αντιμετωπίστηκαν σημαντικά ζητήματα, τα οποία έχουν άμεση σχέση τόσο με απλουστευτικές παραδοχές στην δομή του υδρολογικού μοντέλου PRMS, που αφορούν κατά κύριο λόγο τον τρόπο προσομοίωσης (αντιμετώπισης) των υπόγειων υδροφορέων, όσο και με την πολυπλοκότητα της φυσικής πραγματικότητας στην περιοχή.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του μοντέλου σε ότι αφορά την κίνηση του νερού κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, στην εδαφική, στην ακόρεστη και στην κορεσμένη ζώνη.

Οι κατακόρυφες διαιρέσεις του υπεδάφους σε ταμιευτήρες, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους και η κίνηση του νερού μέσα από αυτούς διέπεται από τις σχέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 4.1, είναι μία καλή προσέγγιση της πραγματικότητας. Όμως, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, οι υπόγειοι ταμιευτήρες διαφορετικών HRU στο μοντέλο δεν συνδέονται υδραυλικά μεταξύ τους, πράγμα που φυσικά απέχει από τις πραγματικές συνθήκες στην περιοχή. Ο υδροφορέας του Ακρωτηρίου δέχεται επιφανειακές και υπόγειες εισροές από το βόρειο όριό του και υπόγειες από την περιοχή του ποταμού Κούρη.

Η δυσκολία προσομοίωσης της φυσικής πραγματικότητας της περιοχής έχει σχέση με τις αρδεύσεις των καλλιεργημένων εκτάσεων (ποσοτικά και χρονικά), τις αντλήσεις από τον υδροφορέα, τον τεχνητό εμπλουτισμό σε συγκεκριμένες εκτάσεις και στην χρήση γης γενικότερα. Στο μοντέλο δεν προβλέπεται εισαγωγή της άρδευσης ή του τεχνητού εμπλουτισμού με χρήση κάποιων ειδικών δεξαμενών κ.λ.π.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων, ακολουθήθηκαν επίπονες και χρονοβόρες διαδικασίες, με βάση πάντα τα διαθέσιμα στοιχεία. Η επιτευχθείσα ακρίβεια της προσομοίωσης είναι ευθέως ανάλογη με την ακρίβεια των δεδομένων.

4.1 Αντιμετώπιση του προβλήματος

➤ Η υδρολογική λεκάνη χωρίστηκε κατ'αρχήν σε 11 HRU (Σχήμα 4.1.1) με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

⇒ Τοπογραφικά

⇒ Γεωλογικά – Υδρογεωλογικά

⇒ Χρήσης γης – Φυτοκάλυψης

Από αυτές κάποιες είναι φυσικές και κάποιες τεχνητές, ώστε να γίνει δυνατή η εισαγωγή στο μοντέλο και η άρδευση της περιοχής και ο τεχνητός εμπλουτισμός που εφαρμόστηκε και ακόμα οι υπόγειες/πλευρικές εισροές από την περιοχή του ποταμού Κούρη στα βορειοδυτικά και από το βόρειο όριο του υδροφορέα.

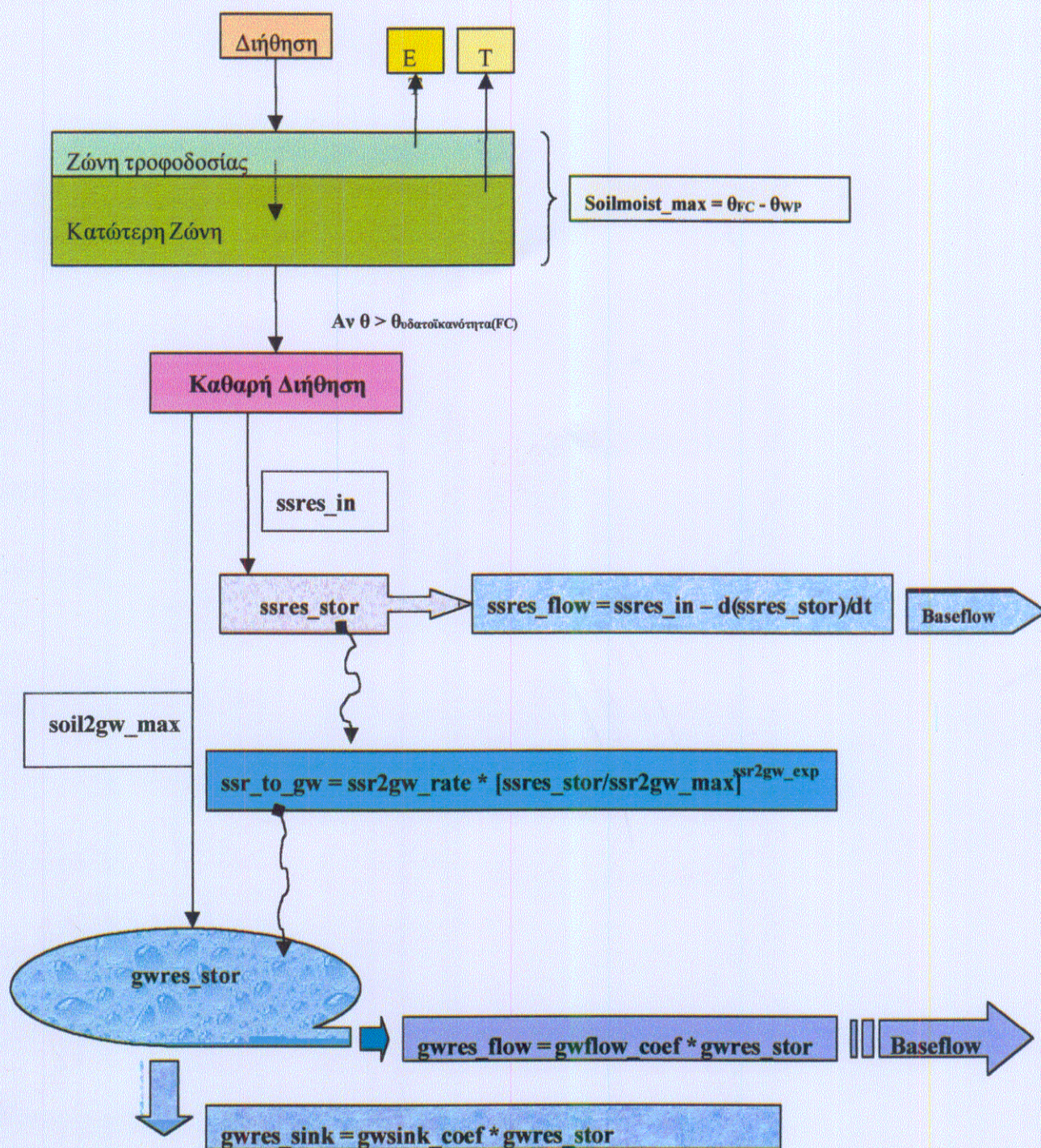
- Η εδαφική ζώνη χωρίστηκε σε ισάριθμους με τις HRU ταμιευτήρες (SZR), λόγω των διαφορετικών συνθηκών σε αυτούς, που οφείλονται στους διάφορους τύπους εδαφών και παχών ριζοστρώματος.
- Η ακόρεστη ζώνη χωρίστηκε σε δύο υποδερμικούς ταμιευτήρες, SSR1 και SSR2.
- Η κορεσμένη ζώνη χωρίστηκε σε δύο υπόγειους ταμιευτήρες, GWR1 και GWR2. Ο GWR2 συμπίπτει μερικώς με τον υδροφορέα του Ακρωτηρίου και μάλιστα με το τμήμα του που βρίσκεται ανατολικά του ποταμού Κούρη. Έχει έκταση 37.3 km², ενώ όλος ο υδροφορέας έχει έκταση 40 km².

Η μεθοδολογία διαίρεσης και οι λόγοι που την επέβαλαν γίνονται φανεροί στην συνέχεια. Στο Σχήμα 4.1.2 παρουσιάζεται ο τρόπος διασύνδεσης των επιφανειακών υδρολογικών ενοτήτων, των εδαφικών, των υποδερμικών και των υπόγειων ταμιευτήρων.

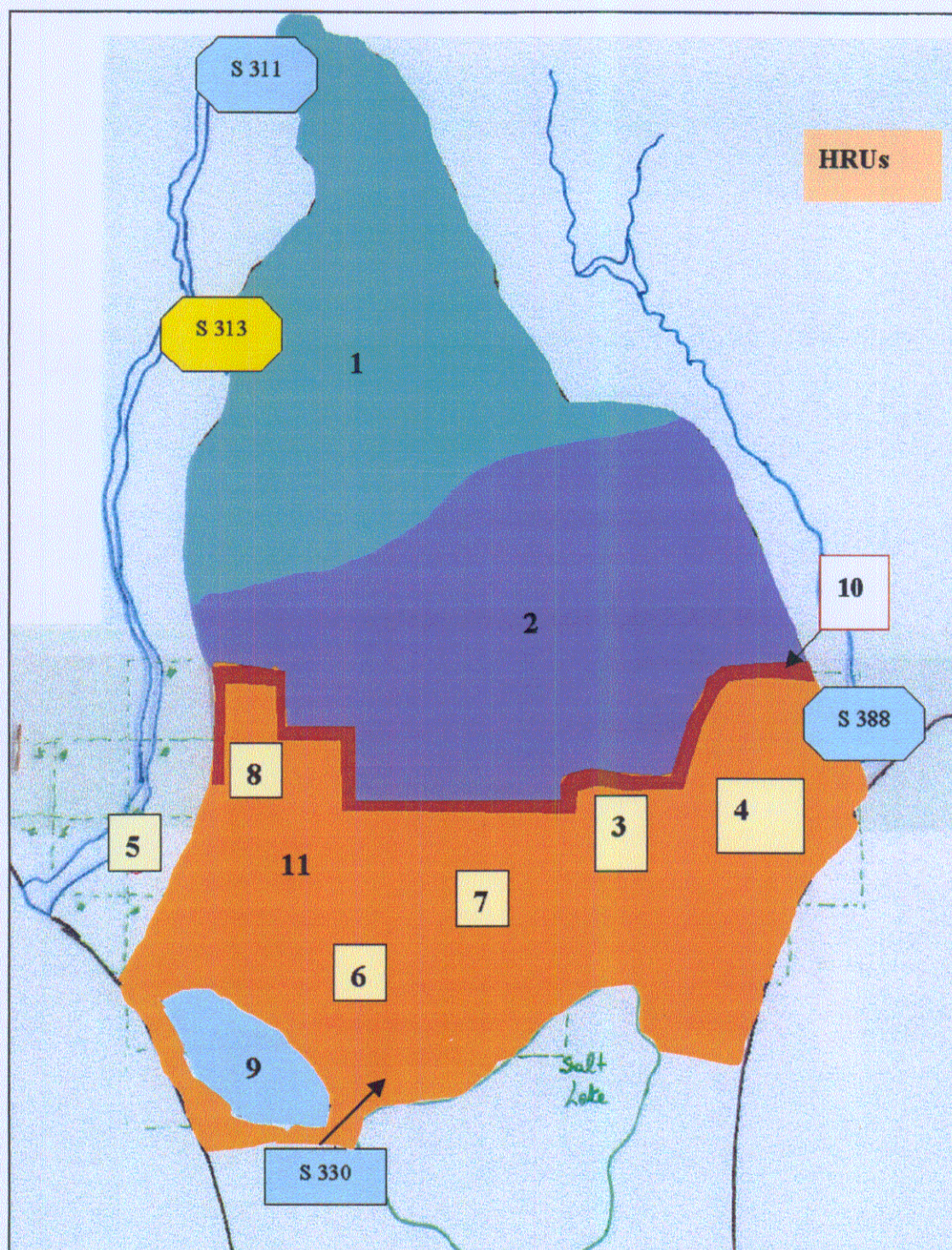
4.1.1 Υδρολογικές ενότητες

HRU1

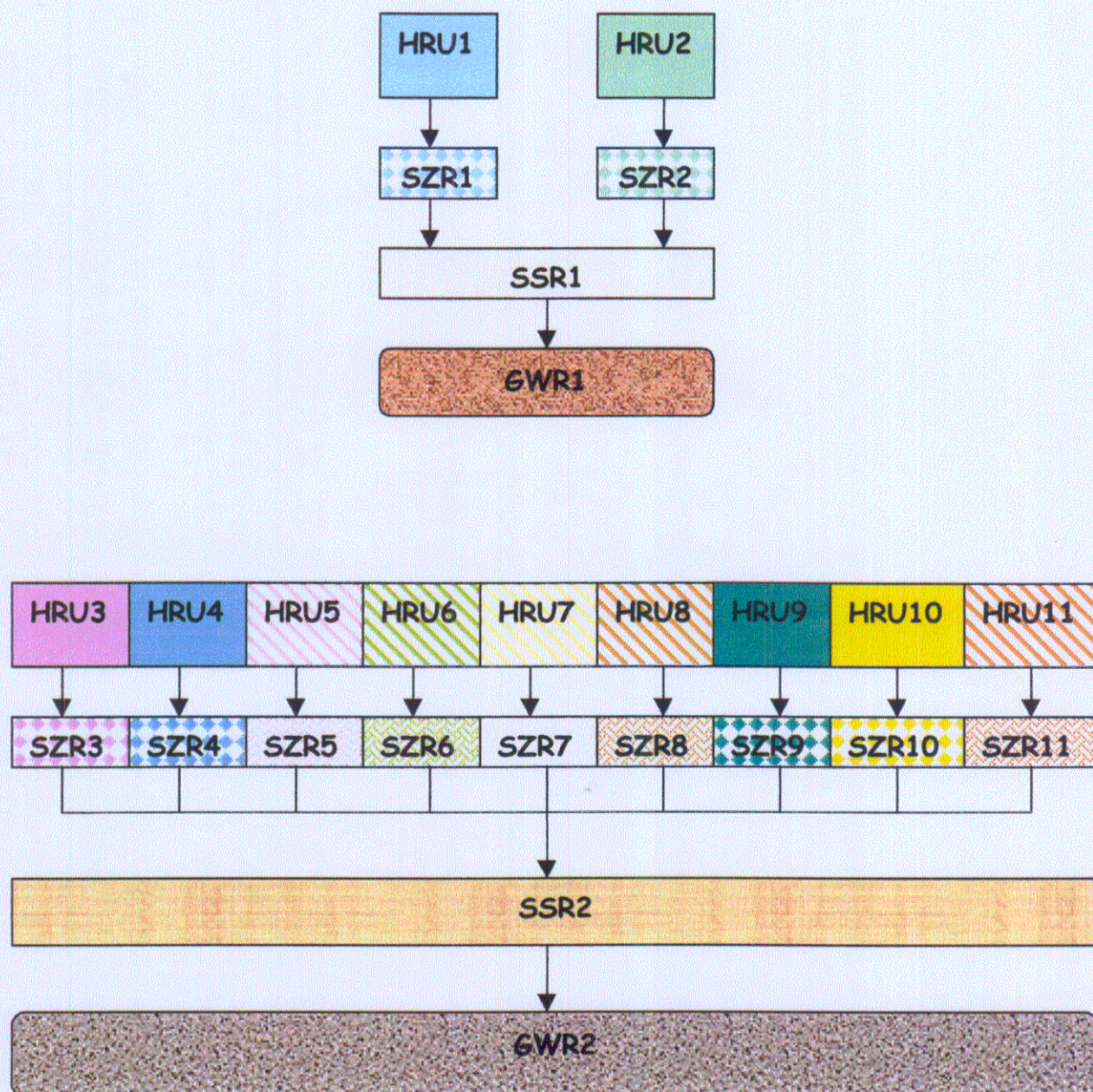
Η HRU1, καταλαμβάνει το βορειότερο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης, έχει έκταση 19 km² και μέσο υψόμετρο 250 m. Δεν καλλιεργείται, ενώ γεωλογικά ανήκει στον σχηματισμό της Πάχνας που είναι ημι-περατός. Η φυτοκάλυψη αποτελείται από θάμνους και χαμηλή βλάστηση.



Σχήμα 4.1: Σχηματική παράσταση και εξισώσεις που διέπουν την προσομοίωση των υπογείων ταμιευτήρων στο μοντέλο PRMS



Σχήμα 4.1.1: Διαίρεση της υδρολογικής λεκάνης σε 11 υδρολογικές ενότητες



Σχήμα 4.1.2: Σχηματική απεικόνιση του τρόπου διασύνδεσης των HRU με τους εδαφικούς, υποδερμικούς και υπόγειους ταμιευτήρες στο μοντέλο PRMS

HRU2

Η HRU2 (26 km²) βρίσκεται νοτίως της HRU1, έχει μέσο υψόμετρο 100 m και η στρωματογραφία της είναι σε αδρές γραμμές από την επιφάνεια προς τα κάτω: άμμοι και χαλίκια (10 m), άργιλοι (10 m), άμμοι και αμμοχάλικα (10-15 m) και τέλος, άργιλοι. Στο πραγματικό (φυσικό) αντίστοιχο της HRU2 απαντώνται δύο υδροφορείς χωρίς ιδιαίτερη σημασία, οι οποίοι όμως συνεχίζονται στην HRU που βρίσκεται αμέσως νοτιότερα (στο μοντέλο), στον υδροφορέα στην πραγματικότητα. Η HRU2 εμπλουτίζεται πλευρικά από τον Κούρη πριν την κατασκευή του φράγματος και εμπλουτίζεται από την άμεση βροχόπτωση.

Η HRU2 συμπίπτει την πραγματικότητα με το βόρειο τμήμα του υδροφορέα του Ακρωτηρίου, που έχει όμως σημαντικές διαφορές με τον κύριο υδροφορέα, όσον αφορά

- το πάχος του υδροφορέα στην περιοχή (0-10 m από το βόρειο όριο με την HRU1, έως το όριο με τον υδροφορέα του Ακρωτηρίου)
- τις υδραυλικές κλίσεις 1.5% (περίπου)
- τις τιμές της μεταφορικότητας (200-2200 m²/day).

Ακόμα, οι αντλήσεις στην περιοχή δεν είναι γνωστές, ούτε υπάρχουν δεδομένα υπόγειας στάθμης.

Η περιοχή δεν καλλιεργείται και η βλάστηση είναι αραιή, αποτελούμενη από θάμνους και χόρτα. Το 30% αυτής της έκτασης, καλύπτεται από οικισμούς, τα τεχνικά έργα του Νοτίου Αγωγού και άλλες κατασκευές.

HRU3

Η HRU3 βρίσκεται νοτίως της HRU2 στην περιοχή του υδροφορέα και το έδαφός της αποτελείται από άμμους και χαλίκια. Αυτή η υδρολογική ενότητα εισήχθη, ώστε να παρασταθεί στο μοντέλο μια περιοχή έκτασης 1.14 km², η οποία καλλιεργείται με αμπέλια, εποχιακά και διάφορα είδη κηπευτικών και αρδεύεται από τον Νοέμβριο έως τον Μάρτιο.

HRU4

Η HRU4 βρίσκεται και αυτή στην περιοχή του υδροφορέα και αντιπροσωπεύει καλλιεργημένη έκταση 13.3 km² με εσπεριδοειδή, τριφύλλια κλπ., η οποία αρδεύεται από τον Απρίλιο έως τον Οκτώβριο.

HRU's 5, 6, 7, 8

Αυτές αποτελούν υδρολογικές ενότητες (HRUs) που εισήχθησαν ώστε να χρησιμεύσουν ως επιφάνειες εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού, σύμφωνα με τα δεδομένα μας. Αντιστοίχως είναι οι

HRU	Δεξαμενές	Εμβαδόν (m ²)
5	Κούρη	8.000
6	Φασούρι	17.500
7	Λανίτης	9.460
8	Κολόσι	10.000

Σε αυτές τις HRU η βλάστηση είναι ουσιαστικά ανύπαρκτη (εκτός από την πρώτη στην κοίτη του ποταμού Κούρη, όπου στο έδαφος έχουν φυτρώσει κάποια υδρόφιλα φυτά, σε μικρή έκταση, όπως καλάμια κλπ). Το έδαφος έχει (τεχνητά) μέγιστες περατότητες και μηδενική υδατοϊκανότητα, ώστε να ελαχιστοποιείται η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας, να αποφεύγεται η εξατμισοδιαπνοή και το νερό να εισρέει ταχύτατα στον υπόγειο υδροφόρο, όπως στην πραγματικότητα συμβαίνει.

HRU9

Η HRU9 ταυτίζεται απολύτως με το οικολογικά σημαντικό τμήμα της περιοχής του Βάλτου Φασουρίου (όπως περιγράφηκε παραπάνω) και καλύπτει έκταση 20.000 m². Η βλάστηση είναι πυκνή, ιδιαίτερα κατά το καλοκαίρι, αποτελούμενη από ευκαλύπτους, υδρόφιλα φυτά, θάμνους κλπ.

HRU10

Η HRU10 είναι και αυτή τεχνητή, με εμβαδόν 1 km², για την απλοποίηση των υπολογισμών μετατροπής των δεδομένων. Η παραδοχή αυτή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, γιατί η επιφάνεια είναι μοναδιαία. Αυτή η υδρολογική ενότητα ορίστηκε, ώστε να γίνει δυνατή η εισαγωγή στο μοντέλο της φυσικής τροφοδοσίας του υπόγειου ταμιευτήρα GW2 (υδροφόρος) που υφίσταται, από τις επιφανειακές και υπόγειες εισροές από το βόρειο όριο του και τις υπόγειες από την περιοχή του ποταμού Κούρη.

Σε αυτήν την HRU10, όπως άλλωστε και στις τεχνητές HRU5, HRU6, HRU7 και HRU8, η βλάστηση είναι ανύπαρκτη, το έδαφος έχει (τεχνητά) μέγιστες περατότητες και μηδενική υδατοϊκανότητα, ώστε να ελαχιστοποιείται η κατακράτηση υγρασίας, να αποφεύγεται η εξατμισοδιαπνοή και το νερό να εισρέει ταχύτατα στον υπόγειο υδροφόρα.

HRU11

Αυτή η υδρολογική ενότητα, ταυτίζεται με την περιοχή του υδροφορέα και καλύπτει έκταση περίπου 18 km². Η βλάστηση αποτελείται από θάμνους, ενώ στην έκτασή της φιλοξενούνται οικισμοί, δρόμοι και λοιπά έργα. Η περιοχή δεν καλλιεργείται.

4.2 Δεδομένα και επεξεργασία τους

Η περίοδος προσομοίωσης αφορά τα έτη 1989-1999. Δεδομένα εισόδου αποτέλεσαν:

1. Ημερήσια κατακρημνίσματα από τους σταθμούς S311 και S330.
2. Ημερήσιες θερμοκρασίες από τον σταθμό S388.
3. Ημερήσιο ύψος εξάτμισης από λεκάνη τύπου A, σταθμός S313.
4. Μηνιαίοι όγκοι νερού που χρησιμοποιήθηκε για άρδευση, από διάφορες πηγές.
5. Μηνιαίοι όγκοι νερού που χρησιμοποιήθηκε στον τεχνητό εμπλουτισμό, από διάφορες πηγές.
6. Οι υπολογισμοί της τροφοδοσίας του υδροφορέα από το βόρειο και βορειοδυτικό τμήμα του (m³/μήνα).
7. Μηνιαίοι όγκοι νερού αντλούμενου για όλες τις χρήσεις από τον υδροφόρα.
8. Μετρήσεις μηνιαίων σταθμών του υπόγειου υδροφορέα τόσο από γεωτρήσεις που αντλούνταν, όσο και από μη αντλούμενες.

Θέλοντας να κάνουμε μέγιστη χρήση των δεδομένων, ώστε να επιτευχθεί κατ' αρχήν η βέλτιστη προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης, και μια που το PRMS δεν προβλέπει την άρδευση ως είσοδο παρά μόνο ημερήσια ύψη κατακρημνισμάτων από διαφόρους βροχομετρικούς σταθμούς, έγιναν οι ακόλουθες μετατροπές:

Για την εισαγωγή της άρδευσης

Οι καλλιεργούμενες/αρδευόμενες εκτάσεις είναι γνωστές με ικανοποιητική ακρίβεια, όπως επίσης είναι η ποσότητα και η συχνότητα εφαρμογής σε αυτές του αρδευτικού νερού, ανάλογα με την καλλιέργεια.

Αρχικά υπολογίστηκε το ποσοστό της έκτασης των καλλιεργειών, που ποτίζονται χειμώνα και καλοκαίρι, επί της συνολικής αρδευόμενης έκτασης και ακολούθως, με βάση τα ποσοστά αυτά και την συχνότητα εφαρμογής της άρδευσης, κατανεμήθηκε η γνωστή μηνιαία άρδευση, ανά ημέρα του έτους και ανά μονάδα επιφάνειας.

Εισήχθησαν, με τον τρόπο αυτό, δύο ακόμα τεχνητοί βροχομετρικοί σταθμοί που παρέχουν ημερήσιες τιμές βροχής, οι οποίες είναι ίσες με το ημερήσιο άθροισμα του ύψους του νερού εφαρμογής και της πραγματικής βροχόπτωσης από τον σταθμό S330.

Από τους τεχνητούς αυτούς βροχομετρικούς σταθμούς, ο ένας συσχετίστηκε με την HRU3 και ο άλλος με την HRU4.

Για την εισαγωγή του τεχνητού εμπλουτισμού

Οι μηνιαίες τιμές του όγκου νερού που εμπλουτίζουν τεχνητά τον υδροφορέα και εφαρμόστηκαν ανά δεξαμενή τεχνητού εμπλουτισμού, ήταν γνωστές με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι μηνιαίοι όγκοι εμπλουτισμού διαιρέθηκαν με το εμβαδόν της επιφάνειας εφαρμογής τους και με τον αριθμό των ημερών κάθε μήνα, για τον υπολογισμό ημερήσιας τιμής εμπλουτισμού.

Δημιουργήθηκαν με τον τρόπο αυτό, σύνολα δεδομένων «βροχόπτωσης» από τέσσερις τεχνητούς βροχομετρικούς σταθμούς, σε αντιστοιχία με τις δεξαμενές τεχνητού εμπλουτισμού του Κούρη, Φασουρίου, Λανίτη και Κολοσίου.

Στις ημερήσιες αυτές τιμές που προέκυψαν ανά δεξαμενή, προστέθηκε και η πραγματική ημερήσια βροχόπτωση με βάση τα δεδομένα του σταθμού S330.

Για τον φυσικό εμπλουτισμό του υδροφορέα από βόρεια και βορειοδυτικά

Επειδή οι υπόγειοι ταμιευτήρες στο μοντέλο δεν συνδέονται, επιλέχθηκε η λύση να τροφοδοτηθεί ο υπόγειος ταμιευτήρας GW2 με την παρεμβολή της HRU10 στην οποία οι εισροές από τις παραπάνω πηγές εφαρμόζονται ως βροχή. Η τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα γίνεται ως εξής:

- έμμεσα από τα βόρεια τμήματα της λεκάνης, δηλαδή η επιφανειακή και η μικρή υπόγεια απορροή από την HRU1 εισέρχεται στην HRU2. Ένα ποσοστό του όγκου των εισροών αυτών, μαζί με το αντίστοιχο ποσοστό των επιφανειακών και υπογείων απορροών από την HRU2 (βόρειο τμήμα του υδροφορέα), που αποτελεί την άμεση τροφοδοσία προς τον υδροφορέα, κατεισδύει και κινείται νότια προς τον κυρίως υδροφορέα, και
- από την περιοχή του Κούρη. Και μετά την κατασκευή του φράγματος η υψηλή υδραυλική κλίση στην περιοχή διατηρείται σε ένα ποσοστό 35-40% (δηλαδή έχει μειωθεί από 1.5-2% σε 0.09%) και, αντιστοίχως, οι εισροές μειώνονται στο ίδιο ποσοστό. Σύμφωνα με μελέτες προ της κατασκευής του φράγματος (ισοζύγιο 1967-1977), οι ετήσιες εισροές από την κοίτη του Κούρη ανέρχονταν σε 15 εκατ. m³. Παράλληλα, κατά την δεκαετία 1988-1998 υπήρχαν και απώλειες από το φράγμα, ανάλογες με το ύψος του νερού σε αυτό.

Ο υπολογισμός των εισροών έγινε ως εξής:

Από το βόρειο όριο

Με χρήση του μοντέλου PRMS, υπολογίστηκαν τα μηνιαία υδατικά ισοζύγια για τις λεκάνες HRU1 και HRU2.

HRU1: αφαιρέθηκε από το μηνιαίο ύψος κατακρημνισμάτων στην επιφάνειά της, το ύψος της εξατμισοδιαπνοής, το ύψος της θετικής μεταβολής στην εδαφική υγρασία και το ύψος των απορροών που θεωρούνται ότι χάνονται και στην πραγματικότητα, είτε στην HRU1, είτε στην επιφάνεια της HRU2. Υπολογίστηκαν έτσι οι μηνιαίες υπόγειες εισροές, οι οποίες θεωρούνται ότι φτάνουν στον υδροφορέα και οι οποίες διαιρέθηκαν με το εμβαδόν της επιφάνειας της HRU1 και με τις ημέρες κάθε μήνα, ώστε να έχουμε ημερήσιο ύψος εισροών ανά μονάδα επιφάνειας.

HRU2: αφαιρέθηκε από το μηνιαίο ύψος κατακρημνισμάτων, η εξατμισοδιαπνοή, η θετική μεταβολή στην εδαφική υγρασία και το 60% της επιφανειακής απορροής. Η εξατμισοδιαπνοή στην HRU2, φτάνει το 60% του ύψους των κατακρημνισμάτων, οπότε το 60% των απορροών θεωρείται ότι εξατμίζονται πριν εισέλθουν στον υδροφορέα. Το υπόλοιπο του ισοζυγίου θεωρείται ότι αποτελεί τις υπόγειες εισροές στον υδροφορέα, διαίρεται με το εμβαδόν της HRU2 και με τις ημέρες κάθε μήνα, ώστε να έχουμε ημερήσιο ύψος εισροών ανά μονάδα επιφάνειας.

Τελικά αθροίζονται τα ημερήσια ύψη εισροών από τις δύο HRU.

Από τον Κούρη

- I. Θεωρούμε ότι οι εισροές πλέον ανέρχονται στο 35% αυτών της δεκαετίας 1967-1977 (5.4 εκατ. m^3).
- II. Από τα βροχομετρικά δεδομένα του σταθμού S311, υπολογίστηκαν τα μέσα ετήσια κατακρημνίσματα για κάθε έτος της δεκαετίας 1967-1977, καθώς και το μέσο ετήσιο ύψος κατακρημνισμάτων της δεκαετίας (503 mm).
- III. Υπολογίστηκε το ύψος των μέσων μηνιαίων κατακρημνισμάτων για την δεκαετία 1967-1977.
- IV. Υπολογίστηκε το % ποσοστό αυτών επί του μέσου ετήσιου ύψους βροχής δεκαετίας.
- V. Υπολογίστηκαν οι μηνιαίοι όγκοι εισροών ως επί % ποσοστό των ολικών εισροών (5.4 εκατ. m^3).
- VI. Για τα έτη 1989-1999 υπολογίστηκαν τα μηνιαία ύψη βροχής και το ποσοστό αυτών επί του μέσου μηνιαίου ύψους του αντίστοιχου μήνα της δεκαετίας 1967-1977.
- VII. Υπολογίστηκαν οι όγκοι εισροών ανά μήνα από τους όγκους των μηνιαίων εισροών της δεκαετίας επί του ποσοστού (VI).
- VIII. Οι ετήσιοι εκτιμημένοι όγκοι απωλειών από το φράγμα του Κούρη, διαιρέθηκαν με τον αντίστοιχο αριθμό ημερών κάθε έτους, για την εύρεση ημερήσιας τιμής.

Τελικά αθροίστηκαν οι μηνιαίοι όγκοι των εισροών από το βόρειο τμήμα τον Κούρη και από τις απώλειες του φράγματος και διαιρέθηκαν με το εμβαδόν της HRU10 (1 km^2). Τελικά το μηνιαίο ύψος εισροών, διαιρέθηκε με τις αντίστοιχες ημέρες του μήνα.

Για την ποσότητα της άντλησης

Ως δεδομένα είχαμε την μηνιαία άντληση (σε m^3) ανά γεώτρηση και ανά χρήση. Με βάση τις συντεταγμένες των πηγαδιών επιλέχθηκαν εκείνα τα οποία βρίσκονταν στην περιοχή μελέτης που ορίσαμε επί του υδροφορέα. Οι μηνιαίες απολήψεις ανά γεώτρηση αθροίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των μηνιαίων παροχών (m^3 /μήνα).

Στάθμη υπογείου νερού

Αν και τα δεδομένα μας δόθηκαν ως μηνιαία στάθμη υπόγειου νερού σε γεωτρήσεις ή πηγάδια σε κατάσταση ηρεμίας, κατά την ταυτοποίηση και συναξιολόγησή τους με τις γεωτρήσεις από τις οποίες είχαμε απολήψεις, παρατηρήθηκε ότι μερικά από αυτά τα πηγάδια/γεωτρήσεις στην πραγματικότητα αντλούνταν συστηματικά.

Η σύγκριση της στάθμης σε πηγάδια που δεν αντλούνται και αντλούνται, φαίνεται στο Διάγραμμα 3.8.4 που παρουσιάστηκε, νωρίτερα, στο κεφάλαιο 3. Παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις είναι συστηματικά 1 m, περίπου, οπότε οι αντλούμενες γεωτρήσεις έπρεπε να αποκλειστούν από το σύνολο που θα καθόριζε την στάθμη για την βαθμονόμηση του μοντέλου. Έγινε επίσης προσπάθεια να εξομαλυνθούν οι διαφορετικές πυκνότητες των σημείων μετρήσεων στάθμης στον υδροφόρο, έτσι ώστε να έχουμε ενδεικτικά μία γεώτρηση ανά km^2 . Σε περίπτωση που είχαμε δεδομένα από περισσότερες της μίας γεωτρήσεις ανά km^2 , βρήκαμε τον μέσο όρο των σταθμών αυτών. Αποκλείστηκαν και γεωτρήσεις για τις οποίες δεν είχαμε συνεχείς εγγραφές για σειρά ετών, ενώ, όταν έλλειπαν μεμονωμένες τιμές στάθμης, αυτές είτε συμπληρώθηκαν με την χρήση κάποιας γειτονικής εγγραφής, είτε εκτιμήθηκαν από την μορφή της κύμανσης της στάθμης στην ίδια γεώτρηση σε άλλα έτη.

Μια που το μοντέλο χρησιμοποιεί ημερήσιο χρονικό βήμα, για κάθε ημέρα του ίδιου μήνα η τιμή της παρατηρημένης στάθμης παραμένει σταθερή.

Από όλα τα παραπάνω “τεχνάσματα” γίνεται φανερό η προσπάθειά για την μέγιστη αξιοποίηση της κάθε είδους πρωτογενούς πληροφορίας, αφού ελεγχθεί και αξιολογηθεί, καθώς και η επιθυμία να αποδοθεί η φυσική πραγματικότητα με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια.

Τα δεδομένα μας εκτός των μετεωρολογικών, ήταν όλα μηνιαίες τιμές και ως εκ τούτου ήταν αναγκαίο οι τιμές αυτές να μοιρασθούν ομοιόμορφα στον χρόνο, πράγμα που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εξομάλυνση (φιλτράρισμα) των διαφορών μεταξύ των ημερών του έτους, που οδήγησε στην αδυναμία προσέγγισης μεγίστων και ελαχίστων τιμών κατά την προσομοίωση, όπως θα φανεί στην συνέχεια.

4.3 Δεδομένα εισόδου στο PRMS

Το αρχείο των δεδομένων που χρησιμοποιεί το μοντέλο έχει την μορφή που εμφανίζεται στο Σχήμα 4.3.

CyprusPst:S311+S330+HRU4+HRU10+KPLK+T388

runoff 0

precip 8

tmax 1

tmin 1

tstemp 1

solrad 0

pan_evap 1

form_data 1

gw_pump 2

gw_elev 2

1989	10	1	0	0	0	0	0	0.68	0	50.51	11.27	0	0	1.90	29.5	19.9	24.7	0.31	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	2	0	0	0	0.04	0.05	0.05	0.05	50.57	11.32	0.05	0.05	1.90	30	18.8	24.4	0.29	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	3	0	0	0	0.02	0.02	0.02	0.02	50.53	11.29	0.02	0.02	1.90	31.6	20.5	26.1	0.3	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	4	0	0	0	0	0	0	0	50.51	11.27	0	0	1.90	32	22	27	0.43	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	5	0	0	0	0.81	0.25	0.25	0.25	50.76	11.52	0.25	0.25	1.90	31.5	20.5	26	0.42	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	6	0	0	0	0	0.15	0.15	0.15	50.67	11.42	0.15	0.15	1.90	30.2	21	25.6	0.42	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	7	0	0	0	0	0	0	0	50.51	11.27	0	0	1.90	30.6	21.2	25.9	0.41	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	8	0	0	0	0	0	0	0	50.51	11.27	0	0	1.90	30.5	22.4	26.5	0.29	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	9	0	0	0	0	0	0	0	50.51	11.27	0	0	1.90	32	18.5	25.3	0.24	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	10	0	0	0	0	0	0.68	0	50.51	11.27	0	0	1.90	31	20	25.5	0.26	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	11	0	0	0	0	0	0	0	50.51	11.27	0	0	1.90	30.5	21	25.8	0.28	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	12	0	0	0	0	0	0	0	50.51	11.27	0	0	1.90	30.6	20.1	25.4	0.3	2	0	1201684	0	0.59
1989	10	13	0	0	0	0	0	0	0	50.51	11.27	0	0	1.90	31.4	19.5	25.5	0.31	2	0	1201684	0	0.59

Σχήμα 4.3: Μορφή αρχείου εισαγωγής δεδομένων στο μοντέλο PRMS

Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο, όπως αυτό τροποποιήθηκε για τους σκοπούς της μελέτης μας, αποτέλεσαν:

1. Χρόνος (Στήλες 1 – 6).
2. Βροχόπτωση από τους πραγματικούς σταθμούς S311 και S330, και από τους επτά (7) τεχνητούς που προαναφέρθηκαν, σε inches (Στήλες 7 – 15).
3. Μέγιστες και ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες, S313, σε °C (Στήλες 16 – 17).
4. Μέση θερμοκρασία ημέρας, σε °C (Στήλη 18).
5. Ημερήσια Εξατμισοδιαπνοή από Class A Pan, S388, σε inches (Στήλη 19).
6. Δεδομένα φόρμας (Στήλη 20).

7. Ημερήσιοι όγκοι απόληψης νερού από κάθε υδροφορέα, σε m^3/day (Στήλες 21 – 22).
8. Παρατηρημένη στάθμη ανά ημέρα, σε m (a.m.s.l.) (Στήλες 23 – 24).

4.4 Παράμετροι

Κάποιες από τις παραμέτρους του μοντέλου ήταν γνωστές (από μετρήσεις – δεδομένα), άλλες εκτιμήθηκαν (με βάση την βιβλιογραφία), κάποιες τέθηκαν όπως πρότεινε το πρόγραμμα, και τελικά μερικές από τις τελευταίες, βελτιστοποιήθηκαν με βάση τις μεθόδους βελτιστοποίησης που περιλαμβάνονται στο μοντέλο και αναφέρθηκαν παραπάνω.

Στους παρακάτω Πίνακες 4.4.1 – 4.4.3 αναφέρονται και περιγράφονται οι παράμετροι που ήταν γνωστές, που εκτιμήθηκαν και όσες βελτιστοποιήθηκαν. Σε παρένθεση φαίνονται οι διαστάσεις τους.

Πίνακας 4.4.1: Γνωστές παράμετροι

basin_area (1)	Ολικό εμβαδόν υδρολογικής λεκάνης (acres)
cov_type (11)	Τύπος φυτοκάλυψης σε κάθε HRU
soil_type (11)	Τύπος εδάφους σε κάθε HRU
epan_coef (12)	Συντελεστής εξατμισοδιαπνοής λεκάνης τύπου A
hru_area (11)	Εμβαδόν HRU (acres)
hru_elev (11)	Μέσο υψόμετρο HRU (ft)
hru_slope (11)	Μέση κλίση της HRU slope (decimal vertical ft/horizontal ft - %)

Πίνακας 4.4.2: Εκτιμημένες παράμετροι

gwres_area (2)	Εμβαδόν υπογείου υδροφορέα (acres)
hru_percent_imperv	Αδιαπέρατη επιφάνεια σε κάθε HRU (%)
ppt_rad_adj	Τιμή κατωφλίου ύψους βροχής πάνω από το οποίο θεωρείται ότι η ακτινοβολία είναι μειωμένη
soil2gw_max (11)	Μέγιστη τιμή για την μεταφορά νερού από το έδαφος στο υπόγειο νερό (inches)
soil_moist_init (11)	Αρχικές τιμές υγρασίας στο έδαφος (inches)
soil_moist_max (11)	Μέγιστη τιμή υγρασίας στο έδαφος
soil_rechr_init (11)	Αρχική τιμή υγρασίας στο ανώτερο έδαφος (inches)
soil_rechr_max (11)	Μέγιστη τιμή υγρασίας στο ανώτερο έδαφος (inches)

Πίνακας 4.4.3: Παράμετροι που βελτιστοποιήθηκαν

soil2gw_max (11)	Μέγιστη τιμή για την μεταφορά νερού από το έδαφος στο υπόγειο νερό (inches)
gw_depth_datum (2)	Επίπεδο αναφοράς του υπόγειου νερού (m)
gw_porosity (2)	Πορώδες υπογείου υδροφορέα
gwflow_coef (2)	Συντελεστής διόδευσης της υπόγειας ροής (1/day)
gwsink_coef (3)	Συντελεστής διόδευσης της ροής προς καταβόθρα (1/day)
gwstor_init (2)	Αρχική αποθήκευση σε υπόγειο υδροφορέα (inches)
ssr2gw_exp (2)	Συντελεστής διόδευσης της ροής από τον υποδερμικό προς τον υπόγειο υδροφορέα (1/day)
ssr2gw_rate (2)	Συντελεστής διόδευσης της ροής από τον υποδερμικό προς τον υπόγειο υδροφορέα (1/day)
ssrcoef_lin (2)	Γραμμικός συντελεστής διόδευσης του υποδερμικού υδροφορέα (1/day)
ssrcoef_sq (2)	Μη γραμμικός συντελεστής διόδευσης του υποδερμικού υδροφορέα
ssrmax_coef (2)	Συντελεστής διόδευσης της ροής από τον υποδερμικό προς τον υπόγειο υδροφορέα
ssstor_init (2)	Αρχική αποθήκευση σε υποδερμικό υδροφορέα (inches)

Οι παράμετροι του Πίνακα 4.4.3 αφορούν την προσομοίωση του υπεδάφιου τμήματος και συνδέονται μεταξύ τους με βάση τις εξισώσεις που υπάρχουν στο μοντέλο και που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 4.1.

4.4.1α Παράμετροι που εκτιμήθηκαν

Για τις τιμές μερικών παραμέτρων που εκτιμήθηκαν αξίζει να αναφερθούν τα ακόλουθα:

1. **hru_percent_imperv:** η παράμετρος αυτή εκτιμήθηκε από τους διαθέσιμους χάρτες ως ποσοστό επί της επιφάνειας της κάθε HRU που καταλαμβάνεται από οικισμούς, δρόμους και λοιπά έργα.
2. **ppt_rad_adj:** η παράμετρος αυτή αναφέρεται στην σχέση της ηλιακής ακτινοβολίας με το ύψος βροχόπτωσης και επηρεάζει άμεσα τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Το μοντέλο θεωρεί ότι αν το ύψος βροχής ξεπερνά την τιμή 0.2 inches (προτεινόμενη, εύρος κύμανσης 0-5 inches) η ακτινοβολία είναι

μειωμένη. Όμως με τον τρόπο εισόδου του εμπλουτισμού, των αρδεύσεων κλπ στις HRU του μοντέλου, σε κάποιες περιπτώσεις το ύψος βροχής ξεπερνά τις 20 inches. Ως εκ τούτου το μοντέλο μείωνε την πραγματική ET. Θέσαμε έτσι – παρά τους περιορισμούς – τιμή για αυτή την παράμετρο, αυθαίρετα, 20 inches.

3. **soil2gw_max**: Το μοντέλο προτείνει την τιμή 0 (inches) για την απ' ευθείας μεταφορά νερού από το έδαφος στον υπόγειο ταμιευτήρα, με μέγιστη τιμή 5 inches. Για τις τεχνητές HRU χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή, ώστε να μειώνονται οι απώλειες από εξάτμιση που θα είχαμε από την καθυστέρηση εισροής στον υδροφορέα. Για τις υπόλοιπες HRU αρχικά τέθηκε η προτεινόμενη τιμή 0.

4. **soil_moist_init**
soil_moist_max
soil_rechr_init
soil_rechr_max

Οι τιμές των παραμέτρων αυτών εκτιμήθηκαν με βάση την βιβλιογραφία, για κάθε πραγματική HRU. Από το βάθος του ριζοστρώματος της επικρατούσας καλλιέργειας σε κάθε υδρολογική ενότητα και τον τύπο του εδάφους (άμμοι, άργιλοι), υπολογίστηκαν η υδατοϊκανότητα και το σημείο μαρασμού για κάθε HRU.

Ως **soil_moist_init** για την περίπτωση αμμώδους εδάφους, όπως αυτό των HRU 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 και 11, υπολογίστηκε το γινόμενο της τιμής 11%, η οποία προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ του σημείου μαρασμού και της υδατοϊκανότητας, επί το βάθος του ριζοστρώματος της φυτοκάλυψης. Για την HRU1 – αργιλικό έδαφος – το **soil_moist_init** υπολογίστηκε ως 26%, επί το αντίστοιχο πάχος του ριζοστρώματος.

Ως **soil_moist_max** τέθηκε η υδατοϊκανότητα επί το βάθος του ριζοστρώματος για κάθε τύπο εδάφους και βλάστησης.

Ως **soil_rechr_init** και **soil_rechr_max**, τέθηκε το 1/3 των τιμών **soil_moist_init** και **soil_moist_max**, όπως προτείνει το πρόγραμμα.

4.4.1β Παράμετροι που βελτιστοποιήθηκαν

Οι τιμές των παραμέτρων που βελτιστοποιήθηκαν και αφορούν, κατά βάση, το τμήμα του μοντέλου που έχει σχέση με τους υπόγειους υδροφορείς, αρχικά έλαβαν τιμές που προτεινόταν από το μοντέλο, ως εξής:

Παράμετρος	Τιμή	Όρια διακύμανσης
soil2gw_max	<i>Ανάλογα με την HRU</i>	0 – 5
gw_depth_datum	0	-1.000 – 1.000
gw_porosity	0.36	0 – 1
gwflow_coef	0.015	0 – 1
gwsink_coef	0	0 – 1
gwstor_init	0.1	0 – 20
ssr2gw_exp	1	0 – 3
ssr2gw_rate	0.1	0 – 1
ssrcoef_lin	0.1	0 – 1
ssrcoef_sq	0.1	0 – 1
ssrmax_coef	1	0 – 20
ssstor_init	0	0 – 20

Η παράμετρος **gw_depth_datum** χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της στάθμης στον υπόγειο ταμιευτήρα. Η σημασία της είναι να παρέχει την δυνατότητα αναγωγής της προσομοιωμένης στάθμης, αφού κατά τον υπολογισμό της αποθήκευσης στον υπόγειο ταμιευτήρα με το μοντέλο PRMS, δεν εισάγεται το πραγματικό βάθος του υδροφορέα, αλλά μόνο ο περιεχόμενος όγκος νερού σε αυτόν. Ο όγκος αυτός, με την χρήση του πορώδους μεταφράζεται σε στάθμη (Σχήμα 4.4.1).

Για τον υπολογισμό του ισοζυγίου η εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι

$$x(t+1) = x(t) - p(t)/A$$

όπου

$x(t)$ η ποσότητα νερού στον υπόγειο ταμιευτήρα την χρονική στιγμή $x(t)$

$p(t)$ ο όγκος νερού που αντλείται την ίδια χρονική στιγμή

A το εμβαδόν του υπόγειου ταμιευτήρα

Επειδή έχουμε μηνιαίες τιμές του όγκου νερού που αντλείται,

$$p(t) = P(t)/d(T)$$

όπου

P ο μηνιαίος όγκος νερού που αντλείται

T ο μήνας στον οποίο βρίσκεται το βήμα t

$d(T)$ ο αριθμός ημερών του μήνα T

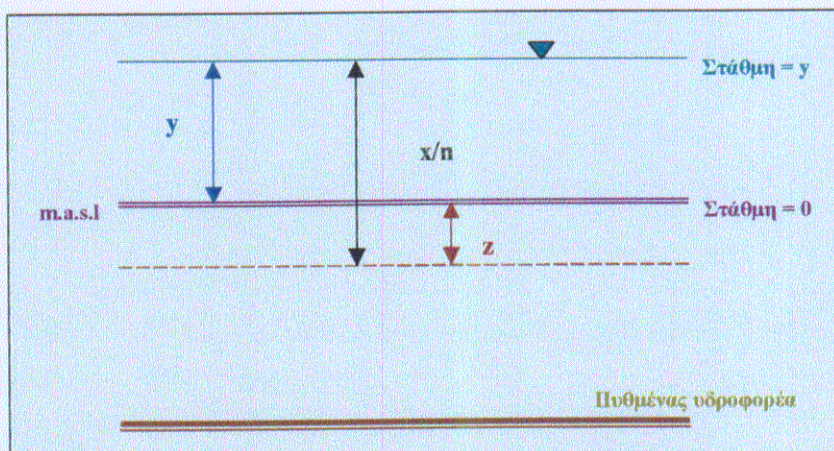
Η στάθμη $y(t)$ υπολογίζεται ως

$$y(t) = x(t)/n - z$$

όπου

n το πορώδες του υδροφορέα

z το gw-datum



Σχήμα 4.4.1: Σχηματική απεικόνιση υπολογισμού της παραμέτρου *datum*

Η συνιστώσα του υδρολογικού ισοζυγίου **gwres_flow**, ορίζεται από το μοντέλο ως βασική απορροή, ενώ η συνιστώσα **gwres_sink**, ορίζεται από το μοντέλο ως το νερό που χάνεται από τον υδροφορέα προς άγνωστη κατεύθυνση – εκτός λεκάνης. Η συνιστώσα **gwres_sink**, χρησιμοποιείται από τον χρήστη όταν είναι γνωστό, ότι το ισοζύγιο της υδρολογικής λεκάνης δεν κλείνει, δηλαδή όταν υπάρχουν εκροές εκτός λεκάνης, οι οποίες δεν συμμετέχουν στο ισοζύγιο αυτής.

Η προσομοίωση του υδροφορέα του Ακρωτηρίου της Κύπρου γίνεται χρησιμοποιώντας και τις δύο συνιστώσες

☒ gwres_flow διότι αν και δεν έχουμε βασική απορροή σε ποτάμια έχουμε πολύ σημαντική εκφόρτιση του υδροφορέα στην θάλασσα και στην Αλμυρή λίμνη κατά μήκος του νοτίου ορίου του, ενώ η

☒ gwres_sink για να έχουμε μία παράμετρο με την οποία μπορούμε να προσεγγίσουμε καλύτερα την πραγματικότητα (έναν ακόμα βαθμό ελευθερίας).

Εξάλλου αποδείχθηκε ότι το μοντέλο ήταν πιο ακριβές στην προσομοίωση της στάθμης, όταν και η συνιστώσα gwres_sink συμμετείχε στο ισοζύγιο.

5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Προσομοίωση - Βελτιστοποίηση

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

5.1 Προσομοίωση

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την προσομοίωση, έχει ως εξής:

1. Υπολογίστηκαν οι στάθμες στον υδροφορέα και η τετραγωνική ρίζα των τετραγωνικών σφαλμάτων μεταξύ παρατηρημένης και υπολογισμένης στάθμης, εφαρμόζοντας το μοντέλο με έξι διαφορετικά σύνολα παραμέτρων. Δύο αρχικές προσομοιώσεις έγιναν χωρίς βελτιστοποίηση παραμέτρων, όπως αναφέρεται στα 5.1.1 και 5.1.2, που ακολουθούν. Τέσσερις ακριβείς προσομοιώσεις έγιναν με βελτιστοποιημένες παραμέτρους κατά Rosenbrock και κατά Hyper Tunnel, όπως αναφέρεται στο 5.2.
 - i. Αρχικά βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροι soil2_gwmax για τις HRU 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 και 11 με την μεθοδο Rosenbrock. Στην συνέχεια, διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές, βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροι που αναφέρονται στα SSR2 και GWR2 με την μέθοδο Rosenbrock, εκτός της παραμέτρου gwres_sink, η οποία διατηρήθηκε στην τιμή 0.
 - ii. Με την μέθοδο Hyper Tunnel βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροι που προέκυψαν από την μέθοδο Rosenbrock (soil2_gwmax και οι παράμετροι των SSR2 και GWR2), εκτός πάλι της παραμέτρου gwres_sink, η οποία διατηρήθηκε στην τιμή 0.
 - iii. Στην συνέχεια βελτιστοποιήθηκαν όλες οι παράμετροι που προαναφέρθηκαν (και η gwres_sink) με την μεθοδο Rosenbrock.
 - iv. Τελικά, κάνοντας χρήση των παραμέτρων soil2_gwmax (σταθερές) [βήμα (iii)], βελτιστοποιήθηκαν όλες οι παράμετροι [των SSR και GWR2 που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση (iii)] με την μέθοδο Hyper Tunnel.
2. Υπολογίστηκε το ισοζύγιο της υδρολογικής λεκάνης και του υδροφορέα με βάση τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους της μεθόδου Hyper Tunnel από το βήμα (ii).
3. Υπολογίστηκε το ισοζύγιο της υδρολογικής λεκάνης και του υδροφορέα με βάση τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους της μεθόδου Hyper Tunnel από το βήμα (iii).

5.1.1 Προσομοίωση με τις τιμές παραμέτρων που προτείνει το πρόγραμμα

Την πρώτη φορά, το μοντέλο έτρεξε με τιμές των παραμέτρων που ήταν γνωστές από πρωτογενή στοιχεία και τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων όπως τις προτείνει το πρόγραμμα. Οι υπολογισμένες στάθμες στον υδροφορέα δεν ακολουθούν την πραγματική κύμανση της στάθμης, όπως αυτή προκύπτει από τα δεδομένα μας (Σχήμα 5.1.1). Συγχρόνως δε, φαίνεται ότι ο υδροφορέας αδειάζει εντελώς σε κάθε υδρολογικό έτος, πράγμα το οποίο αντίκειται στην φυσική πραγματικότητα.

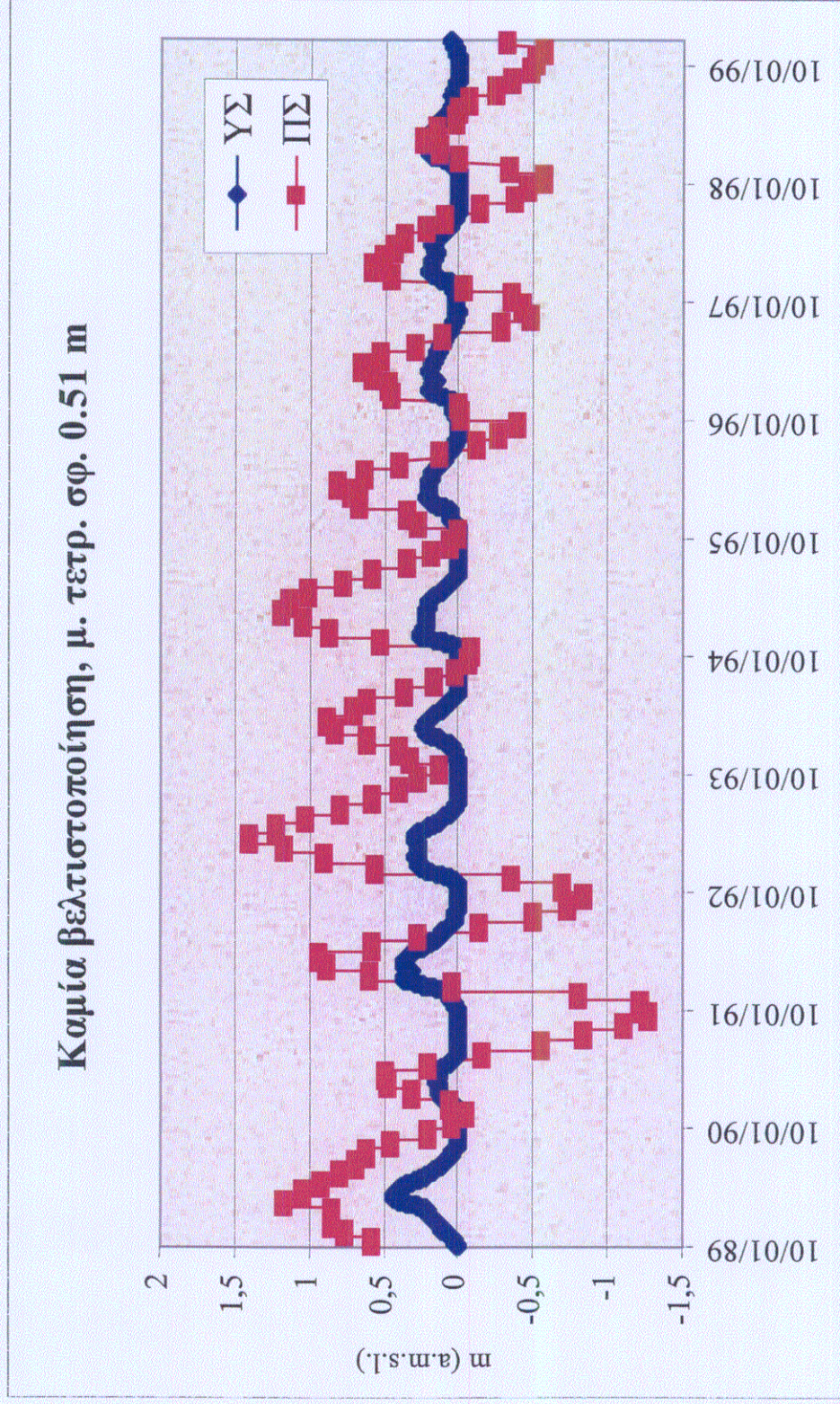
Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ της παρατηρημένης και προσομοιωμένης στάθμης είναι 0.51 m.

5.1.2 Προσομοίωση με τις τιμές παραμέτρων που προτείνει το πρόγραμμα και πορώδες 14%

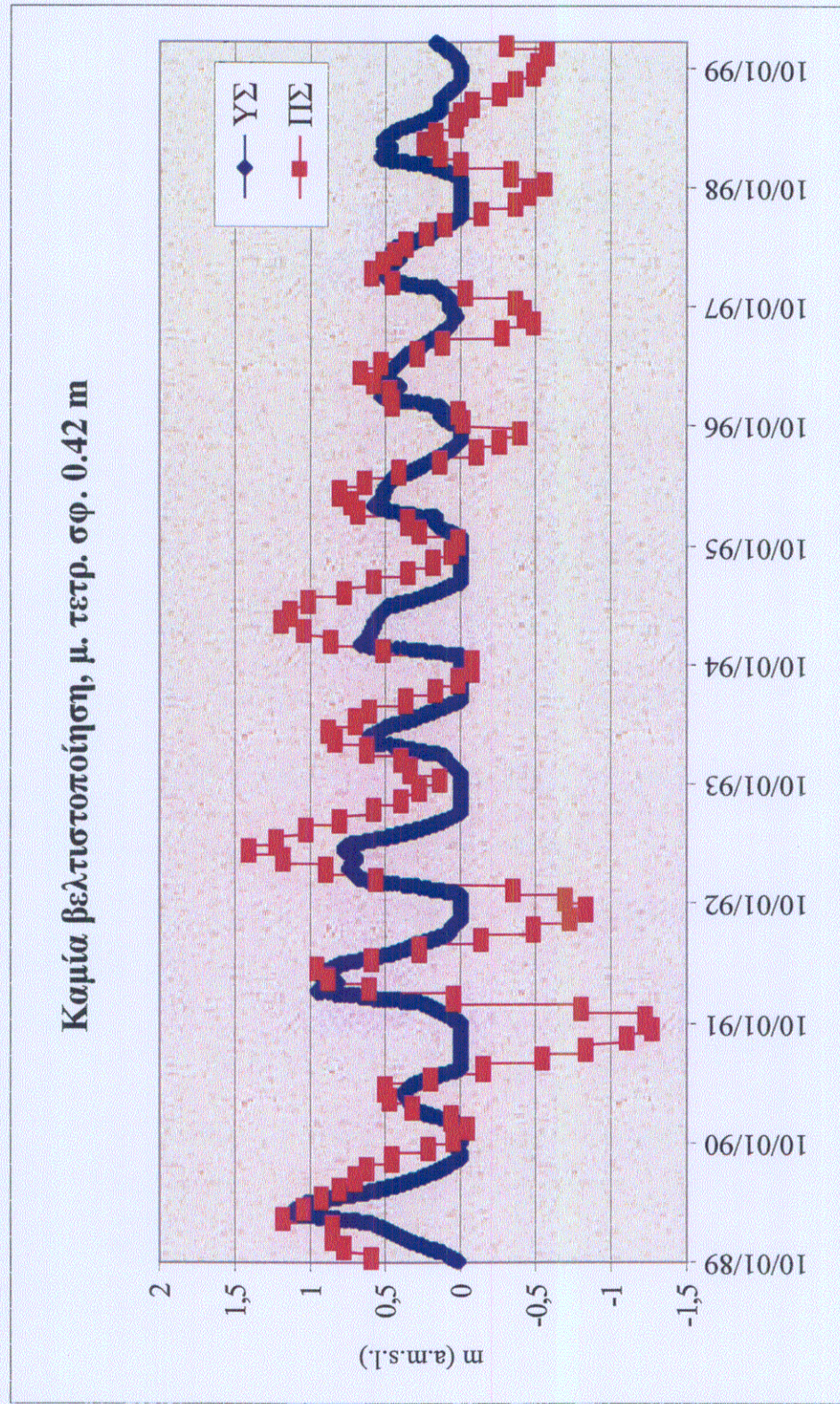
Το μοντέλο έτρεξε με τις τιμές των παραμέτρων που προτείνει το πρόγραμμα και πορώδες 14%, τιμή εκτιμημένη από τέστ αντλήσεως σε επιλεγμένα σημεία της περιοχής του υδροφορέα.

Στο Σχήμα 5.1.2 φαίνονται η παρατηρημένη και η προσομοιωμένη στάθμη στον υδροφορέα. Η παρατηρημένη στάθμη συμφωνεί καλύτερα με την προσομοιωμένη από το Σχήμα 5.1.1, αλλά ο υδροφορέας συνεχίζει να αδειάζει σε κάθε υδρολογικό έτος.

Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ της παρατηρημένης και προσομοιωμένης στάθμης είναι 0.42 m, δηλαδή η προσομοίωση είναι σαφώς βελτιωμένη σε σχέση με την προηγούμενη.



Σχήμα 5.1.1: Σύγκριση παρατηρημένης (ΠΣ) και υπολογισμένης (YΣ) στάθμης στον υδροφόρα Ακρωτήριον με τιμές παραμέτρων που προτείνονται από το πρόγραμμα



Σχήμα 5.1.2: Σύγκριση παρατηρημένης (ΠΣ) και υπολογισμένης (YS) στάθμης στον υδροφorea Ακρωτηρίου με τιμές παραμέτρων που προτείνονται από το πρόγραμμα και πορώδες 14 %

5.2 Βελτιστοποίηση

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις για την βελτιστοποίηση με τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαφορετικές.

Οι περιορισμοί αναφέρονται στις τιμές των παραμέτρων, οι οποίες πρέπει να κυμαίνονται σε κάποια όρια και είναι κοινοί και για τις δύο μεθόδους.

5.2.1 Μέθοδος Rosenbrock

Αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι το απόλυτο σφάλμα μεταξύ παρατηρημένης και προσομοιωμένης στάθμης στον υδροφορέα.

$$\text{Min } f(x), f(x) = |\text{Παρατηρημένη Στάθμη} - \text{Προσομοιωμένη στάθμη}|$$

Για την μέθοδο Rosenbrock ορίστηκαν ως περίοδος αρχικοποίησης τα υδρολογικά έτη 1989-1991, ώστε να τρέξει το πρόγραμμα και να ληφθούν νέες τιμές παραμέτρων, ανεξάρτητες από τις οριζόμενες από τον χρήστη.

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων έγινε για όλα τα έτη της προσομοίωσης 1989-1999 και για όλους τους μήνες 1-12 κάθε έτους. Πραγματοποιήθηκαν είκοσι ολοκληρώσεις για την περίπτωση του βήματος (i) και δέκα ολοκληρώσεις για την περίπτωση του βήματος (iii), όπως αυτά περιγράφηκαν στην παράγραφο (5.1).

Η βελτιστοποίηση με την μέθοδο Rosenbrock διάρκεσε κατά μέσο όρο περίπου 15 λεπτά για τις είκοσι ολοκληρώσεις και 7 λεπτά για τις δέκα ολοκληρώσεις, σε ένα προσωπικό υπολογιστή με επεξεργαστή PentiumIII/450MHz. Προφανώς η διάρκεια εκτέλεσης έχει άμεση σχέση με τον αριθμό των παραμέτρων που βελτιστοποιούνται ταυτοχρόνως.

5.2.2 Μέθοδος Hyper Tunnel

Αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ παρατηρημένης και προσομοιωμένης στάθμης στον υδροφορέα.

$$\text{Min } f(x), f(x) = (\text{Παρατηρημένη Στάθμη} - \text{Προσομοιωμένη στάθμη})^2$$

Στην μέθοδο Hyper Tunnel δεν υπάρχει περίοδος αρχικοποίησης, όπως στην Rosenbrock. Πραγματοποιούνται πολλές ολοκληρώσεις, μέχρι τελικά να επιτευχθεί αυτόματη σύγκλιση στην βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (ελάχιστο).

Ο μέσος χρόνος διάρκειας της βελτιστοποίησης εξαρτάται και εδώ από τον αριθμό των παραμέτρων που βελτιστοποιούνται ταυτοχρόνως και είναι πολλαπλάσιος του χρόνου που χρειάζεται η βελτιστοποίηση κατά Rosenbrock.

5.3 Βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων πλην της gwres_sink (βλ. §5.1)

5.3.1 Βελτιστοποίηση παραμέτρων soil2_gwmax κατά Rosenbrock

Στην συνέχεια βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροι soil2_gwmax για τις HRU που συνδέονται με τον υπόγειο ταμιευτήρα GWR2, διότι οι αρχικές τους τιμές είχαν τεθεί κατ' εκτίμηση για τις τεχνητές HRU 5, 6, 7, 8 και 11 και όπως ορίζει το πρόγραμμα (default) για τις υπόλοιπες. Η παράμετρος soil2_gwmax εκφράζει την μέγιστη ποσότητα νερού (σε υπέρβαση της υδατοϊκανότητας) που μεταφέρεται άμεσα από το έδαφος στον υπόγειο ταμιευτήρα.

Οι αρχικές και τελικές τιμές της soil2_gwmax για τις αντίστοιχες HRU φαίνονται στον Πίνακα 5.3.1.

Πίνακας 5.3.1: Πίνακας αρχικών και βελτιστοποιημένων (κατά Rosenbrock) τιμών παραμέτρων

HRU	soil2_gwmax (σε inches)	
	Αρχική τιμή	Τελική τιμή
3	0	0.0
4	0	0.0
5	5	0.0
6	5	4.987722
7	5	4.990996
8	5	0.0
9	0	2.815294
10	5	4.97164
11	0	1.72

5.3.2 Βελτιστοποίηση παραμέτρων των SSR2 και GWR2 κατά Rosenbrock

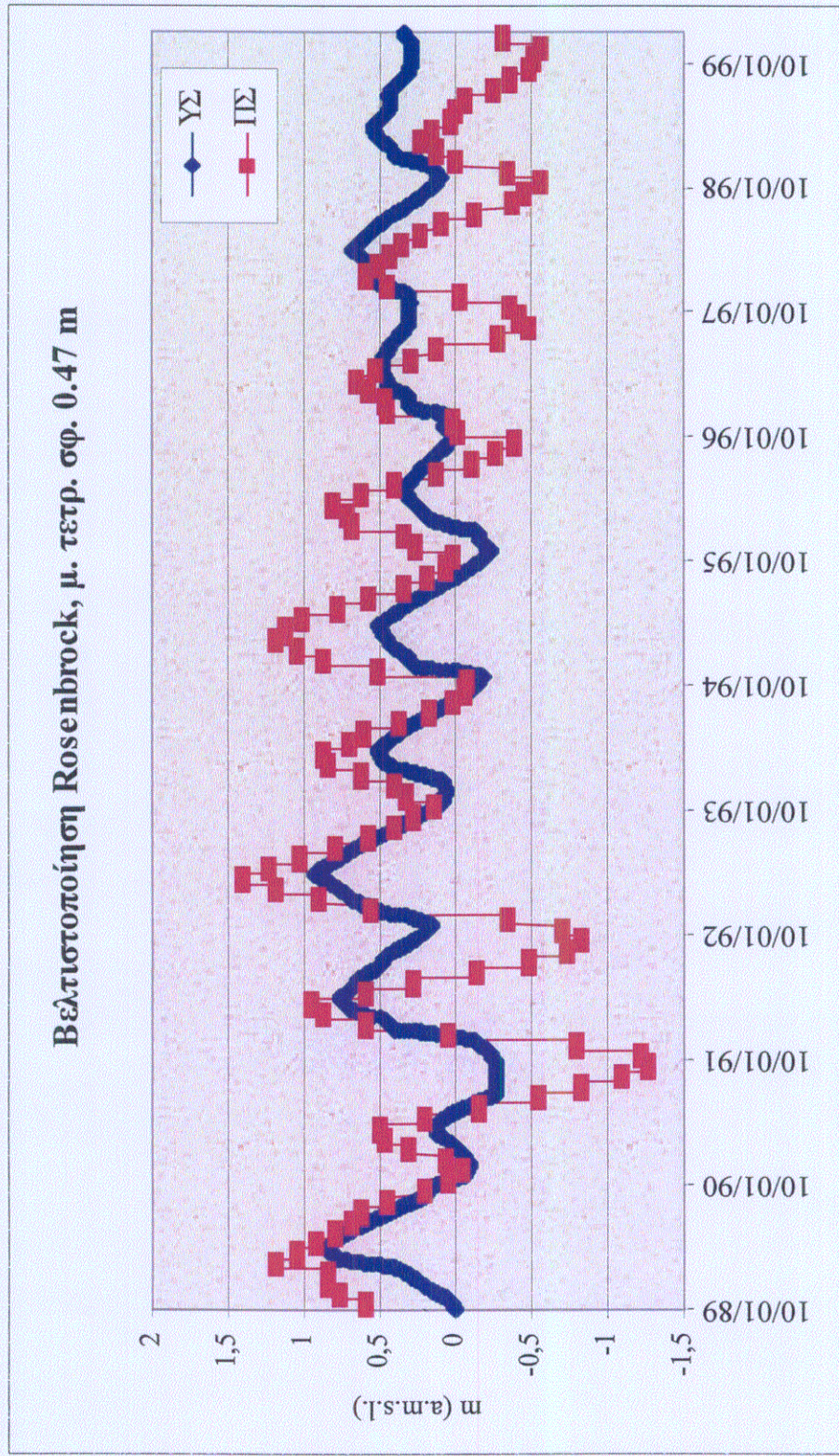
Δεδομένου ότι υπάρχει ο περιορισμός της ταυτόχρονης βελτιστοποίησης έως και δέκα παραμέτρων, η διαδικασία χωρίστηκε σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροι που αφορούν τον υποδερμικό ταμιευτήρα και στο δεύτερο αυτές που αφορούν τον υπόγειο ταμιευτήρα. Οι τελικές τιμές που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση των παραμέτρων φαίνονται στον Πίνακα 5.3.2.

Πίνακας 5.3.2: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων SSR2 και GWR2 κατά Rosenbrock

Παράμετρος	Τιμή
gw_depth_datum	0.256215
gw_porosity	0.238715
gwflow_coef	0.001564
gwstor_init	2.4
ssr2gw_exp	1.650785
ssr2gw_rate	0.189355
ssrcoef_lin	0.346837
ssrcoef_sq	0.0
ssrmax_coef	1.238727
ssstor_init	0.130184

Στο Σχήμα 5.3.2 συγκρίνεται η παρατηρημένη στάθμη στον υδροφορέα με την προκύπτουσα από την προσομοίωση που ακολούθησε την βελτιστοποίηση των παραμέτρων με αυτή την μέθοδο.

Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ της παρατηρημένης και προσομοιωμένης στάθμης είναι 0.47 m. Το σφάλμα έχει αυξηθεί σε σύγκριση με την προηγούμενη προσομοίωση, ενώ ο υδροφορέας φαίνεται ότι συνεχίζει να αδειάζει, τα υδρολογικά έτη 1990-1991 και 1997-1998. Είναι φανερό η αδυναμία της μεθόδου Rosenbrock να βελτιστοποιήσει τις παραμέτρους με επιτυχία, σε αυτή τη φάση, γεγονός που πιθανόν οφείλεται στον εγκλωβισμό της αναζήτησης του βελτίστου σε ένα τοπικό ελάχιστο.



Σχήμα 5.3.2: Σύγκριση παρατηρημένης ($\Pi\Sigma$) και υπολογισμένης ($Y\Sigma$) στάθμης στον υδροφόρα Ακρωτήριον με τιμές παραμέτρων που προέκυψαν μετά την βελτιστοποίηση Rosenbrock

5.3.3 Βελτιστοποίηση παραμέτρων soil2_gwmax κατά Hyper Tunnel

Για να συντομευθεί ο χρόνος που χρειάζεται να ολοκληρωθεί η βελτιστοποίηση κατά Hyper Tunnel χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση κατά Rosenbrock ως αρχικές.

Οι αρχικές και τελικές τιμές της soil2_gwmax για τις αντίστοιχες HRU φαίνονται στον Πίνακα 5.3.3.

Πίνακας 5.3.3: Πίνακας αρχικών και βελτιστοποιημένων (κατά Hyper Tunnel) τιμών παραμέτρων

HRU	soil2_gwmax (σε inches)	
	Αρχική τιμή	Τελική τιμή
3	0.0	0.0
4	0.0	1.184097
5	0.0	4.982996
6	4.987722	4.988265
7	4.990996	4.988598
8	0.0	4.988265
9	2.815294	2.788903
10	4.97164	4.977164
11	1.72	1.058639

5.3.4 Βελτιστοποίηση παραμέτρων των SSR2 και GWR2 κατά Hyper Tunnel

Στην συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν πάλι οι τιμές των παραμέτρων του υποδερμικού και υπόγειου ταμιευτήρα που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση κατά Rosenbrock ως αρχικές, για την βελτιστοποίηση Hyper Tunnel.

Στον Πίνακα 5.3.4 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων μετά την βελτιστοποίηση.

Πίνακας 5.3.4: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων SSR2 και GWR2 κατά Hyper Tunnel

Παράμετρος	Τιμή
gw_depth_datum	0.844638
gw_porosity	0.210456
gwflow_coef	0.001862
gwstor_init	8.819291
ssr2gw_exp	2.364510
ssr2gw_rate	0.284009
ssrcoef_lin	0.262696
ssrcoef_sq	0.235848
ssrmax_coef	0.610758
ssstor_init	0.130185

Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ της παρατηρημένης και προσομοιωμένης στάθμης είναι 0.37 m, δηλ. το μικρότερο που επιτεύχθηκε μεταξύ των παραπάνω μεθόδων.

Την βελτιστοποίηση ακολούθησε ο υπολογισμός του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης και του υδροφορέα.

Στο Σχήμα 5.3.4 συγκρίνεται η παρατηρημένη στάθμη στον υδροφορέα με την προκύπτουσα από την προσομοίωση που ακολούθησε την βελτιστοποίηση των παραμέτρων με την μέθοδο Hyper Tunnel.

Εξετάζοντας το Σχήμα 5.3.4, μερικές άμεσες παρατηρήσεις είναι ότι:

1. Έχει επιτευχθεί πολύ καλή χρονική προσαρμογή του μοντέλου στις μετρήσεις των σταθμών του υδροφορέα.
2. Ο υπολογισμός της στάθμης είναι ο πιο ακριβής μεταξύ των μοντελοποιήσεων που προηγήθηκαν. Αυτό αποδεικνύεται και από την μείωση του τετραγωνικού σφάλματος.
3. Το εύρος της κύμανσης, μεταξύ ελαχίστων και μεγίστων τιμών της υπολογισμένης στάθμης στον υδροφορέα, είναι μικρότερο από αυτό των

δεδομένων. Αυτό οφείλεται, μεταξύ άλλων, και στο γεγονός ότι όλα τα δεδομένα εισροών στον υδροφορέα (πλην της βροχόπτωσης) και απολήψεων από αυτόν, ήταν σε μηνιαίες τιμές.

Το υπολογισμένο υδατικό ισοζύγιο για την υδρολογική λεκάνη του Ακρωτηρίου, που υπολογίστηκε μετά την βελτιστοποίηση Hyper Tunnel, φαίνεται στον ακόλουθο Πίνακα 5.3.5α.

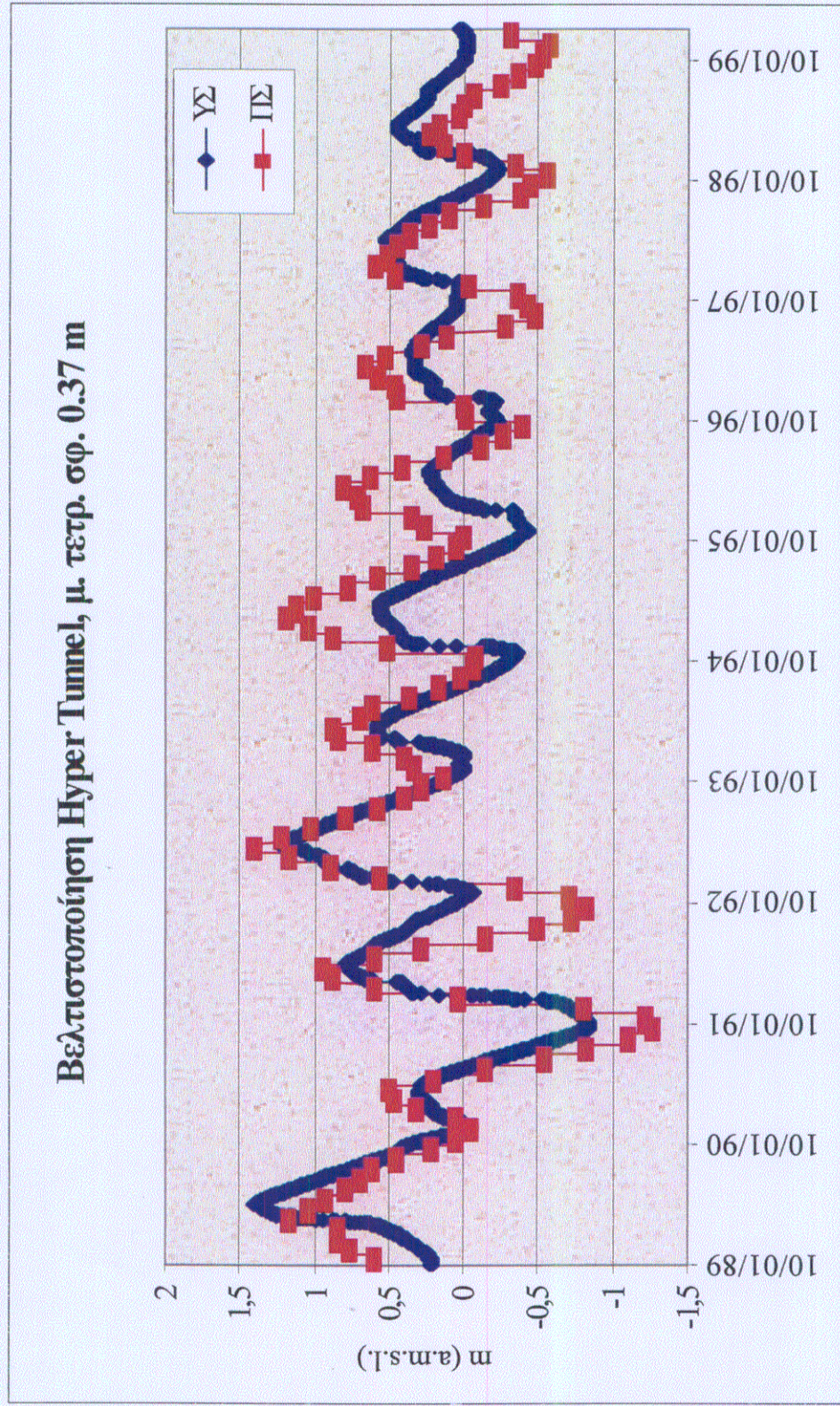
Το ισοζύγιο του υδροφορέα του Ακρωτηρίου υπολογίστηκε και φαίνεται στον Πίνακα 5.3.5β.

Τα αποτελέσματα των ισοζυγίων που παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.3.5α και 5.3.5β, οδηγούν στις εξής παρατηρήσεις:

- ☒ Το ισοζύγιο μεταξύ εισροών και εκροών από την υδρολογική λεκάνη «κλείνει». Οι μικρές αποκλίσεις από το μηδέν οφείλονται στο γεγονός ότι οι τιμές του Πίνακα 5.3.5α έχουν προκύψει από μετατροπή των αποτελεσμάτων του μοντέλου (inches) σε m. Με τις τιμές σε inches το ισοζύγιο κλείνει πλήρως, δηλαδή στο μηδέν.
- ☒ Το ισοζύγιο του υδροφορέα «κλείνει» με σφάλμα περίπου 11% των ολικών εισροών στην επιφάνεια του υδροφορέα.

Το σφάλμα αυτό αιτιολογείται από τα εξής:

- ☞ Το υπόγειο τμήμα της λεκάνης (υπέδαφος – υδροφορέας) δεν προσομοιώνεται με την ίδια πιστότητα όπως το επιφανειακό.
- ☞ Το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης υπολογίζεται από πρωτογενή στοιχεία εισόδου (βροχοπτώσεις, θερμοκρασία κ.λ.π.) και από υπολογισμένες απορροές, ενώ για το ισοζύγιο του υδροφορέα τα δεδομένα εισόδου είναι εν μέρει κατ' εκτίμηση του συγγραφέα και εν μέρει βασισμένα σε πρωτογενή δεδομένα εισόδου τα οποία επεξεργάστηκε το μοντέλο (όπως π.χ. υποχρεώνοντας τις υπόγειες απορροές της HRU1 να εισρεύσουν στον υδροφορέα).



Σχήμα 5.3.4: Σύγκριση παρατηρημένης (ΠΣ) και υπολογισμένης (ΥΣ) στάθμης στον υδροφόρα Ακρωτηρίου με τιμές παραμέτρων που προέκυψαν μετά την βελτιστοποίηση Hyper Tunnel

Πίνακας 5.3.5α: Ετήσια υδρολογικά ισοζύγια λεκάνης απορροής Ακρωτηρίου (σε εκατομμύρια m³)

Έτος	PPT	ΑΡΔ	ΤΕ	ΙΝ	ΑCΤΕΤ	SΜΑV	GWST	SSST	GWFL	SSFL	SROFF	P	B	% OE
1990	32.5	6.2	21.9	12.1	29.6	-0.7	0.5	0.0	11.6	15.5	4.5	13.5	-2	-2
1991	22.3	5.9	9.6	4.3	23.0	0.0	-8.6	0.0	5.0	7.2	3.0	14.6	-2	-5
1992	44.4	5.8	3.9	14.3	27.3	0.0	6.4	0.0	15.2	4.1	6.1	10.5	-1	-2
1993	40.5	6.4	4.6	11.3	25.9	0.0	0.9	0.0	15.5	4.5	5.9	11.2	-1	-2
1994	32.1	5.1	3.7	9.2	24.1	0.9	-3.2	0.0	10.0	3.3	4.6	11.5	-1	-2
1995	33.1	5.2	5.1	10.7	23.0	-0.8	-0.2	0.0	11.8	5.0	4.6	12.1	-1	-2
1996	30.1	6.6	3.5	9.9	25.7	0.0	0.7	0.0	8.5	4.0	3.9	8.0	-1	-2
1997	36.1	12.4	2.6	9.5	34.5	1.4	2.0	0.0	9.0	3.7	5.1	5.5	-1	-1
1998	31.4	17.1	0.8	7.0	37.4	-1.1	-1.4	0.0	9.1	2.1	4.5	6.1	0	-1
1999	32.1	14.5	0.0	8.4	33.0	-0.2	1.2	0.0	9.5	2.1	4.5	5.7	-1	-1

όπου

PPT	Όγκος βροχόπτωσης στην επιφάνεια της λεκάνης	GWFL	Όγκος υπογείων εκροών
ΑΡΔ	Όγκος άρδευσης	SSFL	Όγκος υποδερμικών ροών
ΤΕ	Όγκος τεχνητού εμπλουτισμού	SROFF	Όγκος επιφανειακής απορροής
ΙΝ	Όγκος εισροών	P	Όγκος αντλήσεων
ΑCΤΕΤ	Όγκος πράγματικής εξατμισοδιαπνοής	B	Μεταβολή ετησίον ισοζυγίου
SΜΑV	Μεταβολή εδαφικής υγρασίας	% OE	Ποσοστό ανοίγματος ισοζυγίου επί των ολικών εισροών
GWST	Μεταβολή αποθήκευσης στους υδροφορείς		
SSST	Μεταβολή αποθήκευσης στην ακόρεστη ζώνη		

Πίνακας 5.3.5β: Ετήσια υδρολογικά ισοζύγια Υδροφορέα Ακρωτηρίου (σε εκατομμύρια m³)*Εισροές στην επιφάνεια που αντιστοιχεί στον υπόγειο υδροφορέα*

Έτος	PPT	APA	TE	IN	OE
1990	13.8	6.2	21.9	12.1	54.1
1991	9.4	5.9	9.6	4.3	29.2
1992	17.9	5.8	3.9	14.3	41.9
1993	17.3	6.4	4.6	11.3	39.7
1994	13.4	5.1	3.7	9.2	31.3
1995	13.4	5.2	5.1	10.7	34.5
1996	11.7	6.6	3.5	9.9	31.7
1997	14.9	12.4	2.6	9.5	39.3
1998	13.0	17.1	0.8	7.0	37.9
1999	13.0	14.5	0.0	8.4	36.0

Εισροές στον υπόγειο υδροφορέα

SZR_GW	SZR_SSR	SSR_GW
16.2	24.0	7.1
5.8	9.9	2.4
22.1	3.7	0.4
19.3	4.2	0.3
13.2	2.8	0.1
16.3	5.7	0.7
13.2	4.5	0.1
11.9	4.9	0.8
10.5	2.1	0.0
11.6	2.3	0.2

Πίνακας 5.3.5β (συνέχεια): Ετήσια υδρολογικά ισοζύγια Υδροφορέα Ακρωτηρίου (σε εκατομμύρια m³)

Έτος	ACTET	SMAV	GWST	SSST	GWFL	SSFL	SROFF	P	ΣΥΝΟΛΟ
1990	10.9	-0.5	1.2	0.0	8.4	16.6	1.3	13.5	51.5
1991	7.8	0.0	-9.5	-0.1	4.4	7.6	0.9	14.6	25.7
1992	8.6	0.0	7.0	0.0	5.4	3.2	1.9	10.5	36.7
1993	8.8	0.0	0.9	0.0	8.0	3.9	1.9	11.2	34.6
1994	8.8	0.4	-3.6	0.0	5.2	2.9	1.4	11.5	26.6
1995	7.4	-0.3	-0.2	0.0	5.6	4.7	1.4	12.1	30.6
1996	9.0	0.0	0.8	0.0	4.5	4.3	1.2	8	27.9
1997	15.1	0.6	2.2	0.0	5.7	3.8	1.7	5.5	34.6
1998	18.1	-0.4	-1.6	0.0	5.7	2.2	1.6	6.1	31.7
1999	14.9	-0.3	1.3	0.0	5.7	2.0	1.5	5.7	30.8

*Οι συντμήσεις είναι ίδιες με αυτές του Πίνακα 5.3.5α

όπου

OE Όγκος ολικών εισροών στην επιφάνεια της λεκάνης που αντιστοιχεί στον υδροφορέα

SZR_GW Όγκος ολικών εισροών από το έδαφος στον υπόγειο ταμιευτήρα

SZR_SSR Όγκος ολικών εισροών από το έδαφος στον υποδερμικό ταμιευτήρα

SSR_GW Όγκος ολικών εισροών από τον υποδερμικό στον υπόγειο ταμιευτήρα

B	% OE
2.6	5
3.5	12
5.3	10
5.0	11
4.8	13
3.9	10
3.8	12
4.8	13
6.2	16
5.2	13

5.4 Βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων και της gwres_sink (βλ. §5.1)

Για τους σκοπούς της μελέτης μας βελτιστοποιήθηκαν πάλι όλες οι παράμετροι που αναφέρονται στην παράγραφο 5.1 μαζί με την gwres_sink, η οποία είχε αρχικά τεθεί ίση με μηδέν. Αυτό έγινε για τους ακόλουθους λόγους

- ✓ για να εισαχθεί ένας ακόμα βαθμός ελευθερίας στο σύστημα που προσομοιώνουμε και να διαπιστωθεί η επίπτωση της εισαγωγής της παραμέτρου gwres_sink στον υπολογισμό του ισοζυγίου λεκάνης και υδροφορέα
- ✓ για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα εγκλωβισμού σε τοπικό ελάχιστο που παρουσίασε η μέθοδος Rosenbrock
- ✓ για να διαπιστωθεί κατά πόσο είναι δυνατή η καλύτερη προσέγγιση της παρατηρημένης στάθμης.

5.4.1 Βελτιστοποίηση παραμέτρων soil2_gwmax κατά Rosenbrock

Βελτιστοποιήθηκαν οι παράμετροι soil2_gwmax για τις HRU που συνδέονται με τον υπόγειο ταμιευτήρα GWR2, ξεκινώντας πάλι από τις τιμές που είχαν τεθεί κατ' εκτίμηση για τις τεχνητές HRU 5, 6, 7, 8 και 11 και όπως ορίζει το πρόγραμμα (default) για τις υπόλοιπες. Οι αρχικές και τελικές τιμές της soil2_gwmax για τις αντίστοιχες HRU φαίνονται στον Πίνακα 5.4.1.

Πίνακας 5.4.1: Πίνακας αρχικών και βελτιστοποιημένων (κατά Rosenbrock) τιμών παραμέτρων

	soil2_gwmax (σε inches)	
HRU	Αρχική τιμή	Τελική τιμή
3	0	0.001
4	0	1.991459
5	5	4.982996
6	5	4.988265
7	5	4.988598
8	5	4.988265
9	0	2.789355
10	5	4.97164
11	0	2.075658

5.4.2 Βελτιστοποίηση παραμέτρων των SSR2 και GWR2 κατά Rosenbrock

Οι τελικές τιμές που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση των παραμέτρων φαίνονται στον Πίνακα 5.4.2.

Πίνακας 5.4.2: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων SSR2 και GWR2 κατά Rosenbrock

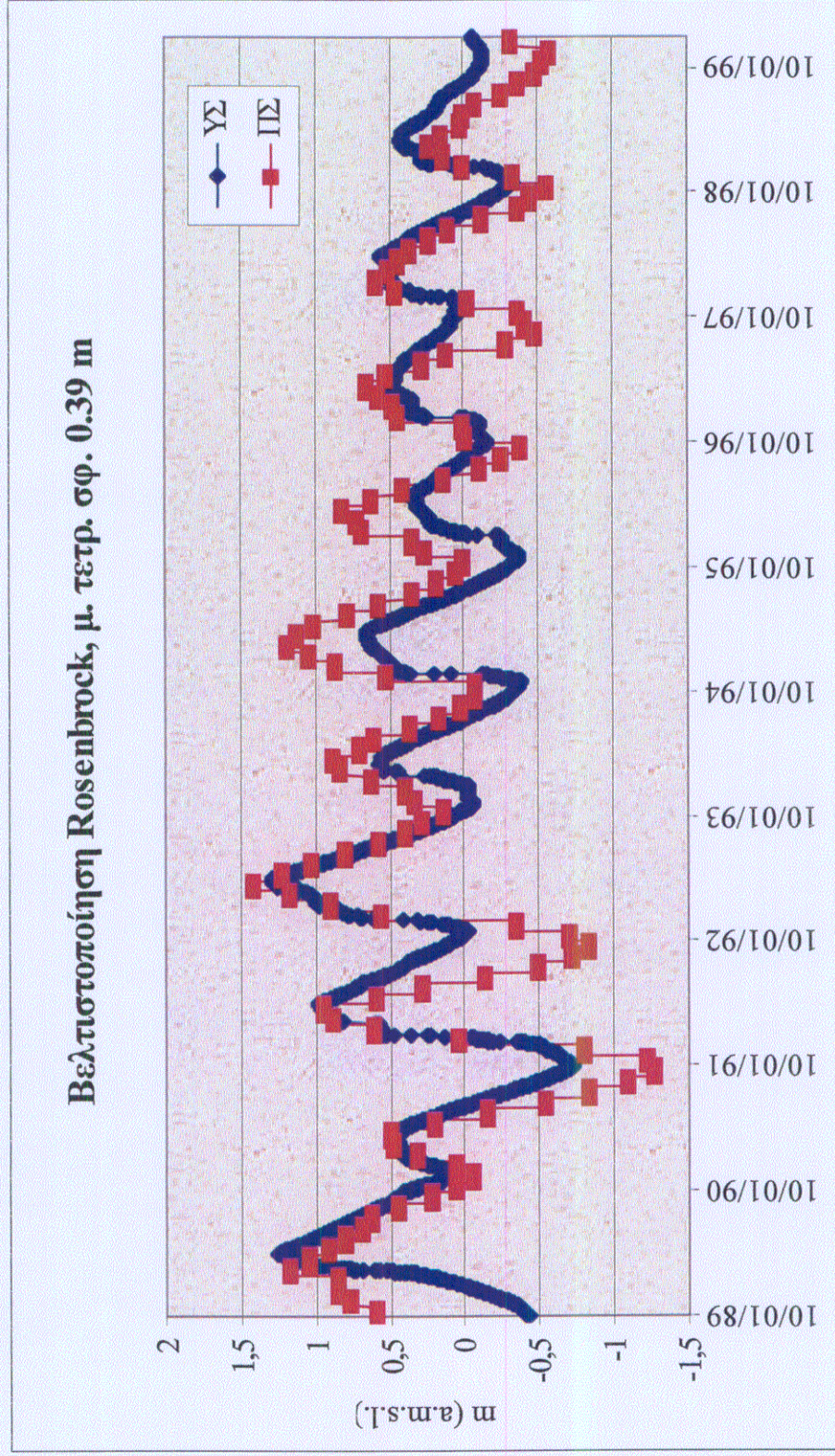
Παράμετρος	Τιμή
gw_depth_datum	0.7668
gw_porosity	0.2083
gwflow_coef	0.000521
gwsink_coef	0.002174
gwstor_init	2.4
ssr2gw_exp	0.897397
ssr2gw_rate	0.154285
ssrcoef_lin	0.091823
ssrcoef_sq	0.313309
ssrmax_coef	0.027732
ssstor_init	0.129994

Στο Σχήμα 5.4.2 συγκρίνεται η παρατηρημένη στάθμη στον υδροφορέα με την προκύπτουσα από την προσομοίωση που ακολούθησε την βελτιστοποίηση των παραμέτρων με αυτή την μέθοδο.

Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ της παρατηρημένης και προσομοιωμένης στάθμης είναι 0.39 m, σημαντικά μικρότερο της προσομοίωσης με αρχικά βελτιστοποιημένες παραμέτρους κατά Rosenbrock. Παρατηρούμε δε, ότι ο υδροφορέας έχει σταματήσει να αδειάζει.

5.4.3 Βελτιστοποίηση παραμέτρων των SSR2 και GWR2 κατά Hyper Tunnel

Στον Πίνακα 5.4.3 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων μετά την βελτιστοποίηση κατά Hyper Tunnel.



Σχήμα 5.4.2: Σύγκριση παρατηρημένης ($\Pi\Sigma$) και υπολογισμένης ($\Upsilon\Sigma$) στάθμης στον υδροφόρα Ακρωτήριον με τιμές παραμέτρων που προέκυψαν μετά την βελτιστοποίηση Rosenbrock

Πίνακας 5.4.3: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων SSR2 και GWR2 κατά Hyper Tunnel

Παράμετρος	Τιμή
gw_depth_datum	0.715478
gw_porosity	0.203870
gwwflow_coef	0.000998
gwsink_coef	0.002554
gwstor_init	8.119721
ssr2gw_exp	0.380374
ssr2gw_rate	0.096230
ssrcoef_lin	0.116934
ssrcoef_sq	0.153305
ssrmax_coef	1.396225
ssstor_init	0.140238

Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ της παρατηρημένης και προσομοιωμένης στάθμης είναι 0.35 m, δηλ. το μικρότερο που επιτεύχθηκε μεταξύ όλων των παραπάνω βημάτων.

Την βελτιστοποίηση ακολούθησε ο υπολογισμός του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης.

Στο Σχήμα 5.4.3 συγκρίνεται η παρατηρημένη στάθμη στον υδροφορέα με την προκύπτουσα από την προσομοίωση που ακολούθησε την βελτιστοποίηση των παραμέτρων με την μέθοδο Hyper Tunnel.

Κάποια άμεσα συμπεράσματα είναι ότι:

1. Έχει επιτευχθεί πολύ καλή χρονική προσαρμογή του μοντέλου στις μετρήσεις των σταθμών του υδροφορέα.
2. Ο υπολογισμός της στάθμης είναι ο πιο ακριβής μεταξύ όλων των μοντελοποιήσεων που προηγήθηκαν. Αυτό αποδεικνύεται και από την μείωση του τετραγωνικού σφάλματος, αν και η διαφορά αυτού μεταξύ των δύο

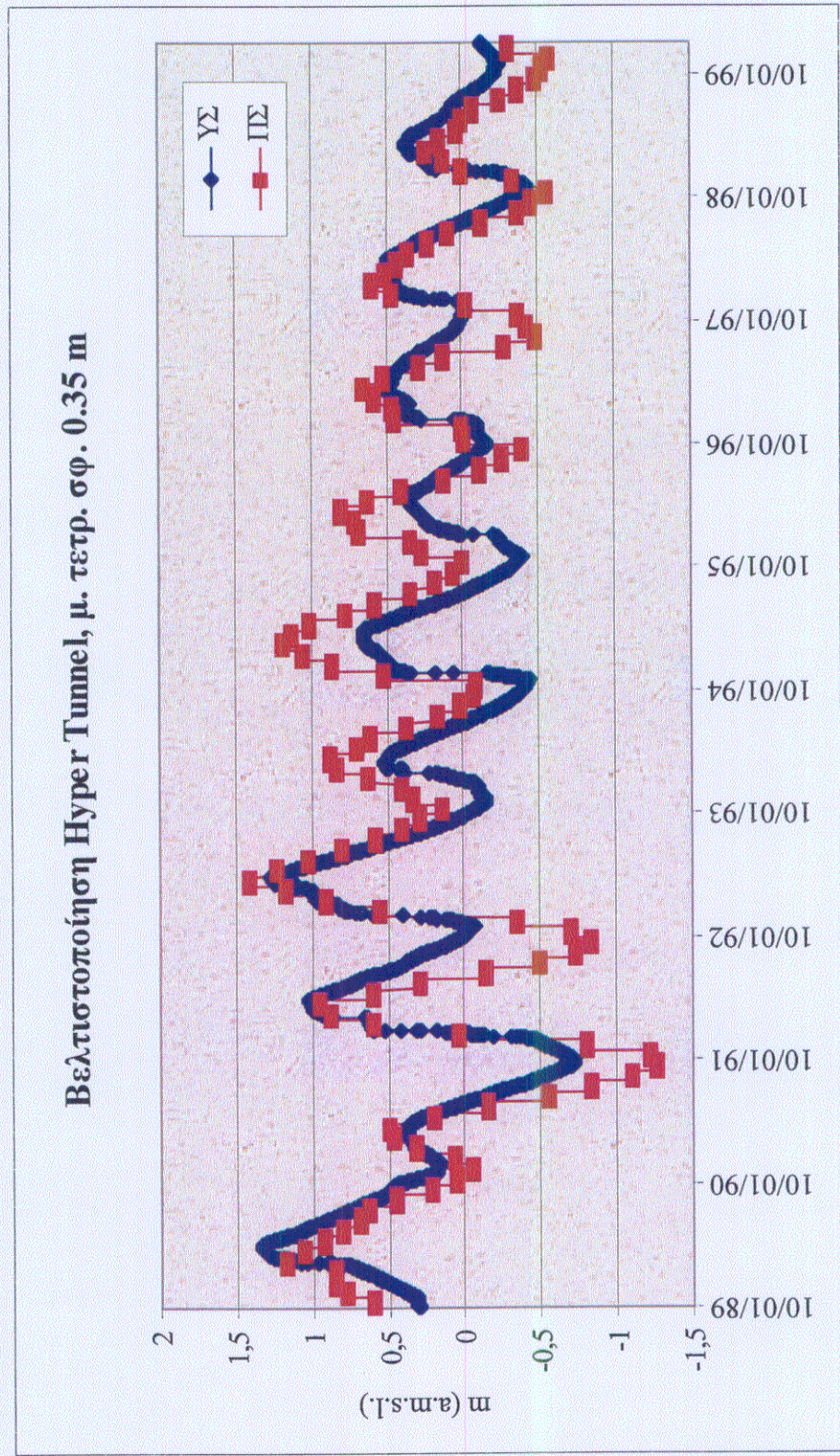
προσομοιώσεων, με τιμή της παραμέτρου $gwres_sink$ ίση με μηδέν και ίση με 0.002554 (όπως προέκυψε από την βελτιστοποίηση) είναι πολύ μικρή, 0.02 m.

Το υπολογισμένο υδατικό ισοζύγιο για την υδρολογική λεκάνη του Ακρωτηρίου, που υπολογίστηκε μετά την βελτιστοποίηση Hyper Tunnel, φαίνεται στον ακόλουθο Πίνακα 5.4.4α.

Το ισοζύγιο του υδροφορέα του Ακρωτηρίου υπολογίστηκε και φαίνεται στον Πίνακα 5.4.4β.

Τα αποτελέσματα των ισοζυγίων που παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.4.4α και 5.4.4β, οδηγούν στις εξής παρατηρήσεις:

- ⊗ Η διάφορη του μηδενός τιμή της παραμέτρου $gwres_sink$ οδηγεί το ισοζύγιο της λεκάνης στο να μην «κλείνει», περίπου στο 9% των συνολικών εισροών σε αυτή, για την δεκαετία 1989-1999.
- ⊗ Το ισοζύγιο μεταξύ εισροών και εκροών από τον υδροφορέα «κλείνει» με σφάλμα περίπου 14% των ολικών εισροών στην επιφάνεια του υδροφορέα, μεγαλύτερο αυτού που υπολογίστηκε νωρίτερα στην παράγραφο 5.4.3.



Σχήμα 5.4.3: Σύγκριση παρατηρημένης (ΠΣ) και υπολογισμένης (ΥΣ) στάθμης στον υδροφόρο Ακρωτηρίου με τιμές παραμέτρων που προέκυψαν μετά την βελτιστοποίηση Hyper Tunnel

Πίνακας 5.4.4α: Ετήσια υδρολογικά ισοζύγια λεκάνης απορροής Ακρωτηρίου (σε εκατομμύρια m³)

Έτος	PPT	APA	TE	IN	ACTET	SMAV	GWST	SSST	GWFL	SSFL	SROFF	GWSI	P	B	% OE
1990	32.6	6.2	21.9	12.1	23.4	-0.7	0.4	-0.1	7.6	10	4.5	10.5	13.5	3.7	5
1991	22.4	5.9	9.6	4.3	17.1	0	-7.9	0	3.1	3.3	3	5.2	14.6	3.8	9
1992	44.7	5.8	3.9	14.3	20	0	5	0	12.7	1	6	7.7	10.5	5.8	8
1993	40.7	6.4	4.6	11.3	18.8	0	-0.3	0	11.6	1	5.9	9.4	11.2	5.4	9
1994	32.2	5.1	3.7	9.2	18.3	0.9	-2.5	0	6.9	0.6	4.5	5.4	11.5	4.6	9
1995	33.3	5.2	5.1	10.7	16.9	-0.8	0.5	0	9	1.1	4.5	6.9	12.1	4.1	8
1996	30.3	6.6	3.5	9.9	19.3	0	1.1	0	6.6	0.7	3.9	5.5	8	5.2	10
1997	36.3	12.4	2.6	9.5	27.4	1.4	1.2	0	6.5	0.7	5.1	6.2	5.5	6.8	11
1998	31.5	17.1	0.8	7.0	30	-1.1	-2.5	0	6	0.5	4.5	5.8	6.1	7.1	13
1999	32.3	14.5	0	8.4	25.8	-0.2	1	0	6.4	0.6	4.5	5.4	5.7	6.0	11

όπου

PPT	Όγκος βροχόπτωσης στην επιφάνεια της λεκάνης	GWFL	Όγκος υπογείων εκροών
APA	Όγκος άρδευσης	SSFL	Όγκος υποδερμικών ροών
TE	Όγκος τεχνητού εμπλουτισμού	SROFF	Όγκος επιφανειακής απορροής
IN	Όγκος εισροών	GWSI	Όγκος νερού που χάνεται
ACTET	Όγκος πραγματικής εξατμισοδιαπνοής	P	Όγκος αντλήσεων
SMAV	Μεταβολή εδαφικής υγρασίας	B	Μεταβολή ετήσιου ισοζυγίου
GWST	Μεταβολή αποθήκευσης στους υδροφορείς	% OE	Ποσοστό ανοίγματος ισοζυγίου επί των ολικών εισροών
SSST	Μεταβολή αποθήκευσης στην ακόρεστη ζώνη		

Πίνακας 5.4.4β: Ετήσια υδρολογικά ισοζύγια Υδροφορέα Ακρωτηρίου (σε εκατομμύρια m³)**Εισροές στην επιφάνεια που αντιστοιχεί στον υπόγειο υδροφορέα**

Έτος	PPT	ΑΡΔ	ΤΕ	ΙΝ	ΟΕ
1990	13.8	6.2	21.9	12.1	54.1
1991	9.4	5.9	9.6	4.3	29.2
1992	17.9	5.8	3.9	14.3	41.9
1993	17.3	6.4	4.6	11.3	39.6
1994	13.4	5.1	3.7	9.2	31.4
1995	13.4	5.2	5.1	10.7	34.4
1996	11.7	6.6	3.5	9.9	31.7
1997	14.9	12.4	2.6	9.5	39.4
1998	13	17.1	0.8	7.0	37.9
1999	13	14.5	0	8.4	35.9

Εισροές στον υπόγειο υδροφορέα

SZR_GW	SZR_SSR	SSR_GW
14.4	22.1	13.7
5.4	9.5	6.5
21.7	3.4	2.9
18.7	4.2	3.6
12.4	2.9	2.5
16.2	4.5	4.3
11.8	3.8	4.0
11.8	3.5	3.7
9.5	2.1	1.8
11.5	1.9	1.8

Πίνακας 5.4.4β (συνέχεια): Εκροές από τον υδροφορέα*

Έτος	ACTET	SMAV	GWST	SSST	GWFL	SSFL	SROFF	GWSI	P	ΣΥΝΟΛΟ	B	% O.E.
1990	10.9	-0.5	1.1	0	4.1	11	0.8	10.5	13.5	51.4	2.7	5
1991	7.8	0	-8.8	0	2.4	3.5	0.5	5.2	14.6	25.2	4.0	14
1992	8.6	0	5.5	0	2.8	0	1.1	7.7	10.5	36.2	5.7	14
1993	8.8	0	-0.3	0	3.8	0.2	1.1	9.4	11.2	34.2	5.4	14
1994	8.8	0.4	-2.8	0	2.3	0	0.8	5.3	11.5	26.3	5.1	16
1995	7.4	-0.3	0.5	0	2.5	0.2	0.8	6.9	12.1	30.1	4.3	13
1996	9	0	1.3	0	2.3	0.2	0.7	5.4	8	26.9	4.8	15
1997	15.1	0.6	1.4	0	3.2	0.3	0.9	6.2	5.5	33.2	6.2	16
1998	18.1	-0.4	-2.7	0	2.9	0.2	0.8	5.8	6.1	30.8	7.1	19
1999	14.9	-0.3	1.1	0	2.3	0.3	0.8	5.4	5.7	30.2	5.7	16

*Οι συννήψεις είναι ίδιες με αυτές του Πίνακα 5.4.4α

όπου

OE Όγκος ολικών εισροών στην επιφάνεια της λεκάνης που αντιστοιχεί στον υδροφορέα

SZR_GW Όγκος ολικών εισροών από το έδαφος στον υπόγειο ταμιευτήρα

SZR_SSR Όγκος ολικών εισροών από το έδαφος στον υποδερμικό ταμιευτήρα

SSR_GW Όγκος ολικών εισροών από τον υποδερμικό στον υπόγειο ταμιευτήρα

6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Συμπεράσματα - Εισαγήσεις

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είχε σκοπό την διερεύνηση της δυνατότητας βαθμονόμησης μοντέλου υδρολογικού ισοζυγίου, με χρήση δεδομένων υπογείων υδάτων.

Χρησιμοποιήθηκε το εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο *PRMS* της Γεωλογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ (*USGS*), όπως αυτό είναι ενσωματωμένο στο υπολογιστικό πλαίσιο *MMS* (*USGS*). Το μοντέλο είναι ημι-κατανεμημένων παραμέτρων. Λειτουργεί με ημερήσιο βήμα και υπολογίζει τις κυριότερες συνιστώσες του υδρολογικού ισοζυγίου, είναι εύκολο στην χρήση του και σχετικά απλό στην κατανόησή του, ενώ με σχετική ευκολία μπορούν να ενταχθούν σε αυτό νέες υπολογιστικές ρουτίνες.

Το υπολογιστικό πλαίσιο *MMS* έχει διεπιφάνεια χρήστη κατάλληλη για την εισαγωγή στοιχείων εισόδου και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε γραφική μορφή, και εμπεριέχει δύο μεθόδους βελτιστοποίησης παραμέτρων την *Rosenbrock* (*Rosenbrock, 1960*) και την *Hyper Tunnel* (*Restrepo-Posada & Bras, 1982*). Οι ιδιότητες αυτές του *MMS* διευκολύνουν σημαντικά την χρήση του *PRMS*.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα του μοντέλου βρίσκεται στην φτωχή μοντελοποίηση των υπογείων ταμιευτήρων, οι οποίοι θεωρούνται γραμμικοί και, κυρίως, στερούνται υδραυλικής σύνδεσης μεταξύ τους. Στο μοντέλο ακόμα δεν έχουν προβλεφθεί η εισαγωγή δεδομένων αρδεύσεων ή τεχνητού εμπλουτισμού. Για να αντιμετωπισθούν οι ελλείψεις αυτές ήταν απαραίτητο να επινοηθούν «τεχνάσματα» κατά την εφαρμογή του μοντέλου, καθώς επίσης και να προστεθούν σε αυτό και νέες υπολογιστικές υπορουτίνες.

Η περιοχή εφαρμογής ήταν η υδρολογική λεκάνη του Ακρωτηρίου της Κύπρου, η οποία έχει την ιδιαιτερότητα να στερείται μόνιμων επιφανειακών απορροών, λόγω του ημερημικού της κλίματος και να μην έχει ανεπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο λόγω των σχηματισμών της επιφάνειάς της. Ο υδροφορέας του Ακρωτηρίου της Κύπρου έχει μελετηθεί και παρακολουθείται για σειρά ετών.

Τα ακόλουθα σημεία συνοψίζουν τη μελέτη και τα συμπεράσματά της:

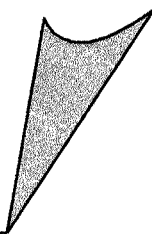
- ✓ Το εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο PRMS μπορεί να βαθμονομηθεί ικανοποιητικά με βάση δεδομένα σταθμών του υπογείου υδροφορέα. Οι μετρημένες και υπολογισμένες στάθμες στον υδροφορέα βρίσκονται σε καλή σχέση μεταξύ τους.
- ✓ Οι δύο μέθοδοι βελτιστοποίησης που παρέχονται είναι μέθοδοι μη γραμμικής βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι το αθροιστικό σφάλμα μεταξύ των παρατηρημένων και των υπολογισμένων σταθμών στον υδροφορέα.
- ✓ Η μέθοδος βελτιστοποίησης Rosenbrock, όπως χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία, ελαχιστοποιεί την απόλυτη τιμή του σφάλματος μεταξύ των παρατηρημένων και των υπολογισμένων σταθμών στον υδροφορέα. Είναι σχετικά γρήγορη, ενώ παρέχει και την δυνατότητα αρχικοποίησης των παραμέτρων, δηλαδή την εύρεση αρχικών τιμών για τις παράμετρους που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Όμως η αναζήτηση του βελτίστου της αντικειμενικής συνάρτησης είναι εύκολο να εγκλωβιστεί σε τοπικό ελάχιστο.
- ✓ Η μέθοδος βελτιστοποίησης Hyper Tunnel βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος (μεταξύ των παρατηρημένων και των υπολογισμένων σταθμών στον υδροφορέα) και παρέχει την καλύτερη προσαρμογή των παραμέτρων, αλλά είναι χρονοβόρα.
- ✓ Το μοντέλο PRMS χρησιμοποιήθηκε στον Υδροφορέα του Ακρωτηρίου της Κύπρου. Για την προσομοίωση του υδροφορέα έγιναν διάφορες παραδοχές για τις τιμές των παραμέτρων και εφαρμόστηκαν τεχνάσματα, ώστε να εισαχθούν στο μοντέλο η άρδευση, ο εμπλουτισμός, οι αντλήσεις και οι υπόγειες εισροές στον υδροφορέα από τις γειτονικές περιοχές και που αφορούν τον τρόπο διαίρεσης της υδρολογικής λεκάνης σε HRU και την εισαγωγή τεχνητών βροχομετρικών σταθμών, φαίνεται από τα αποτελέσματα ότι επιτρέπουν την προσέγγιση της πραγματικής λειτουργίας του υδρολογικού συστήματος.
- ✓ Ο υπολογισμός του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης κλείνει εκτός από την περίπτωση όπου η παράμετρος `gwres_sink` έχει τιμή διάφορη του μηδενός. Η συμμετοχή της παραμέτρου στον υπολογισμό του ισοζυγίου οδηγεί σε αλλοιώσεις αυτού, με αποτέλεσμα το ισοζύγιο να μην κλείνει, και μάλιστα σε σημαντικό ποσοστό, περίπου 9% στην συγκεκριμένη περίπτωση. Αυτό οφείλεται στο

γεγονός ότι, η μη μηδενική τιμή της παραμέτρου προϋποθέτει υπάρχουσες απώλειες από την λεκάνη προς σημείο εκτός αυτής. Όμως η συμμετοχή της παραμέτρου στην προσομοίωση βοηθά την καλύτερη προσέγγιση της παρατηρημένης στάθμης από το μοντέλο, αφού αποτελεί ένα ακόμα βαθμό ελευθερίας του συστήματος.

- ✓ Οι διακυμάνσεις στις υπολογισμένες στάθμες είναι εξομαλυνμένες σε σχέση με τη πραγματικότητα, λόγω των μηνιαίων τιμών των όγκων των αντλήσεων, του τεχνητού εμπλουτισμού στον υδροφορέα, των αρδεύσεων κ.λ.π. και της αβεβαιότητας για την ποιότητα των δεδομένων, καθώς και της «απλοϊκής» υδραυλικής των υπογείων στο μοντέλο.
- ✓ Το πορώδες (21%) που προκύπτει από την βελτιστοποίηση της σχετικής παραμέτρου με την μέθοδο Hyper Tunnel και (23%) με την μέθοδο Rosenbrock είναι μεγαλύτερο από αυτό που εκτίμησαν οι διάφορες μελέτες σε επιλεγμένα σημεία του υδροφορέα (14%). Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι η εκτίμηση του πορώδους είναι σημειακή με τα τεστ αντλήσεως, ενώ το αποτέλεσμα του μοντέλου αναφέρεται σε όλο τον υδροφορέα.

Η ολοκλήρωση του υπολογισμού του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης και του υδροφορέα του Ακρωτηρίου της Κύπρου, με την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, μας δίνει μία πρώτη εκτίμηση των χαρακτηριστικών του υπογείου υδροφορέα και πρέπει να ακολουθηθεί από επισταμένη μελέτη της υδραυλικής του υδροφορέα, με χρήση μοντέλων που επιτρέπουν την σύνδεση των υπόγειων ταμιευτήρων, ώστε να προσεγγιστεί σε μεγαλύτερο βαθμό η πραγματικότητα.

Βιβλιογραφία



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Leavesley G.H., R.W. Lichty, B.M. Troutman and L.G. Saidon, *Precipitation-Runoff Modeling System: User's manual*, Water-Resources Investigations 83-4238, Denver, Colorado, 1983.
- Leavesley G.H., P.J. Restrepo, S.L. Markstrom, M. Dixon, and L.G. Stannard, prepared in cooperation with the University of Colorado at Boulder and Decision Support for Water and Environmental Systems (CADWES), *The Modular Modeling System (MMS): User's Manual*, U.S. Geological Survey Open File Report 96-151, Denver, Colorado 1996.
- Rosenbrock H.H., *An automatic method of finding the greatest or least value of a function*, Computer Journal, 3, p.p. 175-184, 1960.
- Κουτσογιάννης Δ., *Βελτιστοποίηση Συστημάτων Υδατικών Πόρων*, Διδακτικές Σημειώσεις, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1977.
- Bras. R., *Hydrology, An Introduction to Hydrologic Science*, Addison-Wesley Publ. Company, 1990.
- Chow. V. T., Maidment D.R. and L.W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Publ. Company, 1988.
- Linsley R.K. and J.B. Franzini, *Water Resources Engineering*, McGraw-Hill Publ. Company, 1979.
- Mimikou M., Kouvopoulos Y., Cavadias G. and N. Vayianos, *Regional Hydrological Effects of Climate Change*, Journal of Hydrology, 12 (1991) 119-146.

- Fink M., *Preliminary report on the Hydrogeology of Akrotiri Peninsula*, U.N. Special Fund Project, Survey of Groundwater and Mineral Resources, Republic of Cyprus, Tel Aviv, November 1965.
- Balasha – Jalon Consultants & Engineers Ltd. and Phedonos Consultants, *Environmental Study and management Plan for the Akrotiri Salt lake and Wetlands and Assessment of the Environmental Impact of the Proposed Water Development Works in the Limnatis, Dhiazizos and Ezousa Watersheds, Annexes 1 – 4*, Republic of Cyprus, June, 1992.
- L. Ways and Y. K. Tung, *Hydrosystems: Engineering & Management*, McGraw-Hill Publ. Company, 1992.
- Bras R. and I. Rodriguez-Iturbe, *Random Functions and Hydrology*, Dover Publications, 1993.
- Willis R. and W.W-G. Yeh, *Groundwater Systems Planning and Management*, Prentice-Hall Inc., 1987.
- Freeze R.A. and J.A. Cherry, *Groundwater*, Prentice-Hall Inc., 1979.
- Τζιμόπουλος Χρ., *Γεωργική Υδραυλική, Τόμος Ι*, Θεσσαλονίκη, 1982.
- Τσακίρης Γ., *Μαθήματα Εγγειοβελτιωτικών Έργων*, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1991.
- Jakovides J. et al., *Southern Conveyor Project, Feasibility Study: Volume III, Groundwater Resources*, WDD, Nicosia, 1982.
- Νικολαΐδης και Συνεργάτες, *Μελέτη Επιμέτρησης των Επιπτώσεων στο Περιβάλλον από τον Εμπλουτισμό του Υδροφορέα Ακρωτηρίου με Άνακυκλωμένο Νερό του Αποχετευτικού Συστήματος Λεμεσού – Αμαθούντας, Προκαταρκτική Τελική Έκθεση*, Λευκωσία, Μάρτιος, 1999.

Τσοτσώνης Γ., *Εφαρμογή του Ολοκληρωμένου Ημερήσιου Μοντέλου Soil and Water Assessment Tool (SWAT) στη Θεσσαλία κάτω από Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., 2000.

A
ΓΑΡΡΙΤΣΑ

Αναλυτική Παρουσίαση Μοντέλου

Α. Συνιστώσες του μοντέλου

1. Κλιματικές συνιστώσες

Τα ημερήσια κλιματικά δεδομένα ανάγονται σε κάθε HRU βάσει συνιστωσών που ορίζονται από τον χρήστη. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από το πολύ πέντε (5) σταθμούς θερμοκρασίας αέρα.

Θερμοκρασία

Οι μετρημένες μέγιστες (TMX) και ελάχιστες (TMN) ημερήσιες θερμοκρασίες αέρα προσαρμόζονται ώστε να αντιπροσωπεύουν με βάση μηνιαίων ή ημερήσιων ρυθμών πτώσης και την μεταβολή του αναγλύφου μεταξύ κάποιου κλιματικού σταθμού και κάθε HRU. Η θερμοκρασία του αέρα μπορεί να εκφράζεται σε βαθμούς Κελσίου (°C) ή σε βαθμούς Fahrenheit (F), αλλά η κλίμακα πρέπει να παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια μιας προσομοίωσης. Όλες οι μεταβλητές τις θερμοκρασίας και οι παράμετροι πρέπει να είναι στις ίδιες μονάδες με τα δεδομένα. Οι υπολογισμοί των ημερήσιων μέγιστων, ελάχιστων και μέσων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα γίνονται στην υπορουτίνα TEMP.

Ο διορθωτικός παράγοντας (TCRX) για την προσαρμογή της TMX για κάθε HRU υπολογίζεται κάθε μήνα (MO) από:

$$TCRX(MO) = [TLX(MO) * ELCR] - TXAJ \quad (1)$$

όπου

TLX	ο μέγιστος ρυθμός πτώσης της θερμοκρασίας, σε βαθμούς ανά 1.000 feet μεταβολή στο υψόμετρο για τον μήνα MO
ELCR	το μέσο υψόμετρο μιας HRU μείον το υψόμετρο του κλιματολογικού σταθμού, σε 1.000 δεξ feet
TXAJ	η μέση διαφορά στην μέγιστη θερμοκρασία αέρα μεταξύ μιας οριζόντιας επιφάνειας και την κλίση – προσανατολισμό της HRU.

Ο διορθωτικός παράγοντας [TCRN(MO)] για την προσαρμογή της TMN για κάθε HRU, υπολογίζεται για κάθε μήνα με μία εξίσωση της ίδιας μορφής με την εξίσωση (1), χρησιμοποιώντας τον μηνιαίο ρυθμό πτώσης των ελαχίστων θερμοκρασιών και την ελάχιστη διόρθωση θερμοκρασίας μεταξύ κλίσης-προσανατολισμού (TNAJ).

Η προσαρμοσμένη ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία (TM) για κάθε HRU υπολογίζεται από:

$$TM = TMX - TCRX(MO) \quad (2)$$

Η προσαρμοσμένη ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία (TN) για κάθε HRU υπολογίζεται με την χρήση μιας ανάλογης με την (2) εξίσωσης και μεταβλητές τις TMN και TCRN.

Κατακρημνίσματα

Το ολικό ημερήσιο ύψος κατακρημνισμάτων (PPT) που φθάνουν στην επιφάνεια μιας HRU υπολογίζονται από την σχέση

$$PPT = PDV \times PCOR \quad (3)$$

όπου

PDV το ημερήσιο ύψος κατακρημνισμάτων που μετρώνται στον σταθμό με τον οποίο συνδέεται η HRU, σε inches, και
PCOR ο παράγοντας διόρθωσης για την HRU. Στην τιμή του συμπεριλαμβάνονται οι επιδράσεις του υψομέτρου, της χωρικής μεταβολής, της τοπογραφίας, της θέσης του σταθμού, ανακρίβειες οφειλόμενες στην θέση του σταθμού (άνεμος) και άλλοι παράγοντες. Είναι δυνατή η διάκριση μεταξύ των τιμών χειμώνα και καλοκαιριού.

Έως 20 σταθμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ορισμό της χωρικής και χρονικής κατανομής της βροχής σε μία λεκάνη. Κάθε HRU συνδέεται με ένα από τους διαθέσιμους σταθμούς βροχής.

Η μορφή των κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι ή μίγμα αυτών) υπολογίζεται από την μέγιστη (TM) και ελάχιστη (TN) ημερήσια θερμοκρασία αέρα και η σχέση τους από μία θερμοκρασία βάσης (BST) (Willen et al., 1971). Όλα τα κατακρημνίσματα είναι χιόνι, αν η TM είναι μικρότερη ή ίση από την BST και όλα βροχή αν TN είναι μεγαλύτερη από την BST. Αν η TM είναι μεγαλύτερη της BST και η TN μικρότερη της BST, τότε τμήμα των ολικών κατακρημνισμάτων που εμφανίζονται σαν βροχή υπολογίζεται από

$$PRMX = \{(TM-BST)/(TM-TN)\} * AJMX (MO) \quad (4)$$

όπου

AJMX η μηνιαία τιμή του συντελεστή προσαρμογής για κάθε μήνα MO. Για μικτά γεγονότα η βροχή υποτίθεται ότι συμβαίνει πρώτη.

Η διαδικασία εκτίμησης της μορφής των κατακρημνισμάτων μπρεί να παρακαμφθεί με δύο τρόπους. Ο ένας είναι η χρήση της παραμέτρου PAT. PAT είναι η τιμή της θερμοκρασίας αέρα, η οποία όταν υπερβαίνεται από την TM, υποχρεώνει όλη την βροχή να γίνει απορροή, ανεξάρτητα από την τιμή της TN. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει τον υπολογισμό της βροχόπτωσης κατά την διάρκεια της άνοιξης, όταν η TN παραμένει χαμηλή. Η δεύτερη παράκαμψη είναι για τις ημέρες που η μορφή των κατακρημνισμάτων είναι γνωστή. Η μορφή μπορεί να εισαχθεί στα δεδομένα. Ακόμα οι όγκοι της χιονοκάλυψης σε κάθε HRU, μπορούν να υπολογιστούν με χρήση δεδομένων πάχους χιονιού.

Όλοι οι υπολογισμοί που προαναφέρθηκαν περιλαμβάνονται στην υπορουτίνα PRECIP. Μία ακόμη υπορουτίνα, η PKADJ, είναι διαθέσιμη για την αναγωγή των δεδομένων βροχής. Για το χιόνι, οι μειώσεις στις καταγραφές των οργάνων με ανέμους 10 έως 20 μίλια την ώρα, μπορούν να ανέρχονται σε 45 έως 70% (Larson and Peck, 1974). Για τον υπολογισμό αυτών των ελαττώσεων, η PKADJ παρέχει την δυνατότητα αναγωγής του ισοδύναμου ύψους νερού σε κάθε HRU, βασισμένη σε δεδομένα snowcourse από κάθε HRU ή σε ένα δείκτη snowcourse. Αυτή η δυνατότητα αναγωγής είναι δυνατή για μία φορά μόνο τον χρόνο, για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται με τον βέλτιστο τρόπο όταν χρησιμοποιείται σε σχέση με την ημερομηνία του έτους που παρουσιάζεται το μέγιστο πάχος χιονιού.

Ακτινοβολία βραχέων κυμάτων

Η ημερήσια ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (ORAD) εκφρασμένη σε langleys ανά ημέρα (ly/d), χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τήξης χιονιού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής. Η ακτινοβολία βραχέων κυμάτων είναι κατ' επιλογήν για περιοχές χωρίς χιονοκάλυψη. Για τις υπόλοιπες περιοχές, η ORAD μπορεί να εισαχθεί άμεσα ή να εκτιμηθεί από δεδομένα θερμοκρασίας για λεκάνες όταν δεν είναι ήδη διαθέσιμη. Όλοι οι υπολογισμοί της ηλιακής ακτινοβολίας, γίνονται στις υπορουτίνες SOLRAD και SOLTAB.

Η ORAD μετρημένη σε οριζόντια επιφάνεια, ανάγεται ώστε να εκιμά την SWRD, την ημερήσια ακτινοβολία βραχέων κυμάτων που προσλαμβάνεται από τον συνδυασμό κλίσης-προσανατολισμού από κάθε HRU. Η SWRD υπολογίζεται από:

$$SWRD = ORAD * (DRAD/HORAD) \quad (5)$$

όπου

DRAD η δυνητική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για την κλίση και τον προσανατολισμό κάθε HRU (ly), και

HORAD η ημερήσια δυνητική ηλιακή ακτινοβολία για οριζόντια επιφάνεια (ly).

Η DRAD και η HORAD είναι γραμμικά παρεμβλλόμενες από ένα πίνακα με 13 τιμές δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας (RAD), οι οποίες υπολογίζονται για κάθε συνδυασμό κλίσης και προσανατολισμού και την οριζόντια επιφάνεια. Λόγω της συμμετρίας του ηλιακού έτους, αυτές οι 13 τιμές αντιπροσωπεύουν την δυνητική ηλιακή ακτινοβολία για 24 ημερομηνίες μέσα στο έτος. Οι 13 αυτές ημερομηνίες και τα ζεύγη των τιμών, φαίνονται στον Πίνακα 1. Οι τιμές του πίνακα υπολογίζονται από την υπορουτίνα SOLTAB με την χρήση συνδυασμού μεθόδων που περιγράφονται από τους Frank and Lee (1966) και Swift (1976).

Για εγγραφές που λείπουν σε ημερομηνίες ή και περιόδους, η ORAD μπορεί να εκτιμηθεί από δεδομένα θερμοκρασίας αέρα. Μία από δύο διεργασίες μπορούν να επιλεγούν με την χρήση της μεταβλητής MRDC. Η πρώτη είναι μία μετατροπή της μεθόδου *βαθμού ημερομηνίας* που περιγράφηκε από τους Leaf και Brink (1973). Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε για μια έκταση της περιοχής του Rocky Mountain των Η.Π.Α. Φαίνεται ότι η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται καλύτερα σε αυτήν την περιοχή όπου ο ουρανός είναι ιδιαίτερα καθαρός σε περιόδους χωρίς βροχή.

Η εκτίμηση της ORAD υπολογίζεται από:

$$ORAD = SOLF * HORAD \quad (6)$$

Ο λόγος SOLF (ο λόγος της πραγματικής προς την δυνητική ακτινοβολία για μία οριζόντια επιφάνεια) παράγεται για ημέρες χωρίς βροχή, έτσι, η υπολογισμένη ORAD είναι για ξηρές μέρες. Η ORAD για ημέρες με βροχή υπολογίζεται για την περίοδο Σεπτεμβρίου-Απριλίου πολλαπλασιάζοντας την ORAD από την εξίσωση (6) με μία σταθερή PARW οριζόμενη από τον χρήστη. Για ημέρες με βροχή στους μήνες Μάιο έως Αύγουστο, η ORAD ανάγεται με την χρήση της PARS στην θέση της PARW.

Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για την χρήση αυτής της διαδικασίας είναι η κλίση (RDM) και η τομή με τον άξονα των y (RDC) της γραμμής που εκφράζει την σχέση μεταξύ μέγιστης μηνιαίας τιμής θερμοκρασίας και ενός συντελεστή βαθμού-ημέρας (DD). Επίσης ζητούνται εκτιμήσεις των PARW και PARS. Η DD υπολογίζεται ως:

$$DD = (RDM * TMX) + RDC \quad (7)$$

όπου

TMX η παρατηρημένη ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία αέρα.

Πίνακας 1: Σειρά και ημερομηνίες των 13 τιμών της δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε συνδυασμό κλίσης-προσανατολισμού

No. Σειράς	Ημερομηνία(ες)
1	Δεκέμβριος 22
2	Ιανουάριος 10, Δεκέμβριος 3
3	Ιανουάριος 23, Νοέμβριος 19
4	Φεβρουάριος 7, Νοέμβριος 5
5	Φεβρουάριος 20, Οκτώβριος 22
6	Μάρτιος 7, Οκτώβριος 8
7	Μάρτιος 21, Σεπτέμβριος 23
8	Απρίλιος 4, Σεπτέμβριος 9
9	Απρίλιος 19, Αύγουστος 25
10	Μάιος 3, Αύγουστος 10
11	Μάιος 18, Ιούλιος 27
12	Ιούνιος 1, Ιούλιος 12
13	Ιούνιος 22

Οι μηνιαίες τιμές των RDM και RDC μπορούν να υπολογιστούν από ιστορικά δεδομένα θερμοκρασίας αέρα και ηλιακής ακτινοβολίας. Μία μέθοδος είναι να γίνουν μηνιαία διαγράμματα των TMX με τους ημερήσιους συντελεστές του βαθμού-ημέρας, DD, για ημέρες χωρίς βροχή. Ένα σετ από μηνιαίες καμπύλες μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να διέρχονται από αυτά τα σημεία με το «μάτι» ή με τεχνικές γραμμικής παλινδρόμησης. Μια πιο σύντομη και χονδρική διεργασία είναι να οριστούν δύο σημεία για κάθε μηνιαία τιμή με την χρήση μέσων τιμών. Κάθε σημείο για κάθε μήνα υπολογίζεται με την χρήση της μέσης SOLF και την μέση μέγιστη θερμοκρασία για ημέρες χωρίς βροχή. Το δεύτερο σημείο εκτιμάται με την χρήση της μέσης παρατηρημένης μηνιαίας θερμοκρασίας και μία από τις 15 τιμές της DD. Εκτιμήσεις των PARW και PARS παίρνουμε από τις καταγραφές της ακτινοβολίας. PARW είναι ο λόγος της SOLF για ημέρες με βροχή προς ημέρες χωρίς βροχή για την περίοδο από Σεπτέμβριο έως τον Απρίλιο. PARS είναι ο λόγος της SOLF για ημέρες με βροχή προς ημέρες χωρίς βροχή, για την περίοδο από Μάιο έως Αύγουστο.

Η δεύτερη διαδικασία για την εκτίμηση ελλειπών δεδομένων χρησιμοποιεί μία σχέση μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας και νεφοκάλυψης του ουρανού που αναπτύχθηκε από τον Thompson (1976) και μία σχέση μεταξύ νεφοκάλυψης και ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας που παρουσιάστηκε από τον Tangborn (1978). Αυτή η διεργασία φαίνεται εφαρμόσιμη στις πιο υγρές περιοχές της χώρας (ΗΠΑ) όπου εμφανίζονται εκτεταμένες περίοδοι νεφοκάλυψης με ή και χωρίς βροχή. Η ημερήσια νεφοκάλυψη (SKY) υπολογίζεται από:

$$SKY = [RDM(MO) * (TMX-TMN)] + RDC(MO) \quad (8)$$

όπου

- RDM η κλίση του εύρους των τιμών της σχέσης νεφοκάλυψης-ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα για τον μήνα MO
 TMX η μετρημένη μέγιστη θερμοκρασία αέρα
 TMN η ελάχιστη μετρημένη θερμοκρασία αέρα, και
 RDC η τομή του εύρους των τιμών της σχέσης νεφοκάλυψης-ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα για τον μήνα MO

Η τιμή SKY χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό μιας εκτίμησης του λόγου (RAJ) της ORAD προς την δυνητική ακτινοβολία ανέφελου ουρανού, ως:

$$RAJ = RDB + (1 - RDB) * [(1 - SKY) ** RDP] \quad (9)$$

- RDB η τιμή B που υπολογίστηκε από τον Thompson (1976) σχέδιο 1, και
 RDP παράμετρος που προτάθηκε να έχει την τιμή 0.61 (Thompson, 1976)

Για ημέρες με βροχή, η RAJ πολλαπλασιάζεται με την PARS (Μάιος έως Αύγουστος) ή PARW (Σεπτέμβριος έως Απρίλιο). Ένα άνω όριο της RAJ ορίζεται από την παράμετρο RDMX. Οπότε η ORAD υπολογίζεται από:

$$ORAD = RAJ * HORAD \quad (10)$$

Και οι δύο μέθοδοι εκτίμησης της ORAD είναι σχετικά χονδρικές, αλλά φαίνεται ότι λειτουργούν ικανοποιητικά καλά. Κανονικά χρησιμοποιούνται για το συμπλήρωμα δεδομένων, ημερών που λείπουν. Όμως όπου δεν υπάρχουν δεδομένα ακτινοβολίας, παράγονται λογικά αποτελέσματα όταν τρέχονται για την γένεση δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας ολόκληρων περιόδων. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται, ο πιο κοντινός κλιματικός σταθμός με δεδομένα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας αέρα για την εκτίμηση των τιμών RDM και RDC. Αν υπάρχει μεγάλη διαφορά στο υψόμετρο μεταξύ του κλιματικού σταθμού της λεκάνης και του σταθμού που μετρά την ακτινοβολία, τα δεδομένα θερμοκρασίας αέρα σχετιζόμενα με τα δεδομένα ακτινοβολίας, ανάγονται στο υψόμετρο της περιοχής μελέτης.

2. Εδαφικές Συνιστώσες

Αδιαπέρατη έκταση

Μπορούμε να χειριστούμε την αδιαπέρατη έκταση με δύο τρόπους. Αν βρίσκεται υπό την μορφή μεγάλης ενιαίας περιοχής, μπορεί να σχεδιαστεί ως μία ή περισσότερες εντελώς αδιαπέρατες HRU. Αν μεν η αδιαπέρατη έκταση είναι αρκετή, αλλά διασκορπισμένη μέσα στις περατές HRU's μπορεί να σχεδιαστεί σαν ένα επί τοις εκατό ποσοστό επί της συνολικής περατής επιφάνειας της HRU. Η κατακράτηση θεωρείται ότι δεν λαμβάνει χώρα σε αδιαπέρατη περιοχή. Για αυτόν τον λόγο είσοδος στην αδιαπέρατη επιφάνεια είναι η ολική βροχόπτωση. Η αδιαπέρατη επιφάνεια θεωρείται ότι έχει μια μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης κατακράτησης (RETIP). Η διαθέσιμη αποθηκευτικότητα κατακράτησης (RESTOR) μειώνεται κατά την εξάτμιση. Η επιφανειακή απορροή από αδιαπέρατες περιοχές οδηγείται άμεσα στο δίκτυο ρεμάτων και ξεκινά μόλις ικανοποιηθεί η RETIP.

Κατακράτηση

Η κατακράτηση της βροχόπτωσης υπολογίζεται σαν συνάρτηση της πυκνότητας φυτοκάλυψης και της διαθέσιμης αποθήκευσης γα την κυρίαρχη βλάστηση σε κάθε HRU. Η καθαρή βροχόπτωση (PTN) υπολογίζεται από:

$$PTN = [PPT * (1-COVDN)] + (PTF * COND N) \quad (11)$$

όπου

PPT η ολική βροχή που φτάνει στην επιφάνεια της HRU (in.)

COVDN η εποχιακή πυκνότητα φυλλώματος

PTF η βροχή που διαπερνά από τον θόλο (in.)

Η COVDEN ορίζεται για το καλοκαίρι (CONDNS) και τον χειμώνα (COVDNW). Η PTF υπολογίζεται από:

$$PTF = PPT - (STOR - XIN) \quad PPT > (STOR - XIN) \quad (12)$$

$$PTF = 0.0 \quad PPT \leq (STOR - XIN)$$

όπου

STOR το μέγιστο ύψος αποθήκευσης της κατακράτησης στην βλάστηση (in.)

XIN το υπάρχον ύψος αποθήκευσης κατακράτησης (in.).

Η STOR ορίζεται από την εποχή και την μορφή των κατακρημνισμάτων – χιόνι χειμώνα (SNST), βροχή τον χειμώνα (RNSTS). Όταν πέφτει η βροχή σε κατακρατημένο χιόνι, το STOR αλλάζει από SNST στην τιμή της εποχιακής αποθήκευσης. Όταν το νέο αποθηκευμένο χιόνι υπερβαίνει την νέα τιμή της αποθήκευσης της βροχής, προστίθεται στην PTF. Όταν πέφτει το χιόνι σε αποθηκευμένη βροχή, το STOR γίνεται SNST και η διαθέσιμη αποθήκευση βροχής χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση της SNST. Η αποθηκευμένη βροχή που υπερβαίνει την SNST προστίθεται στην PTF. Η SNST γενικά θεωρείται ότι είναι μεγαλύτερη ή ίση με την RNSTW. Η PTF και η XIN υπολογίζονται από την

υπορουτίνα PRECIP για γεγονότα ημερήσιας βροχόπτωσης και στην υπορουτίνα UNITD για γεγονότα καταιγίδων.

Η κατακρατούμενη βροχή θεωρείται ότι εξατμίζεται με τον ρυθμό της ελεύθερης επιφάνειας νερού (EVCAN). Αν χρησιμοποιούνται δεδομένα εξάτμισης δοχείου τύπου Α, τότε η EVCAN ισούται με την εξάτμιση από το δοχείο. Αν η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) υπολογίζεται από μετεωρολογικές μεταβλητές, η EVCAN υπολογίζεται από:

$$EVCAN = PET/EVC (MO) \quad (13)$$

όπου EVC είναι ο μηνιαίος συντελεστής εξάτμισης από το δοχείο.

Η τήξη του κατακρατημένου χιονιού (SUBCAN) συνάγεται, ότι γίνεται με ένα ρυθμό που εκφράζεται ως ποσοστό (CTW) της PET. Ακόμα, εκτός από την τήξη το κατακρατημένο χιόνι μπορεί να απομακρυνθεί από τον θόλο, με λιώσιμο. Το ενεργειακό ισοζύγιο υπολογίζεται για μια περίοδο 12 ωρών (από τις 06.00 έως τις 18.00). Αν το ενεργειακό ισοζύγιο είναι μηδέν ή αρνητικό δεν παρουσιάζεται τήξη. Όταν το ενεργειακό ισοζύγιο είναι θετικό, όλη η τήξη μοιράζεται στην χιονοκάλυψη ή στην επιφάνεια του εδάφους σαν καθαρή βροχή.

Πραγματική ημερήσια απώλεια από την κατακράτηση (XINLOS) είναι ίση με την μικρότερη τιμή της αποθήκευσης XIN ή με τους ρυθμούς απώλειας, EVCAN ή SUBCAN. Αν η XIN δεν μειώνεται σε μία μέρα, το υπόλοιπο μεταφέρεται στην επόμενη. Η XINLOS όπως υπολογίζεται παραπάνω, αντιπροσωπεύει την απώλεια από το ποσοστό της επιφάνειας της HRU εκφρασμένη με τις παραμέτρους της πυκνότητας κάλυψης COVDNS ή CONDNW. Για υπολογισμούς του ισοζυγίου του νερού, η XINLOS ανάγεται να εκπροσωπεί μία μέση τιμή της HRU. Η XINLOS υπολογίζεται στην υπορουτίνα INTLOS σε ημερήσια βάση και στην υπορουτίνα UNITD στην βάση της καταιγίδας.

Υπολογισμός της Εδαφικής Υγρασίας

Ο υπολογισμός της εδαφικής υγρασίας πραγματοποιείται ως το αλγεβρικό άθροισμα όλων των προσθέσεων και αφαιρέσεων νερού από το ενεργό εδαφικό προφίλ. Οι μειώσεις περιλαμβάνουν την εξατμισοδιαπνοή και την επαναφόρτιση στον υπόγειο ταμιευτήρα και στην ακόρεστη ζώνη. Οι προσθέσεις είναι η διήθηση από την βροχή και την τήξη του χιονιού. Το βάθος του ενεργού εδαφικού προφίλ θεωρείται ότι είναι το μέσο βάθος του ριζοστρώματος της επικρατούσας βλάστησης σε κάθε HRU. Η μέγιστη δυνατή ικανότητα συγκράτησης νερού της εδαφικής ζώνης (SMAX) είναι η διαφορά μεταξύ υδατοϊκανότητας και σημείου μαράνσεως του προφίλ. Το ενεργό εδαφικό προφίλ χωρίζεται σε δύο στρώματα. Το ανώτερο ονομάζεται ζώνη τροφοδοσίας και το κατώτερο, κατώτερη ζώνη. Η ζώνη τροφοδοσίας ορίζεται από τον χρήστη όσον αφορά το βάθος και την μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης νερού (REMX). Η μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης νερού στην κατώτερη ζώνη (LZMX) είναι η διαφορά μεταξύ SMAX και REMX. Στην ζώνη τροφοδοσίας οι απώλειες συμβαίνουν από εξάτμιση και διαπνοή, ενώ από την κατώτερη μόνο ως διαπνοή. Οι απώλειες της εξατμισοδιαπνοής συμβαίνουν με ρυθμό, ο οποίος είναι συνάρτηση στις εδαφικής αποθήκευσης σε υγρασία. Η προσπάθεια για την ικανοποίηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής γίνεται πρώτα από την ζώνη τροφοδοσίας. Για να κινηθεί το νερό στην κατώτερη ζώνη πρέπει πρώτα να κορεστεί σε υγρασία η ανώτερη ζώνη. Όταν η αποθήκευση του εδαφικού νερού

φτάσει την SMAX, όλη η πρόσθετη διήθηση οδηγείται στην ακόρεστη και στην κορεσμένη ζώνη.

Ο υπολογισμός της ημερήσιας εδαφικής υγρασίας γίνεται στην υπορουτίνα SMBAL. Οι υπολογισμοί για περιόδους με καταιγιστικά επεισόδια γίνονται στην υπορουτίνα UNITD.

Εξατμισοδιαπνοή

Οι ημερήσιες εκτιμήσεις της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (PET) υπολογίζονται στην υπορουτίνα PETS. Υπάρχουν τρεις διαθέσιμοι τρόποι υπολογισμού. Η επιλογή της διαδικασίας γίνεται με την μεταβλητή IPET. Η πρώτη διαδικασία χρησιμοποιεί ημερήσια δεδομένα εξατμίσης από Α-τύπου λεκάνη. Η PET (in/day) υπολογίζεται από:

$$PET = EPAN * EVC(MO) \quad (14)$$

όπου

EPAN οι ημερήσιες απώλειες από την λεκάνη τύπου Α (in.)

EVC ο μηνιαίος συντελεστής αναγωγής για τον μήνα (MO)

Η δεύτερη διαδικασία υπολογίζει την PET σαν συνάρτηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του αέρα και των πιθανών ωρών ηλιοφάνειας (Hamon, 1961). Η PET (in/day) υπολογίζεται από:

$$PET = CTS(MO) * DYL^2 * VDSAT \quad (15)$$

όπου

CTS ο συντελεστής για τον μήνα MO

DYL πιθανές ώρες ηλιοφάνειας, σε μονάδες των 12 ωρών, και

VDSAT η πυκνότητα κορεσμένου αέρα – νερού (απόλυτη υγρασία) στην μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα σε gr/m^3

Η VDSAT υπολογίζεται από (Federer and Lash, 1978):

$$VDSAT = 216.7 * VPSAT / (TAVC + 273.3) \quad (16)$$

όπου

VPSAT η πίεση κορεσμένων υδρατμών σε millibars (mb) στην TAVC, και

TAVC η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα (C).

Η VPSAT υπολογίζεται από (Murray, 1967):

$$VPSAT = 6.108 * EXP [17.26939 * TAVC / (TAVC + 237.3)] \quad (17)$$

Ο Hammon (1961) προτείνει την σταθερή τιμή 0.0055 για την CTS. Άλλοι ερευνητές (Leaf and Brink, 1973, Federer and Lash, 1978) παρατηρούν ότι η τιμή 0.0055 υποεκτιμά την PET σε κάποιες περιοχές. Περιορισμένη εμπειρία εξάλλου έδειξε ότι

μία σταθερή ετήσια τιμή υποεκτιμά την PET για τους χειμερινούς μήνες περισσότερο από τους θερινούς. Για αυτό παρέχεται η δυνατότητα κύμανσης της CTS με τον μήνα.

Η DYL μπορεί να μεταβάλλεται με την εποχή του έτους και την κλίση και προσανατολισμό της HRU. Ένα σετ με διάρκειες ημέρας (SSH) σε ώρες υπολογίζεται από την υπορουτίνα SOLTAB για 13 διαφορετικά ζεύγη ημερομηνίας μέσα στο έτος (Πίνακας 1 για κάθε πεδίο ηλιακής ακτινοβολίας. Κάθε τιμή SSH διαιρείται με 12 για τον υπολογισμό της σχετισμένης DYL τιμής. Οι ημερήσιες DYL τιμές παρεμβάλλονται από τις 13 DYL τιμές στην υπορουτίνα SOLRAD.

Η τρίτη διαδικασία αναπτύχθηκε από τους Jensen and Haise (1963). Η PET (in/day) υπολογίζεται από:

$$PET = CTS(MO) * (TAVF - CTX) * RIN \quad (18)$$

όπου

CTS ο συντελεστής για τον μήνα MO

TAVF η ημερήσια μέση θερμοκρασία αέρα (F)

CTX συντελεστής

RIN η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία εκφρασμένη σε inches του δυναμικού εξάτμισης

Όπως και η μέθοδος του Hamon, έτσι και η μέθοδος των Jensen-Haise τείνει να υποεκτιμά την χειμερινή μηνιαία PET. Γι' αυτό παρέχεται και η δυνατότητα μηνιαίας αλλαγής της CTS. Για τους θερμότερους μήνες του χρόνου οι σταθερές τιμές για τις CTS και CTX μπορούν να εκτιμηθούν από την περιοχική θερμοκρασία αέρα, υψόμετρο, πίεση ατμών και δεδομένα βλάστησης (Jensen and others, 1969). Για αεροδυναμικά αδρές καλλιέργειες, οι οποίες θεωρούμε ότι περιλαμβάνουν και τα δάση, η CTS υπολογίζεται για την λεκάνη από:

$$CTS = [C1 + (13.0 * CH)]^{-1} \quad (19)$$

όπου

C1 συντελεστής διόρθωσης υψομέτρου, και

CH δείκτης υγρασίας

Το C1 υπολογίζεται από:

$$C1 = 68.0 - [3.6 * (E1/1.000)] \quad (20)$$

όπου

E1 μέσο υψόμετρο λεκάνης σε ft.

Το CH υπολογίζεται από:

$$CH = [50/(e2 - e1)] \quad (21)$$

όπου

e1 η πίεση κορεσμένου αέρα (mb) για τη μέση μέγιστη θερμοκρασία αέρα του θερμότερου μήνα του χρόνου

e2 η πίεση κορεσμένου αέρα (mb) για τη μέση ελάχιστη θερμοκρασία αέρα του θερμότερου μήνα του χρόνου

Η CTX για κάθε HRU υπολογίζεται από:

$$CTX = 27.5 - 0.25 * (e2 - e1) - (E2/1,000) \quad (22)$$

όπου

E2 το μέσο υψόμετρο κάθε HRU σε ft.

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (AET) είναι ο υπολογισμένος ρυθμός των απωλειών νερού που αντικατοπτρίζει την διαθεσιμότητα νερού για την ικανοποίηση της PET. Όταν το διαθέσιμο νερό είναι απεριόριστο, η AET ιούται με την PET. Η PET πρώτα ικανοποιείται από την αποθήκευση της κατακράτησης, και την κατακράτηση σε αδιαπέρατες επιφάνειες και εξάτμιση/εξάχνωση από χιονοσκεπείς. Η υπολοιπόμενη απαίτηση της PET εφαρμόζεται στην αποθήκευση της εδαφικής ζώνης. Η AET υπολογίζεται χωριστά από την ζώνη τροφοδοσίας και την κατώτερη ζώνη με την χρήση της ανικανοποίητης ζήτησης της PET και τον λόγο του προσωρινά διαθέσιμου νερού στην εδαφική ζώνη προς την μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης. Για την ζώνη τροφοδοσίας αυτός ο λόγος είναι RECHR/REMX. Για την κατώτερη ζώνη χρησιμοποιείται ο λόγος SMAV/SMAX. Η AET που υπολογίζεται για την ζώνη τροφοδοσίας χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση της PET. Κάθε υπολοιπόμενη ζήτηση γίνεται προσπάθεια να καλυφθεί με την AET από την κατώτερη ζώνη. Τα εδάφη σε κάθε HRU ορίζονται ώστε να είναι κατά το μέγιστο άμμος, πηλός ή άργιλος με την χρήση της μεταβλητής ISOIL. Οι υπολογισμοί γίνονται στην υπορουτίνα SMBAL.

Η στιγμή του έτους που ξεκινά η διαπνοή ορίζεται σαν περίοδο μηνών μεταξύ ITST και ITND, οι οποίοι είναι οι αρχικοί (ITST) και τελικοί (ITND) μήνες της περιόδου διαπνοής. Η καθορισμένη ημερομηνία για την αρχή της διαπνοής υπολογίζεται για κάθε HRU με την χρήση του θερμοκρασιακού δείκτη – παραμέτρου TST. Για κάθε HRU το άθροισμα των μέγιστων ημερήσιων θερμοκρασιών αέρα συσσωρεύεται, ξεκινώντας από την πρώτη μέρα του μήνα ITST. Όταν το άθροισμα αυτό, για μία HRU υπερβαίνει την TST, θεωρείται ότι ξεκινά η διαπνοή για αυτή την HRU. Αυτή η τεχνική επιτρέπει τον εν μέρει υπολογισμό των ανοιξιάτικων περιόδων που είναι θερμότερες ή ψυχρότερες του φυσιολογικού. Η διαπνοή σταματά την πρώτη μέρα του ITND.

Διήθηση

Οι τιμές της διήθησης κυμαίνονται εξαρτώμενες από την χρονική στιγμή και την μορφή των κατακρημνισμάτων εισόδου. Για την ημερήσια βροχόπτωση σε HRU με μη χιονοσκεπή επιφάνεια, η διήθηση υπολογίζεται σαν η διαφορά μεταξύ της υπολογισμένης - στην υπορουτίνα PRECIP - καθαρής βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής που υπολογίζεται στην υπορουτίνα SRFRO. Για την τήξη χιονιού, η διήθηση θεωρείται απεριόριστη έως το έδαφος να φτάσει στην υδατοϊκανότητα. Όταν επιτυγχάνεται η υδατοϊκανότητα, μια ημερήσια μέγιστη ικανότητα διήθησης που ορίζεται από τον χρήστη (SRX) περιορίζει τον ημερησίως διηθούμενο όγκο. Κάθε τήξη χιονιού που υπερβαίνει την SRX γίνεται επιφανειακή απορροή. Για βροχή που πέφτει επάνω σε χιόνι, το προκύπτον νερό το διαθέσιμο για διήθηση, αντιμετωπίζεται ως τήξη χιονιού αν το πάχος της χιονοκάλυψης δεν μειώνεται. Αν το πάχος της χιονοκάλυψης μειώνεται, τότε η βροχή και η τήξη αντιμετωπίζονται ως βροχή σε ελεύθερη από χιόνι επιφάνεια.

Οι υπολογισμοί για καταιγιστικά επεισόδια γίνονται μόνο για βροχή και μόνο όταν η επιφάνεια δεν καλύπτεται από χιόνι. Η διήθηση κατά την διάρκεια των καταιγίδων υπολογίζεται στην υπορουτίνα UNITD, με την χρήση μιας μεταβολής της εξίσωσης Green-Ampt (Green and Ampt, 1911). Η καθαρή βροχόπτωση (PTN) που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους κατανέμεται σε υπέρβαση της βροχόπτωσης (QR) και διήθησης (FIN), είτε στο καθοριζόμενο από τον χρήστη χρονικό διάστημα ή σε 5 λεπτά – σε όποιο από τα δύο είναι μικρότερο. Η ικανότητα σημειακής διήθησης (FR) υπολογίζεται ως:

$$FR = KSAT * (1.0 + PS/SMS) \quad (23)$$

όπου

KSAT η υδραυλική αγωγιμότητα της ζώνης μετάβασης σε in/hour

PS η ενεργή τιμή του προϊόντος της τριχοειδούς οδού και της μείωσης της υγρασίας (in.)

SMS η παρούσα τιμή της αθροιστικής διήθησης (in.)

Η PS μεταβάλλεται γραμμικά σαν συνάρτηση του λόγου RECHR/REMX από την διακύμανση της PSP, την τιμή του προϊόντος της τριχοειδούς οδού και την μείωση της υγρασίας στην υδατοϊκανότητα, σε μία μέγιστη τιμή, RGF φορές την PSP, που εκφράζεται ως:

$$PS = PSP * [RGF - (RGF - 1) * (RECHR/REMX)] \quad (24)$$

όπου

RECHR η παρούσα αποθήκευση υγρασίας στην ζώνη τροφοδοσίας του εδαφικού προφίλ (in.),

RMX η μέγιστη αποθήκευση υγρασίας στην ζώνη τροφοδοσίας του εδαφικού προφίλ (in.)

Η καθαρή διήθηση FIN υπολογίζεται υποθέτοντας ότι η ικανότητα διήθησης κυμαίνεται γραμμικά από μηδέν έως FR. Οπότε η FIN υπολογίζεται ως:

$$FIN = PTN - PTN^2/2FR \quad \text{όταν} \quad PTN < FR \quad (25)$$

$$FIN = FR/2 \quad \text{σε άλλη περίπτωση}$$

Η υπέρβαση της βροχόπτωσης (QR) είναι η καθαρή βροχή μείον την καθαρή διήθηση

$$QR = PTN - FIN \quad (26)$$

Προσαυξήσεις στο περισσευούμενο νερό αποθηκεύονται στην σειρά UPE(1440) ώστε να είναι διαθέσιμες για υπολογισμό της επακόλουθης επιφανειακής απορροής. Η καθαρή διήθηση εισχωρεί στην ζώνη τροφοδοσίας και συσσωρεύεται στην μεταβλητή SMS για τον σκοπό του υπολογισμού της σημειακής διήθησης της εξίσωσης 23. Σε περιόδους όπου η καθαρή βροχόπτωση είναι ίση με μηδέν, η SMS μειώνεται με ρυθμό ο οποίος υπολογίζεται από τον παράγοντα DRN φορές το KSAT. Η SMS εξαντλείται από την εξατμισοδιαπνοή κατά την διάρκεια βροχοπτώσεων με καθαρό ύψος βροχής μηδενικό.

Και στον ημερήσιο και στον καταιγιστικό τρόπο υπολογισμού, όλη η διήθηση που υπερβαίνει την SMAX οδηγείται στην ακόρεστη ζώνη και στον υπόγειο ταμιευτήρα. Το πλεόνασμα χρησιμοποιείται πρώτα ώστε να ικανοποιηθεί ο μέγιστος ρυθμός επαναφόρτισης του υπόγειου νερού SEP και το υπόλοιπο οδηγείται στην ακόρεστη ζώνη.

Επιφανειακή Απορροή

Ο υπολογισμός της επιφανειακής απορροής μεταβάλλεται με τον χρόνο και την πηγή της απορροής. Η ημερήσια μέση επιφανειακή απορροή υπολογίζεται στις υπορουτίνες SMBAL και SRFRO. Η επιφανειακή απορροή για καταιγίδες υπολογίζεται στην υπορουτίνα UNITD.

Ημερήσιος τρόπος υπολογισμού

Η επιφανειακή απορροή από την τήξη του χιονιού υπολογίζεται μόνο σε ημερήσια βάση. Η απορροή λόγω τήξης από περατές επιφάνειες υποθέτουμε ότι συμβαίνει μόνο όταν η εδαφική ζώνη μιας HRU φτάνει στην υδατοϊκανότητα. Στην υδατοϊκανότητα υποθέτεται ένας ημερήσιος μέγιστος ρυθμός διήθησης (SRX). Κάθε ημερήσια τήξη χιονιού σε υπέρβαση της SRX γίνεται επιφανειακή απορροή. Από αδιαπέρατες περιοχές η τήξη πρώτα ικανοποιεί την διαθέσιμη ικανότητα αποθήκευσης και η υπόλοιπη γίνεται επιφανειακή απορροή. Η διαθέσιμη αποθήκευση της κατακράτησης υπολογίζεται αφαιρώντας την παρούσα αποθήκευση κατακράτησης (RSTOR) από την μέγιστη αποθήκευση κατακράτησης (RETIP). Η RSTOR εξαντλείται από την εξάτμιση, αφού λιώσει η χιονοκάλυψη. Η τήξη χιονιού που προκαλείται από την βροχή σε μια χιονοσκεπή επιφάνεια αντιμετωπίζεται σαν τήξη, όταν η χιονοκάλυψη δεν εξαντλείται από την βροχή. Αν η βροχή εξαντλεί την χιονοκάλυψη, το προκύπτον μίγμα από βροχόπτωση και τήξη αντιμετωπίζεται σαν να ήταν όλο βροχή σε μη χιονοσκεπή επιφάνεια HRU.

Η ημερήσια επιφανειακή απορροή από περατή μη χιονοσκεπή HRU υπολογίζεται με την χρήση της αρχής της συνεισφέρουσας επιφάνειας (Dickinson and Whiteley, 1970, Hewlett and Nutter, 1970). Το ποσοστό της HRU που συνεισφέρει στην επιφανειακή απορροή μπορεί να υπολογιστεί είτε σαν γραμμική είτε σαν μη γραμμική συνάρτηση της προηγούμενης εδαφικής υγρασίας και της ποσότητας της βροχόπτωσης. Στην γραμμική σχέση η συνεισφέρουσα επιφάνεια (CAP) εκφρασμένη ως δεκαδικό κλάσμα της ολικής HRU υπολογίζεται από:

$$CAP = SCN + [(SCX - SCN) * (RECHR/REMX)] \quad (27)$$

όπου

SCN	η ελάχιστη πιθανά συνεισφέρουσα επιφάνεια
SCX	η μέγιστη πιθανά συνεισφέρουσα επιφάνεια
RECHR	η παρούσα αποθήκευση υγρασίας στην ζώνη τροφοδοσίας του εδαφικού προφίλ (in.)
REMX	η μέγιστη ικανότητα αποθήκευσης υγρασίας στην ζώνη (in.)

Η επιφανειακή απορροή (SRO) υπολογίζεται από:

$$SRO = CAP * PTN \quad (28)$$

όπου

PTN η καθαρή ημερήσια βροχόπτωση (in.)

Η μη γραμμική προσέγγιση χρησιμοποιεί ένα δείκτη υγρασίας (SMIDX) παρόμοιο με αυτόν που αναπτύχθηκε από τους Dickinson and Whiteley (1970) για τον υπολογισμό της CAP. Η CAP υπολογίζεται από:

$$CAP = SCN * 10^{**}(SC1 * SMIDX) \quad (29)$$

όπου

SCN & SC1 συντελεστές

SMIDX το άθροισμα του διαθέσιμου νερού στην εδαφική ζώνη (SMAV) συν μισό της ημερήσιας καθαρής βροχόπτωσης (PTN).

Ένα μέγιστο του CAP ορίζεται χρησιμοποιώντας την μεταβλητή SCX. Η SRO υπολογίζεται μετά με την εξίσωση 28.

Εκτιμήσεις των SCX, SCN και SC1 και της άμεσης επιφανειακής απορροής μπορούν να γίνουν από την παρατηρημένη επιφανειακή απορροή και δεδομένα εδαφικής υγρασίας. Όπου δεν υπάρχουν δεδομένα εδαφικής υγρασίας, εκτιμήσεις των τιμών της εδαφικής υγρασίας μπορούν να αποκτηθούν από προκαταρκτικά τρεξίματα του μοντέλου. Η παλινδρόμηση του $\log CAP - SMIDX$ μπορεί να γίνει για αυτά τα δεδομένα ώστε να υπολογιστούν οι συντελεστές:

$$\log CAP = a + b + SMIDX \quad (29a)$$

τότε

$$SCN = 10^{**} a$$

$$SC1 = b$$

SCX είναι η μέγιστη τιμή της CAP

Τρόπος υπολογισμού για κλίμακα καταιγίδας

Η προσομοίωση για αυτή την κλίμακα γίνεται με την χρήση της μεθόδου του κινηματικού κύματος. Οι υπολογισμοί της επιφανειακής απορροής σε περατές περιοχές γίνεται με το πλεόνασμα της βροχόπτωσης που υπολογίζεται ως εισροή στην εξίσωση (26). Οι αδιαπέρατες επιφάνειες χρησιμοποιούν την παρατηρημένη βροχόπτωση ως είσοδο για τον υπολογισμό. Μία HRU μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε ως ενιαία πλημμυροπεδιάδα, είτε να διαιρεθεί σε δύο ή περισσότερες ώστε να λαμβάνονται υπόψη και οι αλλαγές στην κλίση και την τραχύτητα της επιφάνειας. Όλες οι πλημμυροπεδιάδες εκφορτίζονται σε ρέματα (κανάλια), ενώ δεν επιτρέπονται πλημμυροπεδιάδες που εκβάλλουν ως καταράκτες. Όλες οι πλημμυροπεδιάδες που τίθενται σε μία HRU, χρησιμοποιούν το ίδιο ίχνος υπέρβασης της βροχόπτωσης. Η μερική διαφορική εξίσωση που λύνεται για κάθε επιφανειακή πλημμυροπεδιάδα είναι:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = re \quad (30)$$

όπου

h	το βάθος ροής (σε feet)
q	η ταχύτητα ροής ανά μοναδιαίο πάχος (σε ft ³ /sec/ft)
re	η ταχύτητα των εισροών του πλεονάσματος βροχόπτωσης
t	ο χρόνος (σε sec)
x	η απόσταση προς τα κατάντη (σε ft)

Η σχέση μεταξύ h και q δίνεται ως

$$q = ah^m$$

όπου a και m είναι συναρτήσεις των χαρακτηριστικών της επιφανειακής πλημμυροπεδιάδας και υπολογίζονται στην υπορουτίνα AM.

Οι εξισώσεις ώστε να υπολογιστούν τα a και m δίνονται από πίνακες.

Υποδερμική Απορροή

Ως υποδερμική απορροή ορίζεται η σχετικά ταχεία κίνηση του νερού από την ακόρεστη ζώνη, προς το υδρογραφικό δίκτυο. Η υποδερμική απορροή συμβαίνει κατά την διάρκεια ή και μετά κάποια βροχόπτωση ή/και τήξη χιονιού. Η πηγή της υποδερμικής απορροής είναι το εδαφικό νερό που υπερβαίνει την υδατοϊκανότητα. Το πλεόνασμα αυτό του νερού διεισδύει σε ρηχούς υπόγειους υδροφορείς ή κινείται προς τα κάτω σε μικρό βάθος από το σημείο της διήθησης σε κάποιο σημείο εκφόρτισης πάνω από την στάθμη του υπόγειου υδροφορέα. Η υποδερμική απορροή υπολογίζεται με την χρήση συστήματος διόδευσης ταμιευτήρα.

Ένας υποδερμικός ταμιευτήρας μπορεί να δέχεται εισροές από μία ή περισσότερες HRUs. Αλλά και ο αριθμός των υποδερμικών ταμιευτήρων μπορεί να κυμαίνεται από ένα έως τον αριθμό των HRU's. Η εισροή σε υποδερμικό ταμιευτήρα, INFLOW, ορίζεται με την πρόσθεση όλων των τιμών των soil_to_ssr (έδαφος προς υποδερμικό ταμιευτήρα) από όλες τις HRUs που συνδέονται με αυτόν τον ταμιευτήρα.

Εισροή σε ένα υποδερμικό ταμιευτήρα γίνεται όταν υπερβαίνεται η μέγιστη ικανότητα κατακράτησης υγρασίας από το έδαφος (SMAX) και αυτό το ποσό είναι μεγαλύτερο από την ταχύτητα τροφοδοσίας (SEP) προς τον υδροφορέα. Δηλαδή, η διαφορά μεταξύ του πλεονάσματος σε νερό του εδάφους και της SEP, εισρέει στον «υποδερμικό ταμιευτήρα». Η εξίσωση διατήρησης της μάζας για την υποδερμική ροή εκφράζεται ως:

$$RAS = INFLOW - d(RES)/dt \quad (32)$$

όπου

RAS	η ταχύτητα εκροής από τον υποδερμικό ταμιευτήρα (in/Δt)
INFLOW	η ταχύτητα εισροής στον υποδερμικό ταμιευτήρα (in/Δt)
RES	ο όγκος αποθήκευσης υποδερμικό ταμιευτήρα (in)

Η RAS εκφράζεται στα πλαίσια του RES με την σχέση

$$RAS = RCF * RES + RCP * RES^2 \quad (33)$$

όπου

RCF και RCP είναι συντελεστές διόδευσης (routing)

Η παραπάνω σχέση είναι μη γραμμική. Όμως αν τεθεί $RCP = 0$, η σχέση γίνεται γραμμική. Συνδυάζοντας την (33) με την (32), έχουμε

$$d(RES)/dt = INFLOW - (RCF * RES) - (RCP * RES^2) \quad (34)$$

Η (34) συνδυάζεται με την εξίσωση της συνέχειας.

Ένα δεύτερο σημείο εκφόρτισης του υποδερμικού ταμιευτήρα παρέχει εισροές (GAD) σε υπόγειο ταμιευτήρα (υδροφορέα) οι οποίες υπολογίζονται ως

$$GAD = RSEP * (RES/RESMX)^{REXP} \quad (35)$$

όπου

RESMX	συντελεστές διόδευσης νερού από τον υποδερμικό ταμιευτήρα
και REXP	στον υδροφορέα
RSEP	συντελεστής ημερήσιας διόδευσης νερού από τον υποδερμικό ταμιευτήρα στον υδροφορέα
RES	η αποθήκευση στον υποδερμικό ταμιευτήρα

Οι συντελεστές RESMX και REXP χρησιμοποιούνται ώστε να ορίζονται τα χαρακτηριστικά διόδευσης. Αν τα θέσουμε ίσα με ένα, η διόδευση γίνεται γραμμική συνάρτηση του RES.

Οι αρχικοί όγκοι νερού που είναι αποθηκευμένοι στον υποδερμικό ταμιευτήρα και οι συντελεστές διόδευσης πρέπει να οριστούν για κάθε υποδερμικό ταμιευτήρα. Γενικά η πρώτη εκτίμηση της αποθήκευσης είναι μηδέν. Οι τιμές των RESMX και REXP μπορούν να προσαρμοστούν από ιστορικά δεδομένα.

3. Υπόγειο Νερό

Το σύστημα του υπόγειου υδροφορέα έχει παρουσιαστεί ως γραμμικός ταμιευτήρας και θεωρείται ότι είναι η πηγή της βασικής απορροής (BAS). Εισροές στον υπόγειο ταμιευτήρα αποτελούν η περίσσεια της εδαφικής υγρασίας και η διαρροή από τον υποδερμικό ταμιευτήρα. Η μορφή του καθοδικού κλάδου του προσομοιωμένου υδρογραφήματος θα επηρεάζεται ανάλογα, με την ποσότητα της τροφοδοσίας του υδροφορέα από τις δύο πηγές. Η τροφοδοσία από το έδαφος συμβαίνει μόνο όταν η διήθηση υπερβαίνει την υδατοϊκανότητα του εδάφους, ενώ η τροφοδοσία από τον υποδερμικό ταμιευτήρα συμβαίνει πάντα εφόσον υπάρχει διαθέσιμο νερό στον υποδερμικό ταμιευτήρα. Γι' αυτό η προτιμητέα χρήση της GAD από την SEP, μειώνει την υποδερμική απορροή και αυξάνει την συνεισφορά του υπόγειου νερού στην βασική απορροή.

Η ροή από κάθε υδροφορέα (BAS) εκφρασμένη σε acres-inches υπολογίζεται από:

$$BAS = RCB * GW \quad (36)$$

όπου

RCB	συντελεστές διόδευσης υπόγειου νερού ώστε να παρέχεται η συνεισφορά της υπόγειας ροής στην βασική απορροή
GW	είναι η ολική αποθήκευση σε κάθε υπόγειο υδροφορέα

Οι τιμές του συντελεστή RCB, GW και η αρχική αποθήκευση στον υδροφορέα, υπολογίζονται γενικά από παροχές ρεμάτων με διάφορες μεθόδους.

Η κίνηση του νερού σε σημεία εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος ή μέτρησης, αντιμετωπίζονται με την χρήση μίας «υπόγειας καταβόθρας». Η τιμή της ροής (SNK) σε acres-inches υπολογίζεται ως

$$SNK = GSNK * GW \quad (37)$$

όπου

GSNK συντελεστές διόδευσης υπόγειου νερού σε καταβόθρα

Σε μία υδρολογική λεκάνη μπορούμε να διακρίνουμε έναν ή περισσότερους υπόγειους υδροφορείς, αρκεί να έχουμε αρκετά στοιχεία ώστε να εκτιμήσουμε την αρχική αποθήκευση και τους συντελεστές διόδευσης.

Συνιστώσες ποτάμιων ταμιευτήρων

Οι συνιστώσες αυτές προσομοιώνουν την αποθήκευση και την απόκριση της διόδευσης των ποτάμιων ταμιευτήρων.

Συνιστώσες Χιονιού

Οι συνιστώσες χιονιού προσομοιώνουν την αρχικοποίηση, την συσσώρευση και την μείωση της χιονοκάλυψης σε κάθε HRU.

Συνιστώσες Κλίμακας Καταιγίδας

Η υδρολογική λεκάνη διακρίνεται σε πλημμυροπεδιάδα και τμήματα καναλιών (ποταμών) για του υπολογισμούς κλίμακας καταιγίδας. Υπολογίζονται έτσι

- Η επιφανειακή απορροή.
- Η ροή σε ποτάμια.
- Η μεταφορά ιζημάτων.

Β. Ανάλυση Ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας επιτρέπει στον χρήστη να εξακριβώσει κατά πόσον η αβεβαιότητα στις επιλεγμένες παραμέτρους, οδηγεί σε αβεβαιότητα στην υπολογισμένη τιμή της μεταβλητής. Συζητήσεις στην ανάλυση ευαισθησίας έχουν παρουσιαστεί από τους Mein and Brown (1978) και από τους Beck and Arnold (1977).

Δύο μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας παρέχονται. Η πρώτη (PRMS Sensitivity) αναπτύχθηκε για χρήση της στο μοντέλο PRMS και περιγράφεται στο εγχειρίδιο χρήσης (Leavley and others, 1983). Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την συναξιολόγηση έως και 10 παραμέτρων. Η δεύτερη αξιολογεί την ευαισθησία μιας παραμέτρου ή ζεύγους παραμέτρων και παράγει την επιφάνεια της αντικειμενικής συνάρτησης για επιλεγμένο διάστημα αυτών των παραμέτρων.

Γ. Modules του προγράμματος

Οι ακόλουθες modules του προγράμματος υπολογίζουν με συνδυασμούς των παραμέτρων τους, τις συνιστώσες του υδρολογικού ισοζυγίου. Μεταξύ τους είναι αλληλοεξαρτώμενες, καθώς οι παράμετροι κάποιας module μπορούν να χρησιμοποιούνται και από άλλη. Σε κάθε module δηλώνονται παράμετροι, μεταβλητές και εξωτερικές μεταβλητές, δηλαδή μεταβλητές των οποίων οι τιμές ορίζονται ή υπολογίζονται από άλλες modules.

Τα ονόματά των modules, το περιεχόμενο του υπολογισμού τους και οι ορισμοί τους φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Modules του PRMS

Ονομασία	Ορισμός
basin	Ορισμός της λεκάνης απορροής (Δηλώνει την λεκάνη απορροής και τις φυσικές παραμέτρους των HRU)
basin_sum	Συγκέντρωση αποτελεσμάτων (Συνολικές τιμές για ημερήσια, μηνιαία ετήσια και ολική ροή)
ccsolrad	Αλγόριθμος κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας και διαδικασία εκτίμησης ελλειπών δεδομένων
ddsolrad	Αλγόριθμος κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας και διαδικασία εκτίμησης ελλειπών δεδομένων
grnampt_infil	Διήθηση – διαδικασία υπολογισμού της διήθησης κατά την διάρκεια καταιγίδων με την τροποποιημένη μέθοδο Green & Ampt
gwwflow	Ροή στον υδροφορέα – αθροίζει τις εισροές στους υδροφορείς και υπολογίζει τις εκροές σε ρέματα ή/και σε καταβόθρες

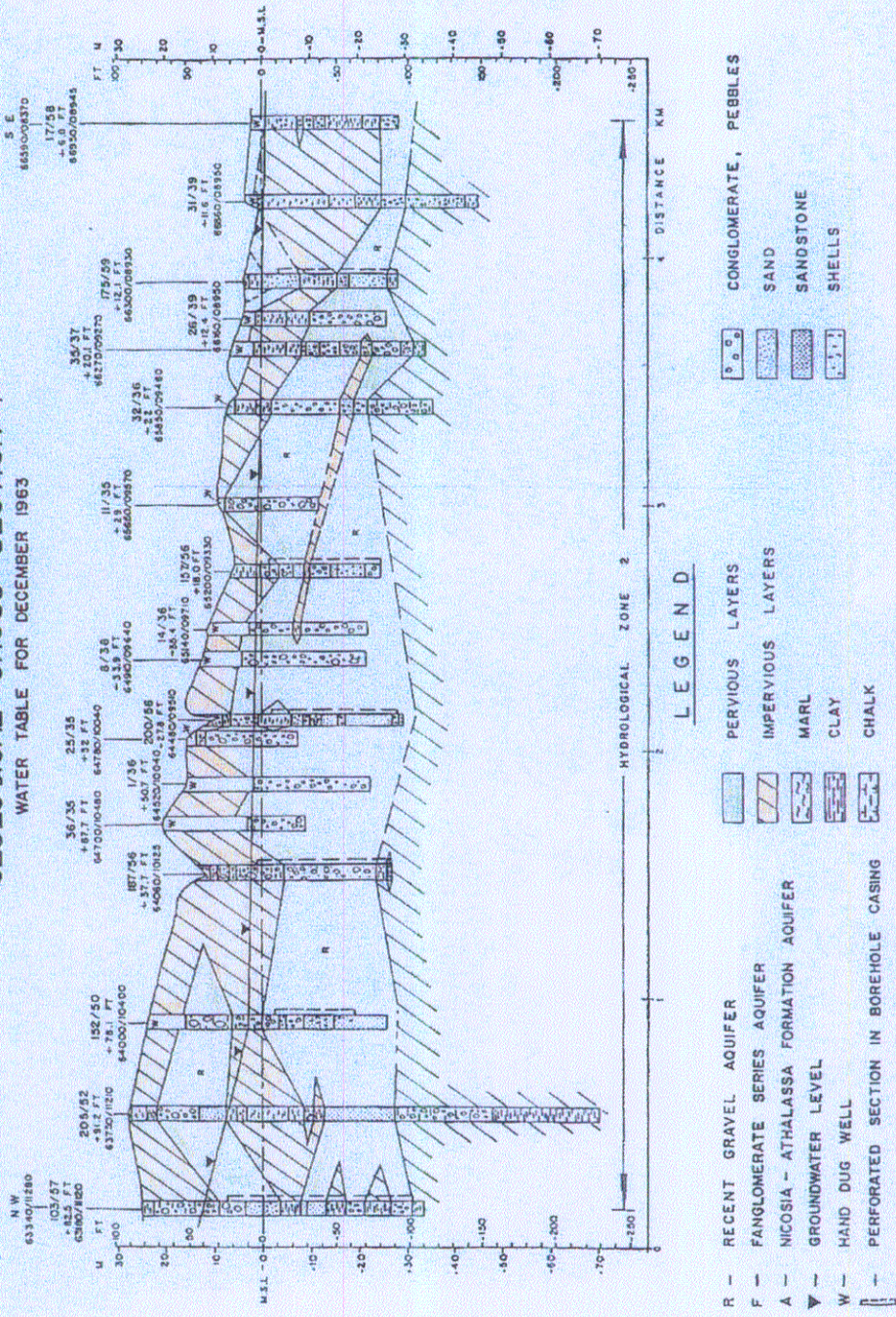
intcp	Υπολογισμός της κατακράτησης (από νερό ή χιόνι, εξάτμιση από αυτά και τελικής ποσότητας που φτάνει στο έδαφος)
krout_chan	Κινηματική διόδευση ποτάμιας ροής, διόδευση ταμιευτήρα και μεταφορά ιζημάτων
krout_ofpl	Κινηματική διόδευση της επιφανειακής απορροής και σε αυλακώσεις του εδάφους και μεταξύ τους (rill-interrill) αποκόλληση ιζημάτων και μεταφορά
obs	Διαβάζει τις μεταβλητές εισόδου (από το αρχείο των δεδομένων)
potet_ep_not	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (αν δεν υπάρχουν δεδομένα θερμοκρασίας)
potet_epan	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (με χρήση δεδομένων pan)
potet_hamon	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (με χρήση του τύπου Hamon)
potet_jh	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (με χρήση του τύπου Jensen-Haise)
precip	Κατανομή και μορφή βροχόπτωσης
smbal	Υπολογισμός της εδαφικής υγρασίας
snowcomp	Χιόνι – Εξέλιξη χιονοκάλυψης – υποχώρησης με ενεργειακό ισοζύγιο
soltab	Ηλιακή ακτινοβολία (Δυνητική) – και ανατολή - δύση ηλίου
srunoff_carea	Επιφανειακή απορροή – Υπολογισμός απορροής και διήθησης
srunoff_smidx	Επιφανειακή απορροή – Υπολογισμός απορροής και διήθησης
ssflow	Υποδερμική απορροή
strmflow	Ημερήσια ροή σε ρέματα, ροές από καταιγίδες και ημερήσια διόδευση ταμιευτήρα
temp_1sta	Κατανομή θερμοκρασίας (με βάση το υψόμετρο και 1 σταθμό θερμοκρασίας)
temp_2sta	Κατανομή θερμοκρασίας (με βάση 2 σταθμούς θερμοκρασίας)

B
CAPRITIA
A

Γεωλογικές Τεχνικές Περιοχής Ακρωτηρίου

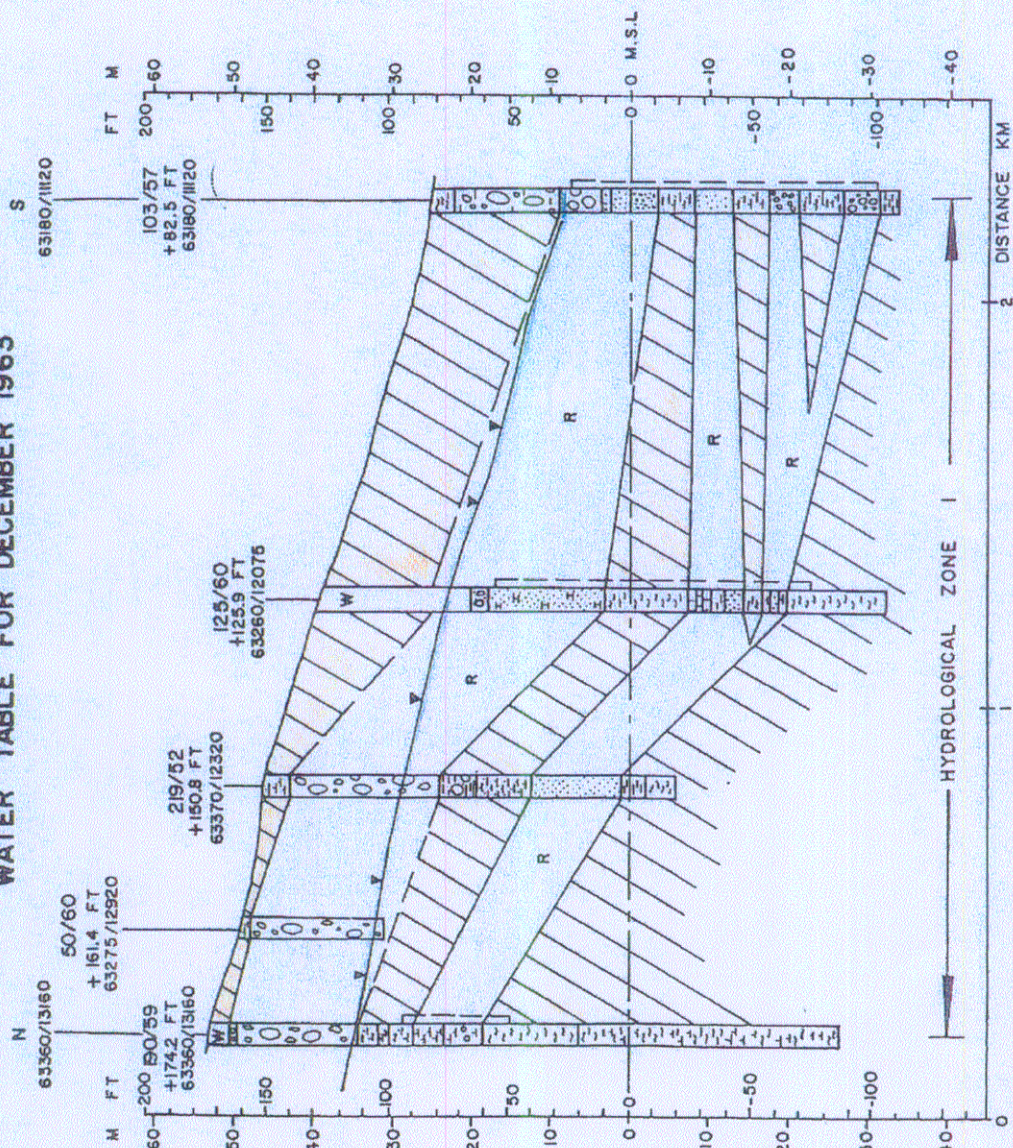
Fig 3

AKROTIRI PENINSULA
GEOLOGICAL CROSS SECTION I
WATER TABLE FOR DECEMBER 1963



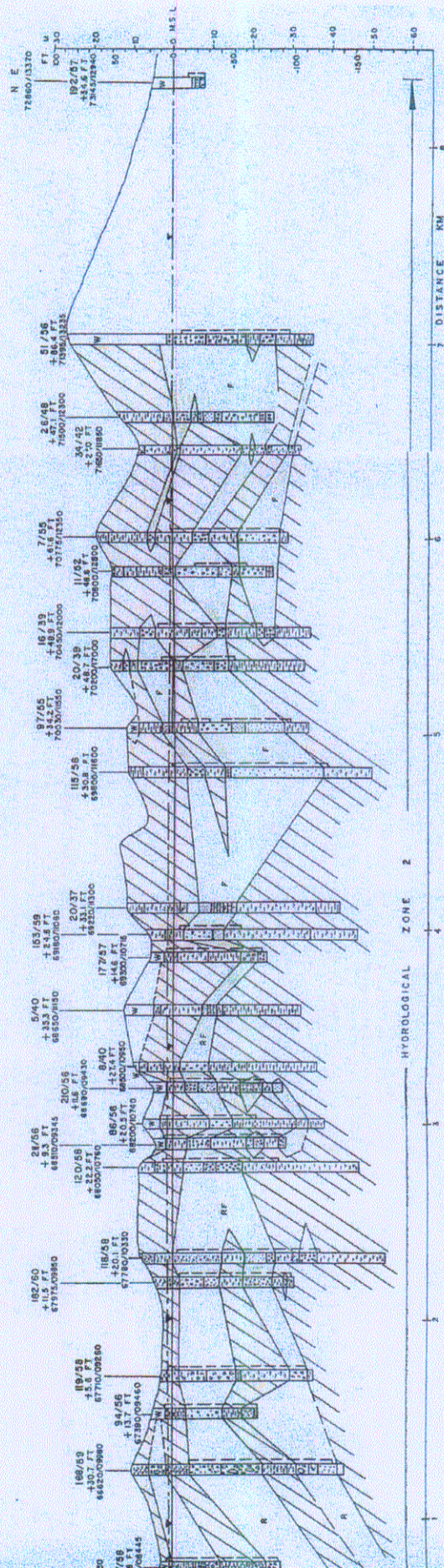
AKROTIRI PENINSULA
GEOLOGICAL CROSS SECTION 3
WATER TABLE FOR DECEMBER 1963

Fig



AKROTIRI PENINSULA
GEOLOGICAL CROSS SECTION 4
WATER TABLE FOR DECEMBER 1963

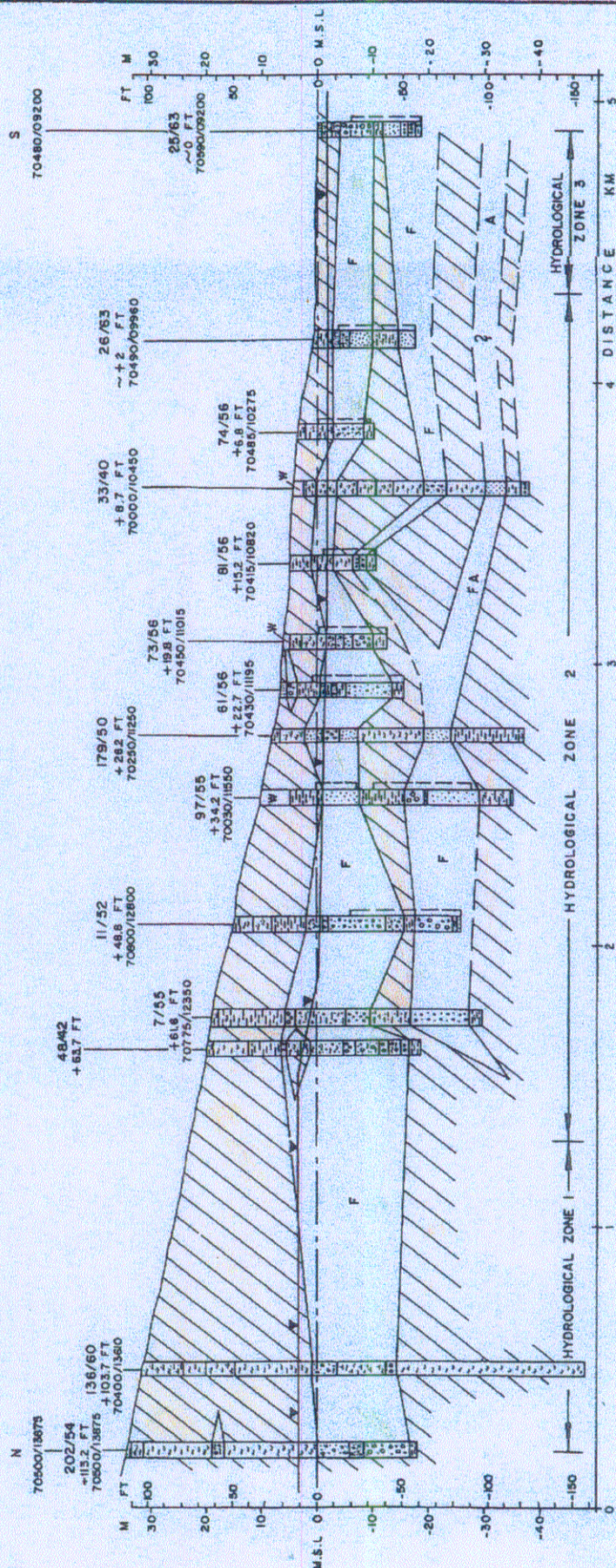
Fig. 6



FOR LEGEND SEE Fig. 3

AKROTIRI PENINSULA
GEOLOGICAL CROSS SECTION 5
WATER TABLE FOR DECEMBER 1963

Fig 7



FOR LEGEND SEE Fig. 3