ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ :

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ

Από τον
ΠΑΝΤΕΛΗ Γ. ΣΙΔΗΡΟΠΟΥΛΟ
Πολιτικό Μηχανικό Π.Θ.

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Π.Μ.Σ.)
«ΜΔΕ στην Εφαρμοσμένη Μηχανική και Προσομοίωση Συστημάτων»
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΟΛΟΣ 2007

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 5272/1
Ημερ. Εισ.: 10-10-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
551.49
ΣΙΔ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Αφιερωμένη

στην Ρία

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της Μεταπτυχιακής Εργασίας Ειδίκευσης του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών « Εφαρμοσμένη Μηχανική και Προσομοίωση Συστημάτων », του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Επιβλέπων της Μεταπτυχιακής Εργασίας ήταν ο Επίκουρος Καθηγητής Νικήτας Μυλόπουλος, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη και την καθοδήγηση που μου παρείχε από την αρχή της συνεργασίας μας.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή Θανάση Λουκά για τις χρήσιμες πληροφορίες που μου παρείχε, αλλά και για τις επαφές του με τις αρμόδιες Υπηρεσίες της Θεσσαλίας από τις οποίες έλαβα αρκετά στοιχεία.

Δεν μπορώ να παραβλέψω τη χρήσιμη βοήθεια του Υπ. Διδάκτορα Λάμπρου Βασιλειάδη στο θεωρητικό επίπεδο και του Υπ. Διδάκτορα Φίλλιπου Σοφού πάνω στη Fortran.

Ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου για την υποστήριξη που μου παρέχουν όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στη Ρία Κασιώρα, για την ηθική και ψυχολογική της συμπαράσταση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Θεσσαλία, η δεύτερη μεγαλύτερη πεδιάδα της Ελλάδας, είναι μια εντατικά καλλιεργημένη αγροτική περιοχή. Η έντονη και εκτεταμένη παραγωγή υδρόφιλων καλλιεργειών, όπως το βαμβάκι, έχουν οδηγήσει σε μια αξιοσημείωτη αύξηση της ζήτησης νερού, η οποία καλύπτεται από την υπερεκμετάλλευση των υπόγειων αποθεμάτων. Ο υπόγειος υδροφορέας της Λίμνης Κάρλας υφίσταται πλέον τις συνέπειες αυτής της κατάστασης.

Η παλαιά Λίμνη Κάρλα κατείχε το μεγαλύτερο μέρος της ανατολικής πεδιάδας της Θεσσαλίας μέχρι το 1962, τη χρονιά της αποξήρανσή της. Ήταν από τους πιο σημαντικούς υδρότοπους στην Ελλάδα και ένας φυσικός ταμιευτήρας πολύ σημαντικός για την αποθήκευση νερού και για τον εμπλουτισμό του υποκείμενου υδροφορέα. Η κατασκευή ενός μικρότερου ταμιευτήρα δεν έχει ακόμη ολοκληρωθεί, ενώ το έργο της μερικής ανασύστασης της παλαιάς λίμνης είναι σχεδόν έτοιμο. Αυτή η καθυστέρηση έχει προκαλέσει σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως μεταξύ άλλων, ο περιορισμός του φυσικού εμπλουτισμού του υποκείμενου υδροφορέα και η αύξηση της άντλησης του υπόγειου νερού, η οποία με τη σειρά της οδήγησε στην δραματική πτώση της στάθμης του. Σήμερα το επίπεδο της στάθμης είναι περισσότερο από 200 m κάτω από το έδαφος στα νότια της πεδιάδας και η πτώση της στις ζώνες με τη μεγαλύτερη άντληση να φτάνει στα 80 m τα τελευταία 20 χρόνια.

Η έλλειψη δεδομένων, όσον αφορά κυρίως τη χωρική μεταβλητότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) δημιουργεί ένα αβέβαιο υδρογεωλογικό περιβάλλον για το υπό μελέτη πεδίο. Επιπλέον, οι χιλιάδες μη καταγεγραμμένες και ανεξέλεγκτες γεωτρήσεις που αντλούν από τον υπόγειο υδροφορέα για την ικανοποίηση των τεράστιων αναγκών σε νερό, αποτελούν μια άλλη πηγή αβεβαιότητας. Σε αυτή τη μελέτη ένα στοχαστικό μοντέλο αναπτύχθηκε για την προσομοίωση του υδροφορέα της Λίμνης Κάρλας μέσω της γεωστατιστικής προσέγγισης, στην οποία χρησιμοποιήθηκε η Ακολουθιακή Προσομοίωση Gauss (SGSIM) από το GSLIB, τόσο για την μη εξαρτημένη, όσο και για την εξαρτημένη στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Το τυχαίο πεδίο της υδραυλικής αγωγιμότητας θεωρήθηκε ότι ακολουθεί λογαριθμική κατανομή, με μια μέση τιμή και μια τυπική απόκλιση. Η εξάρτηση επιτεύχθηκε με τη χρήση των 15 δειγματοληπτικών τιμών της K σε κάποιες θέσεις του πεδίου. Προέκυψαν έτσι πολλαπλές Monte-Carlo απεικονίσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας, οι οποίες εισήχθησαν στο Modflow και έδωσαν αντίστοιχες απεικονίσεις των υδραυλικών υψών. Υπολογίσθηκαν χάρτες με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των υδραυλικών υψών από όλες τι απεικονίσεις. Η εκτίμηση της αβεβαιότητας που πραγματοποιήθηκε αφορά κυρίως την επίδραση της εξάρτησης της K από τις δειγματοληπτικές της τιμές και την υπερεκμετάλλευση του υδροφορέα στις προσομοιωμένες τιμές των υδραυλικών υψών που προέκυψαν.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

ABSTRACT

Thessaly, the second largest plain of Greece, is an intensely cultivated agricultural region. The intense and extensive agriculture of water demanding crops, such as cotton, has lead to a remarkable water demand increase, which is usually covered by the over-exploitation of groundwater resources. The aquifer of Lake Karla's basin is a prominent example of this unsustainable practice.

The former Lake Karla occupied most of the eastern part of Thessaly plain until 1962, year of the lake's drainage. It was one of the most important wetlands in Greece and a natural reservoir very significant for water storage and for the underlying aquifer's recharge. A smaller reservoir that was planned instead was never built until today, when the project of partial restoration of the former lake is near completion. This delay has caused serious environmental problems, such as the limitation of the natural recharge of the underlying aquifer and the increase of groundwater pumping among others, which in turn have caused a dramatic drawdown of the water table. Today, the groundwater's level is more than 200 m below the land surface at the southern area of the basin, and the head losses at the zones with the most intense pumping have reached up to 80 m during the last 20 years.

The limited information and data concerning mostly the spatially varying hydraulic conductivity parameter in the study area generates an uncertain hydrogeological environment. In addition, the thousands of unregistered and uncontrolled wells which pump at unidentified locations in order to satisfy the iniquitous needs produce another source of uncertainty. In this study a stochastic model is being developed to simulate the Lake Karla's aquifer through a geostatistical approach. For the latter, the Sequential Gaussian Simulation (SGSIM) from GSLIB was used, for both the unconditional and the conditional stochastic simulation of hydraulic conductivity. The random hydraulic conductivity field is assumed to follow log-normal distribution, with a given expected mean value, and a standard deviation. Conditioning was achieved by using the values of K which were obtained through pump tests, at 15 locations. Monte-Carlo realizations of the parameter were generated and groundwater flow was simulated for each of them. Estimates of the mean (expected value) and standard deviation of hydraulic heads for all of the realizations were obtained. The uncertainty analysis that was performed concerned mainly the impact of conditioning and of the overpumping upon the results of the model and the derived output uncertainty (measured by deviations in simulated heads).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ....1
1 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ....2
1.1 Εισαγωγή....2
1.2 Υδρολογική Λεκάνη της Κάρλας....2
1.3 Κλιματικές - Υδρολογικές Συνθήκες....4
1.4 Γεωλογική Δομή....4
1.4.1 Γεωμορφολογία....4
1.4.2 Στρωματογραφία και Τεκτονική....5
1.5 Εκμετάλλευση Υπόγειων Υδάτων και Συμπεριφορά Υδροφοριών....8
1.5.1 Υδροφόροι Σχηματισμοί....8
1.5.2 Υδροφορία Προσχωματικού και Πεδινού Τμήματος της Κάρλας.10
1.5.3 Τροφοδοσία – Πιεζομετρία....11
1.5.4 Εκμετάλλευση – Απόδοση των υδροφορέων....14
1.5.5 Αρδευτική – Υδρευτική Εκμετάλλευση του Υπόγειου Υδροφορέα22
2 ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ....24
2.1 Εισαγωγή....24
2.2 Γεωστατιστική προσέγγιση....25
2.3 Μεταβλητόγραμμα - Ημιμεταβλητόγραμμα....32
2.4 Kriging....34
2.5 Αρχές της Στοχαστικής Προσομοίωσης....41
2.6 Γεωστατιστική Βιβλιοθήκη (GeoStatistical LIBrary - GSLIB)....45
2.6.1 Data....47
2.6.2 Postscript....55
2.6.3 Variogram....63
2.6.4 Kriging....71
2.6.5 Simulation....75
2.7 Ακολουθιακή Προσομοίωση (Sequential Simulation)....76
2.8 Κανονική Προσομοίωση (Gaussian Simulation)....78
2.9 Ακολουθιακή Κανονική Προσομοίωση (Sequential Gaussian SIMulation)....80
3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΡΟΩΝ (GROUNDWATER MODELING SYSTEM – GMS 6.0)....87
3.1 Εισαγωγή....87
3.2 Ο Κώδικας Modflow....88
3.2.1 Μαθηματικό Υπόβαθρο του Modflow....88
3.2.2 Διακριτοποίηση....91
3.2.3 Εξίσωση Πεπερασμένων Διαφορών....92
3.2.4 Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών....100
3.2.5 Πακέτα υποστήριξης του MODFLOW....101
3.2.6 Σχεδιασμός του καννάβου....105
3.3 Τρόποι προσέγγισης του MODFLOW....105
3.3.1 Προσέγγιση Καννάβου....106
3.3.2 Προσέγγιση του Εννοιολογικού Μοντέλου....107
3.4 Ρύθμιση του μοντέλου....109
3.5 Στοχαστική Προσομοίωση μέσω του MODFLOW....112
4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ GSLIB, MODFLOW ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ....114
4.1 Δομή – Γεωμετρία της Προσομοιωμένης Περιοχής....114

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

4.2 Παρουσίαση όλων των χαρακτηριστικών – δεδομένων του μοντέλου 115
4.2.1 Στοχαστική Προσομοίωση της Υδραυλικής Αγωγιμότητας 122
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 128
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 144
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....145

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο **1° Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της Υδρολογικής Λεκάνης της Κάρλας, μέσα στην οποία βρίσκεται και η περιοχή μελέτης. Η ευρύτερη αυτή Λεκάνη καταλαμβάνει έκταση 1.663.000 στρεμμάτων, ενώ η περιοχή του υπό προσομοίωση Υπόγειου Υδροφορέα καταλαμβάνει 500.000 στρέμματα. Γίνεται αναφορά στο πως σχηματίστηκε η Λεκάνη αυτή ανά τους χρόνους, στη γεωλογική της σύσταση – τόσο του ανάγλυφου, όσο και του υπόβαθρου - και στους τύπους των Υδροφορέων που συναντώνται. Τέλος παρουσιάζονται και οι αρδευτικές και υδρευτικές απαιτήσεις της ευρύτερης Λεκάνης.

Στο **2° Κεφάλαιο** γίνεται αναλυτική παρουσίαση της γεωστατιστικής προσέγγισης καθώς και των στατιστικών της εργαλείων, με το ενδιαφέρον να εστιάζεται στο μεταβλητόγραμμα. Παρουσιάζεται η μέθοδος *Kriging*, που αποτελεί τη μοναδική μέθοδο χωρικής παρεμβολής που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα *GSLIB*, το οποίο η αναλυτική παρουσίασή του γίνεται στο τέλος αυτού του κεφαλαίου.

Στο **3° Κεφάλαιο** περιγράφεται το πρόγραμμα *MODFLOW* , το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της υπόγειας ροής του υδροφορέα. Αναλύεται διεξοδικά πως προκύπτει η κύρια διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής και πως αυτή επιλύεται μέσω των πεπερασμένων διαφορών. Αναλύονται τα πακέτα που υποστηρίζουν το πρόγραμμα και τέλος η στοχαστική προσομοίωση που πραγματοποιείται μέσα από αυτό.

Στο **4° Κεφάλαιο** γίνεται η εφαρμογή των δύο προγραμμάτων *GSLIB, MODFLOW* για την στοχαστική προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα. Παρουσιάζονται οι οριακές, αρχικές συνθήκες, τα δεδομένα που απαιτούνται για το χτίσιμο του μοντέλου καθώς και οι παραδοχές που έγιναν. Στο τέλος του κεφαλαίου το ενδιαφέρον εστιάζεται στη στοχαστική προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας.

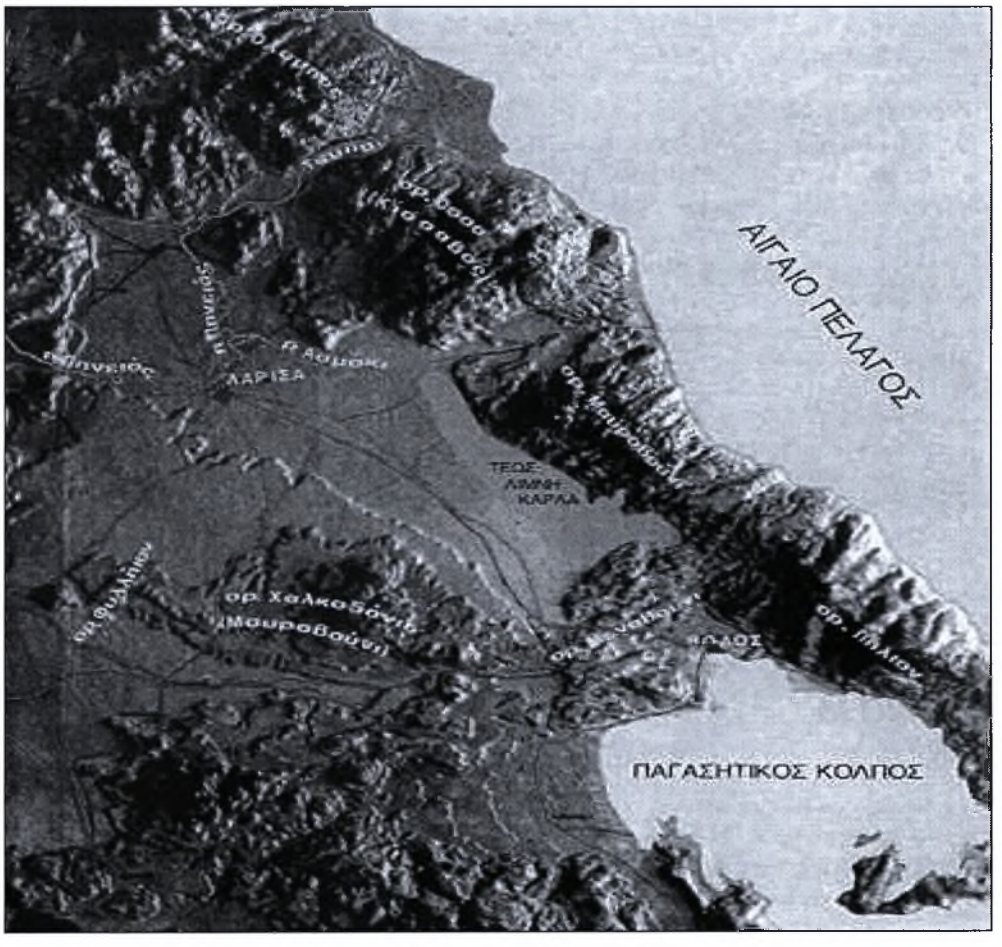
Στο **5° Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δύο μεθόδους της στοχαστικής προσομοίωσης. Από την παρατήρηση αυτών εξάγονται και τα απαραίτητα συμπεράσματα ολοκληρώνοντας έτσι τον σκοπό αυτής της εργασίας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

1 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ.

1.1 Εισαγωγή.

Η λίμνη Κάρλα, η αρχαία Βοιβηίς, υπήρξε μία από τις μεγαλύτερες και οικολογικά σημαντικότερες λίμνες της Ελλάδας. Σχηματιζόνταν από τα ποτάμια που πήγαζαν κυρίως από την Όσσα. Βρίσκονταν στους πρόποδες της βόρειας προέκτασης της οροσειράς του Πηλίου που λέγεται Μαυροβούνι (Σχήμα 1.1). Καταλάμβανε μία έκταση 200.000 στρεμμάτων. Η λίμνη οριοθετούνταν βορειοανατολικά από τις λοφώδεις εξάρσεις της οροσειράς Μαυροβουνίου, νότια από τις λοφώδεις εξάρσεις της οροσειράς του Πηλίου, ενώ βορειοδυτικά, δυτικά έως νοτιοδυτικά δεν ήταν σαφή τα όρια. Καταλάμβανε το χαμηλότερο σημείο του βαθύτερου τμήματος της θεσσαλικής πεδιάδας.



Σχήμα 1.1 Γεωγραφική θέση της Λίμνης Κάρλας. (Μουστάκα Ε., 2002)

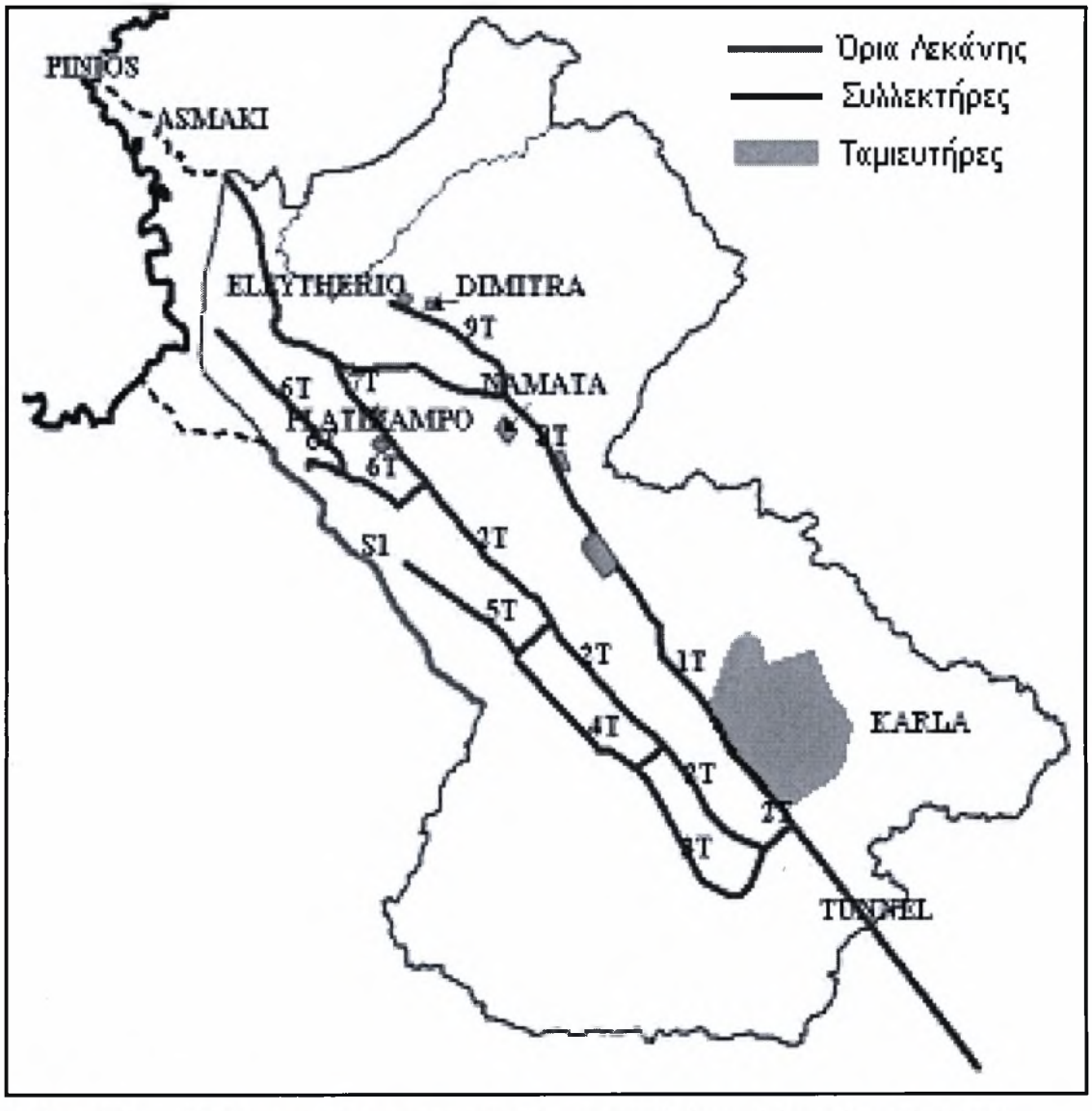
1.2 Υδρολογική Λεκάνη της Κάρλας.

Η λεκάνη της Κάρλας βρίσκεται στο ΝΑ άκρο της πεδιάδας της Λάρισας και παρουσιάζει μορφή κλειστής, επιμήκους λεκάνης, μήκους 35 χλμ. και πλάτους 9 - 15 χλμ. Η λεκάνη έχει όρια στο Βορρά τον ποταμό Πηνειό και τον ορεινό όγκο της Όσσας, στην Ανατολή τους ορεινούς όγκους του Μαυροβουνίου και του Πηλίου, στο Νότο το Χαλκοδόνιο όρος και το Μεγαβούνι και στη Δύση το Φυλλήιον όρος Στο μέσο της λεκάνης αυτής βρίσκεται το βαθύτερο τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας, τα χαμηλότερα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

τμήματα της οποίας μέχρι το 1961, καλύπτονταν από τα νερά της λίμνης, που αποτελούσε πριν από την εκτέλεση των έργων και τον κύριο αποδέκτη της. Διοικητικά η περιοχή υπάγεται στους νομούς Λαρίσης και Μαγνησίας.

Η φυσική λεκάνη της Κάρλας έχει συνολική έκταση 1663 km^2 ή 1.663.000 στρεμμάτων. Μετά το 1950 με την κατασκευή του Συλλεκτήρα Σ1 αποκόπηκε τμήμα της λεκάνης και η έκταση της λεκάνης απορροής της Κάρλας είναι πλέον 1100 km^2 (Σχήμα 1.2) . Το 1960 περατώθηκε η διάνοιξη της σήραγγας Κάρλας, ως πρώτο στάδιο έργων για την κατασκευή στην συνέχεια και του ταμιευτήρα της Κάρλας. Με τη σήραγγα αποχετεύεται η κλειστή λεκάνη Κάρλας προς τον Παγασητικό. Την ίδια περίπου εποχή κατασκευάστηκαν οι τάφροι 1Τ, 2Τ και διάφορες άλλες δευτερεύουσες τάφροι που αποχετεύουν την πεδιάδα προς τη σήραγγα. Προσφάτως ολοκληρώθηκαν και τα έργα κατασκευής του ταμιευτήρα, εκτάσεως 38 km^2, και έτσι έκλεισε η μεγάλη σε χρόνο περίοδος των έργων υποδομής της περιοχής.



Σχήμα 1.2 Υπάρχοντα Έργα στην Λεκάνη της Κάρλας. (Μουστάκα Ε., 2002)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

1.3 Κλιματικές - Υδρολογικές Συνθήκες.

Το μικροκλίμα της περιοχής κατατάσσεται στο Μεσογειακό, ηπειρωτικού χαρακτήρα, που χαρακτηρίζεται από ζεστό και ξηρό καλοκαίρι και από ψυχρό και υγρό χειμώνα. Τα στοιχεία από τους βροχομετρικούς σταθμούς της περιοχής δείχνουν αυξημένες βροχοπτώσεις πριν από την αποξήρανση της λίμνης.

Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής της περιοχής ανέρχεται στα 450 mm. Αναλυτικότερη όμως παρουσίαση της Υδρολογικής Κατάστασης της περιοχής γίνεται στο 4° Κεφάλαιο, όπου τα στοιχεία προέρχονται από τη μελέτη του Υδατικού Ισοζυγίου της Υδρολογικής Λεκάνης της Κάρλας.

Η μέση θερμοκρασία είναι πάντα πάνω από το μηδέν, αλλά η χαμηλότερη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε κατά το χειμώνα είναι $-21,6^o$ C. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε το καλοκαίρι ήταν $45,2^o$ C. Επίσης, στην περιοχή παρατηρούνται παγετοί κατά την περίοδο Δεκεμβρίου- Μαρτίου και σπανιότερα κατά τους μήνες Νοέμβριο και Απρίλιο. Η μέση σχετική υγρασία στην περιοχή είναι 66%.

1.4 Γεωλογική Δομή

1.4.1 Γεωμορφολογία

Η ανατολική Θεσσαλία αποτελεί μία κλειστή πεδινή λεκάνη. Στην νοτιοανατολική της πλευρά, η οροσειρά του Μαυροβουνίου, με υψόμετρο 800 μ. περίπου, σχηματίζει το φυσικό εμπόδιο προς τη θάλασσα του Αιγαίου Πελάγους. Βορειότερα, η οροσειρά αυτή προεκτείνεται και συνδέεται με τον Ορεινό όγκο της Όσσας και του Ολύμπου, που απομονώνουν το βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης από τη θάλασσα.

Υδρογραφικώς η ανατολική Θεσσαλία διαθέτει σήμερα μία μόνο έξοδο προς τη θάλασσα, την κοιλάδα των Τεμπών , μεταξύ Ολύμπου και Όσσας, από την οποία διέρχεται ο Πηνειός ποταμός. Σε παλαιότερους γεωλογικούς χρόνους, φαίνεται ότι από την κοιλάδα των Τεμπών διέφυγαν προς τη θάλασσα όλα τα νερά της ανατολικής Θεσσαλίας.

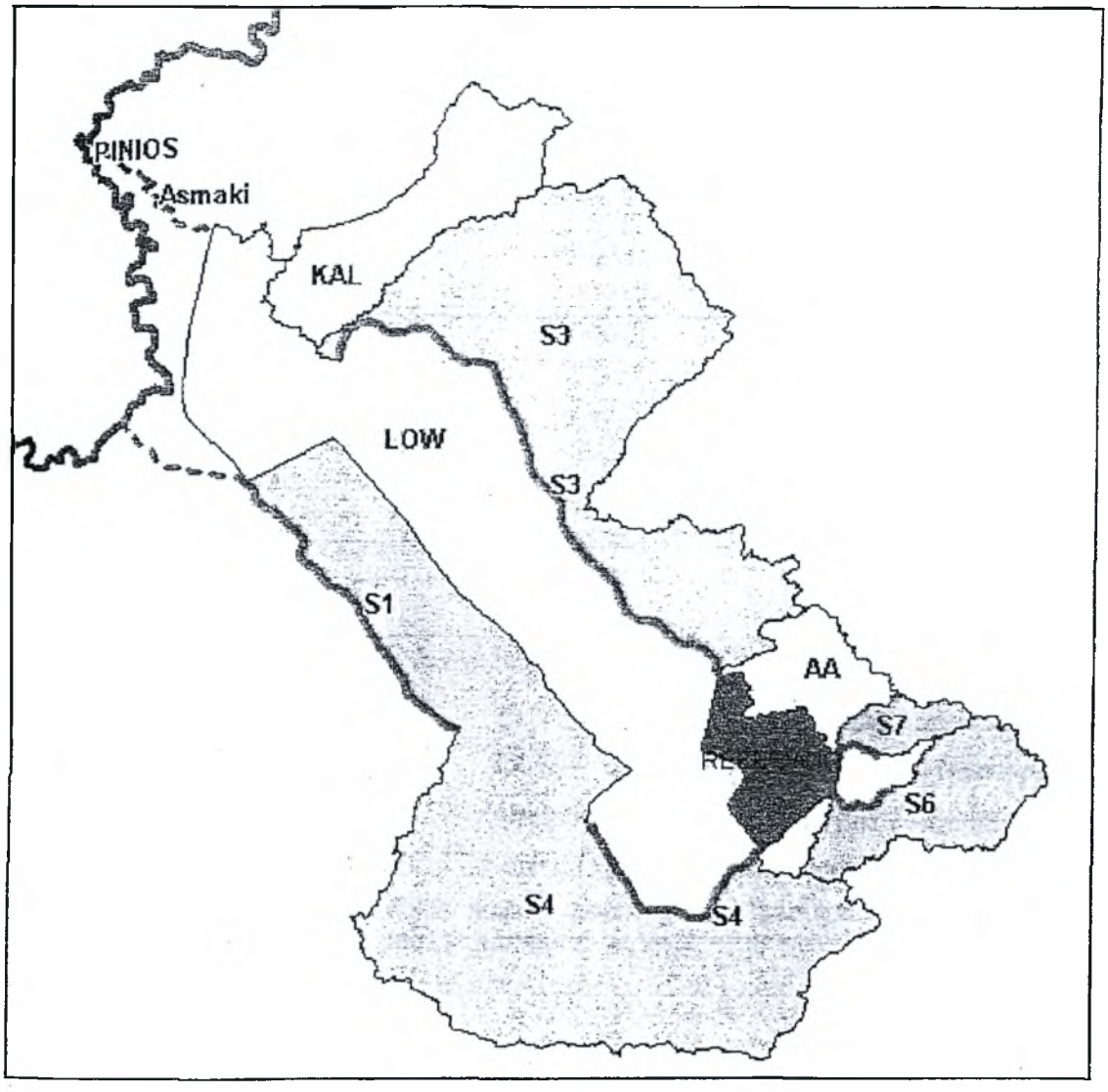
Μεταγενέστερα η περιοχή υπέστη μία γενική καθίζηση, που είναι πιθανό να συνεχίζεται και σήμερα, με αποτέλεσμα η επιφάνεια του εδάφους στο ΝΑ τμήμα της λεκάνης να βρεθεί σε χαμηλότερο υψόμετρο απ' ότι στη ΒΔ πλευρά της. Έτσι η ροή των επιφανειακών υδάτων δεν γινόταν πλέον προς την κοιλάδα των Τεμπών. Το ΝΑ τμήμα της ανατολικής Θεσσαλίας κατακλύσθηκε από τα νερά, που σχημάτισαν τη λίμνη της Κάρλας. Κατά καιρούς η λεκάνη δεχόταν όχι μόνο τα νερά των χειμάρρων των γύρω ορεινών περιοχών που συγκλίνουν προς αυτήν, αλλά και τα νερά του Πηνειού ποταμού, που πλημμύριζαν την περιοχή της Λάρισας.

Η συνολική έκταση της φυσικής υδρολογικής λεκάνης της Κάρλας ανερχόταν παλαιότερα σε 1661,2 τετ. χλμ. Σήμερα, όμως, μεγάλα τμήματά της έχουν αποκοπεί με τεχνητό τρόπο και η επιφανειακή απορροή τους οδηγείται στον Πηνειό. Με τον τρόπο αυτόν διευκολύνθηκε η αποξήρανση της λίμνης.

Η αρχική φυσική λεκάνη υποδιαιρείται από γεωμορφολογική και υδρολογική άποψη σε έξι υδρολογικές υπολεκάνες (Σχήμα 1.3). Δεν αποκλείεται μελλοντικά ορισμένες

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

από αυτές τις υπολεκάνες να χρησιμοποιηθούν για τον τεχνητό εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων (Μουστάκα, 2003).



Σχήμα 1.3 Οι υπολεκάνες και οι συλλεκτήρες της λεκάνης απορροής της Κάρλας. (Μουστάκα Ε., 2002)

1.4.2 Στρωματογραφία και Τεκτονική

Η ανατολική Θεσσαλία ανήκει κυρίως στην γεωτεκτονική ενότητα της Πελαγονικής ζώνης, ενώ ένα μικρό τμήμα της, στην περιοχή του Πηλίου, είναι πιθανόν να ανήκει στην Αττικοκυκλαδική Μάζα.

Η Πελαγονική ζώνη συγκροτείται από δύο μεγάλες ενότητες:

- Το υπόβαθρο, που σχηματίζεται από τα ημιμεταμορφωμένα πέρμο- τριαδικά πετρώματα (φυλλίτες) και τη σχιστοκερατολιθική διάπλαση με οφιόλιθους.
- Τα ανθρακικά καλύμματα που αποτελούνται από ελαφρά μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους Τριαδικού, Ιουραστικού και Κρητιδικού, που είναι επωθημένοι επάνω στους φυλλίτες και στους οφιόλιθους.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Η Αττικοκυκλαδική Μάζα αντιπροσωπεύεται από ισχυρώς μεταμορφωμένα πετρώματα (-γνεύσιους και μάρμαρα-), τα οποία βρίσκονται επωθημένα επάνω στους σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης. Συχνά είναι δύσκολο να διαχωριστούν τα μάρμαρα της Αττικοκυκλαδικής από τους μεσοζωικούς ασβεστόλιθους της Πελαγονικής, που είναι επίσης ελαφρά μεταμορφωμένοι.

Το Νεογενές συνίσταται κυρίως από ερυθρή άργιλο, πηλό και αργιλοαμμώδη υλικά μικρής συνεκτικότητας, με διαστρώσεις κροκαλολατυποπαγών. Οι βαθύτεροι ορίζοντες αποτελούνται από μάργες, οι οποίες εναλλάσσονται με ερυθρά αργιλομαργαικά υλικά. Στην περιοχή Σέσκλου οι αποθέσεις παίρνουν χρώμα κιτρινοκόκκινο, λόγω εμπλουτισμού τους σε έγχρωμα κλαστικά υλικά από τους παρακείμενους γνεύσιους. Μέγιστο πάχος 100 μ. περίπου.

Οι πρόσφατες τεταρτογενείς αποθέσεις καταλαμβάνουν το πεδινό τμήμα της λεκάνης Κάρλας (Σχήμα 1.4). Αποτελούνται από υλικά ποικίλης κοκκομετρίας ποταμοχειμαρρώδους, ποτάμιας ή και λιμναίας προέλευσης. Το κοκκομετρικό μέγεθος των υλικών γενικά μειώνεται με την απομάκρυνση από τους κύριους κώνους των χειμάρρων που εκβάλουν στην πεδινή ζώνη μεταφέροντας αδρομερή υλικά.

Η λεκάνη της Κάρλας σχηματίσθηκε από ένα τεκτονικό βύθισμα, που συνέβη κατά το Πλειόκαινο ή Πλειστόκαινο, στην περιοχή μεταξύ Λάρισας και Βελεστίνου. Το βύθισμα αυτό πληρώθηκε αργότερα με λιμναία ιζήματα και προσχώσεις που προήλθαν από την αποσάθρωση των γύρω οροσειρών. Μέσα στο βύθισμα σχηματίσθηκε και η λίμνη Κάρλα. Φαίνεται ότι η απόθεση των προσχώσεων έγινε συγχρόνως με την καταβύθιση της περιοχής, με αποτέλεσμα τα πάχη των ιζημάτων να είναι αρκετά μεγάλο και σε ορισμένα σημεία να ξεπερνά τα 300 μ. Η πεδιάδα, σήμερα, έχει υψόμετρο 44 – 65 m περίπου.

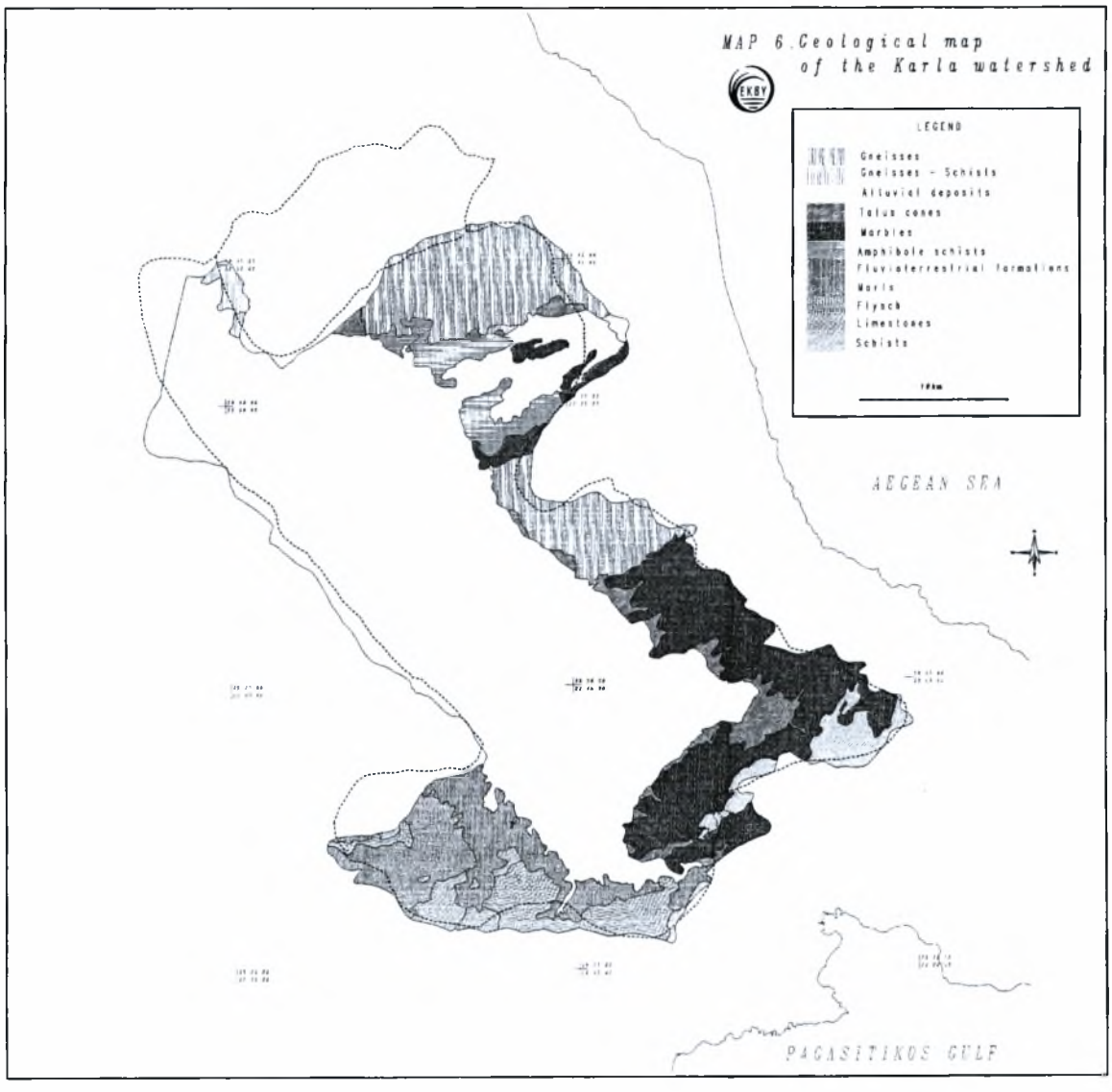
Το υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται από σχιστόλιθους και μάρμαρα. Τα μάρμαρα βρίσκονται κατά κανόνα εναπωθεμένα επάνω στους σχιστόλιθους. Έτσι, η λεκάνη έχει σχηματισθεί επάνω σε αδιαπέραστους σχηματισμούς και είναι σχεδόν απομονωμένη από την θάλασσα του Παγασητικού κόλπου ή του Αιγαίου πελάγους. Όμως, η παρουσία καταβόθρων στην ανατολική πλευρά της λίμνης, από την οποία διέφευγαν τα νερά της προς γειτονικές περιοχές και πιθανότατα προς το Αιγαίο, δείχνει ότι υπάρχει επικοινωνία (-έστω και μικρή-) μεταξύ θάλασσας και περιοχής της λίμνης.

Το πάχος των τεταρτογενών αποθέσεων της πεδιάδας της Κάρλας όπως προκύπτει από γεωφυσικές έρευνες (SOGREAH, 1974) ποικίλλει από τόπο σε τόπο και ξεπερνά κατά θέσεις τα 300 μ. (περιοχή Χάλκης – Αγιάς >550 μ.) εξαρτώμενο από την σύνθετη γεωμετρία του υποβάθρου εξαιτίας του τεκτονισμού.

Στη μελέτη της (SOGREAH, 1974) αναφέρεται ότι νοτιοδυτικά των λόφων της Πέτρας και της Μαγούλας, στην περιοχή Στεφανοβικείου, Ριζόμυλου και Βελεστίνου, σχηματίζεται ένα επίμηκες βύθισμα, του οποίου το υπόβαθρο βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο -200 m. Νοτιοδυτικά των Καναλίων, στο ανατολικότερο σημείο της λεκάνης, σχηματίζεται ένα άλλο βύθισμα, του οποίου το υπόβαθρο βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο -200 m. Το δυτικό βύθισμα, στην περιοχή Στεφανοβικείου, λειτούργησε ως φραγμός για τα χονδρόκοκκα υλικά της διάβρωσης, εμποδίζοντας την μεταφορά τους ανατολικότερα. Μεταξύ των δύο αυτών βυθισμάτων παρατηρείται η αναθόλωση του υποβάθρου και η εμφάνιση των λόφων Πέτρας και Μαγούλας. Προφανώς, το έντονο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

ανάγλυφο του υποβάθρου οφείλεται σε μεγάλα γεωλογικά ρήγματα, που έχουν διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ, παράλληλα με τον γενικό άξονα της λεκάνης της Κάρλας.



Σχήμα 1.4 Γεωλογικός Χάρτης της Λεκάνης της Κάρλας. (Μπεζές Κ., 2004)

Σήμερα στη λεκάνη της Κάρλας υπάρχουν γεωτρήσεις με γλυκά ή υφάλμυρα νερά. Φαίνεται ότι η υφαλμύρυνση δεν προέρχεται από σύγχρονες (σημερινές) εισροές θαλασσινού νερού, αλλά οφείλονται σε νερά της λίμνης, εμπλουτισμένα σε άλατα λόγω της συνεχούς εξάτμισης, τα οποία συγκεντρώθηκαν στον πυθμένα της λίμνης και εγκλωβίστηκαν μέσα στα μάρμαρα και στις προσχώσεις που τα κάλυψαν. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στο νότιο τμήμα της λεκάνης.

Πολλές από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις έχουν διαπεράσει τόσο τις προσχώσεις, όσο και τα υποκείμενα μάρμαρα, με αποτέλεσμα να υπάρχει επικοινωνία σήμερα μεταξύ των προσχωσιγενών σχηματισμών και των καρστικών υδροφόρων οριζόντων. Έτσι είναι πολύ δύσκολο να εξακριβωθεί εάν υπάρχει ποιοτική διαφορά μεταξύ των νερών των δύο τύπων υδροφόρων οριζόντων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Στο νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης, στην περιοχή του Ριζόμυλου, φαίνεται ότι δεν έφθαναν τα υφάλμυρα νερά της λίμνης Κάρλας. Εδώ οι προσχώσεις έχουν πάχος που φθάνει τα 300 m, ενώ βαθύτερα υπάρχουν μάρμαρα και σχιστόλιθοι ή γνεύσιοι, που αποτελούν το βραχώδες υπόβαθρο της λεκάνης. Οι σχηματισμοί του υποβάθρου αναδύονται στην επιφάνεια και εμφανίζονται και στην ορεινή περιοχή που περιβάλλει την πεδιάδα. Στην περιοχή αυτή η ποιότητα των υπογείων νερών είναι πολύ καλή.

Λίγο ανατολικότερα, προς την σήραγγα, λόγω του πολύπλοκου διαμελισμού του υποβάθρου και του μεταβαλλόμενου πάχους των προσχώσεων, παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στην στάθμη και στην ποιότητα των νερών των υφιστάμενων γεωτρήσεων. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό στην μεταξύ Ριζόμυλου και Κάρλας περιοχή, όπου απότομα εμφανίζεται το φαινόμενο της υφαλμύρυνσης.

1.5 Εκμετάλλευση Υπόγειων Υδάτων και Συμπεριφορά Υδροφοριών

1.5.1 Υδροφόροι Σχηματισμοί

Στην περιοχή της Κάρλας διακρίνουμε τρεις κυρίως υδροφόρους σχηματισμούς: τις **αργιλοαμμώδεις λιμναίες αποθέσεις**, τις **αδρομερείς προσχώσεις και κορήματα** και τα **μάρμαρα** (Μπεζές 2004, Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη 1999). Συνήθως οι σχηματισμοί αυτοί διατάσσονται στον χώρο με την σειρά που αναφέρθηκαν, από την επιφάνεια του εδάφους προς τα μεγαλύτερα βάθη.

Μέσα στους υδροφόρους σχηματισμούς, που αναφέρθηκαν παραπάνω, σχηματίζονται αντίστοιχα οι τρεις βασικοί υδροφόροι ορίζοντες:

α) Ο υδροφόρος ορίζοντας των αργιλοαμμωδών λιμναίων αποθέσεων.

β) Ο υδροφόρος ορίζοντας των αδρομερών κροκαλολατυποπαγών και

γ) ο υδροφόρος ορίζοντας των μαρμάρων (καρστικός).

Οι τρεις παραπάνω υδροφόροι ορίζοντες είναι τοποθετημένοι ο ένας επάνω στον άλλο (επάλληλοι ορίζοντες). Δεν συναντώνται σε όλες τις περιοχές της Κάρλας, αλλά από ορισμένες περιοχές είναι δυνατόν να απουσιάζει κάποιος ορίζοντας (όπως π.χ. ο καρστικός).

Η έκταση των τριών υδροφόρων οριζόντων, το πάχος των υδροφόρων στρωμάτων και το βάθος τους από την επιφάνεια του εδάφους δεν είναι ομοιόμορφα σε όλη την έκταση του πεδινού τμήματος της Κάρλας. Παρατηρούνται, κατά την οριζόντια και κατακόρυφη έννοια μεγάλες διαφοροποιήσεις από περιοχή σε περιοχή, οι οποίες μας υποχρεώνουν να υποδιαιρέσουμε την ευρύτερη περιοχή σε ζώνες, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Οι **Αργιλοαμμώδεις Λιμναίες Αποθέσεις** αποτέθηκαν στον πυθμένα της λίμνης Κάρλας, στο πρόσφατο παρελθόν. Πρόκειται για προσχώσεις που περιέχουν αργίλους με ενδιαστρώσεις άμμων και λεπτών κροκάλων. Το στρώμα αυτό καλύπτει τον πυθμένα της αποξηραμένης λίμνης, έχει πάχος της τάξης των 80 - 100 μ. τουλάχιστον και καταλαμβάνει ολόκληρη την έκταση της πρώην λίμνης Κάρλας, προεκτεινόμενο και νοτιοδυτικά του Στεφανοβικείου, μέχρι το Βελεστίνο. Τα υλικά που σχημάτισαν το στρώμα αυτό φαίνεται ότι προήλθαν από τα βόρεια και δυτικά, από την αποσάθρωση των Πλειο-πλειστοκαινικών σχηματισμών της λεκάνης της Θεσσαλίας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Η περατότητα του στρώματος των αργιλικών επιφανειακών προσχώσεων είναι πολύ χαμηλή, όπως διαπιστώθηκε από πλήθος ερευνητικών γεωτρήσεων. Το στρώμα αυτό, σε πολύ μεγάλη έκταση της λεκάνης σχηματίζει την αδιαπέραστη οροφή των υποκειμένων υδροφόρων στρωμάτων. Τα τελευταία είναι εγκλωβισμένα και δίνουν την δυνατότητα να σχηματισθούν στο εσωτερικό τους υδροφόροι ορίζοντες υπό πίεση.

Ο υδροφόρος ορίζοντας των αργιλοαμμωδών λιμναίων αποθέσεων είναι επιφανειακός (φρεατικός). Η τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα γίνεται από τις βροχοπτώσεις και τις διηθήσεις από τα κανάλια. Η ποιότητα του νερού είναι καλή ή μέτρια, ανάλογα με την περιοχή, διότι πολλά από τα επιφανειακά εδάφη της λίμνης παλαιότερα ήταν αλμυρά. Ίσως, με την πάροδο του χρόνου, η κατάσταση να βελτιώνεται, διότι τα εδάφη αποπλένονται και απομακρύνονται τα άλατα.

Οι **Αδρομερείς προσχώσεις και τα κορήματα** βρίσκονται κάτω από το αργιλοαμμώδες στρώμα, με μεταβλητό πάχος εξαρτώμενο από το βάθος του παλαιοαναγλύφου της λεκάνης. Οι σχηματισμοί αυτοί δημιουργήθηκαν παλαιότερα, στις πλαγιές και το κατώτερο τμήμα των κοιλάδων. Πρόκειται για μεγάλες ασβεστολιθικές κροκάλες ή λατύπες, χαλίκια, άμμους και αργίλους, που προέρχονται από τη διάβρωση και αποσάθρωση των μαρμάρων και των σχιστόλιθων των περιφερειακών ορεινών όγκων. Τα υλικά αυτά μεταφέρθηκαν από τους χείμαρρους και αποτέθηκαν στον πυθμένα της λεκάνης, σε παλαιότερες εποχές, όταν το ανάγλυφο ήταν εντονότερο, δηλαδή συγχρόνως με την καταβύθιση της περιοχής.

Η έκταση που καταλαμβάνει το στρώμα των αδρομερών προσχώσεων, προς τα δυτικά, δεν μπορεί να προσδιορισθεί με ακρίβεια. Σίγουρα εκτείνεται μέχρι τις περιοχές Στεφανοβικείου, Αρμενίου και Ριζόμυλου, όπου εκατοντάδες αρδευτικών γεωτρήσεων εκμεταλλεύονται τον υδροφόρο ορίζοντα αυτού του στρώματος.

Οι κώνοι κορημάτων, λόγω των αδρομερών υλικών που περιέχουν και της έλλειψης σημαντικού ποσοστού αργίλου, εμφανίζουν μεγάλη περατότητα. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα ορισμένων γεωτρήσεων, καθώς και οι γεωφυσικές έρευνες, που έχουν γίνει στο παρελθόν, οι αδρομερείς αποθέσεις επεκτείνονται πέραν των κρασπέδων της λεκάνης προς το κέντρο της, σχηματίζοντας ένα στρώμα μεταξύ αργιλοαμμωδών αποθέσεων και των μαρμάρων του υποβάθρου.

Η περατότητα του στρώματος των αδρομερών προσχώσεων είναι πολύ υψηλή. Οι γεωτρήσεις, που εκμεταλλεύθηκαν τον υδροφόρο ορίζοντα αυτού του στρώματος απέδωσαν αρχικά πολύ υψηλές παροχές, μεγαλύτερες από 250 m^3/ώρα, με μικρή πτώση στάθμης. Είναι πιθανόν να υπάρχει υδραυλική επικοινωνία με τον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα των μαρμάρων. Οι υψηλές αυτές παροχές οφείλονται επίσης στο γεγονός ότι αρχικά οι υδροφόροι ορίζοντες ήταν υπό πίεση και μπορούσαν να απελευθερώσουν μεγάλες ποσότητες νερού. Με την πάροδο όμως του χρόνου, επειδή το υδατικό ισοζύγιο έγινε αρνητικό, τα φορτία έπεσαν και ο υδροφόρος ορίζοντας μεταβλήθηκε σε ελεύθερο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την μείωση του ενεργού πάχους του υδροφόρου στρώματος, την μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας Τ και, φυσικά, την μείωση των παροχών. Παρ' όλα αυτά το υδατικό ισοζύγιο παρέμεινε αρνητικό.

Ο υδροφόρος ορίζοντας των αδρομερών κροκαλολατυποπαγών συναντάται σε βάθη άνω των 25 – 50 μ. Έχει υψηλή περατότητα και καλή ποιότητα νερού. Η τροφοδοσία του γίνεται πλευρικά, μέσω των κώνων των κορημάτων και των χειμάρρων της

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

περιοχής. Λόγω της έντονης τροφοδοσίας και της συνεχούς ανανέωσης του υπόγειου νερού, ο υδροφόρος ορίζοντας αυτός έχει νερό πολύ καλής ποιότητας.

Τα **Μάρμαρα** είναι υδροπερατά πετρώματα. Το ασβεστολιθικό υλικό, από το οποίο αποτελούνται, είναι ευδιάλυτο στο νερό, με αποτέλεσμα το βρόχινο νερό που εισχωρεί στις ρωγμές του πετρώματος, να τις διευρύνει συνεχώς και να προσδίνει τελικά στο πέτρωμα μεγάλη περατότητα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται καρστικοποίηση ή καρστ.

Η Κάρλα, στην ανατολική πλευρά της έρχεται σε επαφή με μάρμαρα. Παλαιότερα, τα νερά της, μη μπορώντας να διαφύγουν επιφανειακά προς την θάλασσα, αποχετεύονταν προς των εξωτερικό χώρο, υπογείως, μέσω καταβόθρων, που είχαν δημιουργηθεί στα μάρμαρα. Οι καταβόθρες διακρίνονται και σήμερα στην ανατολική πλευρά της. Η συνολική επιφάνεια των μαρμάρων που βρίσκονται μέσα στα όρια της λεκάνης της Κάρλας ανέρχεται σε 96,3 Km^2.

Εκτός όμως από την περιφέρεια της λεκάνης, μάρμαρα υπάρχουν και κάτω από τις προσχώσεις. Τα στρώματα αυτά αποτελούν προεκτάσεις των περιφερειακών εμφανίσεων και σχηματίζουν το υπόβαθρο της λεκάνης στον ανατολικό και νότιο τομέα. Μέσα σ' αυτά αναπτύσσεται καρστικός υδροφόρος ορίζοντας. Η περατότητα των μαρμάρων είναι γενικά πολύ υψηλή και για τον λόγο αυτόν οι γεωτρήσεις, που εκμεταλλεύονται τον καρστικό υδροφόρο ορίζοντα δίνουν συνήθως υψηλές παροχές. Το πάχος των μαρμάρων κυμαίνεται από 20 έως 200 μ.

1.5.2 Υδροφορία Προσχωματικού και Πεδινού Τμήματος της Κάρλας

Στην περιοχή, κυρίως της παλιάς λίμνης, αναπτύσσεται ένας συνεχής ανώτερος ορίζοντας αργίλων και λεπτών άμμων κυμαινόμενου πάχους από 50-100 μ., που επικάθεται πάνω σε πλέον αδρόκοκκα υλικά. Στα νότια τμήματα του ταμιευτήρα, κοντά στα κράσπεδα των μαρμάρων, το πάχος αυτό είναι σχετικά μικρότερο και φθάνει μέχρι τα 60μ. Κάτω από το επιφανειακό αυτό στρώμα αναπτύσσονται εναλλαγές αδρομερών με λεπτόκοκκους ορίζοντες υλικών και δημιουργούνται έτσι συνθήκες υπό πίεση στις εκεί συναντόμενες υδροφορίες. Στο νοτιοανατολικό τμήμα της πεδινής έκτασης, οι αδρομερείς αυτοί ορίζοντες ελαττώνονται σε πάχος και εδώ (παλιά λίμνη Κάρλας) κυριαρχούν, με μικρές εξαιρέσεις, τα αργιλοϊλυώδη στρώμα

Στα νότια περιθώρια της λίμνης Κάρλας, κοντά στην περιοχή διάνοιξης της αποστραγγιστικής σήραγγας, οι γεωτρήσεις κάτω από τα αργιλοϊλυώδη επιφανειακά υλικά έχουν εντοπίσει μεγάλου πάχους κροκαλολατυποπαγείς αποθέσεις, η υδροφορία των οποίων δεν πρέπει να βρίσκεται σε άμεση επικοινωνία με αυτή των μαρμάρων, όπως προκύπτει από τα παλιότερα γεωτρητικά δεδομένα. Η εκεί απόθεση των αδρομερών αυτών υλικών πρέπει να συνδέεται με τα πρώτα στάδια πλήρωσης της τεκτονικής τάφρου από τους περιβάλλοντες ορεινούς όγκους. Κατά τη φάση διάνοιξης της γεώτρησης SR79 (περί τα 2km ΒΑ της εισόδου της σήραγγας) συναντήθηκαν οι αδρομερείς αυτές αποθέσεις και παρατηρήθηκε αρτεσιανισμός, που υποδηλώνει τη δυσκολία αποστράγγισης των προσχωματικών υδροφοριών στους διπλανούς ευρισκόμενους καρστικούς, η στάθμη στους οποίους ήταν πολύ χαμηλότερη όπως προκύπτει από παρατηρήσεις στην γεώτρηση 8Κ64 που διέτρησε το καρστ (10/73 SR79: +44,24, SR64: +14,64).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των αλλούβιων της ευρύτερης περιοχής της Κάρλας είναι η ύπαρξη κατά θέσεις, αλατούχων αργίλων και λεπτόκοκκων άμμων, οι οποίοι επιβαρύνουν τα υπόγεια νερά με χλωριόντα. Η αυξημένη αυτή αλατότητα των υπογείων νερών δεν έχει σχέση με τη θάλασσα, αλλά οφείλεται στη διάλυση των αλατούχων εδαφών της παλιάς λίμνης.

Στο τμήμα αυτό της πεδιάδας δύο είναι οι κύριες ζώνες όπου εντοπίζεται σχετικό υδρογεωλογικό ενδιαφέρον : οι περιοχές Χάλκης και Αρμενίου –Στεφανοβίκειου - Ριζόμυλου. Στις περιοχές αυτές, οι οποίες βρίσκονται πλησιέστερα προς την κύρια πηγή τροφοδοσίας των πλέον αδρομερών αποθέσεων (κώνοι χειμάρρων - κορήματα), συναντώνται υδροφόρα στρώματα που αποτελούνται από άμμους και χαλίκια εντός των αργιλικών αποθέσεων. Στις ζώνες επίσης αυτές αναπτύσσεται και το μεγαλύτερο πάχος των συγχρόνων αποθέσεων που στη μεν Χάλκη ξεπερνά τα 550μ., στη δε ζώνη Αρμενίου - Στεφανοβίκειου Ριζόμυλου τα 280μ. Στη συνέχεια εξετάζεται η υδροφορία Αρμενίου - Στεφανοβίκειου - Ριζόμυλου που βρίσκεται στην άμεση επιρροή των έργων επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας.

1.5.3 Τροφοδοσία – Πιεζομετρία

Η τροφοδοσία των βαθιών αυτών υπό πίεση υδροφορέων της ευρύτερης περιοχής Κάρλας είναι μικρή και πραγματοποιείται με δυσκολία από:

- την πλευρική τροφοδοσία των πλειοκαινικών λόφων και
- τους κώνους που σχηματίζουν οι μικροί χείμαρροι στα δυτικά και ανατολικά για το υπόλοιπο της πεδιάδας (Κουσμπασανιώτης, Ξεριάς, κλπ.).

Η τροφοδοσία από τη βροχή που πέφτει κατ' ευθείαν στο επιφανειακό ανάπτυγμα είναι πολύ μικρή εξ' αιτίας του μικρού συντελεστή κατείσδυσης στα λεπτόκοκκα επιφανειακά αλλούβια.

Η δυσκολία οφείλεται στη μείωση της διαπερατότητας, και συνεπώς της διαβιβαστικότητας των υλικών των κώνων και των πλευρικών κορημάτων προς το πεδινό τμήμα αλλά και στην αύξηση της ετερογένειας του υλικού με συνεχείς ουσιαστικές παρεμβολές αργιλικών στρωμάτων. Από τις μέχρι τώρα υδρογεωλογικές έρευνες στην περιοχή (SOGREAH, 1974), η υπόγεια υδροφορία του προσχωματικού πεδίου έχει μια γενική διεύθυνση ροής από τα ΝΔ προς τα ΒΑ - Α.

Πριν την μεγάλη ανάπτυξη των εκμεταλλεύσεων των υπογείων νερών, στο ύψος της γραμμής Αρμενίου - Σωτηρίου -Στεφανοβίκειου εμφανίζονταν πηγές μέσα στις προσχώσεις σε υψόμετρα από 55 έως 60 μ. Οι πηγές αυτές ήταν αποτέλεσμα της δυσκολίας υπόγειας μετακίνησης τμήματος των υπογείων νερών, λόγω ανάπτυξης ανατολικότερα των πλέον λεπτομερών αργιλοϊλυωδών ιζημάτων της πεδιάδας.

Οι ανεπτυγμένοι καρστικοί σχηματισμοί που περιβάλλουν τα νοτιοανατολικά περιθώρια της πεδιάδας, δεν τροφοδοτούν τις υδροφορίες των αλλούβιων. Εδώ, ένα μέρος των νερών των σύγχρονων αποθέσεων μεταγγίζεται με υπερχείλιση (βραδέως) μέσα στην ακόρεστη ζώνη του καρστ, το οποίο κανονικά έχει εδώ χαμηλότερη πιεζομετρία και συνεπώς αποστραγγίζεται μαζί με τα καρστικά νερά προς τη θάλασσα.

Οι υπόγειες προσχωματικές υδροφορίες που αναπτύσσονται στην ευρύτερη πεδινή περιοχή της Κάρλας βρίσκονται κάτω από καθεστώς υπερεκμετάλλευσης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Στην ευρύτερη περιοχή Αγ. Γεωργίου - Βελεστίνου - Ριζόμυλου και Στεφανοβικείου έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων που κατασκευάστηκαν κατά το παρελθόν. Η εικόνα της παρουσίας πλούσιας υπόγειας υδροφορίας στην περιοχή είναι όμως πλασματική. Όπως προκύπτει από την επεξεργασία όλων των πιεζομέτρων των προσχωματικών υδροφοριών, με εξαίρεση αυτών που είναι τοποθετημένα στα επιφανειακά στρώματα, υπάρχει συνεχής συστηματική και έντονη ταπείνωση της υπόγειας στάθμης χρόνο με το χρόνο. Η ταπείνωση αυτή οφείλεται στις μεγάλες ποσότητες αντλούμενων νερών έναντι της ελλιπούς τροφοδοσίας και επαναπλήρωσης των υδροφορέων στο σύνολό τους. Η κατάσταση αυτή δεν επιτρέπει περαιτέρω αύξηση των εκμεταλλεύσεων, αλλά αντίθετα απαιτεί μεγάλη μείωση αυτών.

Η εκτίμηση αυτή βασίσθηκε στην επεξεργασία των υπαρχουσών περιοδικών -και αξιόπιστων γενικά μετρήσεων της πιεζομετρικής στάθμης των υδροφορέων που πραγματοποιεί η Υ.Ε.Β. κάθε μήνα σε 40 γεωτρήσεις και πιεζόμετρα στο χώρο της ευρύτερης πεδινής περιοχής της Κάρλας.

Οι περιοδικές αυτές μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1 παρακάτω και οι θέσεις τους φαίνονται στο Χάρτη του Σχήματος 1 του Παραρτήματος.

Εξαιτίας της έντονης πτώσης στάθμης που παρατηρείται στα πιεζόμετρα του προσχωματικού πεδίου, υπάρχει το ενδεχόμενο τοπικά η γενική αυτή κίνηση του υπόγειου νερού να αντιστραφεί και να προκύψει ροή κατά θέσεις του νερού του καρστ προς τις προσχώσεις. Η άποψη αυτή που διατυπώνεται τελευταία δεν είναι δυνατόν σήμερα να τεκμηριωθεί αξιόπιστα. Στο θέμα αυτό παραθέτουμε τις παρακάτω παρατηρήσεις (Μελέτη Επαναδημιουργίας Λίμνης Κάρλας – Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη, 1999):

Στην περιοχή των νοτίων καρστικών κρασπέδων της ευρύτερης πεδινής ζώνης της Κάρλας (περιοχή σήραγγας - Ριζόμυλου - Αγ. Γεωργίου) δεν υπάρχουν συνεχείς πιεζομετρικές παρατηρήσεις της διακύμανσης στάθμης των καρστικών υδροφοριών σε αντίθεση με τα βορειοανατολικά όρια της τέως λίμνης (περιοχή Καναλιών - Καλαμακίου). Στα νότια κράσπεδα, υπάρχουν μόνο στοιχεία κατά τη διάνοιξη των γεωτρήσεων κατά το παρελθόν, που έχουν διατρήσει τα εκεί αναπτυσσόμενα μάρμαρα.

Οι αρδευτικές γεωτρήσεις SR63 και SR64 (περιοχή σήραγγας), που κατασκευάστηκαν το 1973-74 και έχουν διατρήσει μάρμαρα, είχαν συναντήσει την υπόγεια υδροφορία σε απόλυτα υψόμετρα +17,07 (3/74) και +14,64 (10/73) αντίστοιχα. Αντίθετα, η γεώτρηση SR79 (2km ΒΑ στομίου σήραγγας), που συνάντησε κάτω από τις αργιλοϊλυώδεις αποθέσεις της λίμνης και σε βάθος από 100-283 κροκαλοπαγή, παρουσίαζε αρτεσιανισμό και απόλυτο υψόμετρο στάθμης +44,24. Το γεγονός αυτό, της τόσο μεγάλης υψομετρικής διαφοράς της υπόγειας στάθμης σε κοντινή θέση από τα καρστικοποιημένα μάρμαρα, υποδεικνύει ανεξαρτησία μεταξύ των υπογείων υδροφοριών των σύγχρονων αποθέσεων και των μαρμάρων. Η υψηλή αυτή στάθμη υποδηλώνει δυσκολία και παρεμπόδιση αποστράγγισης της υδροφορίας των σύγχρονων αποθέσεων στο καρστ.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Α/Α	**Πιεζόμετρο**	**Δήμος ή Κοινότητα**	**Περίοδος αντλήσεων**	**Συνολική Πτώση στάθμης (m)** **
1.	Ε3	Βελεστίνο	4/72 – 8/90	19,12
2.	AG12	Γλαύκη	9/79 – 12/97	
3.	AG12α	Γλαύκη	9/79 – 12/97	0,31
4.	Π6Λ	Ελευθέριο	6/74 – 11/98	-0,42
5.	SR35	Ελευθέριο	11/72 – 11/98	0,27
6.	402	Καλαμάκι	5/72 – 7/94	5,4
7.	PZ64*	Καλαμάκι	2/80 – 4/98	6,55
8.	SR68*	Καλαμάκι	9/76 – 11/98	2,23
9.	LB202*	Καλαμάκι	8/79 – 11/98	3,95
10.	PZ65*	Καλαμάκι	11/80 – 11/98	8,32
11.	PZ45*	Καστρί	4/80 – 11/98	7,43
12.	SR32	Κυψέλη	12/72 – 11/98	75,13
13.	SR43	Κυψέλη	10/73 – 11/98	50,82
14.	PZ68	Μ. Μοναστήρι	2/80 – 4/94	18,07
15.	SR77	Μελισοχώρι	6/74 – 11/98	22,26
16.	SR31	Μέλισσα	5/73 – 11/98	34,94
17.	PZ67	Μέλισσα	3/80 – 11/98	10,58
18.	AD11	Μοδεστός	12/72 – 11/98	37,43
19.	PZ50	Νάματα	3/80 – 11/98	0,93
20.	SR66	Νίκη	10/73 – 12/98	16,51
21.	AG14	Νίκη	12/11/98	21
22.	SR72	Ομορφοχώρι	1/74 – 11/98	27,63
23.	SR60	Ομορφοχώρι	5/84 – 10/97	20,73
24.	PZ7	Πλασιά	Σταθμηγράφος	7,29
25.	PZ7α	Πλασιά	3/84 – 11/98	2,97
26.	SR29	Πλατύκαμπος	12/72 – 11/98	34,7
27.	SR63α	Ριζόμυλος	10/73 – 11/98	21,68
28.	SR63b	Ριζόμυλος	10/73 – 11/98	18,65
29.	AG17	Ριζόμυλος	9/93 - 11/98	
30.	AG17α	Ριζόμυλος	12/72 – 8/96	49,69
31.	PZ15	Στεφανοβίκειο	1/74 – 11/98	44,78
32.	AD15α	Στεφανοβίκειο	12/72 – 4/94	
33.	LB310	Στεφανοβίκειο	8/80 – 12/97	31,13
34.	AD13	Στεφανοβίκειο	6/84 – 8/90	18,34
35.	AD13α	Στεφανοβίκειο	12/72 – 11/98	6,03
36.	AD15	Στεφανοβίκειο	6/84 – 4/90 και 12/97	4,79
37.	AD16	Χάλκη	12/92 – 11/98	18,38
38.	AD16α	Χάλκη	12/72 – 6/89	
39.	Π17Λ	Χάλκη	10/73 – 5/96	20,17
40.	SR30	Χάλκη	12/72 – 11/98	37,81

Πίνακας 1.1 Περιοδικές μετρήσεις στάθμης πιεζομέτρων ευρύτερης περιοχής Κάρλας.

* Πιεζόμετρα που αναφέρονται σε καρστικούς σχηματισμούς.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

** Η πτώση στάθμης αναφέρεται στο μήνα Νοέμβριο της αρχικής μέτρησης μέχρι το Νοέμβριο της τελικής. Λαμβάνεται ο Νοέμβριος όπου η υπόγεια πιεζομετρία δεν βρίσκεται υπό την επήρεια των αντλήσεων και δεν έχει αρχίσει ακόμα η τροφοδοσία των υδροφοριών. ΑΡΤ(-), ΑΡΤ(+). Στη γεώτρηση υπήρχε αρτεσιανισμός που δεν παρατηρείται σήμερα ΑΡΤ(-) ή συνεχίζεται περιοδικά ΑΡΤ(+).

Ακόμα και στην περίπτωση που σήμερα αυτή η σχέση έχει διαταραχθεί σε θέσεις κοντά στην επαφή των ανεξάρτητων υδροφοριών, η αντιστροφή της κατεύθυνσης της ροής του υπογείου νερού, από τα μάρμαρα προς τις σύγχρονες αποθέσεις, είναι πολύ δύσκολη και θα έχει μόνο τοπικό χαρακτήρα εξαιτίας της πολύ μεγάλης διαφοράς στη διαπερατότητα των δύο μέσων.

Εξετάζοντας τις απόλυτες τιμές στάθμης των πιεζομέτρων των υδροφοριών των σύγχρονων αποθέσεων, παρατηρούμε ότι κατά την τελευταία κυρίως δεκαετία αυτές είναι χαμηλότερες κατά την περίοδο των αντλήσεων του +10 m, στη δε περίπτωση του πιεζόμετρου PZ15 η υπόγεια στάθμη λαμβάνει και αρνητικές τιμές. Στη συνέχεια οι τιμές αυτές επανέρχονται περίπου στο +15. Αν δεχθούμε ότι η στάθμη στο καρστ του νότιου κρασπέδου είναι περίπου στο +15 με βάση παλιότερες παρατηρήσεις, προκύπτει ότι υπάρχουν χρονικές περίοδοι που η καρστική υδροφορία βρίσκεται ψηλότερα αυτής των σύγχρονων αποθέσεων. Στην περίπτωση όμως αυτή, η ροή νερού από το καρστ προς το εσωτερικό της πεδιάδας θα επηρεάσει μια πολύ μικρή ζώνη των αποθέσεων, λόγω της δυσκολίας πραγματοποίησης της εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς διαπερατότητας μεταξύ των δύο διακριτών υδροφορέων.

Η μεγάλη τέλος πτώση στάθμης δεν παρατηρείται κυρίως στα περιθώρια της λεκάνης των σύγχρονων αποθέσεων, αλλά στα δυτικά όρια αυτής, όπου και τοποθετούνται οι κύριες ζώνες εντατικής εκμετάλλευσης.

1.5.4 Εκμετάλλευση – Απόδοση των υδροφορέων

Από την επεξεργασία των μακροχρόνιων πιεζομετρικών παρατηρήσεων, (25 χρόνια περίπου) που πραγματοποίησε το ΥΠΕΧΩΔΕ (Μελέτη Επαναδημιουργίας Λίμνης Κάρλας – Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη, 1999) προκύπτει, ότι ο υπόγειες υδροφορίες του ευρύτερου πεδινού τμήματος βρίσκονται υπό καθεστώς εντατικής υπέρ- εκμετάλλευσης.

Διακρίνονται τρεις κύριες ομάδες πιεζόμετρων, ως προς τη μορφή ταπείνωσης της υπόγειας στάθμης:

- Στην **πρώτη ομάδα πιεζόμετρων** η ταπείνωση είναι μικρή έως σχεδόν μηδενική, με τάσεις της σταθεροποίησης. Σε αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα AD13A, AD15, PZ7α, AG12α, PZ50, PZ7, AD9α, Π6Λ, SR35, PZ67. Της περιοχές τοποθέτησης των παραπάνω πιεζομέτρων (Βόρειο τμήμα Κάρλας) δεν υπάρχουν προοπτικές αύξησης των αντλήσεων γιατί δεν αναπτύσσονται αξιόλογες υδροφορίες.
- Στη **δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων** η ταπείνωση είναι μεγάλη, όχι τόσο έντονη και κατά θέσεις παρατηρούνται τάσεις σταθεροποίησης της υπόγειας στάθμης, στα χαμηλά της σημερινά επίπεδα. Στην ομάδα αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα SR66, AG14, SR63β, Π17Λ, AD9, LB230 69Λ, Π16Λ, SR72, LB232, SR60, SR77. Τα πιεζόμετρα αυτά τοποθετούνται στο βορειοδυτικό

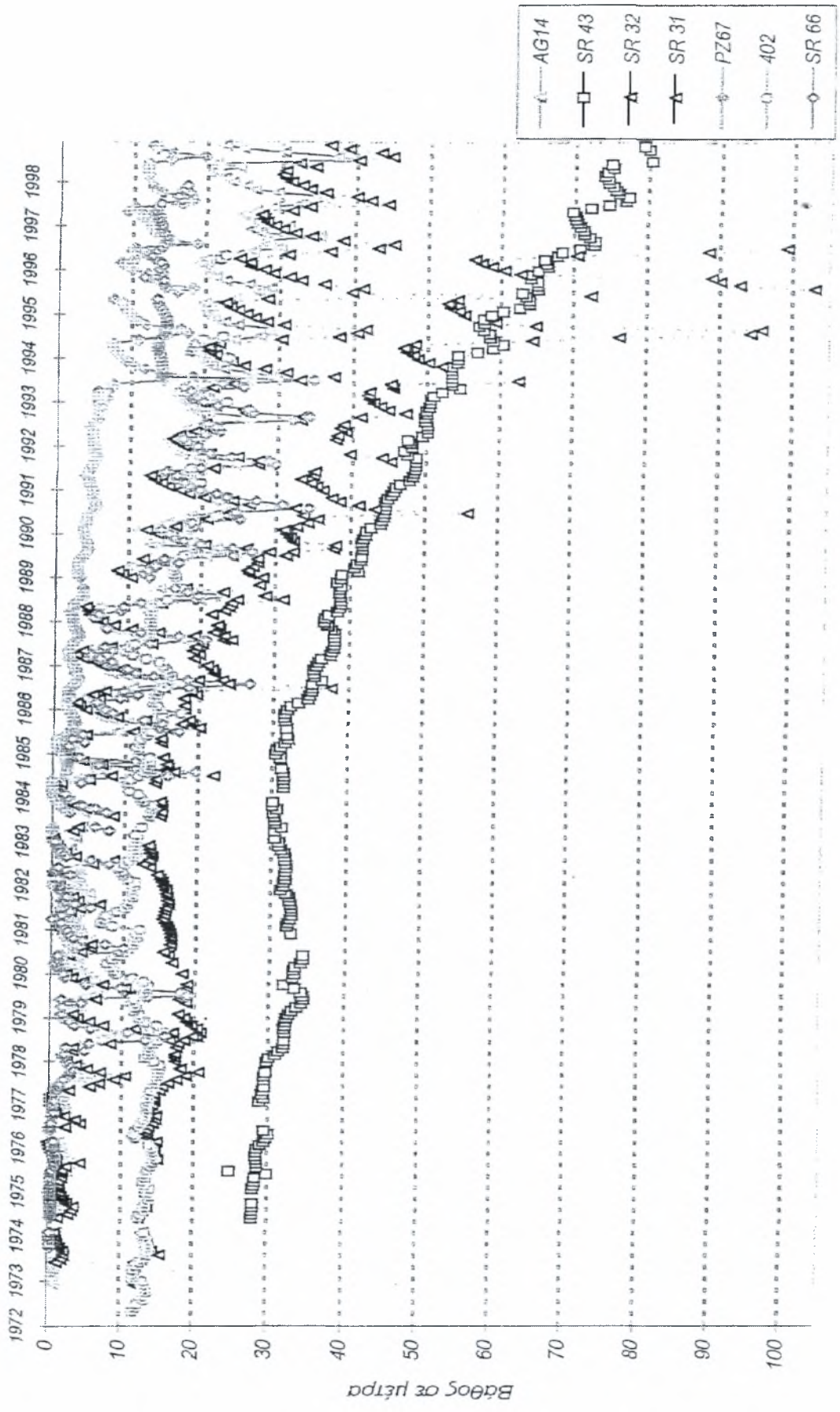
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

τμήμα της Κάρλας (περιοχή Μέλισσα-Λάρισα στην κεντρική και δυτική ζώνη) κυρίως στο ανατολικό όριο ανάπτυξης των αξιόλογων υδροφοριών της περιοχής. Στις περιοχές αυτές οι υπόγειες υδροφορίες βρίσκονται υπό καθεστώς υπερεκμετάλλευσης. Στην ευρύτερη αυτή περιοχή όπου και τοποθετούνται τα πιεζόμετρα της κατηγορίας αναμένεται να αντικατασταθούν τα υπόγεια νερά των αρδεύσεων, από τα επιφανειακά νερά του Πηνειού της εκτροπής του Αχελώου.

- Στην **τρίτη ομάδα πιεζομέτρων** η ταπείνωση είναι μεγάλη και έντονη, χωρίς τάσεις σταθεροποίησης. Στην ομάδα αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα SR32, SR43, LB310, PZ15, AG17α, SR63A, SR30, AD16, PZ68, E3 AD11, SR29. Τα πιεζόμετρα αυτά τοποθετούνται στο δυτικό τμήμα της πεδινής έκτασης, όπου και αναπτύσσονται και οι κύριες αξιόλογες υδροφορίες της Χάλκης και της περιοχής Αρμενίου –Στεφανοβίκειου – Ριζόμυλου – Βελεστίνου – Αγ. Γεωργίου.

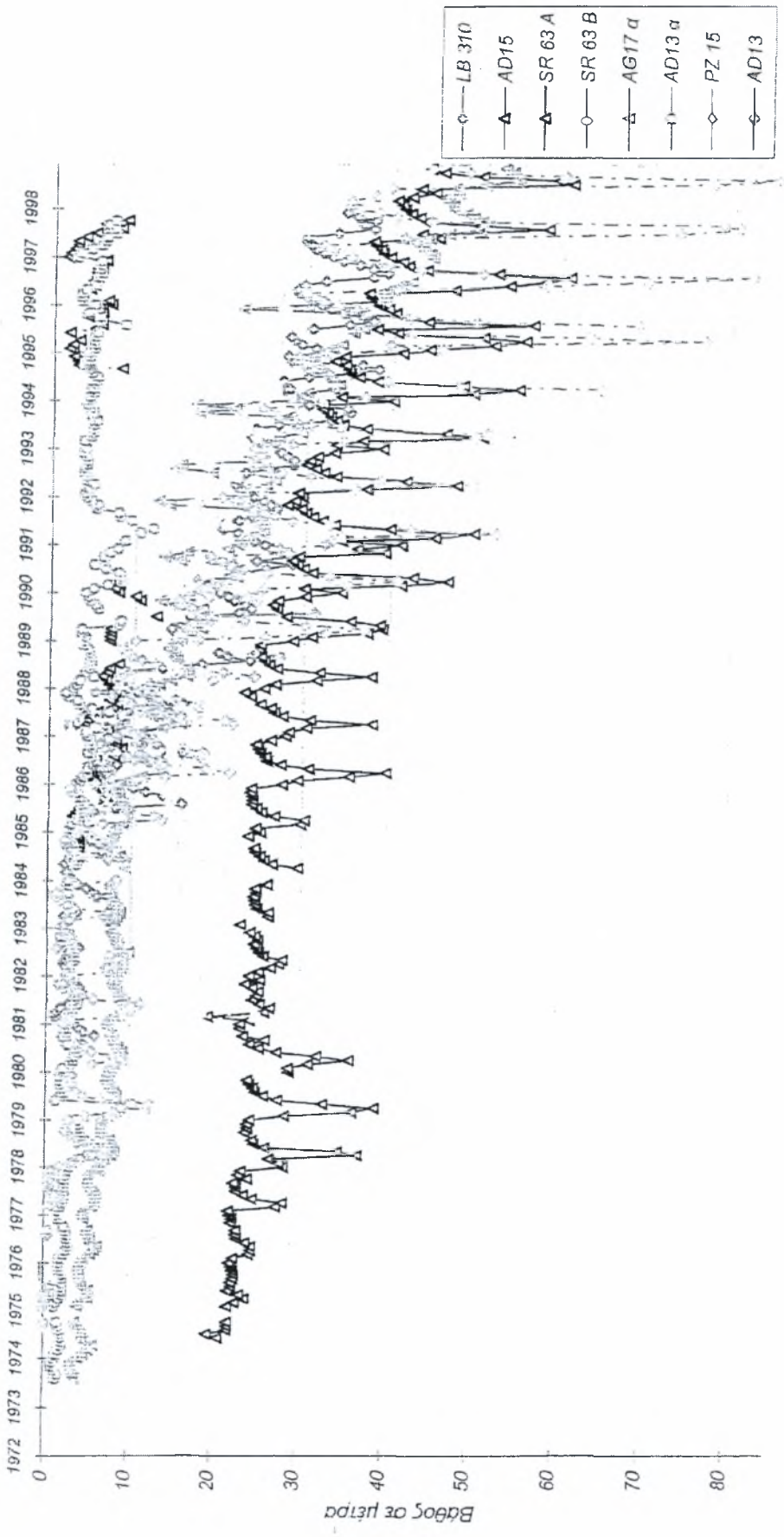
Στα Σχήματα 1.5 ως και 1.9 παρουσιάζονται οι πτώσεις στάθμης των πιεζομέτρων από το 1972 ως το 1998 και στο Σχήμα 1.10 απεικονίζεται η θέση της κάθε ομάδας (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε, 2001).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



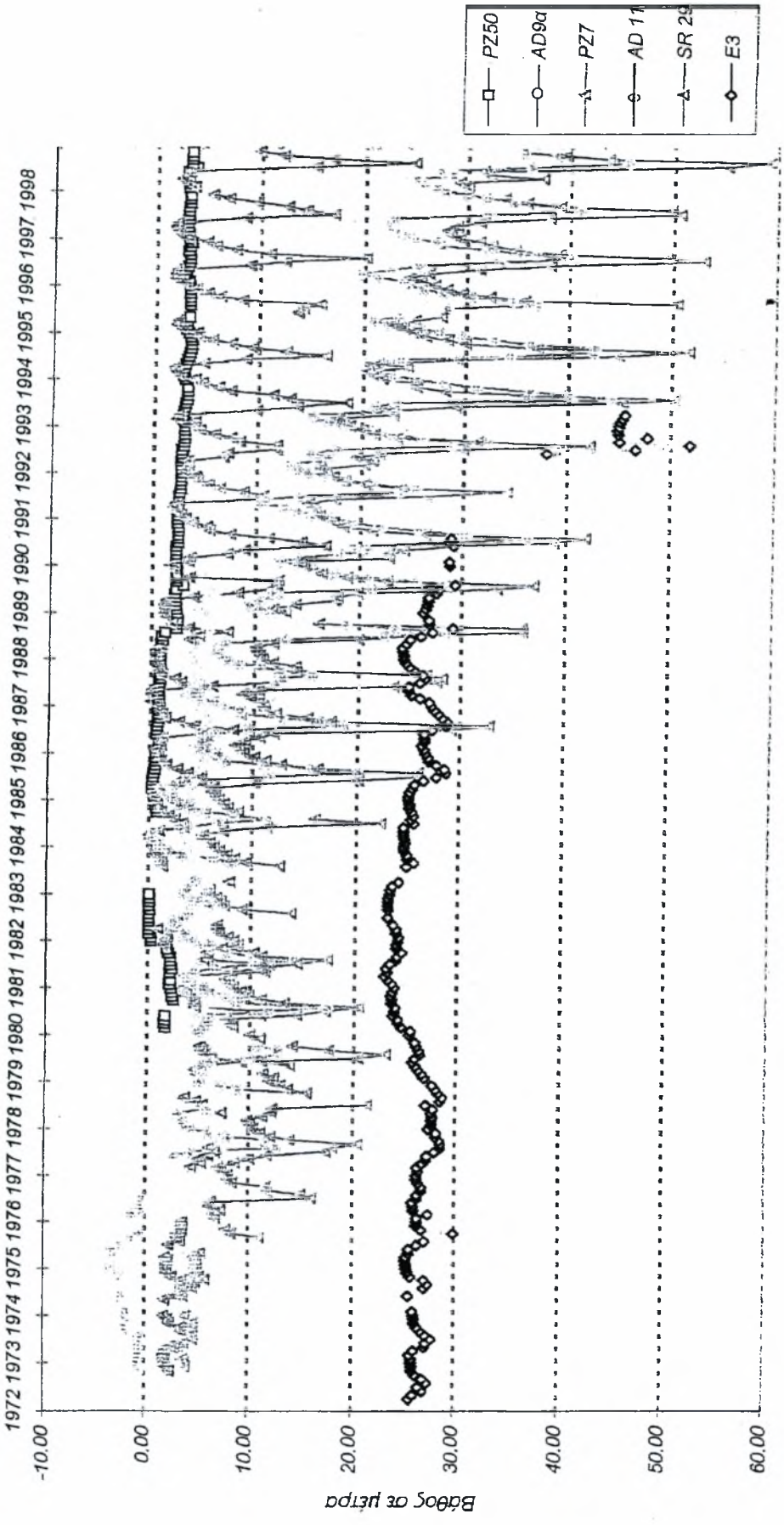
Σχήμα 1.5 Διαγράμματα πτώσης στάθμης πιεζομέτρων νότιου τμήματος Α.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



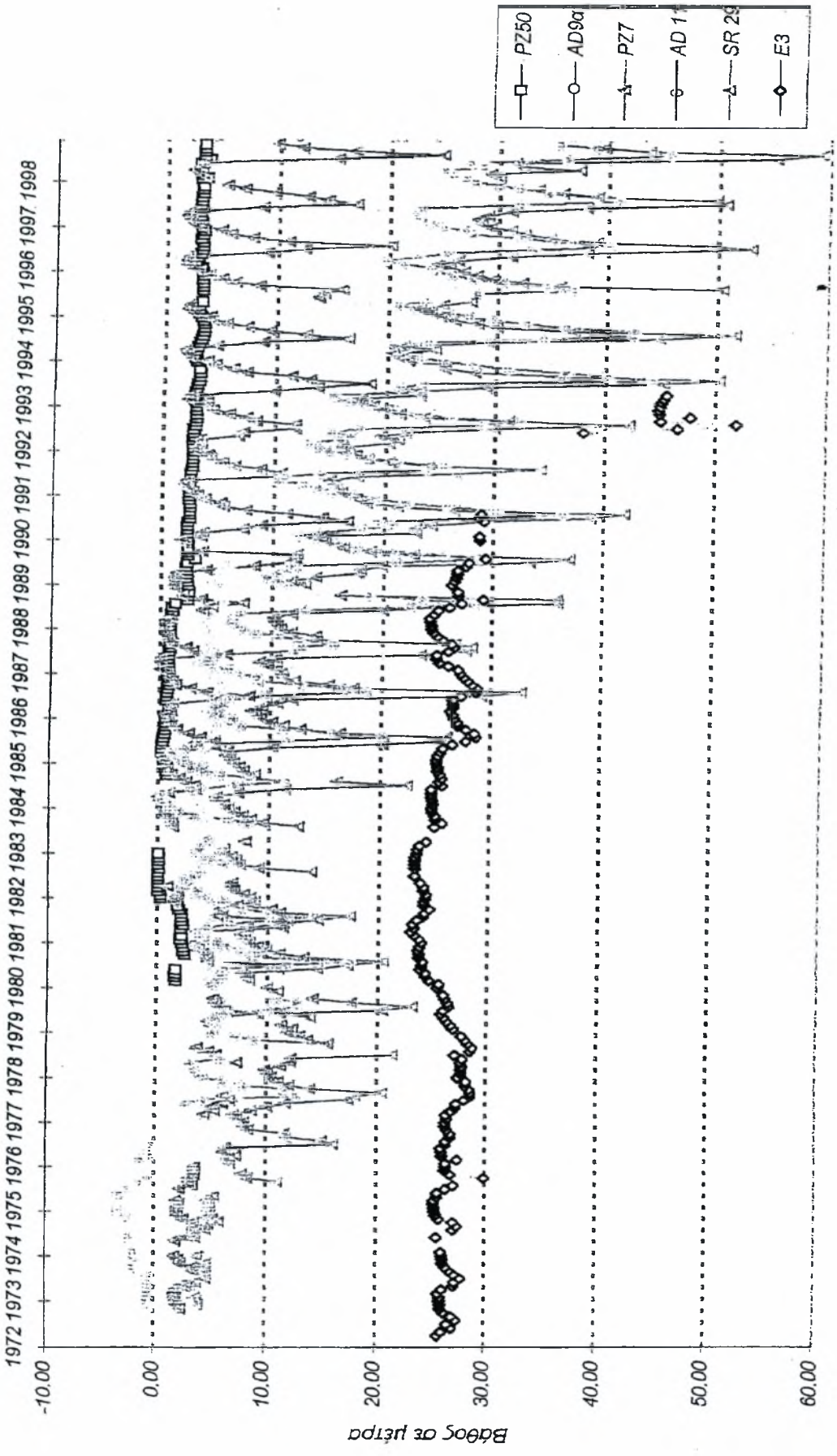
Σχήμα 1.6 Διαγράμματα πτώσης στάθμης πιεζομέτρων νότιου τμήματος Β.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



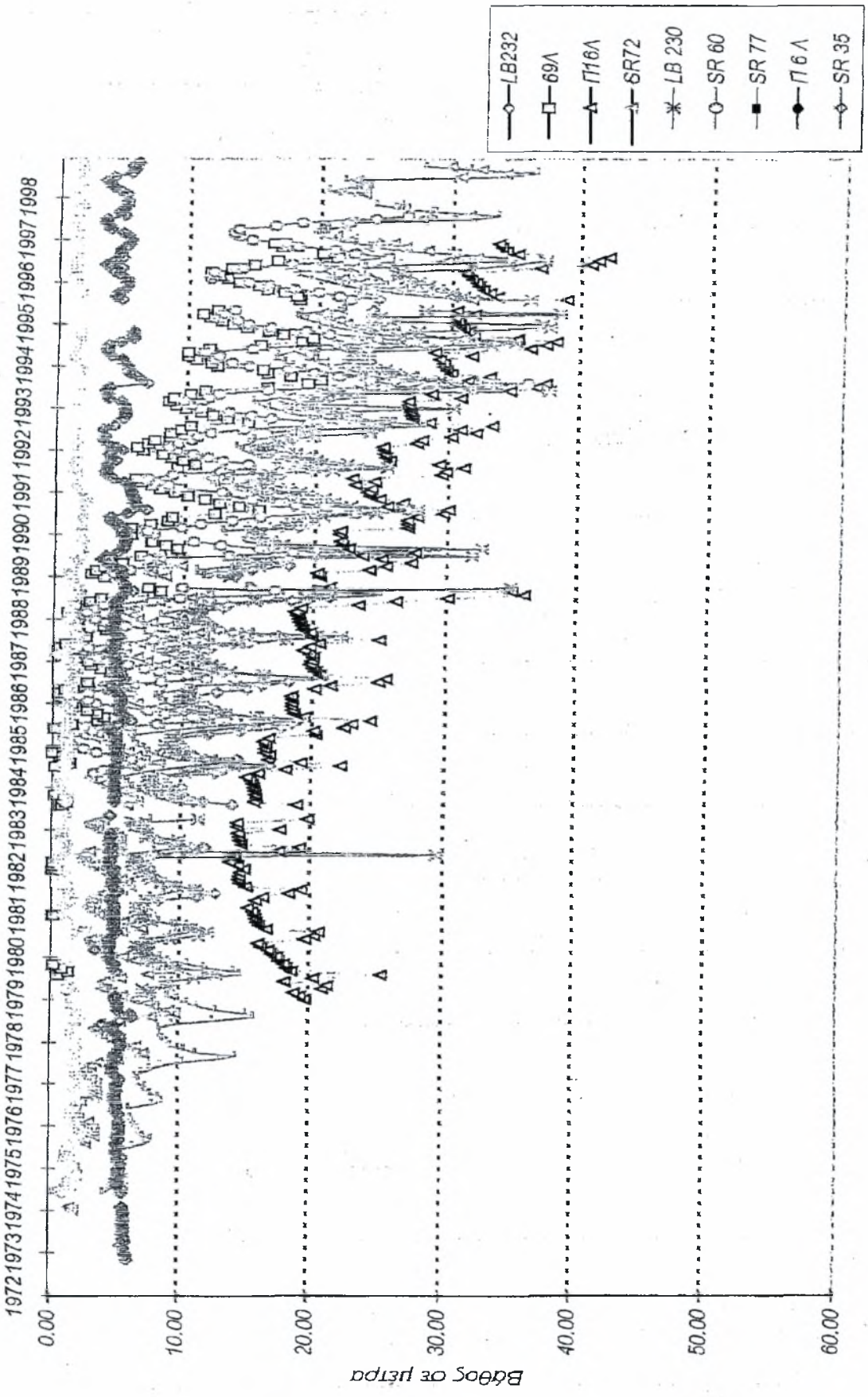
Σχήμα 1.7 Διαγράμματα πτώσης στάθμης πιεζομέτρων κεντρικού τμήματος Β.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



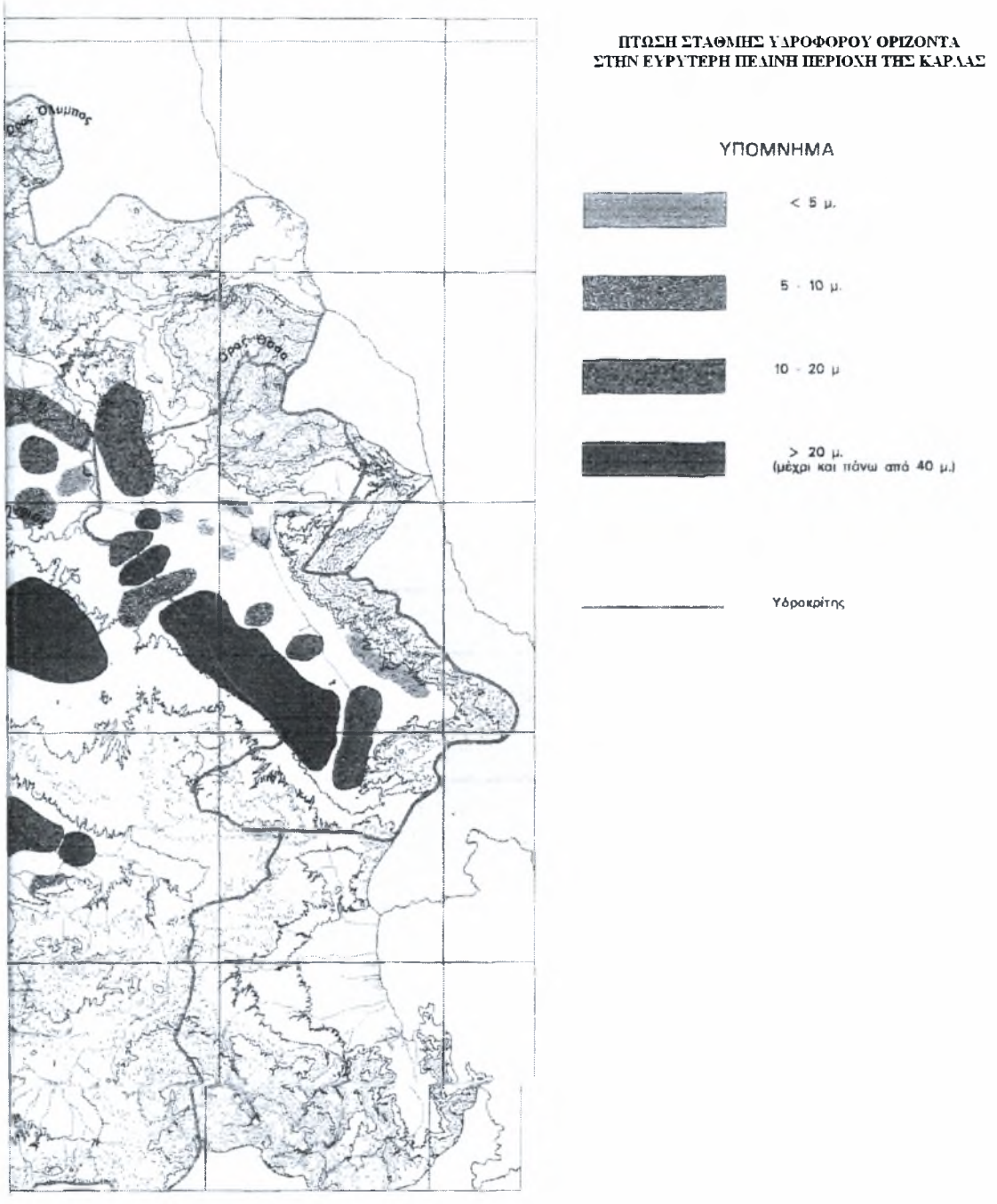
Σχήμα 1.8 Διαγράμματα πτώσης στάθμης πιεζομέτρων κεντρικού τμήματος Β.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



Σχήμα 1.9 Διαγράμματα πτώσης στάθμης πιεζομέτρων βορείου τμήματος .

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



Σχήμα 1.10 Θέσεις των ομάδων πιεζομέτρων.

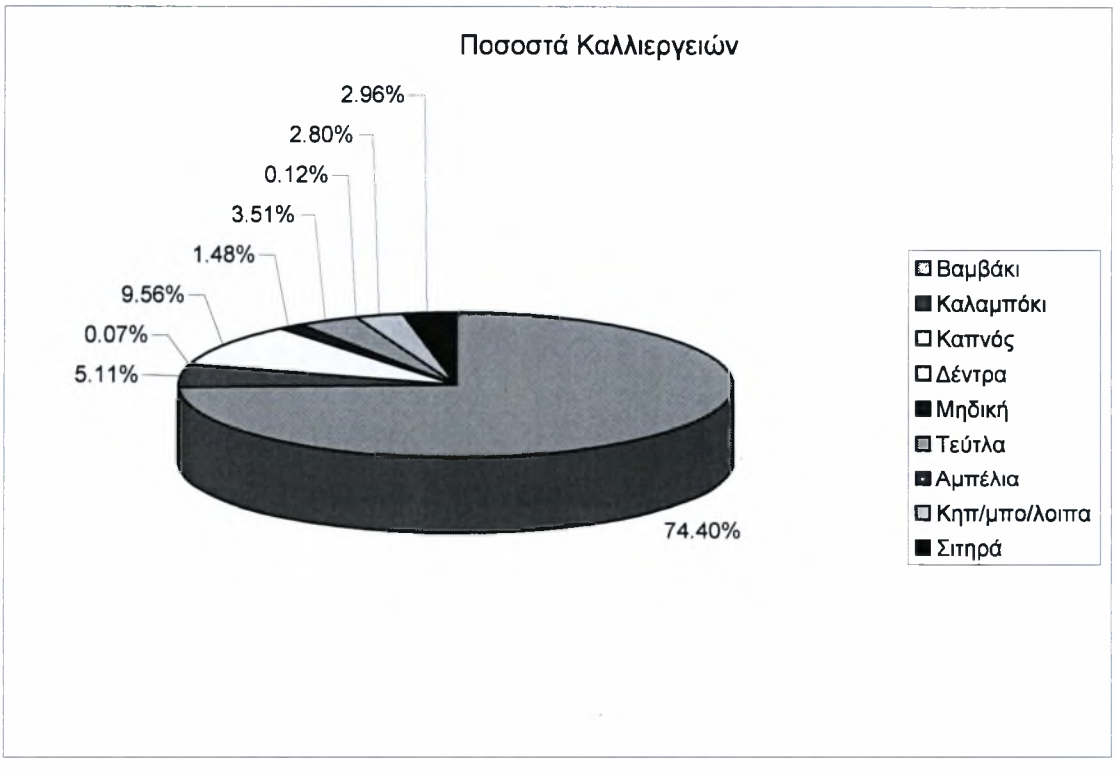
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

1.5.5 Αρδευτική – Υδρευτική Εκμετάλλευση του Υπόγειου Υδροφορέα

Στη λεκάνη της Κάρλας αρδεύονται σήμερα από επιφανειακά και υπόγεια νερά 375,394 Km^2. Οι εκτάσεις και τα ποσοστά καλλιεργειών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2, που ακολουθεί παρακάτω και παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 1.11 (Μουστάκα Ε., 2002).

Καλλιέργεια	Km^2	Ποσοστό
Βαμβάκι	279.27338	74.395%
Καλαμπόκι	19.17250	5.107%
Καπνός	0.27687	0.074%
Δέντρα	35.89168	9.561%
Μηδική	5.56020	1.481%
Τεύτλα	13.16125	3.506%
Αμπέλια	0.44084	0.117%
Κηπ/Μπο/λοιπα	10.51660	2.801%
Σιτηρά	11.10077	2.957%

Πίνακας 1.2 Εκτάσεις και ποσοστά των καλλιεργειών. (Μουστάκα Ε., 2002)



Σχήμα 1.11 Ποσοστά Καλλιεργειών. (Μουστάκα Ε., 2002)

Το μεγαλύτερο ποσοστό των καλλιεργούμενων εκτάσεων αρδεύεται από τον υπόγειο υδροφορέα και είναι της τάξεως των 305 km^2 . Για την περίοδο μελέτης 1/1/1987-1/1/1997 οι ανάγκες σε νερό λόγω άρδευσης κυμαίνονται από $147*10^6$ m^3 έως και

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$192*10^6$ m^3. Το ποσό βέβαια αυτό δεν αντλείται όλο από τον υπόγειο υδροφορέα. Στην περιοχή υπάρχουν το Τ.Ο.Ε.Β. Πηνειού που εξυπηρετεί ένα τμήμα της λεκάνης που ανήκει στο Νομό Λαρίσης εκτάσεως 140 km^2 και το Τ.Ο.Ε.Β. Κάρλας που εξυπηρετεί ένα τμήμα της λεκάνης που ανήκει στο Νομό Μαγνησίας εκτάσεως 18,5 km^2.

Από τον υπόγειο υδροφορέα καλύπτονται και οι ανάγκες ύδρευσης των γύρω οικισμών. Βέβαια το ποσοστό αυτό είναι αισθητά πιο μικρό από αυτό της άρδευσης. Η περιοχή μελέτης του υπόγειου υδροφορέα, όπως παρουσιάζεται στο 4° Κεφάλαιο χωρίστηκε σε επτά ζώνες άντλησης εκ των οποίων οι πέντε ανήκουν στο Νομό Μαγνησίας και οι δύο στο Νομό Λαρίσης.

Αναλυτικότερη παρουσίαση τόσο της αρδευτικής – υδρευτικής εκμετάλλευσης του Υπόγειου Υδροφορέα θα γίνει στο 4° Κεφάλαιο κι αυτό γιατί η περιοχή μελέτης είναι διαφορετική από τη λεκάνη της Κάρλας. Οπότε παρατηρούνται διαφορές τόσο στις αρδευόμενες εκτάσεις, όσο και στο συνολικό ποσό νερού που αντλείται από τον Υπόγειο Υδροφορέα στην περίοδο μελέτης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

2 ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ

2.1 Εισαγωγή

Η Γεωστατιστική είναι η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη φαινομένων που μεταβάλλονται στο χώρο ή/και στο χρόνο. Για το σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί μια συλλογή από προσδιοριστικά και στατιστικά εργαλεία για την κατανόηση και μοντελοποίηση της χωρικής μεταβλητότητας.

Την τεχνογνωσία της δανείστηκε από τη βιομηχανία εξόρυξης μεταλλευμάτων και αναζήτησης πετρελαίου, ξεκινώντας με την πρωτοπόρα εργασία του Danie Krige στη δεκαετία του '50 και της μαθηματικής επισημοποίησης από τον George Matheron στις αρχές της δεκαετίας του 60. Σε αυτές τις βιομηχανίες βρήκε αποδοχή μέσω επιτυχών εφαρμογών σε περιπτώσεις όπου οι αποφάσεις είχαν μεγάλο οικονομικό κόστος και οι λειτουργικές εφαρμογές βασίζονταν σε αποτελέσματα από αραιά χωρικά δεδομένα. Οι εφαρμογές των γεωστατιστικών μεθόδων έχουν από τότε επεκταθεί σε πολλά πεδία που έχουν σχέση με τις επιστήμες της γης.

Το πεδίο της γεωστατιστικής είναι γενικά αφιερωμένο στην ανάλυση και στην εξήγηση της αβεβαιότητας που προέρχεται από μικρό αριθμό δειγμάτων. Οι γεωστατιστικές προσεγγίσεις διαφέρουν από τις πιο κλασικές μεθόδους της στατιστικής ανάλυση δεδομένων στο ότι δεν είναι εντελώς δεμένες με ένα μοντέλο πληθυσμιακής κατανομής που υποθέτει ότι τα δείγματα ακολουθούν κανονική κατανομή και είναι μη συσχετιζόμενα. Τα περισσότερα δεδομένα των επιστημών της γης, στην πραγματικότητα, δεν ικανοποιούν αυτές τις υποθέσεις καθώς τείνουν συχνά να έχουν μη κανονικές κατανομές και χωρικά συσχετιζόμενα δείγματα. Εφόσον οι κλασικές στατιστικές προσεγγίσεις αφορούν μόνο την εξέταση της στατιστικής κατανομής του δείγματος, οι γεωστατιστικές περιλαμβάνουν τις ερμηνείες τόσο της στατιστικής κατανομής, όσο και της χωρικής συσχέτισης ανάμεσα στα δείγματα. Εξαιτίας αυτών των διαφορών, τα γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα είναι πιο αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας τις γεωστατιστικές μεθόδους όταν η ανάλυση της χωρικής κατανομής των δεδομένων επιρρεάζει τη λήψη αποφάσεων. Η αποτελεσματικότητα της γεωστατιστικής αυξάνει όταν στα προβλήματα εισέρχεται και ο όρος της επικινδυνότητας.

Η χρήση της σε μεγάλα γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα έχει αποδείξει ότι η γεωστατιστική είναι ένα δυνατό εργαλείο, που επιτρέπει τον συντονισμό των εργασιών, από την απόκτηση των δεδομένων του πεδίου μέχρι την ανάλυση του σχεδιασμού.

Το μεγαλύτερο επίτευγμα της γεωστατιστικής είναι το ότι μπορεί να προβλέψει τη χωρική κατανομή της υπό μελέτη μεταβλητής. Αυτή η πρόβλεψη συνήθως γίνεται με τη μορφή χαρτών που δείχνουν το μέγεθος και την κατανομή της μεταβλητής. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι της γεωστατιστικής πρόβλεψης : η εκτίμηση (estimation) και η προσομοίωση (simulation).

Στη διαδικασία της εκτίμησης παράγεται μια, μοναδική και στατιστικά αρτιότερη εκτίμηση της χωρικής κατανομής της μεταβλητής, βασιζόμενη στα δεδομένα πεδίου, αλλά και στο μοντέλο, το οποίο αναπαριστά με το βέλτιστο δυνατό τρόπο την χωρική

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

συσχέτιση των δεδομένων. Αυτή η μοναδική εκτίμηση παράγεται από την ευρέως γνωστή γεωστατιστική τεχνική με την ονομασία Kriging.

Στην προσομοίωση, παράγονται πολλές, ίσης πιθανότητας απεικονίσεις της χωρικής ύπαρξης της μεταβλητής, χρησιμοποιώντας το ίδιο μοντέλο της χωρικής συσχέτισης όπως αυτό προέκυψε από τη μέθοδο Kriging. Οι απεικονίσεις έχουν ρεαλιστική υπόσταση και διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των δεδομένων. Οι διαφορές ανάμεσα στις πολλαπλές απεικονίσεις παρέχουν ένα μέτρο της χωρικής αβεβαιότητας, που επιτρέπει σε κάποιον να λύσει προβλήματα επικινδυνότητας, κάτι το οποίο δεν επιτυγχάνεται με την εκτίμηση.

2.2 Γεωστατιστική προσέγγιση

Κατά τη γεωστατιστική προσέγγιση κάθε παράμετρος z του προβλήματος (π.χ υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες, μεταφορικότητα) αντιμετωπίζεται σαν τυχαία μεταβλητή (Random Value ή RV) Z, η κατανομή πιθανότητας της οποίας παριστά την αβεβαιότητα στη γνώση μας για τη z.

Ο λόγος για τον οποίο η κάθε παράμετρος αντιμετωπίζεται σαν τυχαία μεταβλητή είναι να δοθεί μια μαθηματική παράσταση της μεταβολής των ιδιοτήτων της στο χώρο.

Μια τυχαία μεταβλητή(RV), Z, αντιπροσωπεύει ένα σύνολο πιθανών ενδεχομένων ή καταστάσεων που δηλώνονται με το σύμβολο z_i i=1,..,N, όπου N αριθμός του συνόλου των καταστάσεων. Κάθε κατάσταση z_i χαρακτηρίζεται από μια πιθανότητα πραγματοποίησης p_i, i=1,..,N.

Η τυχαία μεταβλητή Z, και πιο συγκεκριμένα η κατανομή της πιθανότητάς της είναι χωρικά εξαρτημένη. Συνεπώς και η παραπάνω δηλώνεται ως Z(u) με το u να είναι το διάνυσμα των χωρικών συντεταγμένων. Η Z(u) εξαρτάται επίσης από το πλήθος των δεδομένων με την έννοια ότι η κατανομή της πιθανότητάς της αλλάζει όσα περισσότερα δεδομένα εισάγονται για την παράμετρο z(u).

Αν ο συνολικός αριθμός των καταστάσεων που περιέχει ο πληθυσμός είναι πεπερασμένος, η τυχαία μεταβλητή είναι διακριτή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παραμέτρων που αντιμετωπίζονται ως τυχαίες διακριτές μεταβλητές αποτελούν οι γεωλογικές ιδιότητες ενός πεδίου, όπως ο τύπος του πετρώματος.

Αν ο συνολικός αριθμός είναι άπειρος, η τυχαία μεταβλητή είναι συνεχής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παραμέτρων που αντιμετωπίζονται ως τυχαίες συνεχείς μεταβλητές αποτελούν η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταφορικότητα, το πορώδες, η συγκέντρωση ενός ρύπου κ.α.

Εφόσον στην παρούσα εργασία η παράμετρος αυτή είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, γίνεται κατανοητό πως η τυχαία μεταβλητή Z(u) θα είναι στο εξής **συνεχής** κάτι που θα θεωρείται δεδομένο στις παρακάτω ενότητες.

Επομένως και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cumulative distribution function ή cdf) F(u;z) της μεταβλητής Z(u) θα αντιπροσωπεύει τη συνολική πιθανότητα η μεταβλητή να παίρνει όλες τις τιμές που είναι μικρότερες ή ίσες από την τιμή z :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$$F(u;z) = \text{Prob}\{Z(u) \leq z\} \qquad \text{Εξ. 2.1}$$

Η **αθροιστική συνάρτηση κατανομής ή cdf** χαρακτηρίζει πλήρως την τυχαία μεταβλητή Z(u) και μπορεί να δώσει διαστήματα πιθανότητας :

$$\text{Prob}\{Z \text{ E } [a,b]\} = F(b) - F(a) \qquad \text{Εξ. 2.2}$$

Ανάλογα με τα διαστήματα πιθανότητας, η **πιθανότητα υπέρβασης** μιας οποιασδήποτε στάθμης a ορίζεται ως εξής :

$$\text{Prob}\{Z > a\} = \text{Prob}\{\infty > Z > a\} = F(\infty) - F(a) = 1 - F(a) \qquad \text{Εξ. 2.3}$$

Η πιθανότητα υπέρβασης στάθμης είναι στατιστικό μέγεθος με πολλές και χρήσιμες εφαρμογές στα προβλήματα υδρογεωλογίας (πχ στον έλεγχο της περιβαλλοντικής ρύπανσης). Έτσι λοιπόν το p-ποσοστημόριο για μια κατανομή F(z) είναι η τιμή z_p τέτοια ώστε $F(z_p) = p$ E [0,1], δηλαδή η τιμή z_p που έχει πιθανότητα p να μην την ξεπερνά η τυχαία μεταβλητή Z(u). Καθορίζοντας την αντίστροφη $F^{-1}(p)$ της cdf προκύπτει :

$$\text{p- ποσοστημόριο } z_p = F^{-1}(p), \text{ με p E } [0,1] \qquad \text{Εξ. 2.4}$$

και εκφράζοντας το σε ποσοστό επί της εκατό προκύπτει :

$$\text{p-εκατοστημόριο } z_p = F^{-1}(100p), \text{ με p E } [0,100] \qquad \text{Εξ. 2.5}$$

με τα ποιο γνωστά να είναι ο διάμεσος $M = F^{-1}(0.5)$, και οι άνω και κάτω στάθμες $z_{0.25} = F^{-1}(0.25)$, $z_{0.75} = F^{-1}(0.75)$.

Η **αναμενόμενη ή μέση τιμή** (mean) για μια συνεχής μεταβλητή Z(u) είναι :

$$E\{Z\} = m \int_{-\infty}^{+\infty} z dF(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} z f(z) dz \qquad \text{Εξ. 2.6}$$

όπου F(z) είναι η cdf της Z και f(z) είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function ή pdf) της Z, η οποία ισούται με την παράγωγο της F(z) : f(z) = F'(z).

Η **διασπορά** (variance) της Z ορίζεται ως η αναμενόμενη τετραγωνική απόκλιση της Z από τη μέση τιμή m :

$$\text{Var}\{Z\} = \sigma^2 = E\{|Z-m^2|\} = \int_{-\infty}^{+\infty} (z-m)^2 dF(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} (z-m)^2 f(z) dz \qquad \text{Εξ. 2.7}$$

Η **τυπική απόκλιση** (standard deviation) σ, όπως φαίνεται και από τα παραπάνω είναι ίση με τη τετραγωνική ρίζα της διασποράς.

Σημαντικό ρόλο στη γεωστατιστική προσέγγιση της τυχαίας μεταβλητής Z παίζει η κατανομή της πιθανότητάς της. Οι βασικές κατανομές πιθανότητας είναι : η διωνυμική, η Poisson, η πολυωνυμική, η ομοιόμορφη, η Βήτα, η κανονική, η λογο-κανονική, η X^2, η t (Student), η εκθετική, η Weibull. Εδώ θα αναπτυχθούν μόνο η κανονική και λογαριθμοκανονική κατανομή διότι αυτές χρησιμοποιούνται, συνήθως, για τη γεωστατιστική προσέγγιση της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Η **κανονική** κατανομή είναι επίσης γνωστή και σαν κατανομή **Gauss**. Χαρακτηρίζεται πλήρως από τη μέση τιμή m και την τυπική απόκλιση σ. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ή pdf ισούται με :

$$g(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-m}{\sigma}\right)^2\right] \qquad \text{Εξ. 2.8}$$

Στην περίπτωση όπου m = 0 και $\sigma^2 = 1$ καλείται **τυπική κανονική** κατανομή και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ή pdf ισούται με :

$$g_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] \qquad \text{Εξ. 2.9}$$

Η αθροιστική κατανομή πιθανότητας δεν επιδέχεται κλειστή αναλυτική μορφή:

$$G(z) = \int_{-\infty}^{z} g(u)du = G_0\left(\frac{z-m}{\sigma}\right) \qquad \text{Εξ. 2.10}$$

όπου $G_0(z)$ είναι η cdf της τυπικής κατανομής ίση με :

$$G_0(z) = \int_{-\infty}^{z} g_0(u)du \qquad \text{Εξ. 2.11}$$

Η κανονική κατανομή είναι συμμετρική ως προς τη μέση τιμή m, έτσι : m = M και g(z+m) = g(z-m), οπότε G(m-z) = 1-G(m+z) για όλα τα z. Επίσης $z_{1-p} = 2m-z_p$, για p E[0,0.5].

Η επιτυχία της κατανομής Gauss οφείλεται στο γεγονός ότι στην πράξη οι παρατηρούμενες μεταβολές αντιστοιχούν σε ομογενοποιημένες μεταβλητές που προκύπτουν από τον συνδυασμό διακυμάνσεων μικρότερης κλίμακας. Αυτές οι ομογενοποιημένες μεταβλητές αντιπροσωπεύουν αθροίσματα ή μέσους όρους στοιχειωδών τυχαίων μεταβλητών. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία σε μια περιοχή της Ελλάδας (π.χ Βόλος) αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή ως προς τις τοπικές διακυμάνσεις. Επομένως μπορούμε να αναζητήσουμε τα αίτια για την πανταχού παρουσία της κανονικής κατανομής στη συμπεριφορά της κανονικής κατανομής για ομογενοποιημένες μεταβλητές. Το μαθηματικό πλαίσιο που προσδιορίζει την κατανομή πιθανότητας για τις ομογενοποιημένες μεταβλητές είναι το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα (Central Limit Theorem).

Σύμφωνα με το **Κεντρικό Οριακό Θεώρημα** αν υπάρχουν n μεταβλητές Z_i οι οποίες είναι <u>ανεξάρτητες</u> και <u>ισόνομες</u> (δηλαδή έχουν την ίδια κατανομή) με μέση τιμή m και πεπερασμένη τυπική απόκλιση σ, ορίζουν άθροισμα $Z_{tot}=\sum_{i=1}^{n} Z_i$ και μέσο όρο

$\overline{Z} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z_i$. Οι Z_{tot}, $\overline{Z}$ είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές που χαρακτηρίζονται αντίστοιχα από κατανομές πιθανότητας. Για μεγάλες τιμές του n, ισχύουν οι επόμενες ιδιότητες :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

1. Η κατανομή της Z_{tot} συγκλίνει στην κανονική κατανομή με μέση τιμή nm και τυπική απόκλιση $\sigma\sqrt{n}$.
2. Η κατανομή της $\overline{Z}$ συγκλίνει επίσης στην κανονική κατανομή με μέση τιμή m και τυπική απόκλιση $\sigma/\sqrt{n}$.

Η κανονική κατανομή είναι πολύ εύχρηστη γιατί χαρακτηρίζεται πλήρως από μόνο δύο παραμέτρους τη μέση τιμή και ην τυπική απόκλιση. Επίσης είναι συμμετρική και επιτρέπει την επεξεργασία και αρνητικών τιμών. Στην πράξη όμως πολλές πειραματικές κατανομές είναι ασύμμετρες με μέση τιμή διαφορετική από το διάμεσο. Πολλές μεταλλαγές της κανονικής κατανομής χρησιμοποιήθηκαν για να αντιμετωπίσουν το παραπάνω πρόβλημα. Η πιο ευρεία διαδεδομένη είναι η λογαριθμική κατανομή.

Η **λογοκανονική κατανομή** συνδέεται με την κανονική κατανομή ως εξής : Μια τυχαία μεταβλητή Z>0 ακολουθεί την λογοκανονική κατανομή, όταν ο λογάριθμος της Y = logZ ακολουθεί την κανονική κατανομή και αντιστρόφως. Χαρακτηρίζεται πλήρως :

- είτε από τη μέση τιμή m και την τυπική απόκλιση σ^2 της κανονικής κατανομής και καλούνται αριθμητικές παράμετροι,
- είτε από τη μέση τιμή α και την τυπική απόκλιση β^2 του λογαριθμικού μετασχηματισμού Y = logZ ακολουθεί και καλούνται λογαριθμικές παράμετροι.

Η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της λογοκανονικής κατανομής δίνεται από την εξίσωση :

$$\Pr ob\{Z \le z\} = G_Z(z) = G_0\left(\frac{\ln z - \alpha}{\beta}\right) \text{ για όλα τα } z > 0 \qquad \text{Εξ. 2.12}$$

όπου $G_0(*)$ είναι η cdf της τυπικής κανονικής κατανομής.

Ενώ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της λογοκανονικής κατανομής ισούται με:

$$g_Z(y) = G'_Z(y) = \frac{1}{\beta y} g_0\left(\frac{\ln y - \alpha}{\beta}\right) \qquad \text{Εξ. 2.13}$$

όπου $g_0(*)$ είναι η pdf της τυπικής κανονικής κατανομής.

Οι μαθηματικές σχέσεις ανάμεσα στις μαθηματικές και στις λογαριθμικές παραμέτρους είναι :

$$\begin{cases} m = e^{\alpha+\beta^2/2} \\ \sigma^2 = m^2[e^{\beta^2} - 1] \end{cases} \qquad \begin{cases} \alpha = \ln m - \beta^2/2 \\ \beta^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{m^2}\right) \end{cases} \qquad \text{Εξ. 2.14}$$

Εάν v_p είναι η το p- ποσοστημόριο για μια τυπική κανονική κατανομή δηλ, $v_p = G_0^{-1}(p)$, p E [0,1] τότε το p- ποσοστημόριο για την λογοκανονική είναι : $y_p = e^{\alpha+\beta v_p}$.

Μέχρι στιγμής λαβαίναμε υπόψη μόνο μια τυχαία μεταβλητή κάθε φορά είτε αυτή ήταν η Z(u) ή το άθροισμα $Z_{tot} = \sum_{i=1}^{n} Z_i$ των n τυχαίων μεταβλητών Z(u). Όπως στις περισσότερες επιστήμες, έτσι και στη γεωστατιστική ο παράγοντας της εξάρτησης της

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

μιας μεταβλητής X από μια άλλη Y παίζει σημαντικό ρόλο. Οι μεταβλητές αυτές πιθανόν να αντιστοιχούν στην ίδια ποσότητα (υδραυλική αγωγιμότητα) σε δύο διαφορετικά σημεία του χώρου ή σε δύο διαφορετικές ποσότητες (πορώδες, μεταφορικότητα) που αναφέρονται στο ίδιο ή σε διαφορετικά σημεία στο χώρο.

Στην παρούσα εργασία ισχύει η πρώτη περίπτωση και αυτό θα νοείται στην περαιτέρω επεξεργασία.

Όταν η αθροιστική συνάρτηση κατανομής ή cdf αναφέρεται συγκεκριμένα για ένα σύνολο πληροφοριών (n), π.χ το σύνολο (n) να αποτελείται από γειτονικές τιμές $Z(u_a)$, a=1,…..,n, τότε η τυχαία μεταβλητή Z είναι εξαρτημένη (conditional) στο σύνολο n και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cdf) της καλείται **εξαρτημένη αθροιστική συνάρτηση κατανομής** ή **ccdf**:

$$F(u;z|(n)) = \text{Prob}\{Z(u) \leq z|(n)\} \qquad \text{Εξ. 2.15}$$

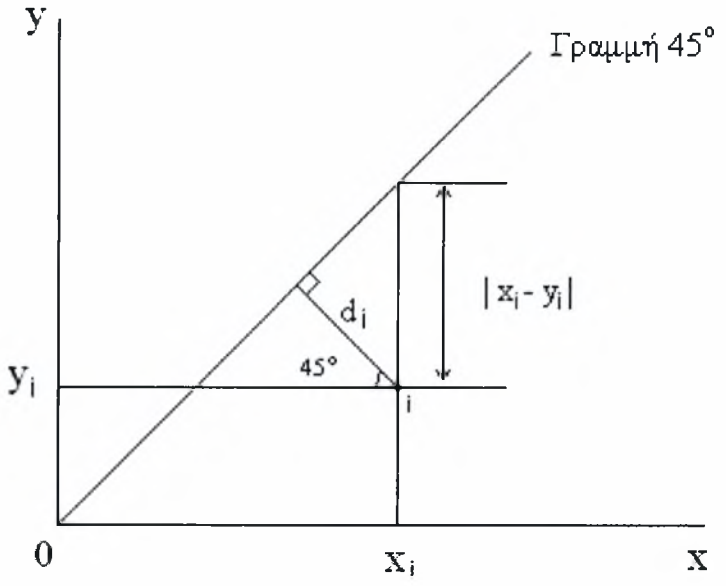
Η Εξίσωση 2.1 μοντελοποιεί την αβεβαιότητα για την άγνωστη τιμή z(u) χωρίς τη χρήση των δεδομένων (n), ενώ η Εξίσωση 15 μοντελοποιεί την αβεβαιότητα για την z(u) λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των δεδομένων (n). Ο μεγάλος στόχος κάθε αλγόριθμου πρόβλεψης είναι να μετατρέψει αρχικά μοντέλα όπως της Εξίσωσης 2.1 σε μεταγενέστερα όπως της Εξίσωσης 2.15. Σημειώστε ότι η ccdf είναι μια συνάρτηση της θέσης u, της γεωμετρικής παράταξης των θέσεων των δεδομένων u_a, a=1,….,n και των τιμών των δεδομένων.

Έτσι λοιπόν ο στόχος της **γεωστατιστικής προσέγγισης** είναι να μελετήσει / μοντελοποιήσει το βαθμό συσχέτισης ή εξάρτησης των δύο ή περισσοτέρων μεταβλητών. Και όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι μεταβλητές αυτές θα αποτελούν στη δική μας περίπτωση τιμές της υδραυλική αγωγιμότητας σε διάφορα σημεία του χώρου.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιεί η γεωστατιστική για τον παραπάνω σκοπό είναι το **μεταβλητόγραμμα** $2\gamma_{XY}$ ή **ημιμεταβλητόγραμμα** γ_{XY}, η **συμμεταβλητότητα Cov{X,Y}** και ο **συντελεστής συσχέτισης** ρ_{XY}.

Ο απλούστερος τρόπος για την πρώτη εκτίμηση της εξάρτησης δύο μεταβλητών είναι το διάγραμμα διασποράς, δηλαδή η δισδιάστατη γραφική παράσταση που προκύπτει από τα ζεύγη σημείων (x_i,y_i) (Σχήμα 2.1). Το διάγραμμα διασποράς είναι ότι και το ιστόγραμμα, στην περίπτωση μιας μεταβλητής. Ο βαθμός εξάρτησης των δύο μεταβλητών X και Y χαρακτηρίζεται από τη διασπορά των σημείων γύρω από τη γραμμή 45°. Όταν τα σημεία (x_i,y_i) εφαρμόσουν ακριβώς πάνω στη γραμμή τότε είναι πλήρως εξαρτημένες.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



Σχήμα 2.1 Το ζεύγος των σημείων (x_i,y_i) σε ένα διάγραμμα διασποράς.

Η ροπή αδράνειας (moment of inertia) είναι η μέση τιμή του τετραγώνου της διαφοράς δύο μεταβλητών και ορίζεται ως εξής :

$$\gamma_{XY} = \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{N}[x_i - y_i]^2 \qquad \text{Εξ. 2.16}$$

Η ροπή αδράνειας καλείται **ημιμεταβλητόγραμμα** (semivariogram). Αν X=Y το ημιμεταβλητόγραμμα μηδενίζεται. Υψηλές τιμές του ημιμεταβλητογράμματος δηλώνουν σημαντική απόκλιση μεταξύ των τιμών των μεταβλητών X και Y. Επομένως το ημιμεταβλητόγραμμα είναι ένα μέτρο της διασποράς των δύο μεταβλητών. Το μεταβλητόγραμμα $2\gamma_{XY}$ είναι απλά το διπλάσιο του ημιμεταβλητογράμματος. Στη γεωστατιστική πιο ευρέως διαδεδομένο είναι το ημιμεταβλητόγραμμα.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι όπως και στην περίπτωση της μια μεταβλητής, έτσι και σε αυτήν που αντιμετωπίζονται δύο ή παραπάνω μεταβλητές οι στατιστικές παράμετροι ορίζονται αναλόγως το ίδιο.

Έτσι η μέση τιμή ορίζεται :

$$E\{XY\} = \int_{-\infty}^{+\infty}\int xy\, d^2F_{XY}(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int xy f_{XY}(x,y)\,dxdy \qquad \text{Εξ. 2.17}$$

στην πράξη υπολογίζεται από : $\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n} x_i y_i$ και όπου η $f_{XY}(x,y) = \frac{d^2F_{XY}(x,y)}{dxdy}$ είναι η κοινή pdf και $d^2F_{XY}(x,y) = f_{XY}(x,y)$ είναι η πιθανότητα εμφάνισης του κοινού αποτελέσματος {X= x $\pm$ dx, Y = y $\pm$ dy}.

Η μέση τιμή E{XY} (Εξίσωση 2.17) καλείται μη κεντρικός συντελεστής διασποράς των δύο τυχαίων μεταβλητών X και Y. Ο κεντρικός **συντελεστής συμμεταβλητότητας** (covariance) ισούται με :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$$Cov\{X,Y\} = \sigma_{XY} = E\{[X - m_X]\cdot[Y - m_Y]\} = E\{XY\} - m_X \cdot m_Y \qquad \text{Εξ. 2.18}$$

στην πράξη υπολογίζεται ως εξής : $\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - m_x)\cdot(y_i - m_Y) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i y_i - m_X \cdot m_Y$

με $m_X = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i$, $m_Y = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}y_i$.

Η διασπορά μιας μεταβλητής, όπως αυτή ορίστηκε στην εξίσωση 2.7, δεν είναι τίποτε άλλο από τον συντελεστή **αυτομεταβλητότητας** (autocovariance) της μεταβλητής αυτής με τον εαυτό της :

$$\sigma^2{}_X = Var\{X\} = Cov\{X,X\} = E\{[X - m_X]\} \geq 0 \qquad \text{Εξ. 2.19}$$

Παρατηρούμε ότι παρόλο που οι διασπορές $\sigma^2{}_X$ και $\sigma^2{}_Y$ είναι απαραίτητα θετικές, ο συντελεστής συμμεταβλητότητας παίρνει και αρνητικές τιμές στην περίπτωση που οι τιμές των δύο τυχαίων μεταβλητών δεν μεταβάλλονται με παρόμοιο τρόπο, δηλαδή όταν οι υψηλές τιμές της μιας τείνουν να προσεγγίσουν τις χαμηλές τιμές της άλλης και αντίστροφα.

Από την Εξίσωση 2.18 είναι προφανές πως η τιμή του συντελεστής συμμεταβλητότητας εξαρτάται από τις μονάδες των X και Y. Για να απαλλαγεί από αυτή τη δέσμευση, ορίστηκε ο **συντελεστής συσχέτισης** (coefficient of correlation) ρ_{XY}:

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} = \frac{Cov\{X,Y\}}{\sqrt{Var\{X\}\cdot Var\{Y\}}} \quad \text{E [-1,+1]} \qquad \text{Εξ. 2.20}$$

Το μεταβλητόγραμμα γ_{XY} μαζί με το ημιμεταβλητόγραμμα $2\gamma_{XY}$ είναι μέσα μέτρησης της μεταβλητότητάς, ενώ ο συντελεστής συμμεταβλητότητας σ_{XY} και ο συντελεστής συσχέτισης ρ_{XY} είναι μέσα μέτρησης της ομοιότητας.

Τόσο το μεταβλητόγραμμα γ_{XY} όσο και ο συντελεστής συμμεταβλητότητας σ_{XY} εξαρτώνται από το γραμμικό μετασχηματισμό των μεταβλητών X,Y, είτε αυτός εκφράζεται ως άθροισμα π.χ X+b, είτε ως γινόμενο αX. Για το λόγο αυτό ζητείται μια πιο «φυσική» (intrinsic) έκφραση απαλλαγμένη από τις μονάδες. Αυτό πραγματοποιείται με την αλλαγή των μεταβλητών σε νέες : $X' = (X-m_X)/\sigma_X$ και $Y' = (Y-m_Y)/\sigma_Y$.

Οι στατιστικές τους παράμετροι είναι :

$$\begin{cases} m_{X'} = m_{Y'} = 0\,,\ \sigma^2{}_{X'} = \sigma^2{}_{Y'} = 1, \\ \sigma_{X'Y'} = \mathrm{E}\left\{\frac{X - m_X}{\sigma_X}\cdot\frac{Y - m_Y}{\sigma_Y}\right\} = \rho_{XY}\ \mathrm{E}\ [-1,+1] \\ \gamma_{X'Y'} = 1 - \rho_{XY}\quad \mathrm{E}\ [0,2] \end{cases} \qquad \text{Εξ. 2.21}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

2.3 Μεταβλητόγραμμα - Ημιμεταβλητόγραμμα

Εφόσον οι τυχαίες μεταβλητές X, Y αντιστοιχούν στις τιμές που παίρνει η υδραυλική αγωγιμότητα σε δύο διαφορετικές θέσεις μέσα στο πεδίο μελέτης A, τότε αν h είναι το διάνυσμα του χώρου που ενώνει τα δύο σημεία, αυτές μπορούν να δηλωθούν ως : X = Z(u), Y=Z(x+h). Αυτή η περίπτωση είναι και η πιο σημαντική για τα προβλήματα παρεμβολής, στα οποία μια παράμετρος (υδραυλική αγωγιμότητα) Z(u),u ανήκει στο πεδίο A, πρέπει να έχει μια συγκεκριμένη τιμή σε κάθε σημείο u, με τα δεδομένα να προέρχονται από ένα περιορισμένο αριθμό τιμών της.

Συγκεντρώνοντας όλα τα ζεύγη n(h) των δεδομένων, υπάρχουν μέσα στο πεδίο μελέτης A, της ιδιότητας Z, τα οποία χαρακτηρίζονται από την ίδια διανυσματική απόσταση h μπορεί να υπολογιστεί τελικά το μεταβλητόγραμμα του πεδίου A. Αυτό είναι λοιπόν το τελικό μεταβλητόγραμμα το οποίο λαμβάνει υπόψη της η γεωστατιστική επιστήμη για την περαιτέρω επεξεργασία του πεδίο μελέτης. Κι αυτό γιατί όπως αναφέρθηκε λαμβάνει υπόψη όλες τις τυχαίες μεταβλητές που χαρακτηρίζουν την εκάστοτε ιδιότητα.

Το μεταβλητόγραμμα ουσιαστικά αποτελεί ταυτότητα για την ιδιότητα Z στο πεδίο A. Μέσω αυτού μπορεί ο μελετητής να εξάγει ένα πρώτο συμπέρασμα για την μεταβλητότητα της ιδιότητας και χωρίς αυτό δεν πραγματοποιείται η γεωστατιστική προσέγγιση.

Ο ακριβής ορισμός που ακολουθεί για το μεταβλητόγραμμα είναι :

Το μεταβλητόγραμμα (variogram) αντικαθιστά την ευκλείδεια απόσταση h με μια θεμελιώδη απόσταση 2γ(h), η οποία είναι συγκεκριμένη στη συμπεριφορά και στο πεδίο μελέτης. Η απόσταση του μεταβλητογράμματος μετρά το μέσο βαθμό της ανομοιότητας ανάμεσα σε μια «χωρίς δειγματοληψία» τιμή z(u) και σε μια κοντινή δεδομένη τιμή. Έτσι π.χ στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη έστω μόνο δύο γνωστές τιμές z(u+h) και z(u+h') σε γνωστές θέσεις, η πιο «διαφορετική» τιμή θα δώσει και λιγότερο βάρος στην εκτίμηση της z(u). (Deutsch, Journel, 1992).

Η εξίσωση που την περιγράφει είναι η παρακάτω :

$$\gamma_{Z(x),Z(x+h)} = 2\gamma'_A(h) = \frac{1}{n(h)}\sum_{a=1}^{n(h)}[z(x_a) - z(x_a + h)]^2 \qquad \text{Εξ. 2.22}$$

Ο συμβολισμός **$2\gamma'_A(h)$** δηλώνει το **πειραματικό μεταβλητόγραμμα** του πεδίου και είναι αυτό που τόσος λόγος έγινε παραπάνω χωρίς να δηλώνεται έτσι. Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται διότι στην γεωστατιστική προσέγγιση, αφού κατασκευασθεί το παραπάνω πειραματικό μεταβλητόγραμμα , το επόμενο βήμα είναι να προσομοιωθεί με ένα έτοιμο/τυποποιημένο **μοντέλο μεταβλητόγραμμα**, οι μορφές του οποίου θα αναλυθούν παρακάτω.

Όπως η τυχαία μεταβλητή Z(x) και η κατανομή της χαρακτηρίζουν την αβεβαιότητα για τη τιμή της στη θέση x, έτσι και η τυχαία συνάρτηση Z(x), x EA, που καθορίζεται ως το σύνολο των εξαρτημένων RV, χαρακτηρίζει την κοινή (joint) χωρική αβεβαιότητα στο πεδίο A. Το μεταβλητόγραμμα $2\gamma'_A(h)$ αυτής της τυχαίας συνάρτησης (Random Function ή RF) χαρακτηρίζει το βαθμό της χωρικής μεταβλητότητας ανάμεσα σε δύο RVs Z(x) και Z(x+h) που απέχουν διανυσματική απόσταση ίση με h.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Για να μοντελοποιηθεί όμως το πειραματικό μεταβλητόγραμμα $2\gamma'_A(h)$ από το θεωρητικό/μοντέλο μεταβλητόγραμμα $\gamma(h)$, πρέπει να γίνουν κάποιες υποθέσεις για την ιδιότητα Z. Κι αυτό γιατί το πειραματικό μεταβλητόγραμμα $2\gamma'_A(h)$ εξαρτάται τόσο από την διανυσματική απόσταση h των σημείων, όσο και από τις θέσεις x_i αυτών, ενώ το μοντέλο μεταβλητόγραμμα δεν πρέπει να εξαρτάται από θέσεις x_i των μεταβλητών, διότι θα χαρακτηρίζει πλέον όλο το πεδίο. Με άλλα λόγια το θεωρητικό μεταβλητόγραμμα θα εξαρτάται μόνο από την διανυσματική απόσταση h των σημείων των RVs.

Η υπόθεση αυτή καλείται **στασιμότητα** (stationarity). Σύμφωνα με αυτήν :

1. Η μέση τιμή της ιδιότητας Z είναι σταθερή για όλο το πεδίο, δηλαδή είναι ανεξάρτητη της θέσης x. Άρα $E[Z(x+h)] = E[Z(x)] = m$ για όλα τα x Ε A.
2. Η συνάρτηση συμμεταβλητότητας C(h) της ιδιότητας Z δεν είναι πλέον συνάρτηση της θέσης x, αλλά μόνο της απόστασης h.

Επομένως :

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = [E\{Z^2(x)\}-m^2] + [E\{Z^2(x+h)\}-m^2] -$$
$$2[E\{Z(x)\,Z(x+h)\}-m^2] = Var\{Z(x)\} + Var\{Z(x+h)\} - 2Cov\{Z(x)\,Z(x+h)\}$$
$$= 2[C(0)-C(h)]$$

Άρα :

$$\gamma(h) = -C(h) + C(0) \qquad \text{Εξ. 2.23}$$

Που σημαίνει πως το θεωρητικό ημιμεταβλητόγραμμα ισούται με το αρνητικό της συνάρτησης συμμεταβλητότητας συν μια σταθερά που όπως θα δούμε και παρακάτω για μεγάλες τιμές του ημιμεταβλητογράμματος ισούται με τη διασπορά σ^2. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η στασιμότητα είναι μια ιδιότητα της RF Z(x) και όχι ιδιότητα της χωρικής κατανομής των z-τιμών στο πεδίο A.

Η ιδέα λοιπόν της γεωστατιστικής προσέγγισης συνοψίζεται στα τέσσαρα παρακάτω βήματα:

i. Καθορισμός του πεδίου A, το οποίο όμως πρέπει να θεωρηθεί στάσιμο για την εξαγωγή όλων των απαραίτητων στατιστικών παραμέτρων.

ii. Εξέταση όλων των δεδομένων του πεδίου A για τον υπολογισμό του πειραματικού μεταβλητογράμματος / ημιμεταβλητογράμματος.

iii. Εξομάλυνση και ολοκλήρωση του πειραματικού μεταβλητογράμματος / ημιμεταβλητογράμματος από το μοντέλο μεταβλητόγραμμα / ημιμεταβλητόγραμμα.

iv. Εφαρμογή των μεθόδων παρεμβολής με τη χρήση του μοντέλου μεταβλητογράμματος / ημιμεταβλητογράμματος. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της μεγάλης αξιοπιστίας της είναι η Kriging. Αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιεί αποκλειστικά και το GSLIB.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

2.4 Kriging

Πολλές γεωλογικές και γεωτεχνικές έρευνες χαρακτηρίζονται από μεροληπτικά (biased) δεδομένα πεδίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα δεδομένα να είναι συσχετιζόμενα (correlated) και σε συστοιχία (clustered). Η γεωστατιστική αναγνωρίζει αυτές τις δυσκολίες και παρέχει εργαλεία ποικίλων μορφών χωρικής εκτίμησης (spatial simulation). Αυτά τα εργαλεία καλούνται **Kriging** στη μνήμη του D. G. Krige, ενός Νοατιοαφρικανού μηχανικού που ήταν πρωτοπόρος στη χρήση των σταθμισμένων μέσων όρων (weighted moving averages) για την αξιολόγηση των μεταλλευμάτων.

Η μέθοδος Kriging υπερτερεί σε σχέση με τις άλλες μεθόδους παρεμβολής για αυτό και την προτιμούν οι περισσότεροι μελετητές. Κι αυτό γιατί είναι η μόνη μέθοδος που ενσωματώνει κατευθείαν το μοντέλο της χωρικής μεταβλητότητας των δεδομένων. Αυτό επιτρέπει στη δημιουργία χαρτών με διαφορετικά σενάρια παρεμβολής. Τα κριτήρια εκτίμησης του Kriging στηρίζονται σε καλά καθορισμένες στατιστικές συνθήκες, οι οποίες υπερτερούν των άλλων μεθόδων. Επιπλέον η αυτόματη αποδέσμευση (decluster) των δεδομένων που γίνεται από την Kriging, την καθιστά κατάλληλη για την επεξεργασία των γεωλογικών και γεωτεχνικών μετρήσεων.

Επίσης η μέθοδος αυτή παρέχει και ένα μέτρο εκτίμησης της ακρίβειας των παρεμβαλλόμενων τιμών μέσω των διαφορών εκτίμησης, οι οποίες παρέχουν δύο στατιστικά εργαλεία : i) κάθε εκτίμηση συνοδεύεται με μια διακύμανση και ii) η διακύμανση αυτή δεν εξαρτάται από ξεχωριστές παρατηρήσεις.

Έστω Z(x) είναι η παράμετρος που θα υποστεί την χωρική ανακατανομή (π.χ υδραυλική αγωγιμότητα, μεταφορικότητα κ.α), με το x να είναι το διάνυσμα των συντεταγμένων στο χώρο. Τοπικές τιμές της παραμέτρου είναι διαθέσιμες σε n διαφορετικές θέσεις στο πεδίο μελέτης A, και καλούνται $Zi = Z(x_i)$, i=1,…,n. Το πρόβλημα της παρεμβολής είναι το πώς θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές Z_i για την εκτίμηση μιας άλλης τιμής Zo στη θέση x_o. Η βασική ιδέα της Kriging στηρίζεται στη γραμμική παλινδρόμηση σύμφωνα με την οποία γίνεται η εκτίμηση της Zo, η οποία καλείται Zo^*. Αλλά η Kriging αποτελεί την πιο εξελιγμένη μορφή γιατί και ελαχιστοποιεί τη διαφορά Zo^* - Zo, αλλά και είναι αμερόληπτη (unbiased).

Θεωρήστε μια άγνωστη τιμή z_o ως την τιμή εξόδου της τυχαίας μεταβλητής (RV) Zo. Οι n τιμές z_i, i=1,…,n είναι οι αντίστοιχες τιμές εξόδου των n RVs Z_i, i=1,…,n. Οι n+1 RVs $Zo, Z_1, \ldots, Zn$ χαρακτηρίζονται από :

- τους μέσους τους $E\{Z_i\}=m_i$, i=1,…,n Εξ. 2.24
- τους συντελεστές συμμεταβλητότητας $Cov\{Zi,Zj\}=E\{Zi,Zj\} - m_i m_j = C_{ij}$ για όλα τα i,j = 0,…,n. Εξ. 2.25

Οι n+1 διακυμάνσεις δεν είναι άλλες από τους συντελεστές αυτομεβλητότητας

$Var\{Zi\} = E\{Zi^2\}-m_i^2 = Cii$ Εξ. 2.26

Ο συντελεστής συσχέτισης δύο οποιοδήποτε μεταβλητών Zi, Zj είναι:

$$\rho_{i,\xi} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{Cii \cdot Cjj}} \quad E\,[-1,1] \qquad \text{Εξ. 2.27}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Τέλος πρέπει να γίνει διαχωρισμός του πίνακα $\underline{K}$ (nxn) των συντελεστών διασποράς των δεδομένων

$$\underline{K} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} \qquad \text{Εξ. 2.28}$$

από τον πίνακα $\underline{k}$ (nx1) των συντελεστών διασποράς των άγνωστων

$$\underline{k} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ \vdots \\ C_{n0} \end{bmatrix} \qquad \text{Εξ. 2.29}$$

Έτσι λοιπόν η άγνωστη τιμή z_0 εκτιμάται από το γραμμικό συνδυασμό των n δεδομένων και της παραμέτρου λ_0 :

$$z_0^* = \lambda_0 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z_i \qquad \text{Εξ. 2.30}$$

Αντίστοιχα ο γραμμικός συνδυασμός των n τυχαίων μεταβλητών Zi είναι και αυτός μια τυχαία μεταβλητή και καλείται εκτιμητής :

$$Z_0^* = \lambda_0 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z_i \qquad \text{Εξ. 2.31}$$

Οι άγνωστοι του προβλήματος είναι οι συντελεστές βαρύτητας λ_i, οι οποίοι εξαρτώνται τόσο από τη θέση x_o, όσο και από τις θέσεις x_i. Το πραγματικό σφάλμα $z_0 - z_0^*$ είναι άγνωστο και δεν μπορεί να προσδιοριστεί. Όμως, κάποια στατιστικά χαρακτηριστικά του λάθους των τυχαίων μεταβλητών $Zo - Zo^*$ μπορούν να υπολογιστούν.

Η μέση τιμή του λάθους των τυχαίων μεταβλητών είναι :

$$E\{Zo - Zo^*\} = E\{Zo\} - E\{Zo^*\} = E\{Zo\} - \lambda_0 - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i E\{Zi\} = m_0 - \lambda_0 - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i m_i$$

Για να είναι αμερόληπτη η μέθοδος αυτή πρέπει μέση τιμή του σφάλματος των τυχαίων μεταβλητών να είναι μηδέν, έτσι ο συντελεστής βαρύτητας λ_0 ισούται με :

$$\lambda_0 = m_0 - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i m_i \qquad \text{Εξ. 2.32}$$

Επιπλέον :

$$Zo^* = m_0 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i [Zi - m_i] \qquad \text{Εξ. 2.33}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Ο αμερόληπτος εκτιμητής Zo^* εμφανίζεται σαν το αποτέλεσμα της γραμμικής εκτίμησης της διαφοράς $[Z_0 - m_0]$ από την διαφορά των τυχαίων μεταβλητών των δεδομένων $[Zi - m_i]$:

$$[Z_0^* - m_0] = [Z_0 - m_0]^* = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i [Zi - m_i] \qquad \text{Εξ. 2.34}$$

Μένει λοιπόν ο υπολογισμός των n συντελεστών βαρύτητας λ_i , i=1,…,n. Αυτό θα γίνει μέσω της ελαχιστοποίηση του σφάλματος της διασποράς. Θεωρώντας το σφάλμα των $\{Zo - Zo^*\}$ ως γραμμικό συνδυασμό Y των (n+1) τυχαίων μεταβλητών, έχουμε :

$$Y = Zo - Zo^* = [Z_0 - m_0] - [Z_0 - m_0]^* = \sum_{i=0}^{n} i_i [Zi - m_i] \qquad \text{Εξ. 2.35}$$

με $\begin{cases} i_0 = 1 \\ i_i = -\lambda_i,\ i=1,\ldots,n \end{cases}$

Το σφάλμα της διασποράς εκφράζεται ως το διπλό άθροισμα των συντελεστών συνδυακύμανσης Cij :

$$\mathrm{Var}Y = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n} i_i j_j Cij \qquad \text{Εξ. 2.36}$$

Τα n βάρη $i_i=-\lambda_i$, i=1,…,n είναι αυτά τα οποία θα ελαχιστοποιήσουν το σφάλμα της διασποράς VarY . Αυτό γίνεται με το μηδενισμό των n μερικών διαφορών του σφάλματος VarY σε σχέση με την καθεμία από τις n παραμέτρους i_i, i=1,…,n :

$$\frac{1}{2}\frac{\partial VarY}{\partial i_i} = \sum_{j=0}^{n} i_j C_{ij} = i_0 C_{i0} + \sum_{j=1}^{n} i_j C_{ij} = C_{i0} - \sum_{j=1}^{n} \lambda_j C_{ij} = 0, \text{ για όλα τα } i=1,\ldots,n \qquad \text{Εξ. 2.37}$$

Καταλήξαμε λοιπόν στο τελικό σύστημα των εξισώσεων γραμμικής παλινδρόμησης ή καλύτερα στο σύστημα του **Απλού (Simple) Kriging** :

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j C_{ij} = C_{i0}\ ,\ i=1,\ldots,n \qquad \text{Εξ. 2.38}$$

Το ελαχιστοποιημένο λάθος της διασποράς VarY καλείται «Simple Kriging» διασπορά και ισούται με :

$$\sigma_{SK}^2 = Var\{Z_0 - Z_o^*\} = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n} i_i i_j C_{ij} = \underbrace{C_{00} - \sum_{j=1}^{n} \lambda_j C_{0j}}_{i=0} - \underbrace{\sum_{a=1}^{n} \lambda_i C_{i0}}_{i \neq 0, j=0} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \lambda_i \lambda_j C_{ij} =$$

$$= C_{00} - 2\sum_{i=1}^{n} \lambda_i C_{i0} + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \left[\sum_{j=1}^{n} \lambda_j C_{ij} = C_{i0} \right]$$

Τελικά :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$$\sigma_{SK}^2 = Var\{Z_0 - Z_0^*\} = C_{00} - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i C_{i0} \geq 0 \qquad \text{Εξ. 2.39}$$

Η Εξ.2.38 γράφεται σε μορφή πινάκων ως εξής :

$$\underline{K} * \underline{\lambda} = \underline{k} \text{ ή } \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ \vdots \\ C_{n0} \end{bmatrix} \qquad \text{Εξ. 2.40}$$

Καθορίζοντας τον πίνακα $\underline{R}_i^T$ ως τη διαφορά των τυχαίων μεταβλητών δηλαδή $\underline{R}_i^T = [Z_1-m_1,\dots,Z_n-m_n]$, τότε ο εκτιμητής της Εξ.2.34 γράφεται σε μορφή πινάκων :

$$[Z_0-m_0^*] = \underline{\lambda}^T \underline{R}_i = \underline{k}^T \underline{K}^{-1} \underline{R}_i \qquad \text{Εξ. 2.41}$$

εφόσον $\underline{K} = \underline{K}^T$ (ο πίνακας $\underline{K}$ είναι συμμετρικός) τότε και $\underline{K}^{-1} = (\underline{K}^{-1})^T$. Και το ελαχιστοποιημένο λάθος της διασποράς γράφεται :

$$\sigma_{SK}^2 = C_{00} - \underline{\lambda}^T \underline{k} = C_{00} - \underline{k}^T \underline{K}^{-1} \underline{k} \qquad \text{Εξ. 2.42}$$

<u>Συνθήκη ανεξαρτησίας</u>

Αν υποθέσουμε ότι οι n τυχαίες μεταβλητές Z_i, i=1,…,n, είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη, τότε θα πρέπει να καλούνται ανεξάρτητες μεταβλητές και η άγνωστη Z_0 να καλείται εξαρτημένη. Ο πίνακας $\underline{K}$ των συντελεστών διασποράς των δεδομένων μετατρέπεται σε έναν διαγώνιο πίνακα:

$$\underline{K} = [C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_{nn} \end{bmatrix}, \qquad \text{Εξ. 2.43}$$

όπου $C_{ij} = \begin{cases} 0, \text{ για } i \neq j \\ C_{ii}, \text{ για } i=j \end{cases}$

Το Simple Kriging σύστημα της Εξ.2.38 γράφεται : $\lambda_i C_{ii} = C_{i0} \Rightarrow \lambda_i = C_{i0}/C_{ii}$, όμως $\rho_{i0} = C_{i0} / \sqrt{C_{ii} C_{00}} \Rightarrow \lambda_i = \rho_{i0} \frac{\sqrt{C_{00}}}{\sqrt{C_{ii}}}$ και ο Simple Kriging εκτιμητής της Εξ.2.34 γίνεται : $[Z_0 - m_0]^* = \sum_{i=1}^{n} \rho_{i0} \frac{\sqrt{C_{00}}}{\sqrt{C_{ii}}} \cdot [Z_i - m_i]$ ή $\left[\frac{Z_0 - m_0}{\sigma_0}\right]^* = \sum_{i=1}^{n} \rho_{i0} \cdot \left[\frac{Z_i - m_i}{\sigma_i}\right]$ αφού $\sigma_i = \sqrt{C_{ii}}$.

Έτσι στην περίπτωση ανεξαρτησίας των δεδομένων, τα Simple Kriging βάρη λ_i δεν είναι άλλα από τους συντελεστές συσχέτισης ρ_{oi} ανάμεσα σε κάθε δεδομένο και στην άγνωστη εξαρτημένη μεταβλητή Z_0. Όσο μεγαλύτερη η συσχέτιση ρ_{oi} ενός δεδομένου με τη Z_0, τόσο μεγαλύτερο το βάρος του. Σημειώνεται ότι :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} \rho_{i0} \neq 1 \\ \sigma_{SK}^2 = C_{00}\left[1 - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \frac{C_{i0}}{C_{00}}\right] = C_{00}\left[1 - \sum_{i=1}^{n} \rho_{i0}^2\right] \end{cases}$$

Επιπλέον, αν τα n δεδομένα είναι ανεξάρτητα και από την άγνωστη μεταβλητή Z_0, δηλαδή $\rho_{i0}=0$, τότε και ο SK εκτιμητής ισούται με τη μέση τιμή $Z_0^* = m_0$.

Στην περίπτωση μας όπου τα n δεδομένα Z_i αντιστοιχούν στην ίδια συμπεριφορά Z αλλά σε διαφορετικές θέσεις $x_i \neq x_0$, έχουμε :

$$Z^*(x_0) - m = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i [Z(x_i) - m] \qquad \text{Εξ. 2.44}$$

με m είναι η μέση τιμή των (n+1) τυχαίων μεταβλητών $Z(x_0)$, $Z(x_i)$, i=1,…,n. Καθορίζοντας τη συνάρτηση διασποράς C(h) ως τη συμμεταβλητότητα μεταξύ δύο οποιοδήποτε τυχαίων μεταβλητών Z(x), Z(x+h), που απέχουν απόσταση διανύσματος h :

$$C(h) = Cov\{Z(x),Z(x+h)\} \qquad \text{Εξ. 2.45}$$

Το Simple Kriging σύστημα γράφεται :

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j C(x_i - x_j) = C(x_i - x_0), \ i=1,\ldots,n \qquad \text{Εξ. 2.46}$$

Όπως έγινε αντιληπτό από τα παραπάνω για την εφαρμογή της Simple Kriging θεωρείται δεδομένη η γνώση της μέσης τιμής m της παραμέτρου και η οποία μάλιστα σύμφωνα με τη συνθήκη της στασιμότητας είναι ίδια σε όλο το πεδίο μελέτης. Στην περίπτωση όμως που η μέση τιμή δεν είναι γνωστή τότε χρησιμοποιείται μια άλλη μέθοδος της Kriging, η Ordinary Kriging. Εδώ αξίζει να ειπωθεί ότι υπάρχουν πολλές μέθοδοι Kriging ανάλογα με την περίπτωση του προβλήματος, όπως οι : Universal, Block, With Trend Model, With External Drift, Cokriging, Nonlinear, Indicator Probability, Soft Kriging. Αλλά δύο είναι οι ευρείας χρήσης στα συνηθισμένα προβλήματα : η Simple Kriging και η Ordinary Kriging.

Στην περίπτωση τώρα που η μέση τιμή m είναι άγνωστη ο γραμμικός εκτιμητής $Z^*(x_0)$ γράφεται όπως και πριν $Z^*(x_0) = \lambda_0 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i)$ και η μέση τιμή του λάθους είναι $E\{Z(x_0) - Z^*(x_0)\} = m - \lambda_0 - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i m = -\lambda_0 + m\left(1 - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i\right)$, η οποία πρέπει να είναι μηδέν. Αυτό πραγματοποιείται όταν $\lambda_0=0$ και $\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1$.

Έτσι, ο αμερόληπτος γραμμικός εκτιμητής $Z(x_0)$ γράφεται :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i), \text{ με } \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \qquad \text{Εξ. 2.47}$$

Το σφάλμα της διασποράς γράφεται :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$$\sigma_E^2 = Var\{Z(x_o) - Z^*(x_0)\} = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{n} i_i i_j C(x_i - x_j) \qquad \text{Εξ. 2.48}$$

με $\begin{cases} i_0 = 1 \\ i_i = -\lambda_i,\ i=1,\ldots,n \\ C(x_i-x_j) = Cov\{Z(x_i)-Z(x_j)\} \end{cases}$

Όμως πρέπει να ελαχιστοποιηθεί το λάθος της διασποράς για να διατηρώντας την αμεροληψία δηλαδή τη συνθήκη $\sum_{i=1}^{n}\lambda_i = 1$. Αυτό ισοδυναμεί σε βελτιστοποίηση κάτω από γραμμικούς περιορισμούς. Σε αυτό το σημείο θα γίνει χρήση της μεθόδου Lagrange, με τη δημιουργία της συνάρτησης S των (n+1) παραμέτρων : i) των συντελεστών βάρους λ_i, i=1,…,n, και ii) της παραμέτρου Lagrange 2μ και καθορίζεται ως εξής :

$$S(\lambda_i, i = 1,\ldots n; \mu) = \sigma_E^2 + 2\mu\left[\sum_{i=1}^{v}\lambda_i - 1\right] \qquad \text{Εξ. 2.49}$$

Η ελαχιστοποίηση της S πραγματοποιείται με τον μηδενισμό των (n+1) μερικών παραγώγων της :

$$-\frac{1}{2}\frac{\partial S}{\partial \lambda_i} = \sum_{j=0}^{n} i_j C(x_i - x_j) - \mu = 0, \quad i=1,\ldots,n,$$

$$-\frac{1}{2}\frac{\partial S}{\partial \mu} = \sum_{i=1}^{n}\lambda_i - 1 = 0$$

Οι πρώτες n εξισώσεις ξαναγράφονται :

$$C(x_i - x_0) - \sum_{j=1}^{n}\lambda_j C(x_i - x_j) - \mu = 0 \text{ ή } C(x_i - x_0) = \sum_{j=1}^{n}\lambda_j C(x_i - x_j) + \mu \qquad \text{Εξ. 2.50}$$

Τελικά, οι (n+1) άγνωστοι λ_i, μ, υπολογίζονται από το (n+1) γραμμικό σύστημα, το οποίο καλείται «Ordinary Kriging» σύστημα και είναι:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n}\lambda_j C(x_i - x_j) + \mu = C(x_i - x_0), \quad i=1,\ldots,n, \\ \sum_{j=1}^{n}\lambda_j = 1 \end{cases} \qquad \text{Εξ. 2.51}$$

το οποίο μπορεί να γραφτεί και σε όρους μεταβλητογράμματος μιας και αυτό είναι που χρησιμοποιείται στη γεωστατική και πιο συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n}\lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x_0), \quad i=1,\ldots,n, \\ \sum_{j=1}^{n}\lambda_j = 1 \end{cases} \qquad \text{Εξ. 2.52}$$

και σε μορφή πινάκων θα έχουμε :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \gamma_{n3} & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \text{Εξ. 2.53}$$

Το ελαχιστοποιημένο λάθος της διασποράς το οποίο καλείται Ordinary Kriging διασπορά είναι :

$$\sigma_{OK}^2 = E\left\{\left[Z(x_0) - Z^*(x_0)\right]^2\right\} = C(0) - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i C(x_i - x_j) - \mu \geq 0 \qquad \text{Εξ. 2.54}$$

<u>Συνθήκη ανεξαρτησίας</u>

Εάν οι n τυχαίες μεταβλητές $Z(x_i)$ των δεδομένων είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, ο πίνακας $[C(x_i-x_j)]$ των συντελεστών διασποράς των δεδομένων μετατρέπεται σε έναν διαγώνιο πίνακα, με στοιχεία της κυρίας διαγωνίου την τυπική διασπορά $C(0)=Var\{Z(x)\}$. Το OK σύστημα της Εξ.2.51 γίνεται:

$$\begin{cases} \lambda_i C(0) + \mu = C(x_i - x_0), & i=1,\ldots,n, \\ \sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \end{cases} \qquad \text{Εξ. 2.55}$$

ή

$$\begin{cases} \lambda_i = \dfrac{C(x_i - x_0)}{C(0)} - \dfrac{\mu}{C(0)} = \rho(x_i - x_0) - \dfrac{\mu}{C(0)} \\ -\mu = \dfrac{C(0)}{\mu}\left[1 - \sum_{i=1}^{n} \rho(x_i - x_0)\right] \end{cases}$$

οπότε :

$$\sigma_{OK}^2 = C(0) \cdot \left[1 - \sum_{i=1}^{n} \rho^2(x_i - x_0)\right] - \mu\left[1 - \sum_{i=1}^{n} \rho(x_i - x_0)\right] \geq 0$$

με $\rho(h) = C(h)/C(0)$ Ε $[-1,+1]$ να είναι διάγραμμα συσχέτισης (correlogram), το οποίο μετρά τη συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών Z(x), Z(x+h), που απέχουν απόσταση διανύσματος h.

Επιπλέον αν τα n δεδομένα είναι ανεξάρτητα και από την άγνωστη τυχαία μεταβλητή $Z(x_0)$ τότε $\rho(x_i-x_0) = 0$ και το OK σύστημα της Εξ.2.51 γράφεται :

$$\begin{cases} \lambda_i = 1/n, & i=1,\ldots,n, \\ -\mu = C(0)/n \end{cases} \qquad \text{Εξ. 2.56}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Δηλαδή σε αυτήν την περίπτωση ο ΟΚ εκτιμητής γίνεται ίσος με τη μέση τιμή: $Z^*(x_i) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z(x_i)$ και $\sigma_{OK}^2 = C(0) + \frac{C(0)}{n} \geq 0$.

Κλείνοντας εδώ την παρουσίαση της μεθόδου Kriging πρέπει να σημειωθεί ότι τα Simple Kriging και Ordinary Kriging συστήματα των Εξ.2.39 και Εξ.2.51 αντίστοιχα καλούνται στη βιβλιογραφία και στα υπολογιστικά μοντέλα ως «Best Linear Unbiased Estimator» ή BLUE, ένα ακρωνύμιο στο οποίο αναφέρονται τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου Kriging έναντι των άλλων μεθόδων χωρικής παρεμβολής (Journel, 1989).

2.5 Αρχές της Στοχαστικής Προσομοίωσης

Αν θεωρήσουμε την κατανομή σε ένα πεδίο A μιας (ή και περισσοτέρων) τυχαίας συμπεριφοράς *RV* z(u), u ε A, τότε στοχαστική προσομοίωση θα ονομάσουμε τη διαδικασία παραγωγής εναλλακτικών, ίσης πιθανότητας μοντέλων-απεικονίσεων της χωρικής κατανομής της z(u). Οι απεικονίσεις $\{z^{(l)}(u), u \in A\}$, l = 1,…L παριστάνουν L πιθανές εικόνες της χωρικής κατανομής των τιμών της z(u) στο πεδίο A. Κάθε απεικόνιση καλείται «στοχαστική εικόνα» και αντικατοπτρίζει τις ιδιότητες που επιβάλλονται από το μοντέλο τυχαίας συνάρτησης *RF* Z(u). Επίσης όσες περισσότερες ιδιότητες προκύπτουν από τα δεδομένα και ενσωματώνονται στο *RF* μοντέλο Z(u) ή μέσω του αλγορίθμου προσομοίωσης, τόσο καλύτερο θα είναι το *RF* μοντέλο Z(u) ή οι προσομοιωμένες απεικονίσεις.

Όταν οι τιμές της μεταβλητής των απεικονίσεων που προκύπτουν από την στοχαστική προσομοίωση είναι οι ίδιες με τις τιμές που είχαν τα δεδομένα στα σημεία αυτά, τότε η προσομοίωση ονομάζεται «**υπό όρους**» ή «**εξαρτημένη**» προσομοίωση:

$$z^{(l)}(u_\alpha) = z(u_\alpha), z(u), \forall\ l \qquad \text{Εξ. 2.57}$$

Στην αντίθετη περίπτωση, η προσομοίωση καλείται «**άνευ όρων**» ή «**ανεξάρτητη**» και δεν απαιτείται να υπάρχουν σημειακές τιμές των δεδομένων μέσα στην περιοχή, απλά μόνο η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των δειγμάτων (Delhomme 1979).

Η μεταβλητή z(u) μπορεί να είναι είτε συνεχής, όπως το πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα ή η συγκέντρωση μιας μολυσματικής ουσίας, είτε όχι όπως η παρουσία ενός συγκεκριμένου τύπου πετρώματος ή η παρουσία φυτοκάλυψης. Είναι φανερό πως στη παρούσα μελέτη η μεταβλητή z(u) είναι συνεχής, μιας και έχει να κάνει με την υδραυλική αγωγιμότητα.

Η εξαρτημένη προσομοίωση αναπτύχθηκε αρχικά για να διορθώσει την επίδραση της εξομάλυνσης που παρουσιάζεται στους χάρτες, οι οποίοι προέκυπταν από τη μέθοδο Kriging. Κι αυτό γιατί οι εκτιμήσεις της Kriging είναι σταθμισμένοι μέσοι όροι των πραγματικών δεδομένων με αποτέλεσμα να έχουν λιγότερη χωρική διακύμανση από αυτά. Τυπικοί αλγόριθμοι εξαρτημένης προσομοίωσης αλλάζουν την ελαχιστοποίηση της υπό εκτίμηση διακύμανσης με την παραγωγή ενός μεταβλητογράμματος / συμμεταβλητότητας, το οποίο αντιμετωπίζεται σαν ένα μοντέλο χωρικής μεταβλητότητας. Ένας εξομαλυμένος χάρτης είναι κατάλληλος για να παρουσιάσει ολικές τάσεις, σε αντίθεση με τους εξαρτημένους προσομοιωμένους χάρτες οι οποίοι είναι κατάλληλοι για μελέτες που είναι ευαίσθητες σε συνθήκες τοπικής

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

μεταβλητότητας, όπως προσομοιώσεις ροών. Ένα σύνολο επίσης από εξαρτημένους προσομοιωμένους χάρτες παρέχει μια κάποια μέτρηση της αβεβαιότητας για τις συμπεριφορές της χωρικής ανακατανομής.

Οι στοχαστικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται για να παρέχουν μια αριθμητική και οπτική εκτίμηση της χωρικής αβεβαιότητας πέρα από την *ccdf* Prob{Z(u)≤z(n)}. Αυτές οι *ccdf* μετρούν μόνο την αβεβαιότητα που επικρατεί σε μια συγκεκριμένη θέση u, αλλά όχι κάποια ένδειξη για την ενωμένη αβεβαιότητα που επικρατεί σε πολλές θέσεις. Για παράδειγμα, οι θέσεις ενός υποσυνόλου B ε A, οι οποίες είναι u_j ε B c A. Η κατανομή της πιθανότητας της μέσης επιφάνειας $1/|B|\int_B Z(u)du$ ή η πιθανότητα όλες οι τιμές $Z(u)_j$ ταυτόχρονα να υπερβαίνουν ένα όριο z, δεν μπορούν να προκύψουν από ένα σετ αμετάβλητων ccdf Prob{Z(u)≤z(n)}, u_j ε B, αλλά από ένα σετ στοχαστικών εικόνων.

Ισοπιθανότητα απεικονίσεων

Ένα σύνολο από L απεικονίσεις ενός αλγορίθμου προσομοίωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει τις πιθανότητες εμφάνισης συγκεκριμένων συναρτήσεων από αυτές τις απεικονίσεις, μόνο αν οι L αυτές απεικονίσεις είναι ίσης πιθανότητας, που σημαίνει ότι κάθε μια από αυτές έχει την ίδια πιθανότητα εμφάνισης σε σχέση με τις υπόλοιπες άλλες. Αυτή η ισοπιθανότητα επιτυγχάνεται αν κάθε απεικόνιση μπορεί να αναγνωρισθεί με ένα αρχικό τυχαίο αριθμό (seed number) που είναι ανομοιόμορφα κατανεμημένος στο διάστημα [0,1]. Στην πράξη επιτυγχάνεται εάν κάθε απεικόνιση μπορεί να αναπαραχθεί ακριβώς ξανατρέχοντας τον αλγόριθμο προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τον ίδιο αρχικό τυχαίο (*seed)* αριθμό. Είναι σαφές πως η ισοπιθανότητα αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης που περιέχει το δικό του *RF* μοντέλο, όλες τι παραμέτρους του, τον αλγόριθμό του και τον κώδικα του. Άλλο μοντέλο προσομοίωσης ή άλλη μορφής *RF* μοντέλου, δίνει διαφορετικά σύνολα απεικονίσεων που οδηγούν σε διαφορετικές εκτιμήσεις πιθανοτήτων.

Αβεβαιότητα των Μοντέλων

Επειδή όλες οι εκτιμήσεις αβεβαιότητας εξαρτώνται από το *RF* μοντέλο, και συγκεκριμένα από τις παραμέτρους του όπως οι τιμές της cdf, ή ο τύπος και η απόκλιση του βαριογράμματος, δημιουργήθηκε η επιθυμία η αβεβαιότητα να προστεθεί σε αυτές. Αυτό σημαίνει ότι κάθε μοντέλο θα χαρακτηρίζεται από την αβεβαιότητά του. Το πρόβλημα είναι ότι όσο αυξάνεται η τάξη σε κάθε μοντέλο, τόσο αυτό στηρίζεται λιγότερο στα αρχικά του δεδομένα, με αποτέλεσμα να αυξάνει ο βαθμός αβεβαιότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η αβεβαιότητα της απόκλιση ενός μεταβλητογράμματος ή μιας συμμεταβλητότητας. Εξαιτίας των αραιών στο χώρο δεδομένων, όλα τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κανένα για τη ρύθμιση της αβεβαιότητας του μοντέλου. Υιοθετώντας μοντέλα υψηλής τάξης, τα οποία δεν βασίζονται και τόσο πολύ στα αρχικά δεδομένα δεν προστίθεται καμιά αντικειμενικότητα στην αβεβαιότητα του μοντέλου. Γι' αυτό και είναι προτιμητέα η ανάλυση ευαισθησίας στις παραμέτρους του μοντέλου και ιδιαίτερα στις παραμέτρους

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

πρώτης τάξης, που καθορίζουν αποφάσεις, όπως ο αριθμός των πληθυσμών, ο βαθμός του πεδίου στασιμότητας, παρά σε παραμέτρους δεύτερης τάξης, όπως οι αποκλίσεις του μεταβλητογράμματος ή μιας συμμεταβλητότητας.

Σφάλμα Προσομοίωσης

Η επίδραση της εξομάλυνσης στη μέθοδο Kriging και γενικά σε κάθε τύπο χαμηλού φίλτρου παρεμβολής, οφείλεται στη συνιστώσα του σφάλματος που δεν λαμβάνεται υπόψη. Αν θεωρήσουμε την τυχαία συνάρτηση (*RF*) Z(u), ως το άθροισμα της εκτίμησης $Z^*(u)$ και του ανταποκρινόμενου σφάλματος R(u), τότε :

$$Z(u) = Z^*(u) + R(u) \qquad \text{Εξ. 2.58}$$

Η μέθοδος Kriging για παράδειγμα θα παρείχε μόνο την εκτίμηση $Z^*(u)$, υπό την επίδραση της εξομάλυνσης. Για την αποκατάσταση της πλήρους απόκλισης του *RF* μοντέλου, κάποιος θα σκεφτόταν να προσομοιώσει την τυχαία συνάρτηση του σφάλματος με μηδενική μέση τιμή και σωστή τυπική απόκλιση και συμμεταβλητότητας. Η προσομοιωμένη τιμή z θα είναι το άθροισμα της μοναδικής εκτιμώμενης τιμής και του προσομοιωμένου σφάλματος :

$$z_c^{(l)}(u) = z^*(u) + r^{(l)}(u) \qquad \text{Εξ. 2.59}$$

Η ιδέα είναι απλή, αλλά απαιτεί δύο αυστηρές συνθήκες :

1. Η συνιστώσα του σφάλματος R(u) πρέπει να είναι ανεξάρτητη ή τουλάχιστον ορθογώνια στην εκτίμηση $Z^*(u)$. Πράγματι, η τιμή του σφάλματος $r^{(l)}(u)$ προσομοιώνεται ανεξάρτητα και μετά προστίθεται στην εκτιμημένη τιμή $z^*(u)$.
2. Η τυχαία συνάρτηση R(u) που μοντελοποιεί το σφάλμα, πρέπει να έχει την ίδια χωρική κατανομή ή τουλάχιστον την ίδια συμμεταβλητότητα με αυτή του πραγματικού σφάλματος. Έτσι η προσομοιωμένη τιμή $z_c^{(l)}(u)$ θα έχει την ίδια συνδυακύμανση και επομένως την ίδια τυπική απόκλιση με τις πραγματικές τιμές z(u).

Η πρώτη συνθήκη πραγματοποιείται αν ο εκτιμητής $Z^*(u)$ καθορίζεται από ορθογώνια προβολή της Z(u) μέσα στο χώρο των δεδομένων, στην περίπτωση όπου το βέλος του σφάλματος $Z^*(u)$ - Z(u) είναι ορθογώνιο στην εκτίμηση $Z^*(u)$. Δηλαδή όταν η $Z^*(u)$ είναι εκτίμηση της Simple Kriging της Z(u).

Η δεύτερη συνθήκη είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί αφότου η συμμεταβλητότητα του σφάλματος είναι άγνωστη. Ακόμη χειρότερα δεν είναι στάσιμη ακόμη και αν το *RF* μοντέλο της Z(u) είναι στάσιμο κι αυτό γιατί ο σχηματισμός των δεδομένων που χρησιμοποιούνται από τη μια θέση u στην άλλη είναι διαφορετικός. Η λύση είναι να επιλεγούν οι τιμές του σφάλματος από μια άσκηση προσομοιωμένης εκτίμησης, η οποία εκτελείται με τον ίδιο ακριβώς σχηματισμό των δεδομένων.

Για την ακρίβεια, έστω μια μη εξαρτημένη προσομοιωμένη απεικόνιση $z^{(l)}(u)$, διαθέσιμη σε όλες τις θέσεις ακόμη και σε αυτές των δεδομένων. Αυτή η προσομοίωση έχει την ίδια συμμεταβλητότητα με το *RF* μοντέλο Z(u). Οι προσομοιωμένες τιμές $z^{(l)}(u_\alpha)$, α=1,…n παραμένουν στις θέσεις των n δεδομένων και ο αλγόριθμος της εκτίμησης (Kriging) που στηρίχθηκε πάνω στα πραγματικά δεδομένα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

επαναλαμβάνεται. Αυτό παρέχει μια προσομοίωση των εκτιμημένων τιμών $z^{*(l)}(u)$, καθώς και των προσομοιωμένων λαθών $r^{(l)}(u) = z^{(l)}(u) - z^{*(l)}(u)$. Αυτά τα προσομοιωμένα σφάλματα προστίθενται μετά στην πραγματική προσομοιωμένη τιμή $z^{(l)}(u)$, χρησιμοποιώντας τις πραγματικές τιμές των δεδομένων $z(u_\alpha)$:

$$z^{(l)}(u) = z^*(u) + [\, z^{(l)}(u) - z^{*(l)}(u) \,] \qquad \text{Εξ. 2.60}$$

Εάν ο αλγόριθμος προσομοίωσης είναι ακριβής, όπως στην Kriging, οι τιμές των δεδομένων εξαρτώνται από τις θέσεις u_a, έτσι $z^{(l)}(u_\alpha) = z^{*(l)}(u_\alpha)$ που συνεπάγεται $z^{(l)}(u_\alpha) = z^*(u_\alpha) = z(u_\alpha)$, $\forall\, \alpha=1,\ldots,n$. Ο εξαρτημένος αλγόριθμος που χαρακτηρίζεται από την παραπάνω εξίσωση απαιτεί μια προγενέστερη μη εξαρτημένη προσομοίωση για την παραγωγή της $z^{(l)}(u)$ και δύο μεθόδους Kriging για την παραγωγή της $z^*(u)$ και της $z^{*(l)}(u)$. Στην πραγματικότητα μόνο ένα σύνολο από Kriging βάρη απαιτούνται μιας και τόσο η συνάρτηση της συνδυακύμανσης, όσο και ο σχηματισμός των δεδομένων είναι κοινά στις εκτιμήσεις $z^*(u)$ και της $z^{*(l)}(u)$.

Εργοδικότητα

Ένας αλγόριθμος προσομοίωσης βοηθά στη διαλογή απεικονίσεων που ανακλούν τη στατιστική ανάλυση που προέκυψε από τα δεδομένα. Το ερώτημα είναι πόσο καλά αυτά τα στατιστικά πρέπει να αναπαραχθούν. Δεδομένου ότι τα στατιστικά του μοντέλου προέρχονται από στατιστικά δείγματα που είναι αβέβαια, λόγω του περιορισμένου αριθμού των δειγμάτων, η ακριβής αναπαραγωγή αυτών από κάθε προσομοιωμένη απεικόνιση να μην είναι η επιθυμητή.

Έστω ένα παράδειγμα στο οποίο γίνεται διαλογή από ένα στάσιμο *RF* μοντέλο Gauss $Z(u)$, το οποίο χαρακτηρίζεται από την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας *cdf* $F(z)$ και τη συμμεταβλητότητα $C_\gamma(h)$ της κανονικής (*normal score)* μετατροπής του, $Y(u) = G^{-1}(F(Z(u)))$, όπου η $G(y)$ είναι η τυπικά κανονική (*standard normal*) *cdf*. Έστω $z^{(l)}(u)$, $u \in A$, είναι μια συγκεκριμένη απεικόνιση του *RF* μοντέλο $Z(u)$ σε ένα πεπερασμένο πεδίο A και $F^{(l)}(z)$, $C_\gamma^{(l)}(h)$ είναι η ανταποκρινόμενη αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας *cdf* και η κανονική τυπική απόκλιση, τότε η $C_\gamma^{(l)}(h)$ θα αποτελεί την συμμεταβλητότητα των προσομοιωμένων τιμών $y^{(l)}(u)$. Οι εργοδικές διακυμάνσεις αναφέρονται στην ασυμφωνία που υπάρχει ανάμεσα στα στατιστικά της κάθε απεικόνισης $F^{(l)}(z)$, $C_\gamma^{(l)}(h)$ και στις ανταποκρινόμενες παραμέτρους του μοντέλου $F(z)$ και $G(y)$.

Η στάσιμη τυχαία συνάρτηση *RF* $Z(u)$ είναι *εργοδική* στην παράμετρο μ εάν τα ανταποκρινόμενα στατιστικά της απεικόνισης $\mu^{(l)}$, $\forall$ l, τείνουν προς το μ καθώς το μέγεθος του πεδίου A αυξάνεται. Η παράμετρος μ συνήθως λαμβάνεται ως η στάσιμη μέση τιμή της τυχαίας συνάρτησης *RF,* για παράδειγμα η μέση τιμή της αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας *cdf.* Η ιδέα της εργοδικότητας μπορεί να επεκταθεί και σε οποιαδήποτε άλλη παράμετρο του μοντέλου.

Επιπλέον, θεωρώντας ότι η $Z(u)$ είναι στάσιμη και εργοδική και το πεδίο προσομοίωσης είναι αρκετά μεγάλο, θα περίμενε κανείς τα στατιστικά από κάθε απεικόνιση l να αναπαράγουν με ακρίβεια τις παραμέτρους του μοντέλου. Το μέγεθος του προσομοιωμένου πεδίου A, αρκετά μεγάλο για να επιτρέπει την ισχύ της εργοδικότητας, εξαρτάται από τον τύπο της τυχαίας συνάρτησης *RF,* η οποία

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

επιλέγεται και από το εύρος της ετερογένειάς του, όπως πολύ σωστά χαρακτηρίζονται από τον τύπο και το εύρος της συμμεταβλητότητα ς. Όσο πιο συνεχής η συνδυακύμανση στο h=0 και όσο πιο μεγάλο το εύρος της συνδυακύμανσης , τόσο μεγαλύτερο το πεδίο Α θα είναι πριν επιτευχθεί η εργοδικότητα. Έχει παρατηρηθεί πως τα *RF* μοντέλα Gauss παρέχουν μεγαλύτερη εργοδικότητα.

Επιλογή Απεικόνισης

Το θέμα της εργοδικότητας προέκυψε από την ανάγκη των μελετητών να επιλέξουν μια από τις απεικονίσεις, που προκύπτουν από κάθε προσομοίωση, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται η στοχαστική προσομοίωση σαν μια πιο εξελιγμένη μέθοδο χωρικής παρεμβολής. Στη χειρότερη περίπτωση επιλέγεται η πρώτη απεικόνιση χωρίς περαιτέρω επεξεργασία, με αποτέλεσμα τα στατιστικά του μοντέλου να μην συγκλίνουν. Η μόνη σύγκλιση που εγγυάται η προσομοίωση είναι ένα μέσος όρος (αναμενόμενη τιμή) πέρα από ένα μεγάλο αριθμού απεικονίσεων. Όσο λιγότερο εργοδικό το *RF* μοντέλο που επιλέγεται, τόσο περισσότερες απεικονίσεις απαιτούνται για να προσεγγίσουν την αναμενόμενη τιμή.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, από τις πολλές απεικονίσεις που παράγονται μία ή ελάχιστες από αυτές οδηγούνται στην περαιτέρω επεξεργασία. Διάφορα κριτήρια χρησιμοποιούνται για την επιλογή της κατάλληλης απεικόνισης, όπως από την σύγκλιση των στατιστικών της απεικόνισης στις παραμέτρους του μοντέλου, την υποκειμενική συνολική εμφάνιση των αποτελεσμάτων της ή και, σε κάποιες περιπτώσεις, από την σύγκλισή της σε ένα στοιχείο ή μια ιδιότητα που δεν ήταν από τα αρχικά δεδομένα του μοντέλου. Οι απεικονίσεις που θα επιλεχθούν πρέπει να είναι οι περισσότερο εξαρτημένες από τα πραγματικά δεδομένα, είτε σκληρά είτε απαλά και έτσι θα δώσουν καλύτερα αριθμητικά μοντέλα. Από την άλλη πλευρά η διαδικασία επιλογής των καταλληλότερων απεικονίσεων εξαλείφει το βαθμό της αβεβαιότητας, λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η στοχαστική προσομοίωση.

Το μεγάλο ερώτημα βέβαια έγκειται στον αριθμό των απεικονίσεων που πρέπει να παραχθούν. Η απάντηση είναι αρκετά πολύπλοκη και υποκειμενική. Εξαρτάται από την κρίση και την εμπειρία του μελετητή, καθώς και από τη φύση του φαινόμενου το οποίο προσομοιώνεται. Το σίγουρο είναι πως απαιτούνται παραπάνω από μία για να υπάρχει η αίσθηση της αβεβαιότητας. Ακόμη και στην περίπτωση που παραχθούν δύο απεικονίσεις, εξίσου κατάλληλες, θα υπάρχουν διαφορές των αποτελεσμάτων τους, γεγονός που απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό. Ο αριθμός των απεικονίσεων πρέπει να είναι ο ελάχιστος δυνατός ώστε να δίνει τη σωστή εκτίμηση της αβεβαιότητας του μοντέλου.

2.6 Γεωστατιστική Βιβλιοθήκη (GeoStatistical LIBrary - GSLIB)

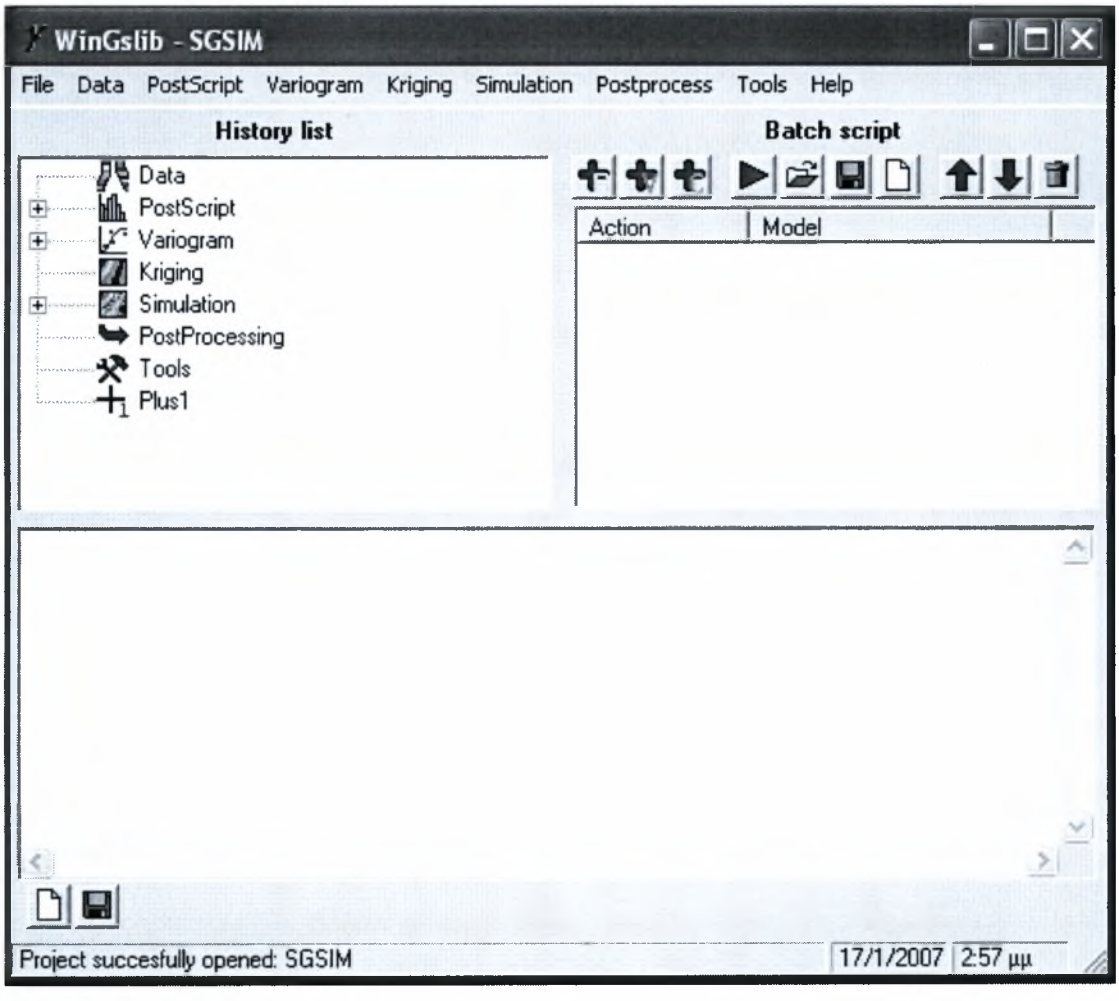
Η ονομασία GSLIB είναι ένα ακρωνύμιο για τη Γεωστατιστική Βιβλιοθήκη. Αυτό το όνομα χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή γεωστατιστικών προγραμμάτων, τα οποία είναι γραμμένα σε Fortran και που αναπτύχθηκαν στο Πανεπιστήμιο του Stanford τα τελευταία 15 χρόνια (Deutsch, Journel, 1992).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Το πρόγραμμα το οποίο συνεργάζεται με το Λειτουργικό Σύστημα των Windows καλείται WinGslib. Μια πρώτη γνωριμία με το περιβάλλον του WinGslib φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Είναι το κύριο μενού που εμφανίζεται με το που ανοίγει το πρόγραμμα.

Έχοντας ως οδηγό το κεντρικό menu της παρακάτω εικόνας θα γίνει η παρουσίαση των λειτουργιών του προγράμματος. Αυτές είναι οι εξής έξι:

1. Data (manipulation)
2. Postscript (plots)
3. Variograms
4. Kriging
5. Simulation
6. Postprocess



Σχήμα 2.2 Κεντρικό menu του WinGslib.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι καθόλου τυχαία η σειρά των λειτουργιών έτσι όπως εμφανίζονται στο menu του προγράμματος αφού πίσω από αυτές τις λειτουργίες βρίσκονται τα απαραίτητα εργαλεία για την γεωστατιστική προσέγγιση, τα οποία

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

πρέπει να εκτελεσθούν με την παραπάνω σειρά. Δηλαδή εντελώς χονδρικά και πριν αρχίσει η εκτενής παρουσίαση των εργαλείων το Wingslib οδηγεί τον μελετητή στη γεωστατιστική προσέγγιση του προβλήματος με τα εξής ακόλουθα βήματα :

- Αρχικά στο πρώτο βήμα γίνεται η τροποποίηση / μετατροπή των δεδομένων αν αυτό απαιτείται. Σε κάποιες περιπτώσεις όταν αυτό δεν είναι αναγκαίο το πρώτο βήμα μπορεί να παραληφθεί.
- Στο δεύτερο βήμα δημιουργούνται όλα τα απαραίτητα στατιστικά γραφήματα τα οποία θα βοηθήσουν σε μια πρώτη εξαγωγή συμπερασμάτων για τη στατιστική συμπεριφορά των δεδομένων και τα οποία θα χρειαστούν στα παρακάτω βήματα.
- Στο τρίτο βήμα γίνεται η κατασκευή τόσο του πειραματικού μεταβλητογράμματος αλλά και του μοντέλου του.
- Στο τέταρτο βήμα ξεκινά η χωρική παρεμβολή της υπό μελέτης μεταβλητής με τη μέθοδο Kriging που χρησιμοποιεί αποκλειστικά το Wingslib.
- Στο πέμπτο βήμα κρύβεται και η μεγάλη επιτυχία του GSLIB, αφού επιτυγχάνεται εδώ η παραγωγή πολλαπλών απεικονίσεων / χαρτών του πεδίου με την υπό μελέτη μεταβλητή μέσω μια σειράς στοχαστικών αλγορίθμων.

2.6.1 Data

Σε αυτό το menu συναντώνται τα παρακάτω προγράμματα :

1. Το <u>σύστημα αλλαγής συντεταγμένων (Change Coordinates System ή rotcoord)</u> το οποίο επιτυγχάνει την μετάθεση και περιστροφή των δεδομένων από ένα σύστημα συντεταγμένων XY σε ένα άλλο X'Y'. Αυτό χρειάζεται σε περιπτώσεις που οι άξονες των συντεταγμένων πρέπει να συμπίπτουν με κάποιο άξονα συγκεκριμένου ενδιαφέροντος.

```
Parameters for ROTCOORD
************************
```

```
START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat     \file with data
1   2                   \columns for original X and Y coordinates
rotcoord.out            \file for output with new coordinates
0.0     0.0             \origin of rotated system in original coordinates
30.0                    \rotation angle (in degrees clockwise)
0                       \0=convert to rotated coordinate system
                        \1=convert from rotated system to original system
```

Σχήμα 2.3 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του rotcoord.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

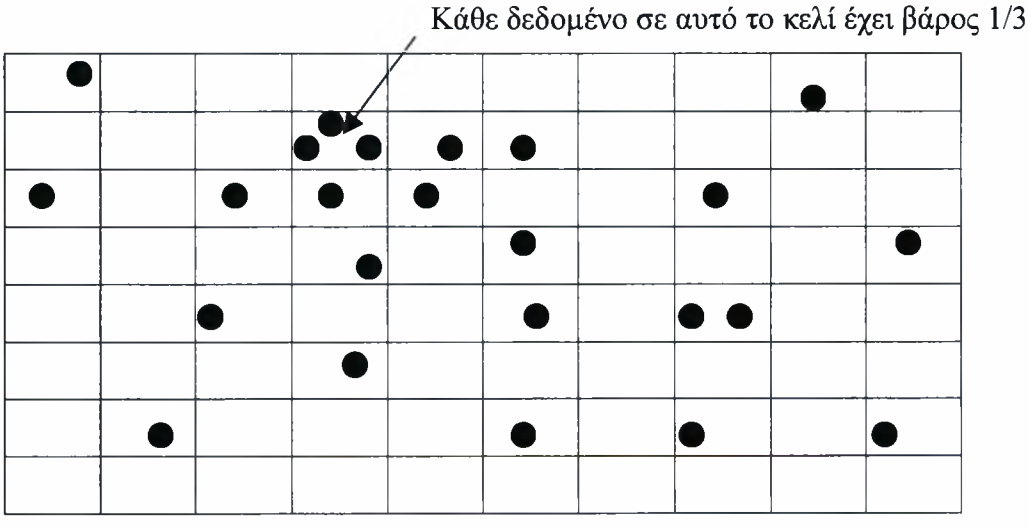
- **datafl :** το αρχείο, με τις αρχικές συντεταγμένες.
- **icolx, icoly :** οι στήλες του πάνω αρχείου που περιέχονται οι x και y συντεταγμένες αντίστοιχα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **outfl :** το τελικό αρχείο που περιέχει τις καινούριες συντεταγμένες.
- **xorigin, yorigin :** η αρχή των αξόνων του αρχικού συστήματος συντεταγμένων.
- **angle :** η ακτίνα περιστροφής
- **switch :** για 0 περιστρέφεται στο νέο σύστημα συντεταγμένων, για 1 θεωρεί ότι το αρχικό σύστημα είναι το τελικό και κάνει την ανάποδη περιστροφή.

2. Η <u>αποδέσμευση κελιών (Cell decluster ή declus)</u> : Στην πραγματικότητα τα αρχικά δεδομένα εμφανίζονται αρκετά συχνά σε συστοιχίες. Είναι δηλαδή συγκεντρωμένα σε μία περιοχή του υπό μελέτη πεδίου. Αν όχι όλα, ένα μεγάλο ποσοστό αυτών. Όμως για την σωστή στατιστική ανάλυσή τους που θα οδηγήσει και σε σωστή προσομοίωση απαιτείται ένα ιστόγραμμα, το οποίο να είναι αντιπροσωπευτικό όλου του υπό μελέτη πεδίου. Για να προκύψει μια αντιπροσωπευτική κατανομή, ένας τρόπος είναι να προσδιοριστούν βάρη αποδέσμευσης για κάθε κελί, όπου η τιμή αυτών να είναι μικρή εκεί που υπάρχουν πολλά δεδομένα και μεγάλη στην αντίθετη περίπτωση. Όταν η τιμή ενός αποδεσμευμένου βάρους είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα, τότε το δείγμα είναι υπέρβαρο και το αντίθετο όταν είναι μικρότερο της μονάδας. Τα βάρη αυτά μετά θα χρησιμοποιηθούν ως συχνότητες εμφάνισης για να προκύψει το ιστόγραμμα ή η *cdf*.

Η βασική ιδέα είναι να χωριστεί το υπό μελέτη πεδίο σε L υποπεδία, που περιέχουν τους δεσμούς των δεδομένων και να εφαρμοστεί ίση κατανομή βαρύτητας σε κάθε πεδίο, η οποία να ακολουθείται από τους μέσους όρους των στατιστικών μέσων των κελιών. Η μέθοδος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα για ένα 2D πρόβλημα.



Σχήμα 2.4 Ένα 2D παράδειγμα της μεθόδου αποδέσμευσης.

Πρώτα, δημιουργείται ένα τυπικός κάνναβος. Το βάρος που αντιστοιχεί σε κάθε δεδομένο είναι αντιστρόφως ανάλογο του αριθμού των δεδομένων που υπάρχουν στο κελί.

Κάθε δεδομένο που υπάρχει σε ένα κελί a_l δέχεται βάρος l/n_l. Όπου a_l είναι το εμβαδόν (σε 3D θα είναι ο όγκος) του κελιού l και n_l είναι ο αριθμός των δεδομένων που υπάρχουν στο σε αυτό το κελί. Τα κελιά, τα οποία δεν έχουν δεδομένα δεν λαμβάνονται υπόψη στην διαδικασία.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

```
                Parameters for DECLUS
                *********************
START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat      \file with data
1  2  0  3               \ columns for X, Y, Z, and variable
-1.0e21    1.0e21        \ trimming limits
declus.sum                \file for summary output
declus.out               \file for output with data & weights
1.0  1.0                 \Y and Z cell anisotropy (Ysize=size*Yanis)
0                        \0=look for minimum declustered mean (1=max)
24  1.0  25.0            \number of cell sizes, min size, max size
5                        \number of origin offsets
```

Σχήμα 2.5 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του declus.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει τη υπό αποδέσμευση μεταβλητή.
- **icolx, icoly, icolz, icolvr** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών που υπάρχουν στο αρχείο των δεδομένων. Δηλαδή τα τρία πρώτα για τις συντεταγμένες x, y, z, και το τέταρτο για την υπό αποδέσμευση μεταβλητή.

```
Dallas Lead Case Study
3
X Location
Y Location
Variable
 722.0  5406.0   192.0
 808.0  6818.0    88.0
 824.0  4516.0   302.0
 864.0  7499.0   201.0
 877.0  6136.0   277.0
1439.0  4561.0    92.0
1520.0  6041.0   617.0
1529.0  3966.0    79.0
1533.0  6213.0   163.0
1572.0  3181.0    71.0
1691.0  7607.0    69.0
1591.0  9355.0   153.0
1595.0  6555.0   183.0
1643.0  6295.0    27.0
1669.0  6842.0    44.0
1710.0  9350.0   164.0
2117.0  6760.0    83.0
2244.0  5393.0   166.0
```

Σχήμα 2.6 Ένα τυπικό αρχείο εισόδου στο οποίο φαίνονται τα δεδομένα εισόδου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **sumfl :** το αρχείο εξόδου που περιέχει όλα τα μεγέθη των κελιών και τις μέσες τιμές των αποδεσμευμένων βαρών.
- **outfl :** το αρχείο που περιέχει τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας.
- **anisy, anisz :** ο παράγοντας ανισοτροπίας για να ληφθούν τα κελιά ορθογώνια. Το μέγεθος του κελιού στην οριζόντια κατεύθυνση x πολλαπλασιάζεται με αυτές τις παραμέτρους για να προκύψουν τα μεγέθη των κελιών στην z και y κατεύθυνση. Για εάν το μέγεθος του κελιού στη οριζόντια κατεύθυνση x είναι 10 και anisy = 2, anisz = 3, τότε το μέγεθος του κελιού στη κατεύθυνση y είναι 20 και στην κατεύθυνση z είναι 30.
- **minmax :** εάν επιλεχθεί το μηδέν γίνεται αναζήτηση του ελάχιστου μέσου, ενώ στην περίπτωση της μονάδας γίνεται αναζήτηση του μέγιστου μέσου.
- **ncell, cmin, cmax :** ο αριθμός των κελιών, το ελάχιστο κελί και το μέγιστο. Απευθύνεται για την οριζόντια κατεύθυνση x, αφού για τις άλλες κατευθύνσεις υπάρχει ο παράγοντας ανισοτροπίας.
- **noff :** παράγοντας αντιστάθμισης για να μην προκύπτουν ακραίες τιμές στα κελιά. Προτεινόμενοι αριθμοί είναι 4 για 2D και 8 για 3D.

3. Ο <u>κανονικός μετασχηματισμός (Normal Score Transfom ή nscore)</u> : Η Ακολουθιακή Προσομοίωση Gauss (**S**equential **G**aussian **Sim**ulation) δουλεύει με τις κανονικές (*normal score*) τιμές των αρχικών δεδομένων. Η προσομοίωση πραγματοποιείται στον κανονικό (*normal*) χώρο και μετά οι προσομοιωμένες τιμές μετασχηματίζονται προς τα πίσω για να επιστρέψουν στον πραγματικό χώρο.

Αν θεωρήσουμε τα αρχικά δεδομένα z_i, i = 1,…,n, το καθένα με μία συγκεκριμένη πιθανότητα p_i, i = 1,…,n (με $\sum_{i=1}^{n} p_i = 1$). Εάν η διαδικασία της αποδέσμευσης βαρών δε θεωρεί σημαντική, τότε όλες οι πιθανότητες p_i θα είναι ίσες με 1/n. Τα δεσμευμένα δεδομένα z_i κατατάσσονται τυχαία. Όταν υπάρχει μία μεγάλη συστοιχία από αυτά σε ένα δεσμό, τότε πρέπει να καταταχθούν σύμφωνα με τον *nscore* μετασχηματισμό. Αυτό μπορεί να γίνει με μια διαδικασία που στηρίζεται στη φύση των δεδομένων ή με τη διάσπαση των δεσμών σύμφωνα με τους γειτονικούς μέσους όρους των δεδομένων.

Εξαιτίας των περιορισμένων δεδομένων που υπάρχουν στα περισσότερα προβλήματα, κάποιος θα έπρεπε να θεωρήσει μία μη μηδενική πιθανότητα για τιμές μικρότερες της ελάχιστης τιμής των δεδομένων, ή μεγαλύτερες από τη μέγιστη τιμή αυτών. Επιπλέον κάποιες υποθέσεις πρέπει να γίνουν για τα άκρα των κατανομών των πιθανοτήτων, οι οποίες πρέπει να εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του κάθε προβλήματος.

Μία κοινή λύση είναι όλες οι προηγούμενες πιθανότητες p_i να έχουν άθροισμα πολύ μικρότερο της μονάδας, π.χ n/n+1 εάν υπάρχουν n δεδομένα. Αυτή η λύση είναι ευαίσθητη στον αριθμό των δεδομένων και δεν προσφέρει ευελιξία στη μοντελοποίηση των άκρων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Για την αποφυγή αυτού του ελαττώματος, η αθροιστική πιθανότητα *cdf* του κάθε δεδομένου αναθεωρείται και είναι ίση στο μέσο όρο της αρχικής τιμή της και του επόμενου μικρότερου δεδομένου. Αυτό επιτρέπει πεπερασμένες πιθανότητες να είναι μικρότερες από τη μικρότερη τιμή των δεδομένων και μεγαλύτερες από τη μέγιστη τιμή αυτών.

Έστω c_i είναι η αθροιστική πιθανότητα του ι – οστού μεγαλύτερου δεδομένου z_i ($c_i = \sum_{j=1}^{i} p_j$). Ο *normal score* μετασχηματισμός y_i του δεδομένου z_i ισούται με :

$$y_i = G^{-1}\left(\frac{c_i + c_{i-1}}{2}\right) \qquad \text{Εξ. 2.61}$$

με G(y) να είναι η τυπικά κανονική cdf, $y_c = G^{-1}(c)$ να είναι η ανταποκρινόμενη τυπικά κανονική c ποσότητα και $c_0 = 0$. Τα περιορισμένα δεδομένα μπορεί να δώσουν μια *cdf* που να είναι ασυνεχής και όχι αντιπροσωπευτική όλου του πληθυσμού. Για αυτό το λόγο το ιστόγραμμα των δεδομένων μπορεί να εξομαλυνθεί με το πρόγραμμα histsmth. Έτσι το προκύπτουν ιστόγραμμα είναι έτοιμο να χρησιμοποιηθεί στο *normal score* μετασχηματισμό (και η παράμετρος ismooth = 1 σε αυτήν την περίπτωση).

Εάν η z_i είναι η l – οστή τιμή από ένα σύνολο L δειγμάτων που βρίσκονται στην k – οστή τάξη (z_{k-1}, z_k) του εξομαλυμένου ιστογράμματος, τότε η αθροιστική πιθανότητα είναι :

$$c_i = \sum_{j=1}^{k-1} p_j + \frac{1}{L} p_k \qquad \text{Εξ. 2.62}$$

με το p_k να είναι η εξομαλυμένη πιθανότητα της τάξης (z_{k-1}, z_k) . Ο *normal score* μετασχηματισμός y_i του δεδομένου z_i ισούται με :

$$y_i = G^{-1}(c_l), \ i=1,\ldots,n \qquad \text{Εξ. 2.63}$$

Οι τιμές p_k θα είναι ήδη αποδεσμευμένες, εάν στη εξομάλυνση του ιστογράμματος λήφθηκαν υπόψη τα βάρη αποδέσμευσης. Εάν πάντως τα δεδομένα εισόδου έχουν υποστεί εξομάλυνση τότε ο *normal score* μετασχηματισμός θα δώσει καλύτερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

```
Parameters for NSCORE
*********************

START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat          \file with data
3   5                        \ columns for variable and weight
-1.0e21   1.0e21             \ trimming limits
0                            \1=transform according to specified ref. dist.
../histsmth/histsmth.out     \ file with reference dist.
1   2                        \ columns for variable and weight
nscore.out                   \file for output
nscore.trn                   \file for output transformation table
```

Σχήμα 2.7 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του nscore.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει τη μεταβλητή που θα υποβληθεί στο *normal score* μετασχηματισμό και τα αποδεσμευμένα βάρη (κατ' επιλογή). Ίδιας μορφής με αυτό του Σχήματος 2.6.
- **icolvr, icolwt** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών που υπάρχουν στο αρχείο των δεδομένων. Δηλαδή ο πρώτος για τη μεταβλητή και ο δεύτερος για τα αποδεσμευμένα βάρη. Εάν icolwt ≤ 0 τα αποδεσμευμένα βάρη έχουν όλα την ίδια τιμή.
- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **ismooth** : Επιλέγεται το 1 στην περίπτωση που τα δεδομένα έχουν περάσει από *normal score* μετασχηματισμό, αλλιώς δηλώνεται το 0.
- **smoothfl** : το αρχείο της εξομαλυμένης κατανομής.
- **icolvr, icolwt** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών που υπάρχουν στο αρχείο smoothfl. Δηλαδή ο πρώτος για τη μεταβλητή και ο δεύτερος για τα αποδεσμευμένα βάρη.
- **outfl** : το αρχείο εξόδου που περιέχει τις *normal score* τιμές.
- **transfl** : το αρχείο εξόδου που περιέχει το αναλυτικό πίνακα των τρεξιμάτων του *normal score* μετασχηματισμού. Περιέχει ζεύγη των z και y τιμών με τα z να είναι τα αρχικά δεδομένα και y οι ανταποκρινόμενες *normal score* τιμές.

4. Ο <u>προς τα πίσω κανονικός μετασχηματισμός (Normal Score Back Transformation ή bactr)</u> :

Ο προς τα πίσω μετασχηματισμός (back transform) z_i της τυπικά κανονικής μεταβλητής y_i δίνεται από : $z_i = F^{-1}(G(y_i))$, όπου F(z) είναι η (αποδεσμευμένη) *cdf* των αρχικών δεδομένων, εξομαλυμένη ή μη.

Σχεδόν πάντα, η τιμή $G(y_i)$ δε θα ανταποκριθεί ακριβώς σε μια αρχική *cdf* τιμή F. Επιπλέον θα απαιτείται κάποια παρεμβολή μεταξύ των αρχικών τιμών z_i ή παρέκταση ανάμεσα στην ελάχιστη και μέγιστη των z_i. Γραμμική παρεμβολή πάντα εκτελείται ανάμεσα σε δύο γνωστές τιμές. Μια ποικιλία επιλογών είναι διαθέσιμη για τη μεταχείριση των άκρων των κατανομών.

Αυτός ο προς τα πίσω μετασχηματισμός βοηθά στην ακριβής αναπαραγωγή της αρχικής *cdf* F(z) , εκτός των δύο ακραίων τιμών. Πρέπει να επισημανθεί κι εδώ ότι είναι προτιμητέα τα εξομαλυμένα ιστογράμματα.

Ο προς τα πίσω μετασχηματισμός πραγματοποιείται αυτόματα στο πρόγραμμα *sgsim*, αλλά υπάρχουν περιπτώσεις που πρέπει να εκτελεστεί ξεχωριστά.

Parameters for BACKTR
****

START OF PARAMETERS:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

```
../nscore/nscore.out      \file with data
4                         \ column with Gaussian variable
-1.0e21   1.0e21          \ trimming limits
backtr.out                \file for output
../nscore/nscore.trn      \file with input transformation table
0.0 60.0                  \minimum and maximum data value
1    0.0                  \lower tail option and parameter
1   60.0                  \upper tail option and parameter
```

Σχήμα 2.8 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του backtr.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο που περιέχει τις *normal score* τιμές
- **ivr** : ο αριθμός της στήλης με τις *normal score* τιμές.

```
Small Data Set (part A)
4
Xloc
Yloc
Variable
Normal Scores
38.50 28.50  0.5740 -0.493
45.50 29.50  1.2110  0.517
41.50 26.50  2.1270  0.461
39.50 31.50  8.3400  1.483
38.50 31.50 18.6420  2.119
39.50 30.50  7.9380  1.439
39.50 32.50  2.2840  0.515
40.50 31.50  2.5090  0.603
```

Σχήμα 2.9 Ένα τυπικό αρχείο εισόδου στο οποίο φαίνονται τα δεδομένα εισόδου.

- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **outfl** : το αρχείο εξόδου που περιέχει τις προς τα πίσω μετασχηματισμένες τιμές.
- **transfl** : το αρχείο εισόδου που περιέχει το αναλυτικό πίνακα των τρεξιμάτων του προς τα πίσω μετασχηματισμού. Περιέχει ζεύγη των z και y τιμών με τα z να είναι τα αρχικά δεδομένα και y οι ανταποκρινόμενες *normal score* τιμές.
- **z_{min}, z_{max} :** η ελάχιστη και μέγιστη τιμή για να χρησιμοποιηθούν για την παρέκταση των άκρων.
- **ltail, ltpar :** καθορίζει τον τρόπο του προς τα πίσω μετασχηματισμού στο τέλος της κάθε κατανομής. Όταν tail=1 εκτελείται γραμμική παρεμβολή στο κατώτερο όριο z_{min}, ενώ όταν tail=2 εκτελείται εκθετική παρεμβολή στο κατώτερο όριο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

z_{min}. Στην παράμετρος ltpar δίνεται ο αριθμός z_{min}. Εξαρτάται από το χρήστη και προκύπτει από διάγραμμα της αθροιστικής κατανομής των αρχικών δεδομένων.

- **utail, utpar :** καθορίζει τον τρόπο του προς τα πίσω μετασχηματισμού στην αρχή της κάθε κατανομής. Όταν tail=1 εκτελείται γραμμική παρεμβολή στο ανώτερο όριο z_{max}, ενώ όταν tail=2 εκτελείται εκθετική παρεμβολή στο ανώτερο όριο z_{max}. Στην παράμετρος utpar δίνεται ο αριθμός z_{max}. Εξαρτάται από το χρήστη και προκύπτει από διάγραμμα της αθροιστικής κατανομής των αρχικών δεδομένων.

5. Ο Γενικός μετασχηματισμός (General Transformation ή trans) λαμβάνει τα δεδομένα που έχει μια οποιαδήποτε κατανομή και τα μετατρέπει σε άλλα της αρεσκείας μας. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης ή για ανάλυση ευαισθησίας.

```
                Parameters for TRANS
                ********************

START OF PARAMETERS:
1                    \1=continuous, 0=categorical
../data/true.dat     \file with reference distribution
1   0                \columns for variable and weight(0=none)
../data/cluster.dat  \file with original distributions
3   0                \columns for variable and weight(0=none)
-1.0e21  1.0e21      \trimming limits
trans.out            \file for transformed distributions
1                    \number of realizations or "sets" to trans
50  50  1            \categorical: nx, ny, nz: size of 3-D model
 2   2  0            \wx,wy,wz:wind   ow size for tie-breaking
1000                 \continuous: number to transform per "set"
0.0   75.0           \minimum and maximum values
1     1.0            \lower tail: option, parameter
1    75.0            \upper tail: option, parameter
0                    \honor local data? (1=yes, 0=no)
kt3d.out             \file with estimation variance
2                    \column number
0.5                  \control parameter ( 0.33 < w < 3.0 )
69069                \random number seed (conditioning cat.)
```

Σχήμα 2.10 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του trans.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **vartype :** ο τύπος της μεταβλητής (1=συνεχής, 0=διακριτή)
- **refdist :** το αρχείο εισόδου με την επιθυμητή κατανομή
- **ivr και iwt :** οι στήλες που πάνω περιέχουν τις τιμές και τα αποδεσμευμένα βάρη(αν υπάρχουν)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **datafl :** το αρχείο εισόδου με την αρχική κατανομή, η οποία θα υποστεί τον μετασχηματισμό.
- **ivrd και iwtd :** οι στήλες που πάνω περιέχουν τις τιμές και τα αποδεσμευμένα βάρη(αν υπάρχουν)
- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **outfl** : το αρχείο εξόδου που περιέχει τις μετασχηματισμένες τιμές.
- **nsets :** ο αριθμός των ομάδων των κατανομών που θα μετασχηματιστούν. Κάθε ομάδα μετασχηματίζεται χωριστά.
- **nx,ny και nz :** το μέγεθος του 3D μοντέλου για διακριτές τιμές μόνο.
- **wx,wy και wz :** το μέγεθος του 3D μοντέλου πάλι για διακριτές τιμές μόνο.
- **nxyz :** ο αριθμός των τιμών που θα μετασχηματιστούν, για συνεχής μεταβλητές.
- **z_{min}, z_{max} :** η ελάχιστη και μέγιστη τιμή για να χρησιμοποιηθούν για την παρέκταση των άκρων.
- **ltail, ltpar :** καθορίζει τον τρόπο του μετασχηματισμού στο τέλος της κάθε κατανομής. Όταν tail=1 εκτελείται γραμμική παρεμβολή στο κατώτερο όριο z_{min}, ενώ όταν tail=2 εκτελείται εκθετική παρεμβολή στο κατώτερο όριο z_{min}. Στην παράμετρος ltpar δίνεται ο αριθμός z_{min}. Εξαρτάται από το χρήστη και προκύπτει από διάγραμμα της αθροιστικής κατανομής των αρχικών δεδομένων.
- **utail, utpar :** καθορίζει τον τρόπο του μετασχηματισμού στην αρχή της κάθε κατανομής. Όταν tail=1 εκτελείται γραμμική παρεμβολή στο ανώτερο όριο z_{max}, ενώ όταν tail=2 εκτελείται εκθετική παρεμβολή στο ανώτερο όριο z_{max}. Στην παράμετρος utpar δίνεται ο αριθμός z_{max}. Εξαρτάται από το χρήστη και προκύπτει από διάγραμμα της αθροιστικής κατανομής των αρχικών δεδομένων.
- **transcon :** περιορισμός του μετασχηματισμού στα αρχικά δεδομένα (1=ναι, 0=όχι)
- **estvfl :** το αρχείο εισόδου με την εκτιμώμενη διασπορά.
- **iconlev :** ο αριθμός της στήλης του παραπάνω αρχείου που περιέχει την εκτιμώμενη διασπορά.
- **omega :** η παράμετρος ελέγχου του βάρους που θα δοθεί στα αρχικά δεδομένα ($0.33<\omega<3.0$)
- **seed :** ο αριθμός κλειδί που χρησιμοποιείται στην περίπτωση της διακριτής μεταβλητής.

6. Η Markov-Bayes Ρύθμιση ή bicalib απαιτείται για την προσομοίωση διακριτών μεταβλητών και δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης στην παρούσα εργασία.

2.6.2 Postscript

Υπάρχουν τα ακόλουθα προγράμματα:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

1. Histogram ή histpl, στο οποίο παρουσιάζεται το ιστόγραμμα των τιμών των δεδομένων μαζί με ένα πίνακα που δείχνει τις στατιστικές παραμέτρους.

```
Parameters for HISTPLT
**********************

START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat      \file with data
3   0                    \ columns for variable and weight
-1.0e21  1.0e21          \ trimming limits
histplt.ps               \file for PostScript output
 0.01    100.0           \attribute minimum and maximum
-1                       \frequency maximum (<0 for automatic)
25                       \number of classes
1                        \0=arithmetic, 1=log scaling
0                        \0=frequency,  1=cumulative histogram
200                      \ number of cum. quantiles (<0 for all)
2                        \number of decimal places (<0 for auto.)
Clustered Data           \title
1.5                      \positioning of stats (L to R: -1 to 1)
-1.1e21                  \reference value for box plot
```

Σχήμα 2.11 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του histplt.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει τη μεταβλητή.
- **icolvr, icolwt** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών που υπάρχουν στο αρχείο των δεδομένων. Δηλαδή ο πρώτος για τη μεταβλητή και ο δεύτερος για τα αποδεσμευμένα βάρη. Εάν icolwt ≤ 0 τα αποδεσμευμένα βάρη έχουν όλα την ίδια τιμή.
- $\mathbf{t_{min}}$, $\mathbf{t_{max}}$ **:** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **outfl :** το αρχείο εξόδου.
- **hmin και hmax :** το ελάχιστο και μέγιστο όριο του άξονα της μεταβλητής.
- **fmax :** το ελάχιστο όριο για τον άξονα της συχνότητας. Αν **fmax<0** τότε θα πάρει αυτόματα μια τιμή.
- **ncl :** ο αριθμός των τάξεων του ιστογράμματος.
- **ilog :** για 1 χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα, για 0 η αριθμητική
- **icum :** για 1 προκύπτει το αθροιστικό ιστόγραμμα, για 0 το ιστόγραμμα συχνότητας.
- **ndec :** ο αριθμός των δεκαδικών των δεδομένων. Αν **ndec=0**, τότε το διαλέγει αυτόματα το πρόγραμμα.
- **title :** ο τίτλος για το ιστόγραμμα μέχρι και 40 χαρακτήρες.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **pos :** καθορίζει τη θέση του πίνακα με τα στατιστικά στοιχεία. Για –1 στα αριστερά, για 1 στα δεξιά.
- **refval :** μια οποιαδήποτε τιμή αρκετά μικρή.

2. Probability Paper ή probplt, που δεν είναι άλλο από τη γραφική παράσταση της αθροιστικής πιθανότητας κάθε δεδομένου σε σχέση με την τιμή του. Ο άξονας της αθροιστικής πιθανότητας είναι τέτοιος ώστε τα σημεία να πέφτουν σε ευθεία γραμμή όταν τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή. Δίνεται και η δυνατότητα της επιλογής της λογαριθμικής αθροιστικής πιθανότητας.

```
            Parameters for PROBPLT
            **********************
START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat        \file with data
3   5                      \ columns for variable and weight
0.0   1.0e21               \ trimming limits
probplt.ps                 \file for PostScript output
99                         \number of points to plot (<0 for all)
1                          \0=arithmetic, 1=log scaling
0.01  30.0   5.0           \min,max,increment for labeling
Clustered Data             \title
```

Σχήμα 2.12 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του histplt.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει τη μεταβλητή.
- **icolvr, icolwt** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών που υπάρχουν στο αρχείο των δεδομένων. Δηλαδή ο πρώτος για τη μεταβλητή και ο δεύτερος για τα αποδεσμευμένα βάρη. Εάν icolwt ≤ 0 τα αποδεσμευμένα βάρη έχουν όλα την ίδια τιμή.
- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **outfl :** το αρχείο εξόδου.
- **ilog :** για 1 χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα, για 0 η αριθμητική
- **pmin, pmax και pinc :** ελάχιστο και μέγιστο όριο για το διάγραμμα και η αύξηση για τον άξονα της μεταβλητής.
- **title :** ο τίτλος για το διάγραμμα μέχρι και 40 χαρακτήρες.

3. Scattergram ή scatplt, που είναι το διάγραμμα διασποράς δύο διαφορετικών μεταβλητών τόσο σε αριθμητική όσο και σε λογαριθμική κλίμακα.

```
            Parameters for SCATPLT
            **********************
```


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

```
START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat          \file with data
4  3  5   0                  \columns for X, Y, wt, third var.
-999.  1.0e21                \ trimming limits
scatplt.ps                   \file for Postscript output
0.0    20.0    0             \X min and max, (0=arith, 1=log)
0.0    20.0    0             \Y min and max, (0=arith, 1=log)
1                            \plot every nth data point
1.0                          \bullet size: 0.1(sml)-1(reg)-10(big)
0.0    2.0                   \limits for third variable gray scale
Primary vs Secondary         \title
```

Σχήμα 2.13 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του scatplt.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει την μεταβλητή.
- **icolx, icoly, icolwt, και icol3vr** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών που υπάρχουν στο αρχείο των δεδομένων. Δηλαδή τα τρία πρώτα για τις συντεταγμένες x, y, z, και το τέταρτο για την άλλη μεταβλητή.
- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **outfl :** το αρχείο που περιέχει τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας.
- **xmin, xmax και xlog :** μέγιστο και ελάχιστο όριο για τον άξονα x. Αν **xlog=0** λαμβάνεται η αριθμητική κλίμακα, αν **xlog=1** λαμβάνεται η λογαριθμική.
- **ymin, ymax και ylog :** μέγιστο και ελάχιστο όριο για τον άξονα y. Αν **ylog=0** λαμβάνεται η αριθμητική κλίμακα, αν **ylog=1** λαμβάνεται η λογαριθμική.
- **nthpoint :** τυπώνονται τα δεδομένα που απέχουν αυτό το διάστημα. Συνήθως 1.
- **dotsiz :** το μέγεθος της βούλας των σημείων (0.1=μικρό, 1=κανονικό, 10=μεγάλο)
- **gmin και gmax :** ελάχιστο και μέγιστο όριο για την αναπαράσταση της $3^{ης}$ μεταβλητής(σπάνια).
- **title :** ο τίτλος για το διάγραμμα μέχρι και 40 χαρακτήρες.

4. <u>Q-Q and P-P Plots ή qpplt</u> : Το πρώτο γράφημα συγκρίνει τα ποσοστημόρια των κατανομών δύο διαφορετικών μεταβλητών. Το δεύτερο συγκρίνει τις αθροιστικές πιθανότητες τους.

Parameters for QPPLT
****

```
START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat          \file with first set of data (X axis)
```


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

```
3   0                          \columns for variable and weight
../data/data.dat               \file with second set of data (Y axis)
3   0                          \columns for variable and weight
0.0      1.0e21                \trimming limits
qpplt.ps                       \file for PostScript output
1                              \0=Q-Q plot, 1=P-P plot
2300                           \number of points to plot (<0 for all)
0.0    20.0                    \X minimum and maximum
0.0    20.0                    \Y minimum and maximum
1                              \0=arithmetic, 1=log scaling
Small Data Set Vs Clustered Data  \Title
```

Σχήμα 2.14 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του qpplt.

- **datafl1 :** το αρχείο, το οποίο περιέχει την πρώτη μεταβλητή.
- **ivr1 και iwt1**: Δίνεται ο αριθμός των στηλών που υπάρχουν στο πάνω αρχείο των δεδομένων. Δηλαδή ο πρώτος για τη μεταβλητή και ο δεύτερος για τα αποδεσμευμένα βάρη. Εάν iwt1 ≤ 0 τα αποδεσμευμένα βάρη έχουν όλα την ίδια τιμή.
- **Datafl2 :** το αρχείο, το οποίο περιέχει τη δεύτερη μεταβλητή.
- **Ivr2 και iwt2**: Δίνεται ο αριθμός των στηλών που υπάρχουν στο πάνω αρχείο των δεδομένων. Δηλαδή ο πρώτος για τη μεταβλητή και ο δεύτερος για τα αποδεσμευμένα βάρη. Εάν iwt2 ≤ 0 τα αποδεσμευμένα βάρη έχουν όλα την ίδια τιμή.
- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **outfl :** το αρχείο που περιέχει τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας.
- **qqorpp :** για 0= Q-Q διάγραμμα, για 1=P-P διάγραμμα.
- **npoints :** ο αριθμός των σημείων που θα χρειαστούν.
- **xmin, xmax :** μέγιστο και ελάχιστο όριο για τον άξονα x.
- **ymin, ymax :** μέγιστο και ελάχιστο όριο για τον άξονα y.
- **ilog :** για 1 χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα, για 0 η αριθμητική.
- **title :** ο τίτλος για το διάγραμμα μέχρι και 40 χαρακτήρες.

5. Location Map ή locmap : είναι το γράφημα των διεσπαρμένων δειγματοληπτικών τιμών μιας μεταβλητής στο XY σύστημα, το οποίο μπορεί να είναι είτε σε έγχρωμο είτε σε ασπρόμαυρο φόντο. Τα σημεία αυτά απεικονίζονται σα κύκλοι και παρουσιάζεται έτσι η πυκνότητα – συγκέντρωση της μεταβλητής.

```
Parameters for LOCMAP
*********************

START OF PARAMETERS:
```


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

```
../data/cluster.dat          \file with data
1  2  3                      \columns for X, Y, variable
-990.  1.0e21                \trimming limits
locmap.ps                    \file for PostScript output
0.0    50.                   \xmn,xmx
0.0    50.                   \ymn,ymx
0                            \0=data values, 1=cross validation
1                            \0=arithmetic,  1=log scaling
1                            \0=gray scale,  1=color scale
0                            \0=no labels,   1=label each location
0.01   10.0   1.             \gray/color scale: min, max, increm
0.5                          \l abel size: 0.1(sml)-1(reg)-10(big)
Locations of Clustered Data  \Title
```

Σχήμα 2.15 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του locmap.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει την μεταβλητή.
- **icolx, icoly, και icolvr** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών που υπάρχουν στο αρχείο των δεδομένων. Δηλαδή τα δύο πρώτα για τις συντεταγμένες x, y, και το τρίτο για τη μεταβλητή.
- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **outfl :** το αρχείο που περιέχει τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας.
- **xmn, xmx :** μέγιστο και ελάχιστο όριο για τον άξονα x.
- **ymn, ymx :** μέγιστο και ελάχιστο όριο για τον άξονα y.
- **idata :** όταν αναφέρεται σε τιμές μιας μεταβλητής είναι μηδέν, ενώ όταν οι δειγματοληπτικές τιμές προέρχονται από διασταυρωμένη επικύρωση τότε είναι άσσος.
- **ilog :** για 1 χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα, για 0 η αριθμητική.
- **igray :** για 1 χρησιμοποιείται το έγχρωμο φόντο, για 0 το ασπρόμαυρο φόντο.
- **ilabel :** για 1 κάθε τιμή εμφανίζεται σε κάθε σημείο, για 0 δεν εμφανίζονται οι τιμές.
- **gmin, gmax και ginc:** ελάχιστο και μέγιστο όριο για την ετικέτα της μεταβλητής καθώς και το ενδιάμεσο διάστημα.
- **labsiz :** το μέγεθος της ετικέτας (0.1 το μικρό, 1 το κανονικό, 10 το μεγάλο)
- **title :** ο τίτλος για το διάγραμμα μέχρι και 40 χαρακτήρες.

6. <u>2-D Map ή pixelplt</u> : η γραφική αναπαράσταση μιας τομής των τιμών του καννάβου μιας μεταβλητής στο 2-D χώρο, με τη διαφορά (σε σχέση με το Locmap) ότι οι τιμές αυτές βρίσκονται σε κάνναβο. Η διαφορά με το Locmap είναι ότι εδώ οι τιμές αυτές είναι το αποτέλεσμα ή της Kriging ή κάποιας μεθόδου προσομοίωσης. Όπως και στο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Locmap έτσι κι εδώ η αναπαράσταση μπορεί να είναι είτε σε έγχρωμο είτε σε ασπρόμαυρο φόντο.

```
                    Parameters for PIXELPLT
                    ***********************

START OF PARAMETERS:
../data/true.dat            \file with gridded data
1                           \column number for variable
-1.0e21  1.0e21             \data trimming limits
pixelplt.ps                 \file with PostScript output
1                           \realization number
50   0.5    1.0             \nx,xmn,xsiz
50   0.5    1.0             \ny,ymn,ysiz
1    0.0    1.0             \nz,zmn,zsiz
1                           \slice orientation: 1=XY, 2=XZ, 3=YZ
1                           \slice number
2-D Reference Data          \Title
East                        \X label
North                       \Y label
1                           \0=arithmetic, 1=log scaling
1                           \0=gray scale, 1=color scale
0                           \0=continuous, 1=categorical
0.01  100.0   2.0           \continuous:  min, max, increm.
4                           \categorical: number of categories
1    3   Code_One           \category(), code(), name()
2    1   Code_Two
3    6   Code_Three
4   10   Code_Four
```

Σχήμα 2.16 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του pixelplt.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει την μεταβλητή.
- **icolx** : Δίνεται ο αριθμός τής στήλης του παραπάνω αρχείου που περιέχει τις τιμές της μεταβλητής.
- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **outfl :** το αρχείο που περιέχει τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας.
- **ireal :** ο αριθμός της απεικόνισης που επιθυμεί ο χρήστης στην περίπτωση της στοχαστικής προσομοίωσης.
- **nx, xmn, xsiz :** ο αριθμός των κόμβων για τον άξονα x, η αρχή του και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- **ny, ymn, ysiz :** ο αριθμός των κόμβων για τον άξονα y, η αρχή του και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **nz, zmn, zsiz :** ο αριθμός των κόμβων για τον άξονα z, η αρχή του και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- **slice :** ο τύπος της τομής 1=οριζόντια XY τομή, 2=κάθετη XZ τομή, 3=κάθετη YZ τομή.
- **sliceno :** ο αριθμός της τομής. Αν slice=1 τότε ο sliceno θα είναι μεταξύ του 1 και του nz, αν slice=2 τότε ο sliceno θα είναι μεταξύ του 1 και του ny και αν slice=3 τότε ο sliceno θα είναι μεταξύ του 1 και του nx.
- **title :** ο τίτλος για το διάγραμμα μέχρι και 40 χαρακτήρες.
- **xlabel :** ο τίτλος για τον άξονα x μέχρι και 40 χαρακτήρες.
- **ylabel :** ο τίτλος για τον άξονα y μέχρι και 40 χαρακτήρες.
- **idata :** όταν αναφέρεται σε τιμές μιας μεταβλητής είναι μηδέν, ενώ όταν οι δειγματοληπτικές τιμές προέρχονται από διασταυρωμένη επικύρωση τότε είναι άσσος.
- **ilog :** για 1 χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα, για 0 η αριθμητική.
- **igray :** για 1 χρησιμοποιείται το έγχρωμο φόντο, για 0 το ασπρόμαυρο φόντο.
- **icont :** για 1 όταν η μεταβλητή είναι διακριτοποιημένη και για 0 όταν είναι συνεχής.
- **ilabel :** για 1 κάθε τιμή εμφανίζεται σε κάθε σημείο, για 0 δεν εμφανίζονται οι τιμές.
- **gmin, gmax και ginc:** ελάχιστο και μέγιστο όριο για την ετικέτα της μεταβλητής καθώς και το ενδιάμεσο διάστημα.
- **ncat :** ο αριθμός των κατηγοριών.
- **code, colorcode και name :** ο ακέραιος αριθμός για την κατηγορία της μεταβλητής, ο κωδικός για το χρώμα της μεταβλητής, και ο τίτλος της μεταβλητής.

7. Bivariate Probability Density Map ή bivplt : τυπώνει το συνδυασμό των αποτελεσμάτων των histsmth και scatsmth, αλλά χρησιμοποιείται σπανίως για αυτό και θεωρήθηκε περιττή η παρουσίασή του.

8. Variogram Plot ή vargplt : τυπώνει το πειραματικό μεταβλητόγραμμα (το οποίο είναι αποτέλεσμα των προγραμμάτων gam ή gamv) και του μοντέλου μεταβλητογράμματος (που κατασκευάζεται από το πρόγραμμα vmodel). Η χρησιμότητα του αρκετά μεγάλη μιας και με αυτό το πρόγραμμα γίνεται η μοντελοποίηση του πειραματικού βαριογράμματος.

```
                    Parameters for VARGPLT
                    **********************

START OF PARAMETERS:
vargplt.ps          -file for PostScript output
2                   -number of variograms to plot
0.0   20.0          -distance  limits (from data if max<min)
```


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

```
0.0   1.2                -variogram limits (from data if max<min)
First Semivariogram      -Title for variogram
gamv.out                  -1 file with variogram data
1   1   1   1   1        - variogram #, dash #, pts?, line?, color
vmodel.var                -2 file with variogram data
1   3   0   1   10       - variogram #, dash #, pts?, line?, color
```

Σχήμα 2.17 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του vargplt.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **outfl :** το αρχείο που περιέχει τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας.
- **nvarg :** ο αριθμός των μεταβλητογραμμάτων που θα τυπωθούν.
- **xmin και xmax :** τα όρια της απόστασης (άξονας x).
- **ymin και ymax :** τα όρια του μεταβλητογράμματος (άξονας Y).
- **title :** ο τίτλος για το διάγραμμα μέχρι και 40 χαρακτήρες.
- **datafl1 :** το αρχείο που περιέχει το πρώτο μεταβλητόγραμμα
- **varcode, dashcode, linecode, colorcode :** κωδικοί αριθμοί για τον αριθμό του μεταβλητογράμματος που υπάρχει στο κάθε αρχείο (στην περίπτωση που ένα αρχείο έχει παραπάνω από ένα μεταβλητόγραμμα), κωδικός για τον αν η γραμμή θα είναι διακεκομμένη ή μη, κωδικός για τον αν θα τυπωθεί γραμμή ή σημεία και το χρώμα αυτών.

2.6.3 Variogram

Πριν γίνει η παρουσίαση του menu **Variogram** πρέπει να γίνει αναφορά στα μοντέλα μεταβλητογράμματος που παρέχει το GSLIB. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω χάρη της θεώρησης της στασιμότητας το μοντέλο μεταβλητόγραμμα ή ημιμεταβλητόγραμμα εξαρτάται πλέον μόνο από το διάνυσμα h της απόστασης των σημείων και όχι πλέον από τη θέση τους. Έτσι όλοι οι τύποι των μοντέλων μεταβλητογραμμάτων αποτελούν ουσιαστικά συναρτήσεις του h. Αυτά είναι :

1. Το σφαιρικό (spherical)

$$\gamma(h) = c \cdot Sph\left(\frac{h}{\alpha}\right) = \begin{cases} c \cdot \left[1.5 \cdot \frac{h}{\alpha} - 0.5 \cdot \left(\frac{h}{\alpha}\right)^3\right], & \text{εάν } h \le \alpha \\ c & , \text{εάν } h \ge \alpha \end{cases} \qquad \text{Εξ. 2.64}$$

2. Το εκθετικό (expotential)

$$\gamma(h) = c \cdot Exp\left(\frac{h}{\alpha}\right) = c \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{3h}{\alpha}\right)\right] \qquad \text{Εξ. 2.65}$$

3. Το Κανονικό (Gaussian)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{(3h)^2}{\alpha^2}\right)\right] \qquad \text{Εξ. 2.66}$$

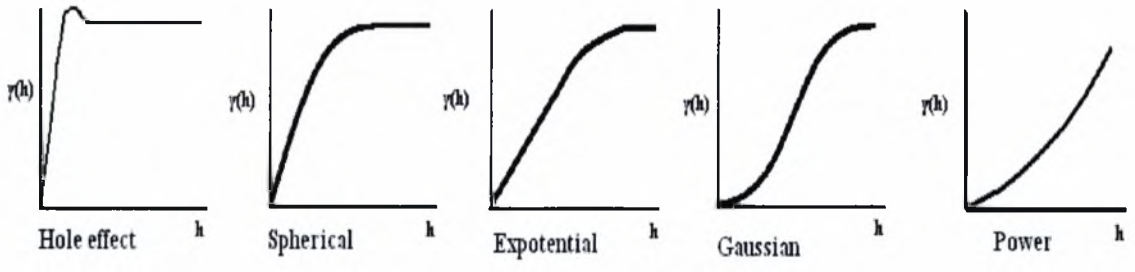
4. Το δυναμικό (power) το οποίο δεν εξαρτάται από φάσμα α, αλλά από τον εκθέτη 0<ω<2

$$\gamma(h) = c \cdot h^{\omega} \qquad \text{Εξ. 2.67}$$

5. Το hole effect

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{h}{\alpha} \cdot \pi\right)\right] \qquad \text{Εξ. 2.68}$$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα γραφήματα των παραπάνω μοντέλων.



Σχήμα 2.18 Τα πέντε μοντέλα μεταβλητογράμματος που παρέχει το GSLIB.

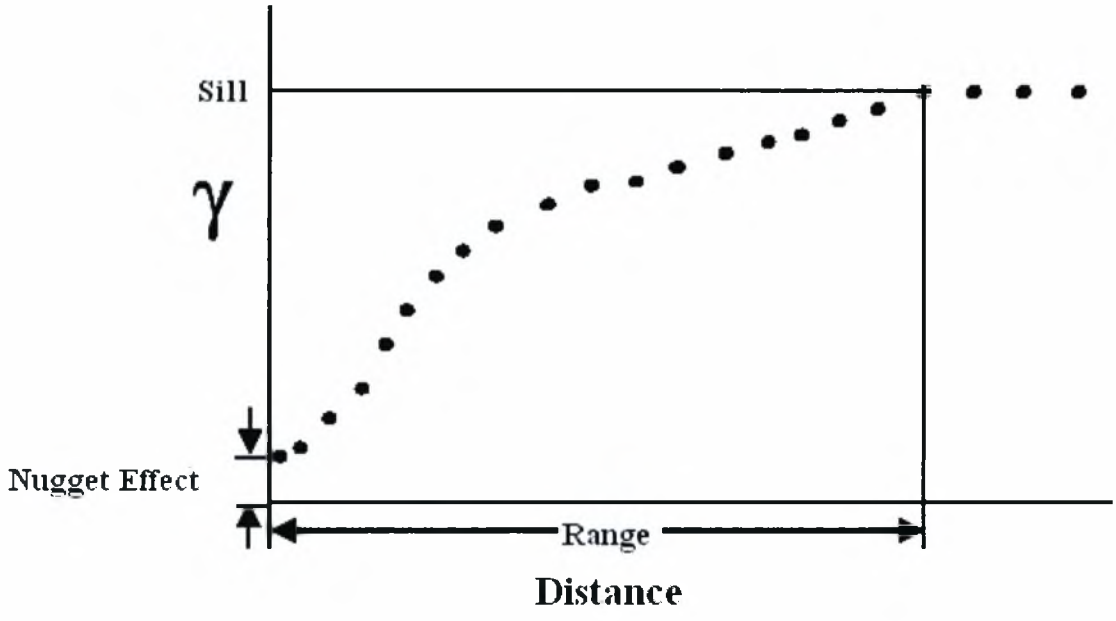
Τα χαρακτηριστικά για το γράφημα ενός μεταβλητογράμματος (πειραματικού ή μοντέλου) είναι τα ακόλουθα :

- Sill (κατώφλι) c : Είναι η τιμή του μεταβλητογράμματος όταν αυτό πλέον γίνεται παράλληλο με τον άξονα της απόστασης. Είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί εδώ ότι για κανονικά μετασχηματισμένες τιμές (όπως αυτές της παρούσης μελέτης) η τιμή αυτή ισούται με τη μονάδα.
- Range (εύρος) α : Είναι η απόσταση για την οποία το μεταβλητόγραμμα φτάνει στο κατώφλι. Καλείται «ακτίνα συσχέτισης» γιατί πέρα από αυτή τα δεδομένα είναι πλέον ασυσχέτιστα.
- Nugget effect (επίδραση βόλου): Το κατακόρυφο ύψος της ασυνέχειας στην αρχή. Για μηδενική απόσταση (όταν δηλαδή τα δεδομένα βρίσκονται ακριβώς στην ίδια θέση) η τιμή του είναι μηδέν. Σε όλα τα πειραματικά μεταβλητογράμματα δεν είναι ποτέ μηδέν, όσο μικρή και να είναι αυτή η απόσταση. Η επίδραση βόλου είναι ένας συνδυασμός των μικρής κλίμακας αποκλίσεων (η απόσταση των οποίων είναι μικρότερη από τη μικρότερη απόσταση μεταξύ των δειγμάτων) και των σφαλμάτων που γίνονται κατά τη συλλογή των δειγμάτων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Από τα τρία αυτά χαρακτηριστικά, το range με τη nugget effect παίζουν το σημαντικότερο ρόλο στη εξαγωγή συμπερασμάτων για τη χωρική μεταβλητότητα του πεδίου. Φαινόμενα, των οποίων το μεταβλητόγραμμά τους έχει μεγάλο range και μικρή nugget effect, χαρακτηρίζονται από καλή χωρική συνέχεια. Τέτοια είναι το υδροστατικό ύψος, το τοπογραφικό ύψος ενώ στα φαινόμενα με μικρή χωρική συνέχεια κατατάσσεται η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταφορικότητα και οι συγκεντρώσεις ουσιών.

Τα τρία αυτά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.19 Χαρακτηριστικά του γραφήματος ενός μεταβλητογράμματος.

Έτσι λοιπόν τα προγράμματα που υποστηρίζει το menu Variogram είναι :

1. Regular Spaced Data ή gam : Κατασκευάζει το πειραματικό μεταβλητόγραμμα μιας ή περισσοτέρων μεταβλητών, οι τιμές των οποίων είναι σε κάνναβο. Αυτό εμφανίζεται όταν αυτή η μεταβλητή είναι αποτέλεσμα μιας οποιαδήποτε μεθόδου χωρικής ανακατανομής ή προσομοίωσης. Στην πράξη όμως οι δειγματοληπτικές τιμές μιας μεταβλητής είναι διάσπαρτες μέσα στο πεδίο κι όχι χωροθετημένες σε κάνναβο. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα παραγωγής μεταβλητογραμμάτων σε όσες κατευθύνσεις επιθυμεί ο χρήστης κι αυτό γιατί μόνο έτσι θα ανακαλύψει την κατεύθυνση με τη μικρότερη ανισοτροπία, της οποίας το πειραματικό μεταβλητόγραμμα θα είναι αυτό το οποίο θα μοντελοποιηθεί για την περαιτέρω επεξεργασία.

Parameters for GAM
****

```
START OF PARAMETERS:
../data/true.dat        \file with data
2  1  2                 \number of variables, column numbers
```


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

```
-1.0e21    1.0e21     \trimming limits
gam.out               \file for variogram output
1                     \grid or realization number
50   0.5   1.0        \nx, xmn, xsiz
50   0.5   1.0        \ny, ymn, ysiz
 1   0.5   1.0        \nz, zmn, zsiz
2  10                 \number of directions, number of lags
 1  0  0              \ixd(1),iyd(1),izd(1)
 0  1  0              \ixd(2),iyd(2),izd(2)
1                     \standardize sill? (0=no, 1=yes)
5                     \number of variograms
1   1   1             \tail variable, head variable, variogram type
1   1   3             \tail variable, head variable, variogram type
2   2   1             \tail variable, head variable, variogram type
2   2   3             \tail variable, head variable, variogram type
1   1   9             \tail variable, head variable, variogram type
```

Σχήμα 2.20 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του gam.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει την μεταβλητή.
- **nvar και ivar(1),…,ivar(ivar)** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών του παραπάνω αρχείου που περιέχουν τις μεταβλητές.
- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **outfl :** το αρχείο εξόδου. Τα μεταβλητογράμματα που περιέχονται στο αρχείο κατατάσσονται πρώτα σύμφωνα με την κατεύθυνση και μετά με τον τύπο του καθενός. Η μορφή των αρχείων αυτών είναι η παρακάτω

Semivariogram		tail:primary - Z		head:primary - Z		direction 1
1	1.000	0.49119	2450	2.53364	2.53909	
2	2.000	0.62754	2400	2.49753	2.52300	
3	3.000	0.75987	2350	2.46945	2.50771	
4	4.000	0.81914	2300	2.45293	2.49312	
5	5.000	0.83200	2250	2.46641	2.49146	
6	6.000	0.88963	2200	2.48491	2.50075	
7	7.000	0.93963	2150	2.50757	2.52079	
8	8.000	0.96571	2100	2.53510	2.53821	
9	9.000	1.00641	2050	2.55013	2.56459	
10	10.000	0.99615	2000	2.57868	2.55968	

Semivariogram		tail:primary - Z		head:primary - Z		direction 2
1	1.000	0.49560	2450	2.61572	2.51775	
2	2.000	0.63327	2400	2.64921	2.45918	
3	3.000	0.67552	2350	2.68369	2.37889	
4	4.000	0.72309	2300	2.72356	2.34000	
5	5.000	0.75444	2250	2.75722	2.31314	

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

6	6.000	0.83449	2200	2.79176	2.30304
7	7.000	0.85967	2150	2.78771	2.27861
8	8.000	0.89283	2100	2.78614	2.25039
9	9.000	0.87210	2050	2.79200	2.17433
10	10.000	0.89131	2000	2.81165	2.15231

Σχήμα 2.21 Τυπική μορφή αρχείο εξόδου από το πρόγραμμα gam.

Η πρώτη στήλη αναφέρεται στον αριθμό διαφοράς (lag number), η δεύτερη στο μέσο όρο της απόστασης διαφοράς (separation distance), η τρίτη στη τινή του βαριογράμματος, η τέταρτη στον αριθμό των ζευγών, η πέμπτη στο μέσο των δεδομένων που συμμετέχουν στην ουρά και η έκτη στο μέσο των δεδομένων που συμμετέχουν στην αρχή. Αυτό τώρα το αρχείο αποτελεί το αρχείο εισόδου για το πρόγραμμα vargplt του menu PostScript.

- **igrid :** ο αριθμός των απεικονίσεων στην περίπτωση που η μεταβλητή προέρχεται από προσομοίωση.
- **nx, xmn, xsiz :** ο αριθμός των κόμβων για τον άξονα x, η αρχή του και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- **ny, ymn, ysiz :** ο αριθμός των κόμβων για τον άξονα y, η αρχή του και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- **nz, zmn, zsiz :** ο αριθμός των κόμβων για τον άξονα z, η αρχή του και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- **ndir και nlag :** ο αριθμός των κατευθύνσεων και των διαφορών που θέλει ο χρήστης να επιλέξει.
- **ixd, iyd και izd :** καθορίζουν την κατεύθυνση στην οποία θα σχηματισθεί το μεταβλητόγραμμα. Οι τιμές κλειδιά για τις παραπάνω παραμέτρους είναι οι αριθμοί –1, 0, 1. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα με το πώς δουλεύουν τα κλειδιά αυτά είναι :

x μετατόπιση	y μετατόπιση	z μετατόπιση	
1	0	0	κατεύθυνση ίδια με τον άξονα x
0	1	0	κατεύθυνση ίδια με τον άξονα y
0	0	-1	κατεύθυνση ίδια με τον άξονα z
1	1	0	οριζόντια 45^0 μοίρες από τον y
1	-1	0	οριζόντια 135^0 μοίρες από τον y
1	1	1	σε βάθος -45^0, 225^0 δεξιόστροφα από τον άξονα y.

- **standardize :** όταν τεθεί ίσο με τη μονάδα τότε το κατώφλι του μεταβλητογράμματος ισούται με τη μονάδα.
- **nvarg :** ο αριθμός των μεταβλητογραμμάτων που θα υπολογιστούν.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **ivtail, ivhead και ivtype :** τα δύο πρώτα χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί διασταυρωμένο μεταβλητόγραμμα για δύο διαφορετικές μεταβλητές κάτι το οποίο είναι πέρα από τις ανάγκες της μελέτης. Στην περίπτωση του μεταβλητογράμματος έχουν την ίδια μεταβλητή. Η τρίτη παράμετρος καθορίζει πιο τύπο επιθυμεί ο χρήστης π.χ ημιμεταβλητόγραμμα, διασταυρωμένο μεταβλητόγραμμα, συμμεταβλητότητα, συσχετιζόγραμμα κ.α Τίθεται πάντα με μονάδα αφού το κύριο εργαλείο είναι το ημιμεταβλητόγραμμα.

2. Irregular Spaced Data ή gamv : Υπολογίζει το μεταβλητόγραμμα μιας ή περισσοτέρων μεταβλητών οι δειγματοληπτικές τιμές των οποίων είναι διάσπαρτες στο πεδίο μελέτης. Είναι το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως και έχει τη δυνατότητα να δώσει μεταβλητογράμματα σε διάφορες κατευθύνσεις.

```
                    Parameters for GAMV
                    *******************

START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat                 \file with data
1  2  0                             \columns for X, Y, Z coordinates
2  3  4                             \number of variables, column numbers
-1.0e21    1.0e21                   \trimming limits
gamv.out                            \file for variogram output
10                                  \number of lags
5.0                                 \lag separation distance
3.0                                 \lag tolerance
3                                   \number of directions
0.0  90.0 50.0  0.0  90.0  50.0     \azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
0.0  22.5 25.0  0.0  22.5  25.0     \azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
90.  22.5 25.0  0.0  22.5  25.0     \azm,atol,bandh,dip,dtol,bandv
1                                   \standardize sills? (0=no, 1=yes)
3                                   \number of variograms
1  1  1                             \tail var., head var., variogram type
1  1  3                             \tail var., head var., variogram type
2  2  1                             \tail var., head var., variogram type
```

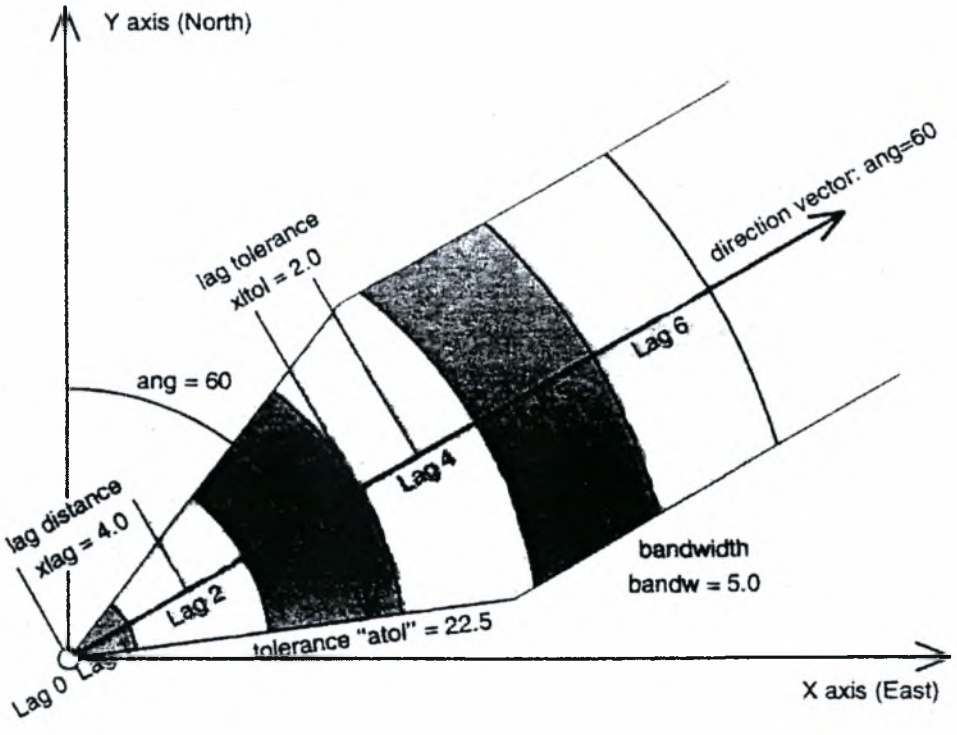
Σχήμα 2.22 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του gamv.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει την μεταβλητή.
- **icolx, icoly, και icolz** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών για τις συντεταγμένες x, y, και z.
- **nvar και ivar(1),…,ivar(ivar)** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών του παραπάνω αρχείου που περιέχουν τις μεταβλητές.
- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **outfl :** το αρχείο εξόδου. Τα μεταβλητογράμματα που περιέχονται στο αρχείο κατατάσσονται πρώτα σύμφωνα με την κατεύθυνση και μετά με τον τύπο του καθενός. Η μορφή των αρχείων αυτών είναι η ίδια με τα αντίστοιχα του προγράμματος gam.
- **nlag :** ο αριθμός των διαφορών που θέλει ο χρήστης να επιλέξει.
- **xlag :** η τιμή της απόστασης διαφοράς.
- **xtol :** η τιμή της ανεκτικότητας της διαφοράς. Συνήθως τίθεται ίση με τη τιμή της απόστασης της διαφοράς.
- **ndir :** ο αριθμός των κατευθύνσεων.
- **Azm, atol, bandwh, dip, dtol, και bandwd :** η αζιμούθεια γωνία (azimuth angle), η μισού παραθύρου αζιμούθεια ανεκτικότητα (half-window azimuth tolerance), το αζιμούθεια πλάτος λωρίδας (azimuth bandwidth), η γωνία βάθους (dip angle), η μισού παραθύρου ανεκτικότητα βάθους (half-window dip tolerance) και το πλάτος λωρίδας βάθους (dip bandwidth). Το αζιμούθειο μετριέται σε μοίρες δεξιόστροφα από το βορρά, π.χ azm=90 είναι ανατολικά και azm=135 είναι νοτιοανατολικά. Η γωνία βάθους μετριέται σε μοίρες με αρνητική κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο π.χ dip=0 είναι οριζόντια, dip=-90 είναι κατακόρυφα και dip=-45 είναι με κλίση 45° προς την κατακόρυφο, bandwh είναι μέγιστη οριζόντια επιτρεπτή κάθετη απόκλιση από το διάνυσμα κατεύθυνσης, ενώ το αντίστοιχό της στο κατακόρυφο επίπεδο είναι η bandwd (Σχήμα 2.23).
- **standardize :** όταν τεθεί ίσο με τη μονάδα τότε το κατώφλι του μεταβλητογράμματος ισούται με τη μονάδα.



Σχήμα 2.23 Χωρικές παράμετροι για το σχηματισμό του μεταβλητογράμματος.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **nvarg :** ο αριθμός των μεταβλητογραμμάτων που θα υπολογιστούν.
- **ivtail, ivhead και ivtype :** τα δύο πρώτα χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί διασταυρωμένο μεταβλητόγραμμα για δύο διαφορετικές μεταβλητές κάτι το οποίο είναι πέρα από τις ανάγκες της μελέτης. Στην περίπτωση του μεταβλητογράμματος έχουν την ίδια μεταβλητή. Η τρίτη παράμετρος καθορίζει πιο τύπο επιθυμεί ο χρήστης π.χ ημιμεταβλητόγραμμα, διασταυρωμένο μεταβλητόγραμμα, συμμεταβλητότητα, συσχετιζόγραμμα κ.α Τίθεται πάντα με μονάδα αφού το κύριο εργαλείο είναι το ημιμεταβλητόγραμμα.

3. Variogram Map ή varmap : ο χάρτης που δείχνει τις τιμές του μεταβλητογράμματος σε όλες τις κατευθύνσεις. Το εργαλείο αυτό είναι από τα πιο σημαντικά για το καθορισμό του καταλληλότερου μεταβλητογράμματος αφού από φαίνεται η κατεύθυνση της μεγαλύτερης συνέχειας κάτι το οποίο απαιτεί κόπο να γίνει από τα προγράμματα gam ή gamv διότι πρέπει να προκύψουν πολλά μεταβλητογράμματα σε διάφορες κατευθύνσεις για να γίνει η τελική επιλογή. Δυστυχώς το μεγάλο μειονέκτημα του είναι ότι δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε μεγάλου μήκους πεδία, όπως αυτό της παρούσας μελέτης. Για το λόγο αυτό η παρουσίαση των παραμέτρων του δεν κρίνεται σκόπιμη.

4. Indicator Variogram Computation : Είναι το πρόγραμμα που υπολογίζει το μεταβλητόγραμμα για διακριτοποιημένες μεταβλητές.

5. Variogram file from model ή vmodel : υπολογίζει το μεταβλητόγραμμα μοντέλο για ένα πειραματικό μεταβλητόγραμμα το οποίο βρίσκεται στο αρχείο εισόδου. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ των πέντε μοντέλων που του παρέχει το GSLIB.

```
                    Parameters for VMODEL
                    *********************
START OF PARAMETERS:
vmodel.var          \file for variogram output
2  22               \number of directions and lags
 0.0  0.0   1.0     \azm, dip, lag distance
90.0  0.0   3.0     \azm, dip, lag distance
2   0.2             \nst, nugget effect
1   0.4  0.0   0.0   0.0   \it,cc,ang1,ang2,ang3
        10.0   5.0  10.0    \a_hmax, a_hmin, a_vert
1   0.4  0.0   0.0   0.0    \it,cc,ang1,ang2,ang3
        10.0   5.0  10.0    \a_hmax, a_hmin, a_vert
```

Σχήμα 2.24 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του vmodel.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **outfl :** το αρχείο εξόδου το οποίο θα περιέχει και το πειραματικό και το μοντέλο μεταβλητόγραμμα.
- **ndir και nlag :** ο αριθμός των κατευθύνσεων και των διαφορών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **azm, dip και lag :** για κάθε κατεύθυνση θα πρέπει να δηλωθούν η αζιμούθεια γωνία azm, η κατακόρυφη γωνία dip και η απόσταση διαφοράς.
- **nst και c0 :** ο αριθμός των μεταβλητογραμμάτων και η nugget effect.
- **it, cc, ang1, ang2, ang3, aa_{hmax}, aa_{hmin} :** ο τύπος του μοντέλου, το περβάζι, οι γωνίες της γεωμετρικής ανισοτροπίας, η μέγιστη και ελάχιστη οριζόντια ακτίνα δράσης.

2.6.4 Kriging

Υπάρχουν τα ακόλουθα προγράμματα

1. 2D Kriging ή kb2d, το οποίο είναι ένα μικρό πρόγραμμα για μικρούς 2D καννάβους και χρησιμοποιείται καθαρά για εκπαιδευτικούς λόγους έτσι ώστε ο χρήστης να είναι έτοιμος για το 3D Kriging.

```
                    Parameters for KB2D
                    *******************

START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat        \file with data
1  2  3                    \columns for X, Y, and variable
-1.0e21   1.0e21           \trimming limits
3                          \debugging level: 0,1,2,3
kb2d.dbg                   \file for debugging output
kb2d.out                   \file for kriged output
5   5.0  10.0              \nx,xmn,xsiz
5   5.0  10.0              \ny,ymn,ysiz
1   1                      \x and y block discretization
4   8                      \min and max data for kriging
20.0                       \maximum search radius
1   2.302                  \0=SK, 1=OK,  (mean if SK)
1  2.0                     \nst, nugget effect
1  8.0  0.0  10.0  10.0    \it, c, azm, a_max, a_min
```

Σχήμα 2.25 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του kb2d.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει την μεταβλητή.
- **icolx, icoly, και icolvr** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών για τις συντεταγμένες x, y, και για τη μεταβλητή.
- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **idbg :** ένας αριθμός από το 0 έως το 3 που εκφράζει το επίπεδο εξυγίανσης του προγράμματος. Όσο πιο μεγάλος τόσο περισσότερες πληροφορίες αποθηκεύονται στο αρχείο dbgfl. Προτείνεται το 1.
- **dbgfl :** το αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται οι παραπάνω πληροφορίες.
- **outfl :** τα στοιχεία του καννάβου αποθηκεύονται εδώ. Περιέχει τόσο τις τιμές Kriging, αλλά και τη διασπορά για όλα τα σημεία.
- **nx, xmn, xsiz :** ο αριθμός των κόμβων για τον άξονα x, η αρχή του και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- **ny, ymn, ysiz :** ο αριθμός των κόμβων για τον άξονα y, η αρχή του και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- **nxdis και nydis :** ο αριθμός των σημείων που συνιστούν το ένα block (ισχύει στην περίπτωση του Block Kriging). Αλλιώς δίνεται και στα δύο η μονάδα.
- **ndmin και ndmax :** ο ελάχιστος και μέγιστος αριθμός των σημείων που συνιστούν το block (ισχύει στην περίπτωση του Block Kriging).
- **radius :** η μέγιστη ακτίνα ισοτροπίας η οποία προκύπτει από το μεταβλητόγραμμα.
- **isk και skmean :** εάν isk=0 χρησιμοποιείται η Simple Kriging και ζητείται η μέση τιμή skmean. Εάν isk=1 χρησιμοποιείται η Ordinary Kriging.
- **nst και c0 :** ο αριθμός των μεταβλητογραμμάτων και η nugget effect.

2. 3D Kriging ή kt3d είναι το πρόγραμμα που χρησιμοποιεί το GSLIB για την εφαρμογή της μεθόδου Kriging σε μια συνεχή μεταβλητή σε 3D χώρο. Παρέχει όλες τις παραλλαγές της Kriging,όπως αυτές που αναφέρθηκαν στη σελίδα 38.

```
                    Parameters for KT3D
                    *******************
START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat        \file with data
1  2  0   3    4           \columns for X, Y, Z, var, sec var
-1.0e21   1.0e21           \trimming limits
1                          \option: 0=grid, 1=cross, 2=jackknife
xvk.dat                    \file with jackknife data
1  2  0   3   0            \columns for X,Y,Z,vr and sec var
3                          \debugging level: 0,1,2,3
kt3d.dbg                   \file for debugging output
kt3d.out                   \file for kriged output
50   0.5    1.0            \nx,xmn,xsiz
50   0.5    1.0            \ny,ymn,ysiz
1    0.5    1.0            \nz,zmn,zsiz
1    1      1              \x,y and z block discretization
4    8                     \min, max data for kriging
0                          \max per octant (0-> not used)
20.0  20.0  20.0           \maximum search radii
 0.0   0.0   0.0           \angles for search ellipsoid
```


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

```
0    2.302                \0=SK,1=OK,2=non-st SK,3=exdrift
0 0 0 0 0 0 0 0 0         \drift: x,y,z,xx,yy,zz,xy,xz,zy
0                         \0, variable; 1, estimate trend
extdrift.dat              \gridded file with drift/mean
4                         \column number in gridded file
1   0.2                   \nst, nugget effect
1   0.8  0.0   0.0   0.0  \it,cc,ang1,ang2,ang3
       10.0  10.0  10.0   \a_hmax, a_hmin, a_vert
```

Σχήμα 2.26 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του kt3d.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει την μεταβλητή (Σχήμα 2.6).
- **icolx, icoly, icolz, icolvr και icolsec**: Δίνεται ο αριθμός των στηλών για τις συντεταγμένες x, y,z, για τη μεταβλητή και τέλος για κάποια τάση (αν υπάρχει) ή δεύτερη μεταβλητή.
- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **option :** Για 0 χρησιμοποιείται η Krigign, για 1 χρησιμοποιείται η cross Kriging, και για 2 χρησιμοποιείται η επαλήθευση Jackknifing.
- **jackfl :** το αρχείο με τις θέσεις που θα χρησιμοποιηθούν για τη μέθοδο επαλήθευσης Jackknifing (στην επιλογή του option=2).
- **icoljx, icoljy, icojlz, icoljvr και icoljsec**: Δίνεται ο αριθμός των στηλών για τις συντεταγμένες x, y,z, για τη μεταβλητή και τέλος για κάποια τάση (αν υπάρχει) του παραπάνω αρχείου.
- **idbg :** ένας αριθμός από το 0 έως το 3 που εκφράζει το επίπεδο εξυγίανσης του προγράμματος. Όσο πιο μεγάλος τόσο περισσότερες πληροφορίες αποθηκεύονται στο αρχείο dbgfl. Προτείνεται το 1.
- **dbgfl :** το αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται οι παραπάνω πληροφορίες.
- **outfl :** τα στοιχεία του καννάβου αποθηκεύονται εδώ. Περιέχει τόσο τις τιμές Kriging, αλλά και τη διασπορά για όλα τα σημεία. Η μορφή των αρχείων είναι η παρακάτω :

```
KT3D ESTIMATES WITH:  Clustered 140 primary and secondary data
7
X
Y
Z
True
Estimate
EstimationVariance
Error: est-true
39.500     18.500     0.500     0.060     0.765     0.730     0.705
```


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

5.500	1.500	0.500	0.060	2.268	0.785	2.208
38.500	5.500	0.500	0.080	1.075	0.741	0.995
20.500	1.500	0.500	0.090	1.220	0.837	1.130
27.500	14.500	0.500	0.090	0.692	0.729	0.602
40.500	21.500	0.500	0.100	0.454	0.588	0.354
15.500	3.500	0.500	0.100	0.563	0.615	0.463
6.500	25.500	0.500	0.110	4.354	0.673	4.244
38.500	21.500	0.500	0.110	0.675	0.629	0.565

Σχήμα 2.27 Τυπική μορφή αρχείο εξόδου από το πρόγραμμα kt3d.

- **nx, xmn, xsiz** : ο αριθμός των κόμβων για τον άξονα x, η αρχή του και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- **ny, ymn, ysiz** : ο αριθμός των κόμβων για τον άξονα y, η αρχή του και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- **nz, zmn, zsiz** : ο αριθμός των κόμβων για τον άξονα z, η αρχή του και η απόσταση μεταξύ των κόμβων.
- **nxdis, nydis και nzdis** : ο αριθμός των σημείων που συνιστούν το ένα block (ισχύει στην περίπτωση του Block Kriging). Αλλιώς δίνεται και στα δύο η μονάδα.
- **ndmin και ndmax** : ο ελάχιστος και μέγιστος αριθμός των σημείων που συνιστούν το block (ισχύει στην περίπτωση του Block Kriging).
- **noct** : ο μέγιστος αριθμός για την αναζήτηση των γειτονικών σημείων.
- **$radius_{hmax}$, $radius_{hmin}$, $radius_{vert}$** : η μέγιστη ακτίνα αναζήτησης στην οριζόντια κατεύθυνση, η ελάχιστη στην ίδια κατεύθυνση και η ακτίνα στην κάθετη κατεύθυνση.
- **sang1, sang2, sang3** : ο παράμετροι των γωνιών που περιγράφουν τον προσανατολισμό την ακτίνας αναζήτησης.
- **ikrige και skmean** : εάν το ikrige=0, τότε χρησιμοποιείται η στάσιμη Simple Kriging και δίνεται η τιμή του Simple μέσου skmean. Για ikrige=1, χρησιμοποιείται η Ordinary Kriging. Για ikrige=2, τότε χρησιμοποιείται η μη στάσιμη Simple Kriging, και τα μη στάσιμα Simple μέσοι δίνονται από το αρχείο secfile. Για ikrige=3, χρησιμοποιείται η Kriging με εξωτερική ολίσθηση.
- **idrif(i), i=1,…,9** : στην περίπτωση που δεν υπάρχει ολίσθηση δίνεται η τιμή 0. Στην περίπτωση που υπάρχει ολίσθηση μπορεί να πάρει νούμερο από το 1 μέχρι κα το 9, όπου :

    1. **i=1, γραμμική ολίσθηση στον x.**
    2. **i=2, γραμμική ολίσθηση στον y.**
    3. **i=3, γραμμική ολίσθηση στον z.**
    4. **i=4, δευτεροβάθμια ολίσθηση στον x.**
    5. **i=5, δευτεροβάθμια ολίσθηση στον y.**

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

6. **i=6, δευτεροβάθμια ολίσθηση στον z**
7. **i=7. διασταυρωμένη δευτεροβάθμια ολίσθηση στον x.**
8. **I=8, διασταυρωμένη δευτεροβάθμια ολίσθηση στον y.**
9. **I=9 διασταυρωμένη δευτεροβάθμια ολίσθηση στον z.**

- **itrend :** για 0 θεωρεί ότι η παράμετρος icolsec αναφέρεται σε δεύτερη μεταβλητή, για 1 θεωρεί ότι πρόκειται για τάση.
- **secfl :** το αρχείο με τη μεταβλητή της εξωτερικής ολίσθησης. Η τιμή της πρέπει να υπάρχει σε όλα τα σημεία του καννάβου, ο οποίος πρέπει να είναι ίδιος με τον αντίστοιχο της πρωτεύουσας μεταβλητής.
- **iseccol :** ο αριθμός της στήλης του παραπάνω αρχείου για τη μεταβλητή ολίσθησης. Ισχύει στην περίπτωση που ikrige=2 ή 3.
- **nst και c0 :** ο αριθμός των μεταβλητογραμμάτων και η nugget effect.

3. 3D Cokriging ή cockb3d, το οποίο χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της διασταυρωμένης Kriging στην περίπτωση δύο μεταβλητών, που είναι έξω από το πλαίσιο της μελέτης.

4. Indicator Kriging ή ik3d στην περίπτωση που η μεταβλητή είναι διακριτή.

2.6.5 Simulation

Υπάρχουν οι εξής αλγόριθμοι προσομοίωσης :

1. Monte Carlo ή draw, που είναι η απλή της μορφή η οποία δέχεται σα δεδομένα μόνο τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της μεταβλητής. Δεν προτείνεται από το GSLIB παρά μόνο για εκπαιδευτικούς λόγους.

2. Gaussian LU ή lusim, η οποία εφαρμόζεται μόνο σε μικρούς καννάβους όχι παραπάνω από 2500 κελιά. Στη παρούσα μελέτη τα κελιά είναι 40000.

3. Gaussian Truncated ή gtsim, που χρησιμοποιείται για διακριτές μεταβλητές.

4. Probability Field ή pfsim, το οποίο είναι πρόγραμμα επεξεργασίας αποτελεσμάτων που προέρχονται από εξαρτημένες προσομοιώσεις. Δέχεται δηλαδή σα αρχείο εισόδου το αποτέλεσμα μιας άλλης προσομοίωσης.

5. Boolean ή ellipsim, χρησιμοποιείται καθαρά για διακριτές μεταβλητές.

6. Sequential Indicator Simulation ή sisim, το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο της ακολουθιακής προσομοίωσης, αλλά για διακριτές μεταβλητές.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

7. Simulated Annealing ή anneal και sasim, είναι τα δύο προγράμματα προσομοίωσης που πατάνε στον αλγόριθμο Anneal. Το anneal ανήκει στην κατηγορία των προγραμμάτων επεξεργασίας «post-process» των αρχείων εξόδου από τις προσομοιώσεις, ενώ στο sasim η παράγωγη των πολλαπλών απεικονίσεων είναι εξαρτημένη στα στατιστικά χαρακτηριστικά των δεδομένων (ιστογράμματα ,μεταβλητογράμματα) και όχι στις τιμές αυτών.

Στη προσομοίωση ενδυνάμωσης δημιουργούνται εναλλασσόμενες εξαρτημένες στοχαστικές εικόνες από συνεχείς ή διακριτοποιημένες μεταβλητές με τη βοήθεια αριθμητικών τεχνικών. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα να συνδυάζει την αναπαραγωγή στατιστικών αναλύσεων δύο σημείων με πολύπλοκα χωρικά στατιστικά πολλών σημείων με τη βοήθεια γεωμετρικών σχημάτων.

Η βασική ιδέα της είναι η συνεχής αναστάτωσης μιας αρχικής εικόνας ώσπου να ταιριάξει κάποια προκαθορισμένα χαρακτηριστικά που έχουν δοθεί σε μια αντικειμενική συνάρτηση. Η αποδοχή κάθε αναστάτωσης εξαρτάται από το πόσο κοντά πλησιάζει η εικόνα τις απαιτήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης.

Παρόλο που αναπτύχθηκε ως αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιείται για να παράγει στοχαστικές εικόνες. Στην πραγματικότητα οι βαθμοί ελευθερίας, δηλαδή ο αριθμός των στοιχείων-κόμβων που μπορούν να αναστατωθούν, είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από τους περιορισμούς της αντικειμενικής συνάρτησης. Επίσης υπάρχει συνήθως ανοχή στο πόσο καλά θα ικανοποιηθεί η αντικειμενική, γεγονός που οδηγεί στην επιλογή των αποδεκτών απεικονίσεων.

Το κλειδί για την επιτυχή εκτέλεση της, είναι η ικανότητα του χρήστη να κρίνει γρήγορα την ποιότητα της εικόνας ανάμεσα σε δύο αναστατώσεις και να αποφασίζει εάν θα κρατήσει την αναστάτωση ή όχι. Οι απεικονίσεις της συνεχούς μεταβλητής μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε από την αναπαραγωγή ενός μοντέλου βαριογράμματος, είτε από μεταβλητογράμματα δεικτών, είτε τέλος από εξαρτημένες κατανομές που προκύπτουν από μια δεύτερη μεταβλητή.

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά νέα και οι δημιουργοί του GSLIB είναι επιφυλακτικοί στην εφαρμογή της σε πραγματικά πεδία.

Σκοπίμως αφήσαμε για το τέλος τη SGSIM μιας και όπως αναφέρθηκε είναι η μέθοδος που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί.

2.7 Ακολουθιακή Προσομοίωση (Sequential Simulation)

Σε πάρα πολλές εφαρμογές είναι απαραίτητη η αναπαραγωγή της χωρικής εξάρτησης πολλών μεταβλητών μαζί. Για παράδειγμα, ένα ρεαλιστικό μοντέλο για ένα κοίτασμα που περιέχει φλέβες χρυσού και χαλκού, πρέπει να λάβει υπόψη, για τη χωρική αλληλεξάρτηση, τόσο τις ποσότητες του χρυσού όσο και του χαλκού. Για τη ρεαλιστική προσομοίωση ενός κοιτάσματος πετρελαίου πρέπει να ληφθούν υπόψη σαν μεταβλητές της προσομοίωσης το πορώδες, η διαπερατότητα, αλλά και ο βαθμός κορεσμού του

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

πετρελαίου. Δημιουργείται λοιπόν ένα αρκετά πολύπλοκο σύστημα εξισώσεων όπως φαίνεται και στην παρακάτω εξίσωση :

$$\Sigma = [\ C_{k,k'}(h) = Cov\{Z_k(u),Z_{k'}(u+h)\},\ k,k' = 1,\ldots,K] \qquad \text{Εξ. 2.69}$$

Η πιο απλή, μα αρκετά αξιόπιστη προσέγγιση για την επίλυση τέτοιων εφαρμογών είναι η ακολουθιακή προσομοίωση. Η πιο σημαντική μεταβλητή ή η μεταβλητή με τα πιο αξιόπιστα δεδομένα, καλείται κύρια μεταβλητή $Z_1(u)$ και είναι αυτή που προσομοιώνεται πρώτη. Έπειτα προσομοιώνονται οι υπόλοιπες μεταβλητές, οι οποίες παράγονται τυχαία από συγκεκριμένες εξαρτημένες κατανομές. Για παράδειγμα στη μοντελοποίηση ενός υπόγειου υδροφορέα :

1. Το πορώδες $\Phi(u) = Z_1(u)$ προσομοιώνεται πρώτο καθώς αποτελεί στις περισσότερες εφαρμογές τη μεταβλητή με τις μικρότερες διακυμάνσεις στο πεδίο.
2. Η οριζόντια διαπερατότητα $K_h(u) = Z_2(u)$ προσομοιώνεται μετά από την εξαρτημένη κατανομή :

   $$Prob\{\ K_h(u) \leq z_2 I \Phi(u) = z_1^{(l)}\ \} \qquad \text{Εξ. 2.70}$$

   του προσομοιωμένου πορώδους $z_1^{(l)}$ στην ίδια θέση. Τέτοιες εξαρτημένες κατανομές προκύπτουν απευθείας από το διάγραμμα διασποράς της K_h σε σχέση με τη Φ στις ίδιες πάντα θέσεις u.
3. Έπειτα, δεδομένης της προσομοιωμένης τιμής της οριζόντιας διαπερατότητας $K_h(u) = z_2(u)$, παράγεται τυχαία η προσομοιωμένη τιμή της κάθετης διαπερατότητας από το διάγραμμα διασποράς της K_h σε σχέση με τη K_V στις θέσεις u.

Η προσέγγιση της Εξ.2.70 επιτρέπει την τυχαία παραγωγή της τιμής της μεταβλητής Z(u) από την εξαρτημένη της κατανομή, δεδομένης της τιμής της καλύτερης συσχετιζόμενης συμμεταβλητότητας στην ίδια θέση u. Η Αρχή της Ακολουθιακής Προσομοίωσης είναι μια γενίκευση αυτής της ιδέας. Η εξάρτηση επεκτείνεται για να περιλάβει δεδομένα της γειτονιάς του u, περιέχοντας τα αρχικά δεδομένα και τις προηγούμενες προσομοιωμένες τιμές.

Αν θεωρηθεί η από κοινού κατανομή N τυχαίων μεταβλητών Z_i, με N πιθανόν πολύ μεγάλο, τότε οι N τυχαίες μεταβλητές RVs Z_i μπορεί να αναπαριστούν την ίδια συμπεριφορά στους N κόμβους ενός καννάβου στο πεδίο A, ή να αναπαριστούν N διαφορετικές συμπεριφορές μετρημένες στην ίδια θέση, ή ακόμη να αναπαριστούν ένα συνδυασμό από K διαφορετικές συμπεριφορές καθορισμένες στους N' κόμβους ενός καννάβου με N = K * N'.

Αν στη συνέχεια θεωρηθεί η συνθήκη αυτών των N τυχαίων μεταβλητών, από ένα σύνολο n δεδομένων που συμβολίζεται με |(n), τότε η ανταποκρινόμενη N μεταβαλλόμενη *ccdf* δηλώνεται :

$$F_{(N)}(z_1,\ldots,z_N|n)) = Prob\{Z_i \leq z_i, i=1,\ldots,N|(n)\} \qquad \text{Εξ. 2.71}$$

Η Εξ.2.71 είναι γενική χωρίς περιορισμούς. Ακολουθιακή εφαρμογή της εξαρτημένης πιθανολογικής σχέσης δείχνει ότι η τυχαία διαλογή μιας N μεταβλητής από τη *ccdf*

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

μπορεί να πραγματοποιηθεί σε N διαδοχικά βήματα, που το καθένα περιέχει μια αμετάβλητη *ccdf* με αυξανόμενο βαθμό εξάρτησης. Έτσι :

1 Διαλέγεται τυχαία η τιμή $z_1^{(l)}$ από την αμετάβλητη *ccdf* της Z_1 δεδομένης των αρχικών δεδομένων (n) . Η τιμή $z_1^{(l)}$ θεωρείται περιοριστικό δεδομένο για τις επόμενες τυχαίες διαλογές. Επίσης το σύνολο των δεδομένων (n) ανανεώνεται σε $(n + 1) = (n) \cup \{Z_1 = z_1^{(l)}\}$.

2 Διαλέγεται τυχαία η τιμή $z_2^{(l)}$ από την αμετάβλητη *ccdf* της Z_2 δεδομένης των αρχικών δεδομένων (n+1). Έπειτα το σύνολο των δεδομένων (n+1) ανανεώνεται σε $(n + 2) = (n + 1) \cup \{Z_2 = z_2^{(l)}\}$.

3 Η διαδικασία συνεχίζεται διαδοχικά για όλες τις N τυχαίες μεταβλητές RVs Z_ι.

Το σύνολο $\{z_i^{(l)}, i = 1,\ldots,N\}$ αναπαριστά μια από κοινού προσομοιωμένη απεικόνιση των N τυχαίων μεταβλητών Z_ι. Αν απαιτείται και άλλη απεικόνιση $\{z_i^{(l')}, i = 1,\ldots,N\}$επαναλαμβάνεται ολόκληρη η διαδικασία ακολουθιακής τυχαίας διαλογής. Αυτή η ακολουθιακή διαδικασία προσομοίωσης απαιτεί τον καθορισμό των N αμετάβλητων *ccdf* , δηλαδή :

$$\text{Prob}\{ Z_1 \leq z_1 | (n)\}$$

$$\text{Prob}\{ Z_2 \leq z_2 | (n + 1)\}$$

$$\text{Prob}\{Z3 \leq z_3 | (n + 2)\}$$

$$\text{Prob}\{ Z_N \leq z_N | (n + N - 1)\} \qquad \text{Εξ. 2.72}$$

Η αρχή της ακολουθιακής προσομοίωσης είναι ανεξάρτητη από τον αλγόριθμο ή το μοντέλο που χρησιμοποιείται για να καθιερώσει την διαδοχή των αμετάβλητων *ccdf.* Στις περισσότερες εφαρμογές οι N RVs, των οποίων οι N μεταβλητές *ccdf* προκύπτουν σύμφωνα με τις N θέσεις u_i μιας τυχαίας συνάρτησης RF Z(u), αναφέρονται σε μια και μόνο συμπεριφορά – ιδιότητα z. Ο αλγόριθμος της ακολουθιακής προσομοίωσης απαιτεί γνώση των N αμετάβλητων *ccdf.* Αυτές οι αμετάβλητες *ccdf* δεν είναι Κανονικές και δεν προσδιορίζονται εξ' ολοκλήρου από τις μέσες τιμές και τις αποκλίσεις τους, εκτός αν η Z(u) μοντελοποιείται σαν μια τυχαία συνάρτηση Gauss. Ευτυχώς, εάν κάποιος επιθυμεί μόνο αναπαραγωγή της z – συμμεταβλητότητας (ή βαριογράμματος) από τα σύνολα των προσομοιωμένων τιμών $\{z^{(l)}(u_i), i = 1,\ldots,N, \forall l$, αρκεί κάθε μια από τις αμετάβλητες N *ccdf* της Εξ.72 να αναγνωρίσει τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της Simple Kriging της ανταποκρινόμενης RV Z(u) με τα (n + ι - 1) δεδομένα.

2.8 Κανονική Προσομοίωση (Gaussian Simulation)

Το μοντέλο της Κανονικής τυχαίας συνάρτησης *RF* είναι μοναδικό σε στατιστικό επίπεδο για την πολύ μεγάλη αναλυτική απλότητά του και το ότι αποτελεί την πιο εξελιγμένη κατανομή από πολλά αναλυτικά θεωρήματα ,που είναι γνωστά με το όνομα « κεντρικά οριακά θεωρήματα ».

Σε ένα πεδίο, εάν το συνεχές χωρικό φαινόμενο { z(u), u ε A } αποτελεί άθροισμα από έναν (όχι και τόσο μεγάλο) αριθμό ανεξάρτητων πηγών { y_k(u), u ε A }, k = 1,…,K, με

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

παρόμοιες χωρικές κατανομές, τότε η χωρική του κατανομή μπορεί να μοντελοποιηθεί από ένα Κανονικής τυχαίας συνάρτησης *RF* :

$$Z(u) = \sum_{k=1}^{K} Y_k(u) \approx \text{Κανονικής} \qquad \text{Εξ. 2.73}$$

Ο οριακός περιορισμός δεν είναι ο αριθμός K, ή το γεγονός ότι οι συνιστώσες $Y_k(u)$ είναι ισοδύναμα κατανεμημένες, αλλά η υπόθεση της ανεξαρτησίας των $Y_k(u)$. Τα Κανονικά μοντέλα είναι αρκετά οικεία, εύκολα στην κατανόηση και έχουν τεράστια επιτυχία στις εφαρμογές. Όλα τα παραπάνω είναι αρκετά για να κάνουν το Κανονικό μοντέλο την καλύτερη επιλογή για τη μοντελοποίηση των συνεχών μεταβλητών.

Ο κλασικός ορισμός μιας Κανονικής Κατανομής μπορεί να βρεθεί σε οποιοδήποτε βιβλίο Στατιστικής. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας *PDF* της ορίζεται ως :

$$F(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-\mu}{\sigma}\right)^2\right], -\infty < u < \infty \qquad \text{Εξ. 2.74}$$

όπου μ είναι η μέση τιμή και σ η τυπική απόκλιση. Το γράφημα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας *PDF* της δίνεται στο παρακάτω σχήμα για: α) μ = 8, σ = 1 β) μ = 5, σ = 2 γ) μ = 5, δ = 4.

Η τυχαία συνάρτηση *RF* Y(u) = { Y(u), u ε A } είναι κανονική όταν ισχύουν τα παρακάτω :

1 όλα τα υποσύνολα της *RF* , για παράδειγμα { Y(u), u ε B C A } είναι επίσης κανονικά

2 όλοι οι γραμμικοί συνδυασμοί των συνιστωσών Y(u) είναι κανονικά κατανεμημένοι $X = \sum_{a=1}^{n} \omega_a Y(u_a)$ εφ' όσον u_a ε A.

3 μηδενική συμμεταβλητότητα (ή αυτοσυσχέτιση) συνεπάγεται πλήρη ανεξαρτησία : εάν Cov{Y(u),Y(u') = 0, οι δύο τυχαίες μεταβλητές *RVs* Y(u) και Y(u') δεν είναι μόνο μη αυτοσυσχετιζόμενες, αλλά και ανεξάρτητες.

4 όλες οι εξαρτημένες κατανομές ενός οποιουδήποτε υποσυνόλου της *RF* Y(u), δίνοντας τις απεικονίσεις από κάποιο άλλο υποσύνολο, είναι κανονικές. Για παράδειγμα, η εξαρτημένη κατανομή των K *RVs* { $Y_k(u'_k)$, k=1,….,K, u'_k ε A}, που δίνει τις απεικονίσεις $y(u_a) = y_a$, a=1,…,n, είναι κανονική για κάθε K, u'_k, n, u_a, y_a.

Η υπόθεση K=1, $u'_1 = u_0$, όπου η τυχαία μεταβλητή *RV* $Y(u_0)$ μοντελοποιεί την αβεβαιότητα για μια συγκεκριμένη μη δειγματοληπτική τιμή $y(u_0)$, έχει ξεχωριστό ενδιαφέρον : Η εξαρτημένη αθροιστική συνάρτηση κατανομής *ccdf* της $Y(u_0)$ είναι κανονική και πλήρως χαρακτηριζόμενη από :

1 τη μέση τιμή της, όπως αυτή προσδιορίζεται από την Απλού Kriging *SK* εκτίμηση της $y(u_0)$

$$E\{Y(u_0)|y(u_\alpha) = y_\alpha, \alpha=1,\ldots,n\} \equiv [y(u_0)]^*_{SK} \equiv$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$$m(u_0) + \sum_{a=1}^{n} \lambda_\alpha [y_\alpha - m(u_\alpha)] \qquad \text{Εξ. 2.75}$$

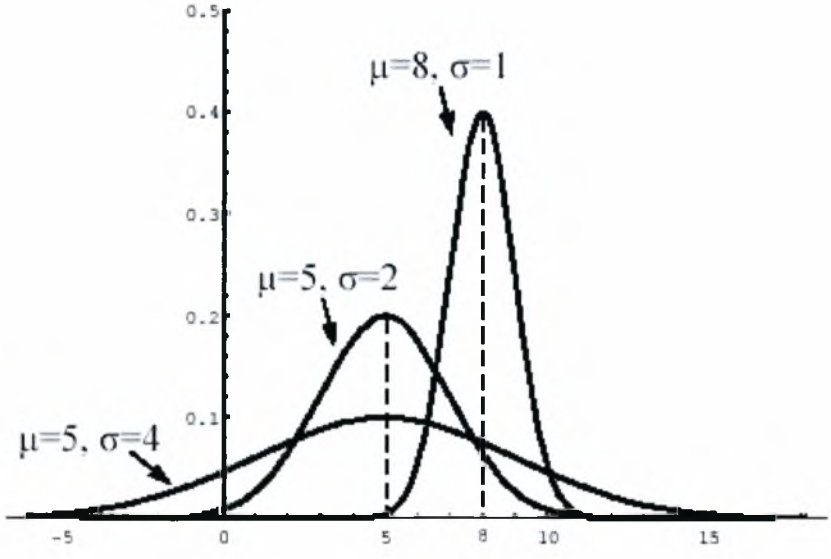
όπου m(u) = E{Y(u)} είναι η αναμενόμενη τιμή της (όχι απαραίτητα στάσιμης) *RV* Y(u). Τα n βάρη λ_α δίνονται από το Απλού Kriging *SK* σύστημα :

$$\sum_{\beta=1}^{n} \lambda_\beta C(u_\beta, u_\alpha) = C(u_0, u_\alpha) \quad \alpha = 1,\ldots n \qquad \text{Εξ. 2.76}$$

όπου C(u,u') = Cov{Y(u),Y(u')} είναι η συμμεταβλητότητα (όχι απαραίτητα στάσιμη) της *RF* Y(u).

2 την τυπική της απόκλιση, η οποία είναι η Απλού Kriging *SK* απόκλιση :

$$\mathrm{Var}\{Y(u_0)|y(u_\alpha) = y_\alpha, \alpha = 1,\ldots,n\} = C(u_0, u_0) - \sum_{\alpha=1}^{n} \lambda_\alpha C(u_0, u_\alpha) \qquad \text{Εξ. 2.77}$$



Σχήμα 2.28 Γράφημα Συνάρτησης Πυκνότητας Πιθανότητας *PDF*.

2.9 Ακολουθιακή Κανονική Προσομοίωση (Sequential Gaussian SIMulation)

Ο *sgsim* αποτελεί τον πιο εμπρόσθιο αλγόριθμο για την παραγωγή απεικονίσεων ενός Κανονικού πεδίου, από τους διαδοχικούς αλγορίθμους. Κάθε μεταβλητή προσομοιώνεται διαδοχικά, σύμφωνα με την κανονική εξαρτημένη αθροιστική συνάρτηση κατανομής *ccdf*, που προέκυψε μέσω ενός συστήματος Απλού (*Simple*) ή Κανονικού (*Ordinary*) Kriging όπως της Εξ.2.76. Τα εξαρτημένα δεδομένα αποτελούνται από όλα τα αρχικά δεδομένα συν όλες τις προηγουμένως προσομοιωμένες τιμές, που βρίσκονται στη γειτονιά της υπό προσομοίωσης περιοχής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Η εξαρτημένη προσομοίωση μιας συνεχούς μεταβλητής z(u) μοντελοποιείται από τις παρακάτω διαδικασίες μιας στάσιμης Κανονικής *RF* Z(u) :

1. Καθορίζεται η αμετάβλητη *cdf* $F_Z(z)$, αντιπροσωπευτική ολόκληρου του υπό μελέτη πεδίου και όχι μόνο των διαθέσιμων z δεδομένων. Μπορεί να απαιτείται αποδέσμευση (*declustring*) σε περίπτωση που τα δεδομένα είναι συγκεντρωμένα σε κάποια περιοχή του πεδίου, ή εξομάλυνση (smoothing) αν αυτά είναι λίγα και διάσπαρτα.

2. Χρησιμοποιώντας την *cdf* $F_Z(z)$, πραγματοποιείται ο *normal score* μετασχηματισμός των z δεδομένων στα αντίστοιχα y με μια τυπικά κανονική *cdf*.

3. Αφού το Γκαουσσιανό *RF* μοντέλο μπορεί να αντικατασταθεί από την μεταβλητή y, η διαδικασία προχωρά με τον αλγόριθμο *sgsim* και τη ακολουθιακή προσομοίωση:

   - Καθορίζεται ένας τυχαίος δρόμος, με τον οποίο η διαδικασία πηγαίνει από κελί σε κελί μέσα στον κάνναβο, αλλά για μια φορά. Σε κάθε κόμβο u, παραμένει ένας συγκεκριμένος αριθμός που προέρχεται από τον περιορισμός της γειτνίασης των δεδομένων, περιέχοντας και τα αρχικά δεδομένα y και τις προσομοιωμένες από πριν τιμές y.

   - Χρησιμοποιείται η Απλή (*Simple*) ή Κανονική (*Ordinary*) Kriging μαζί με το *normal score* μεταβλητόγραμμα για τον καθορισμό των παραμέτρων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση) της εξαρτημένης αθροιστικής συνάρτηση κατανομής *ccdf* της *RF* Y(u), στη θέση u.

   - Επιλέγεται τυχαία μια προσομοιωμένη τιμή $y^{(l)}(u)$ από αυτή τη *ccdf*.

   - Η προσομοιωμένη αυτή τιμή $y^{(l)}(u)$ προστίθεται στο σύνολο των δεδομένων.

   - Προχωρά στον επόμενο κόμβο και επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να προσομοιωθούν όλοι οι κόμβοι.

4. Μετασχηματίζονται προς τα πίσω (backtransform) οι προσομοιωμένες κανονικές τιμές $\{ y^{(l)}(u), u \varepsilon A \}$ στις προσομοιωμένες τιμές των αρχικών μεταβλητών $\{z^{(l)}(u) = \varphi^{(-1)}(y^{(l)}(u)), u \varepsilon A\}$.

<u>Πολλαπλές Απεικονίσεις</u>

Εάν απαιτούνται πολλαπλές απεικονίσεις $\{ z^{(l)}(u), u \varepsilon A \}$, $l = 1,\ldots,L$, ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται L φορές με κάποια από τις δύο παρακάτω διαδικασίες:

1. Με τον ίδιο τυχαίο δρόμο η διαδικασία πηγαίνει από κελί σε κελί μέσα στον κάνναβο. Σε αυτήν την περίπτωση η διαμόρφωση των δεδομένων και τα Kriging συστήματα παραμένουν ίδια για κάθε προσομοίωση. Χρειάζονται να λυθούν μόνο μια φορά.

2. Χρησιμοποιείται διαφορετικός δρόμος για κάθε προσομοίωση. Η ακολουθία της διαμόρφωσης των δεδομένων είναι διαφορετική. Επίσης πρέπει να

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

δημιουργούνται κάθε φορά διαφορετικά Kriging συστήματα και να επιλύονται.

Απλή (*Simple*) ή Κανονική (*Ordinary*) Kriging?

Η αποδοχή της στασιμότητας (*stationarity*) απαιτεί στο δεύτερο βήμα του *SGSIM* αλγορίθμου τη χρήση της Απλής Kriging με μηδενική μέση τιμή. Στην περίπτωση που τα δεδομένα είναι αρκετά ώστε να θεωρηθεί το RF μοντέλο μη στάσιμο (nonstationary), τότε πρέπει :

1. να θεωρηθεί μια σειρά από τοπικές αρχικές SK μέσες τιμές (διαφορετική του μηδενός), για να χρησιμοποιηθεί στην Εξ.2.75. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί η Κανονική Kriging, δίνοντας τοπικές μη στάσιμες μέσες τιμές, που προέρχονται από άλλη πηγή πληροφοριών ή
2. να διασπαστεί η περιοχή σε ξεχωριστές ζώνες και να θεωρηθεί για κάθε μία ένα διαφορετικό στάσιμο *RF* μοντέλο, το οποίο υποδηλώνει την παρουσία διαφορετικού ιστογράμματος και *normal score* μεταβλητογράμματος για κάθε ζώνη ή
3. να θεωρηθεί ένα στάσιμο *normal score* μεταβλητόγραμμα, προερχόμενο από όλα τα δεδομένα και ένας μη στάσιμες μέσες τιμές για Y(u). Ο μη στάσιμη μέση τιμή, E{Y(u)}, σε κάθε θέση u, επανεκτιμάται από τα γειτονικά δεδομένα μέσω της Απλής Kriging. Το αντίτιμο από αυτήν την τοπική αναφορά είναι η αναπαραγωγή ενός φτωχότερου στάσιμου Y ιστογράμματος και μεταβλητογράμματος.

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι προτιμάται η επιλογή της Απλής Kriging, διότι δίνει πληρέστερα μοντέλα, αυτό όμως δεν κάνει απαγορευτική τη χρήση της Κανονικής Kriging, αφού υπάρχουν περιπτώσεις που η τελευταία είναι αναγκαία.

Parameters for SGSIM
****

```
START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat        \file with data
1  2  0  3  5  4           \columns for X,Y,Z,vr,wt,sec.var.
-1.0      1.0e21           \trimming limits
1                          \transform the data (0=no, 1=yes)
sgsim.trn                  \file for output trans table
0                          \consider ref. dist (0=no, 1=yes)
histsmth.out               \file with ref. dist distribution
1  2                       \columns for vr and wt
0.0    15.0                \zmin,zmax(tail extrapolation)
1      0.0                 \lower tail option, parameter
1     15.0                 \upper tail option, parameter
1                          \debugging level: 0,1,2,3
sgsim.dbg                  \file for debugging output
sgsim.out                  \file for simulation output
100                        \number of realizations to generate
50   0.5   1.0             \nx,xmn,xsiz
50   0.5   1.0             \ny,ymn,ysiz
```


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

```
1    0.5    1.0          \nz,zmn,zsiz
69069                    \random number seed
0    8                   \min and max original data for sim
12                       \number of simulated nodes to use
1                        \assign data to nodes (0=no, 1=yes)
1    3                   \multiple grid search (0=no, 1=yes),num
0                        \maximum data per octant (0=not used)
10.0  10.0  10.0         \maximum search radii (hmax,hmin,vert)
 0.0   0.0   0.0         \angles for search ellipsoid
1    0.60   1.0          \ktype: 0=SK,1=OK,2=LVM,3=EXDR,4=COLC
../data/ydata.dat        \file with LVM, EXDR, or COLC variable
4                        \column for secondary variable
1    0.1                 \nst, nugget effect
1    0.9  0.0   0.0   0.0  \it,cc,ang1,ang2,ang3
          10.0  10.0  10.0  \a_hmax, a_hmin, a_vert
```

Σχήμα 2.29 Ένα παράδειγμα των παραμέτρων του sgsim.

Η επεξήγηση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω :

- **datafl :** το αρχείο, το οποίο περιέχει τα δεδομένα.. Εάν αυτό δεν υπάρχει τότε η προσομοίωση θα είναι μη εξαρτημένη.
- **icolx, icoly, icolz icolvr, icolwt, icolser** : Δίνεται ο αριθμός των στηλών που υπάρχουν στο αρχείο των δεδομένων. Δηλαδή οι τρεις πρώτες για τις συντεταγμένες x, y, z, η τέταρτη για μεταβλητή που θα προσομοιωθεί, η έκτη τα βάρη αποδέσμευσης και η πέμπτη για τη δεύτερη μεταβλητή υπό προσομοίωση (αν υπάρχει).

```
Clustered 140 primary and secondary data
5
Xlocation
Ylocation
Primary
Secondary
Declustering Weight
39.5  18.5   0.06   0.22  1.619
 5.5   1.5  0 .06   0.27  1.619
38.5   5.5   0.08   0.40  1.416
20.5   1.5   0.09   0.39  1.821
27.5  14.5   0.09   0.24  1.349
40.5  21.5   0.10   0.48  0.944
15.5   3.5   0.10   0.21  1.214
 6.5  25.5   0.11   0.36  1.619
38.5  21.5   0.11   0.22  1.146
23.5  18.5   0.16   0.30  1.821
 0.5  25.5   0.16   0.31  1.349
 9.5  19.5   0.17   0.30  1.012
36.5  43.5   0.18   1.60  0.944
```


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

21.5	5.5	0.19	0.59	1.416
13.5	3.5	0.19	0.18	1.146
40.5	7.5	0.19	0.75	1.012
31.5	17.5	0.22	0.44	1.619
46.5	40.5	0.24	0.58	1.821

Σχήμα 2.30 Ένα τυπικό αρχείο εισόδου στο οποίο φαίνονται τα δεδομένα εισόδου.

- **t_{min}, t_{max} :** τα όρια των τιμών των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα ίδια για όλες τις περιπτώσεις και είναι τα $-10*e^{21}$ και $10*e^{21}$ αντίστοιχα.
- **itrans :** αν επιλεχθεί η τιμή 0 τότε δε θα γίνει μετασχηματισμός της μεταβλητής. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που η μεταβλητή είναι ήδη τυπικά κανονική, αλλιώς επιλέγεται η τιμή 1 για να γίνει ο μετασχηματισμός.
- **transfl :** Το αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται τα αποτελέσματα από τον μετασχηματισμό στην περίπτωση που έχει επιλεχθεί να γίνει. Οι τιμές ουσιαστικά μετατρέπονται σε κανονικές και πλέον αυτό είναι το αρχείο που θα χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω επεξεργασία.
- **ismooth :** αν επιλεχθεί η τιμή 0, τότε το ιστόγραμμα των δεδομένων (το οποίο μπορεί να περιέχει και τα αποδεσμευμένα βάρη αλλά και όχι) χρησιμοποιείται για *normal score* μετασχηματισμό. Αν επιλεχθεί η μονάδα, τότε τα δεδομένα μετασχηματίζονται σύμφωνα με τις τιμές που περιέχονται στο παρακάτω αρχείο.
- **smthfl :** το αρχείο με τις τιμές που θα χρησιμοποιηθούν για το *normal score* μετασχηματισμό.
- **iconvr, icolwt :** ο αριθμός των στηλών στο παραπάνω αρχείο για τη μεταβλητή και τα αποδεσμευμένα βάρη.
- **z_{min}, z_{max} :** ο μέγιστος και ελάχιστος αριθμός των δεδομένων. Απαιτούνται για τον προς τα πίσω μετασχηματισμό. Εξαρτάται από το χρήστη και προκύπτει από διάγραμμα της αθροιστικής κατανομής των αρχικών δεδομένων.
- **ltail, ltpar :** καθορίζει τον τρόπο του προς τα πίσω μετασχηματισμού στο τέλος της κάθε κατανομής. Όταν tail=1 εκτελείται γραμμική παρεμβολή στο κατώτερο όριο z_{min}, ενώ όταν tail=2 εκτελείται εκθετική παρεμβολή στο κατώτερο όριο z_{min}. Στην παράμετρος ltpar δίνεται ο αριθμός z_{min}. Εξαρτάται από το χρήστη και προκύπτει από διάγραμμα της αθροιστικής κατανομής των αρχικών δεδομένων.
- **utail, utpar :** καθορίζει τον τρόπο του προς τα πίσω μετασχηματισμού στην αρχή της κάθε κατανομής. Όταν tail=1 εκτελείται γραμμική παρεμβολή στο ανώτερο όριο z_{max}, ενώ όταν tail=2 εκτελείται εκθετική παρεμβολή στο ανώτερο όριο z_{max}. Στην παράμετρος utpar δίνεται ο αριθμός z_{max}. Εξαρτάται από το χρήστη και προκύπτει από διάγραμμα της αθροιστικής κατανομής των αρχικών δεδομένων.
- **idbg :** ένας ακέραιος αριθμός μεταξύ 0 και 3. Όσο μεγαλύτερος τόσα περισσότερα τα αποτελέσματα στην έξοδο.
- **dbgfl :** το αρχείο για την αποθήκευση των παραπάνω αποτελεσμάτων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **outfl :** το αρχείο που περιέχει τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης. Παρουσιάζει κάθε προσομοιωμένη τιμή της μεταβλητής που αντιστοιχεί σε κάθε κελί του καννάβου αρχίζοντας από την πρώτη προσομοίωση. Όσο αφορά τα κελιά πρώτα εξαντλεί τη x διάσταση, έπειτα την y και τέλος τη z.
- **nsim :** ο αριθμός των προσομοιώσεων που επιθυμεί ο χρήστης.
- **nx, xmn, xsiz :** ο αριθμός των κόμβων, η αρχή και το διάστημα μεταξύ των κόμβων στην κατεύθυνση x.
- **yx, ymn, ysiz :** ο αριθμός των κόμβων, η αρχή και το διάστημα μεταξύ των κόμβων στην κατεύθυνση y.
- **zx, zmn, zsiz :** ο αριθμός των κόμβων, η αρχή και το διάστημα μεταξύ των κόμβων στην κατεύθυνση x.
- **seed :** 69069
- **ndmin, ndmax :** ο μέγιστος και ελάχιστος αριθμός των αρχικών δεδομένων που απαιτούνται για την προσομοίωση ενός κόμβου του καννάβου. Εάν είναι μικρότερος από ndmin ο κόμβος δεν προσομοιώνεται.
- **ncode :** ο μέγιστος αριθμός των προηγούμενων προσομοιωμένων κόμβων που απαιτούνται για την προσομοίωση των επομένων. ,
- **aastrat :** εάν επιλεχθεί το 0, τα δεδομένα και οι προηγούμενοι προσομοιωμένοι κόμβοι εξετάζονται χωριστά. Εάν επιλεχθεί το 1, τα δεδομένα επανατοποθετούνται στους κόμβους και χρησιμοποιείται η σπειροειδής αναζήτηση και οι παράμετροι ndmin, ndmax δεν λαμβάνονται υπόψη.
- **multgrid :** εάν επιλεχθεί το 1, η προσομοίωση θα γίνει για πολλούς καννάβους. Εάν επιλεχθεί το 0, θα προσομοιωθεί ένας κάνναβος (η επικρατέστερη περίπτωση).
- **nmult :** ο αριθμός των καννάβων που προσομοιώνονται στην περίπτωση που η παράμετρος multgrid επιλεχθεί σαν 1.
- **noct :** εάν επιλεχθεί μικρότερο του 0, χρησιμοποιούνται όλα τα αρχικά δεδομένα σε κάθε αναζήτηση για τον προσδιορισμό της προσομοιωμένης μεταβλητής σε έναν κόμβο. Στην αντίθετη περίπτωση ο εκάστοτε αριθμός θα υποδηλώνει και των αριθμό των αρχικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται για το λόγο αυτό.
- **$radius_{hmax}$, $radius_{hmin}$, $radius_{vert}$:** η ακτίνα αναζήτησης για τη μέγιστη και ελάχιστη οριζόντια κατεύθυνση, και για την κάθετη.
- **sang1, sang2, sang3 :** οι παράμετροι των γωνιών που επιλέγονται για την αναζήτηση δεδομένων.
- **ktype :** ο τύπος του kriging : 0 = απλή kriging, 1 = κανονική kriging, 2 = απλή kriging με τοπικά κυμαινόμενη μέση τιμή, 3 = kriging με εξωτερική τάση, 4 = συνδυαστική kriging για δεύτερη μεταβλητή. Όπως αναφέρθηκε και πριν η απλή kriging *SK* προτείνεται από τη θεωρία, αλλά στην περίπτωση που τα αρχικά δεδομένα είναι αρκετά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η κανονική kriging *OK* .

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- **rho, varred :** ο συντελεστής συσχέτισης και παράγοντας μείωσης της διακύμανσης στην περίπτωση που επιλεχθεί η συνδυαστική kriging. Στην παρούσα μελέτη αυτός ο τύπος της kriging μεθόδου δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί , αφού η μεταβλητή που θα προσομοιωθεί είναι μία.
- **secfl :** το αρχείο για το τοπικά κυμαινόμενη μέση τιμή (στην περίπτωση της ktype = 2), την εξωτερική τάση (στην περίπτωση της ktype = 3) ή τη δεύτερη μεταβλητή (στην περίπτωση της ktype = 4).
- **nst, c0 :** ο αριθμός των ημιμεταβλητογράμματος και η τιμή του *nugget effect.* Για κάθε επιλογή nst, πρέπει να επιλεχθούν και οι παράμετροι **it** = ο τύπος του ημιμεταβλητογράμματος, **cc** = το σκαλοπάτι *sill*, **ang1, ang2, ang3** = οι γωνίες που καθορίζουν τη γεωμετρία του ημιμεταβλητογράμματος, aa_{hmax} = η μέγιστη οριζόντια απόσταση, aa_{min}= η έλαχιστη οριζόντια απόσταση, aa_{vert} = η κάθετη απόσταση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΡΟΩΝ (GROUNDWATER MODELING SYSTEM – GMS 6.0)

3.1 Εισαγωγή

Το Groundwater Modeling System είναι ένα περιεκτικότατο γραφικό περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιούνται προσομοιώσεις υπόγειων ροών. Πρόκειται για ένα πλήρες σύστημα διαφορετικών τύπων μαθηματικών μοντέλων (δισδιάστατων ή τρισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων διαφορών). Αναφέρονται τα MODFLOW 2000, MODPATH, MT3DMS/RT3D, SEAM3D, ART3D, UTCHEM, FEMWATER, PEST, UCODE, MODAEM and SEEP2D.

Τα μοντέλα αυτά χωρίζονται στις παρακάτω ενότητες σύμφωνα με τις λειτουργίες τους:

- Δισδιάστατη ροή
  - Το MODAEM, βασιζόμενο σε αναλυτικές μεθόδους, προσομοιώνει εύκολα και γρήγορα προβλήματα δισδιάστατης ροής.
  - Το SEEP2D, βασιζόμενο στα πεπερασμένα στοιχεία, προσομοιώνει τη δισδιάστατη διαρροή, π.χ από φράγματα, από αναχώματα κ.α
- Τρισδιάστατη ροή
  - Το MODFLOW 2000, βασιζόμενο στις πεπερασμένες διαφορές, προσομοιώνει τη ροή του υπόγειου νερού στην κορεσμένη ζώνη.
  - Το FEMWATER, βασιζόμενο στα πεπερασμένα στοιχεία, προσομοιώνει τη ροή του υπόγειου νερού στην κορεσμένη και στην ακόρεστη ζώνη.
- Μεταφορά ρύπανσης
  - Το ART3D, βασιζόμενο σε αναλυτικές μεθόδους, προσομοιώνει απλά δισδιάστατα προβλήματα.
  - Τα MODPATH ή το FEMWATER, βασιζόμενα στα πεπερασμένα στοιχεία, προσομοιώνουν απλά τρισδιάστατα προβλήματα μεταφοράς.
  - Τα RT3D ή SEAM3D, βασιζόμενα στις πεπερασμένες διαφορές, προσομοιώνουν πολύπλοκα τρισδιάστατα προβλήματα μεταφοράς
  - Το UTCHEM, βασιζόμενο στις πεπερασμένες διαφορές, προσομοιώνει τρισδιάστατα προβλήματα μεταφοράς διαφορετικών φάσεων και στρωμάτων.
- Μοντέλα ρύθμισης PEST και UCODE, η παρουσίαση των οποίων θα γίνει παρακάτω.

Τα προηγούμενα αλληλοϋποστηρίζονται και καθένα παρέχει τη δυνατότητα να γίνεται κοινή χρήση της ίδιας πληροφορίας από διαφορετικά μοντέλα και διαφορετικούς τύπους δεδομένων. Τα παρεχόμενα εργαλεία των μοντέλων εκτελούν διαφορετικές

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

λειτουργίες, οι βασικότερες των οποίων είναι ο χαρακτηρισμός της θέσης, η κατασκευή του εννοιολογικού μοντέλου, η βαθμονόμηση, η δημιουργία του καννάβου, η τελική επεξεργασία και η αναπαράσταση.

Σε ένα γραφικό περιβάλλον όπως αυτό του GMS 6.0, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, μέσω της απλής επιλογής ενός σημείου (κελιού) ή συνόλου σημείων, να εισάγει ή / και να τροποποιεί υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά και οριακές συνθήκες στα κατάλληλα πεδία των παραθύρων διαλόγου. Τα εκάστοτε δεδομένα είτε εισάγονται ως εγγραφές, είτε εισάγονται ως σειρές δεδομένων τυχαίων σημείων που «διαβάζονται» από το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα. Τα εξαγόμενα, τέλος, αποτελέσματα είναι γενικευμένα με τέτοιο τρόπο από το GMS, ώστε ο χρήστης να έχει στη διάθεσή του πλήθος επιλογών (μορφών αποτελεσμάτων) προκειμένου να συνδέει το προς επίλυση κάθε φορά πρόβλημα με την αντίστοιχη γραφική απεικόνιση της λύσης.

3.2 Ο Κώδικας Modflow

Για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κατάστασης των υδροφορέων χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές ο κώδικας **Modflow** *(Modular three dimensional finite difference ground water flow model)* της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών *(U.S.G.S.)*,

Το πρόγραμμα στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης, η οποία προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy. Πρόκειται για ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών με επίλυση των εξισώσεων στο κέντρο των κυψελίδων του καννάβου. Εφαρμόζεται τόσο σε μόνιμα, όσο και σε μη μόνιμα προβλήματα ροής και υπολογίζει τις μεταβολές του φορτίου στα σημεία πεδίου σε όλη τη διάρκεια του χρόνου για ομογενή – ετερογενή, ισότροπο ή ανισότροπο υδροφορέα. Επίσης έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης μεγάλου αριθμού πηγαδιών, της κατείσδυσης, της επίδρασης στραγγιστηριών και ποταμών και λιμνών κ.α όπως θα παρουσιαστούν παρακάτω.

3.2.1 Μαθηματικό Υπόβαθρο του Modflow

Έστω ένας στοιχειώδης όγκος δV με περιεχόμενη μάζα δM. Η μεταβολή της μάζας αυτής ανά μονάδα όγκου και χρόνου είναι :

$$\frac{\partial(\delta M)}{\partial t} / \delta V \qquad \text{Εξ. 3.1}$$

Έστω $\vec{q}$ η ταχύτητα Darcy και ρ η πυκνότητα του ρευστού, τότε η ροή της μάζας ανά μονάδα χρόνου θα είναι $\rho \cdot \vec{q}$.

Αν το ρευστό εισέρχεται ή εξέρχεται από το χώρο κατά W(x,y,z,t) ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου, η προστιθέμενη μάζα ανά μονάδα χρόνου και όγκου είναι $\rho \cdot W$.

Επειδή η μάζα διατηρείται, θα ισχύει :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$$\oiint_{\delta V} \rho \cdot \vec{q} \cdot d\vec{S} + \iiint_V \rho \cdot W \cdot dV + \iiint_V \left(\frac{\partial(\delta \mathrm{M})}{\partial t} / \delta V \right) \cdot dV = 0 \qquad \text{Εξ. 3.2}$$

Όπου ο πρώτος όρος είναι το επιφανειακό ολοκλήρωμα, που λαμβάνεται σε όλη την κλειστή επιφάνεια του δV και οι άλλοι δύο όροι ολοκληρώματα όγκου που εκτείνονται στον όγκο του στοιχείου. Σύμφωνα με το θεώρημα της απόκλισης, το επιφανειακό ολοκλήρωμα μπορεί να γραφεί σαν ολοκλήρωμα όγκου :

$$-\oiint \rho \cdot \vec{q} \cdot d\vec{S} = -\iiint \nabla(\rho \cdot \vec{q}) \cdot dV \qquad \text{Εξ. 3.3}$$

Κατά τον Hantush (1964) :

$$\frac{d(\delta \mathrm{M})}{\rho \cdot \delta V} = \frac{d(\delta V_W)}{\delta V} = S_S \cdot d\phi \qquad \text{Εξ. 3.4}$$

όπου S_S είναι η ειδική αποθηκευτικότητα με διαστάσεις L^{-1}. Έτσι η Εξ. 3.2 γράφεται :

$$-\iiint \left\{ \nabla(\rho \cdot \vec{q}) - \rho \cdot W + \rho \cdot S_S \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} \cdot dV = 0 \qquad \text{Εξ. 3.5}$$

ή

$$-\left[\frac{\partial(\rho \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot q_z)}{\partial z} \right] + \rho \cdot W = \rho \cdot S_S \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \qquad \text{Εξ. 3.6}$$

Σύμφωνα με το Hantush (1964), η μεταβολή της πυκνότητας του νερού είναι πολύ μικρή και θεωρείται σταθερή στα περισσότερα προβλήματα υπόγειας υδραυλικής, οπότε μπορεί να παραληφθεί από την Εξ. 3.6. Οι συνιστώσες της ταχύτητας Darcy στις τρεις διαστάσεις, δίνονται από τη σχέση :

$$\left.\begin{aligned} q_x &= -K_{xx} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_{yyx} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_{zz} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned}\right\} \qquad \text{Εξ. 3.7}$$

Η Εξ. 3.6, λόγω της Εξ.3.7 γίνεται :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\cdot\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\cdot\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\cdot\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S_S\cdot\frac{\partial h}{\partial t} \qquad \text{Εξ. 3.8}$$

όπου :

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τις διευθύνσεις X, Y, Z αντίστοιχα σε μονάδες $[LT^{-1}]$.

h το πιεζομετρικό φορτίο σε [L].

W οι εξωτερικές εισροές ή εκροές νερού ανά μονάδα όγκου σε $[T^{-1}]$

S_S η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού σε $[L^{-1}]$, ή το αποτελεσματικό πορώδες ανά μέτρο βάθους το υδροφορέα

t ο χρόνος [T].

Η Εξ.3.8 είναι η τρισδιάστατη διαφορική εξίσωση με μερικές παραγώγους, που περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού σε υπό πίεση υδροφορείς και χρησιμοποιείται από μοντέλο **MODFLOW**. Η εξίσωση αυτή περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού κάτω από συνθήκες μη μόνιμης ροής, σε ετερογενές και ανισότροπο μέσο, με την προϋπόθεση ότι οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας, ταυτίζονται με τους άξονες του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Τα S_s, K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} στην Εξ. 8 μπορούν να είναι συναρτήσει του χώρου ($S_S = S_S(x,y,z)$, $K_{xx} = K_{xx}(x,y,z)$, $K_{yy} = K_{yy}(x,y,z)$, $K_{zz} = K_{zz}(x,y,z)$) και το W συναρτήση του χώρου όσο και του χρόνου ($W = W(x,y,z,t)$).

Η Εξ.3.8 σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες στα όρια του υδροφορέα και με καθορισμό αρχικής συνθήκης πιεζομετρίας, αποτελεί ένα μαθηματικό μοντέλο ενός υπόγειου υδροφορέα. Εκτός από περιπτώσεις πολύ απλών συστημάτων υδροφορέων, αναλυτικές λύσεις της Εξ.3.8 είναι πολύ δύσκολο και τις περισσότερες φορές αδύνατο να επιτευχθούν. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια μαθηματικά μοντέλα, που στηρίζονται σε αριθμητικές μεθόδους επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων και δίνουν προσεγγιστικές λύσεις. Τέτοιες αριθμητικές μέθοδοι είναι οι πεπερασμένες διαφορές, τα πεπερασμένα στοιχεία, τα πολλαπλά κελιά, τα οριακά στοιχεία κ.α.

Το μοντέλο **MODFLOW** με τη βοήθεια του οποίου γίνεται η επίλυση της Εξ.3.8, χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στις τρεις διαστάσεις όπου το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από την Εξ.3.8, αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών σημείων τόσο ως προς το χρόνο όσο και ως προς το χώρο. Οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από όρους που υπολογίζονται ως διαφορές στην πιεζομετρία για τα συγκεκριμένα αυτά σημεία και η διαδικασία αυτή τελικά οδηγεί σε συστήματα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με πεπερασμένες διαφορές και συγκεκριμένα πίσω διαφορές.

Η αριθμητική λύση των συστημάτων αυτών δίνει τιμές για το φορτίο σε συγκεκριμένα σημεία και για συγκεκριμένα χρονικά βήματα. Οι τιμές αυτές αποτελούν μία

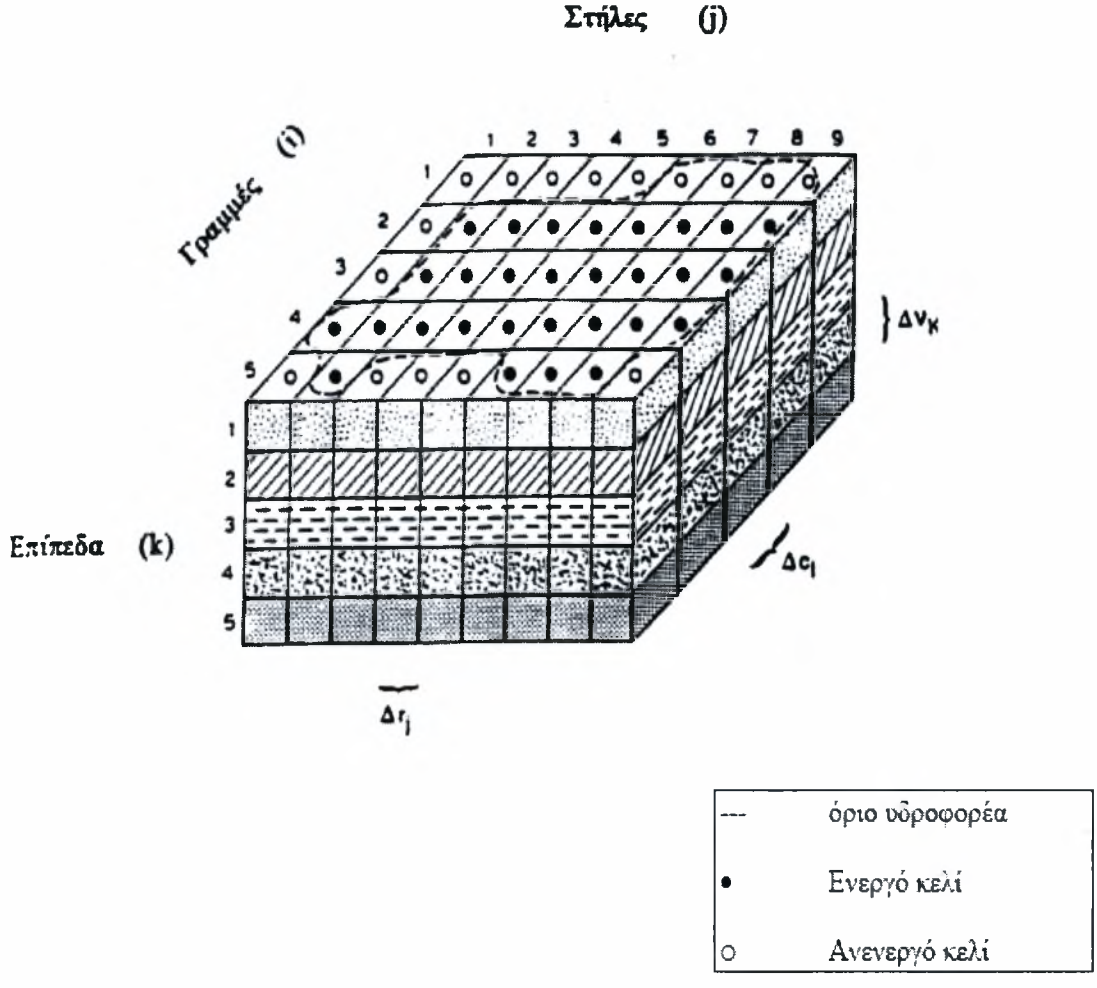
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

προσέγγιση της αναλυτικής λύσης της εξίσωσης η οποία, σε αντίθεση με την αριθμητική λύση, δίνει συνεχείς τιμές της κατανομής φορτίου, για οποιοδήποτε σημείο και για οποιοδήποτε χρόνο.

3.2.2 Διακριτοποίηση

Στο Σχ.3.1 φαίνεται η χωρική διακριτοποίηση ενός υδροφορέα, με ένα πλέγμα ορθογώνιων υποπεριοχών, προσανατολισμένων προς το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένου, που λέγονται κελιά (cells). Κάθε υποπεριοχή αποτελείται από ένα χαρακτηριστικό σημείο, το οποίο είναι το κέντρο βάρους του κελιού και στο οποίο ζητείται να υπολογιστεί η τιμή του h. Χρησιμοποιούνται δείκτες (i,j,k) όπου :

i = 1, 2, ….., nrow, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των γραμμών,
j = 1, 2, ….., ncol, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των στηλών,
k = 1, 2, ….., nlay, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των επιπέδων στην κατακόρυφη διεύθυνση,



Σχήμα 3.1 Χωρική διακριτοποίηση ενός τρισδιάστατου υδροφορέα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Κατά τον σχηματισμό των εξισώσεων του μοντέλου, έγινε η σύμβαση ότι τα επίπεδα αντιπροσωπεύουν οριζόντιες υδρογεωλογικές μονάδες. Έτσι ο δείκτης k σημαίνει αλλαγές πάνω στον κατακόρυφο άξονα z με φορά από πάνω προς τα κάτω. Το ίδιο ισχύει και για τους άλλους δύο άξονες. Τόσο οι γραμμές, που είναι παράλληλες στον άξονα x όσο και οι στήλες που είναι παράλληλες στον y, δίνουν μεταβολές κατά τη διεύθυνση y και x αντίστοιχα. Έτσι το μήκος ενός κελιού κατά τη διεύθυνση των γραμμών σε μια δεδομένη στήλη j, γράφεται Δr_j, ενώ κατά τη διεύθυνση των στηλών σε μια δεδομένη γραμμή i, γράφεται Δc_i και το πάχος του κελιού για ένα δεδομένο επίπεδο Δv_k. Δηλαδή ένα κελί με συντεταγμένες (i,j,k) = (4,8,3) έχει όγκο $\Delta V = \Delta r_8\ \Delta c_4\ \Delta v_3$.

3.2.3 Εξίσωση Πεπερασμένων Διαφορών

Η ανάπτυξη της Εξ. 3.8 υπό μορφή πεπερασμένων διαφορών, απαιτεί την εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας. Με την προϋπόθεση ότι η πυκνότητα ρ του υπόγειου νερού είναι σταθερή, η εξίσωση συνεχείας που εκφράζει το ισοζύγιο της ροής για ένα κελί, δίνεται από την έκφραση :

$$\sum Q_i = S_S \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \Delta V \qquad \text{Εξ. 3.9}$$

όπου

$\sum Q_i$ το σύνολο των πραγματοποιούμενων εισροών ή εκροών στα όρια του κελιού που προέρχονται από γειτονικά κελιά $[L^3T^{-1}]$

S_S η ειδική αποθηκευτικότητα ή το αποτελεσματικό πορώδες ανά μέτρο βάθους του υδροφορέα. Αυτή μπορεί να οριστεί και σαν ο όγκος του νερού, που αντλείται ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα μεταβολής της πιεζομετρίας $[L^{-1}]$

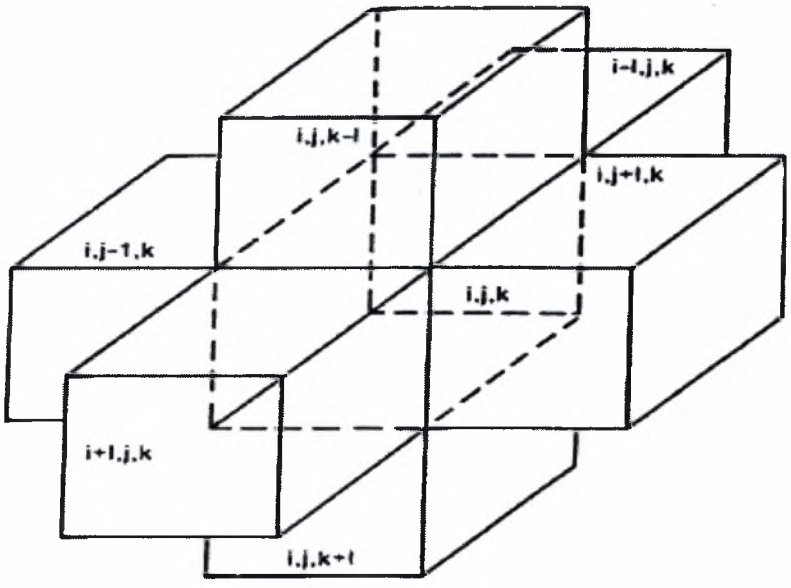
ΔV ο όγκος του κελιού $[L^3]$

Δh η μεταβολή της πιεζομετρίας [L]

Δt το χρονικό βήμα [T]

Οι όροι στο δεξί μέλος της Εξ.3.9, είναι ισοδύναμοι με τον όγκο του νερού που αποθηκεύεται σ' ένα χρονικό διάστημα Δt, κατά το οποίο παρατηρείται αλλαγή της στάθμης κατά Δh. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.2 από την διακριτοποίηση της Εξ.3.9 προκύπτει ένα κεντρικό κελί (i,j,k), και έξι γειτονικά του τα (i-1,j,k), (i+1,j,k), (i,j-1,k), (i,j+1,k), (i,j,k-1), (i,j,k+1).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



Σχήμα 3.2 Το κελί (i,j,k) και τα γειτονικά του.

Η εισροή στο (ι,j,k) λαμβάνεται με θετικό πρόσημο, ενώ η εκροή με αρνητικό. Σύμφωνα με το νόμο του Darcy, για τις ροές των 6 γειτονικών κελιών προς το κεντρικό (ι,j,k), θα ισχύει :

1). Ροή από το κελί (i,j-1,k), στο (ι,j,k) κατά τη διεύθυνση γραμμών (Σχ.3.3) :

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \qquad \text{Εξ. 3.10}$$

όπου

$h_{i,j,k}$ το φορτίο στον κόμβο (ι,j,k) [L]

$h_{i,j-1,k}$ το φορτίο στον κόμβο (ι,j-1,k) [L]

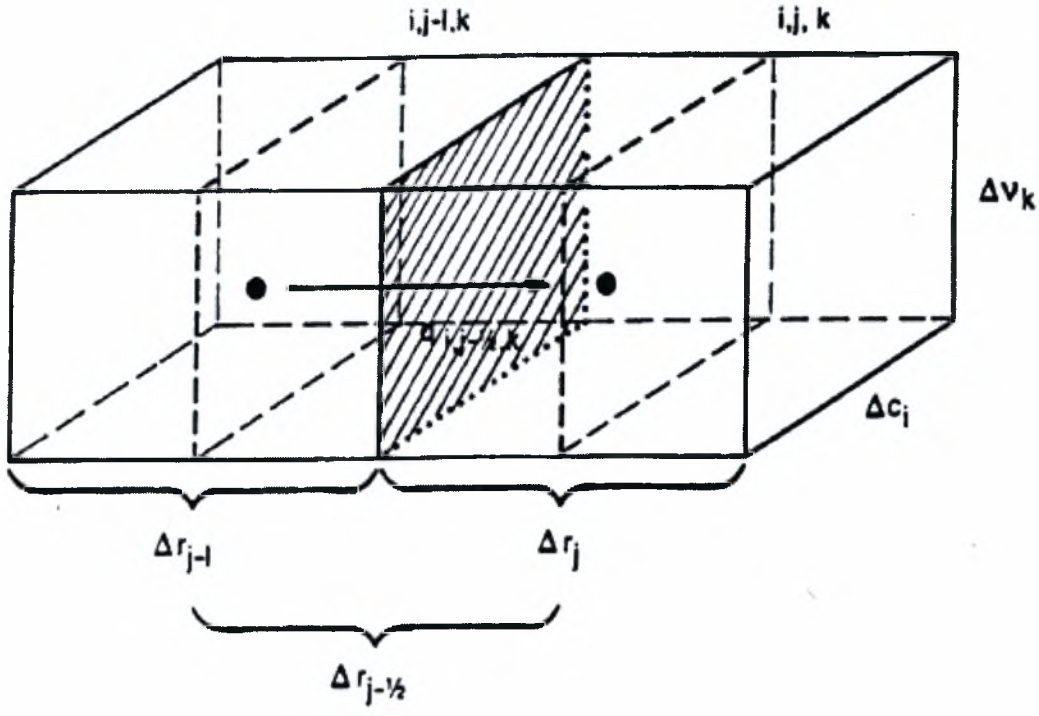
$q_{i,j-1/2,k}$ η παροχή στην κοινή πλευρά των ορθογώνιων στοιχείων (ι,j,k) και (ι,j-1,k) [L^3T^{-1}]

$KR_{i,j-1/2,k}$ η υδραυλική αγωγιμότητα κατά τη διεύθυνση των γραμμών, στην κοινή πλευρά των στοιχείων (ι,j,k) και (ι,j-1,k) [LT^{-1}]

$\Delta c_i \, \Delta v_k$ το εμβαδό της πλευράς του στοιχείου που είναι κάθετη στη διεύθυνση των γραμμών [L^2]

$\Delta r_{j-1/2}$ η οριζόντια απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των στοιχείων (ι,j,k) και (ι,j-1,k) [L]

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



Σχήμα 3.3 Ροή από το κελί (ι,j,k) στο (ι,j-1,k) κατά τη διεύθυνση των γραμμών

Παρόμοιες εκφράσεις μπορούν να γραφούν προσομοιώνοντας τις ροές προς το κελί (ι,j,k) για τις υπόλοιπες 5 επιφάνειες, ως εξής :

2). Ροή από το κελί (i,j+1,k), στο (ι,j,k) κατά τη διεύθυνση γραμμών :

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{\left(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}\right)}{\Delta r_{j+1/2}} \qquad \text{Εξ. 3.11}$$

3). Ροή από το κελί (i-1,j,k), στο (ι,j,k) κατά τη διεύθυνση στηλών :

$$q_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta v_k \cdot \frac{\left(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}\right)}{\Delta c_{j-1/2}} \qquad \text{Εξ. 3.12}$$

4). Ροή από το κελί (i+1,j,k), στο (ι,j,k) κατά τη διεύθυνση στηλών :

$$q_{i+1/2,j,k} = KC_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta v_k \cdot \frac{\left(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}\right)}{\Delta c_{j+1/2}} \qquad \text{Εξ. 3.13}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

5). Ροή από το κελί (i,j,k-1), στο (ι,j,k) κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση :

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \frac{\left(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}\right)}{\Delta v_{k-1/2}} \qquad \text{Εξ. 3.14}$$

6). Ροή από το κελί (i,j,k+1), στο (ι,j,k) κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση :

$$q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \frac{\left(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}\right)}{\Delta v_{k+1/2}} \qquad \text{Εξ. 3.15}$$

όπου οι παράγοντες των παραπάνω γινομένων δικαιολογούνται ανάλογα με την Εξ.3.10. Οι διαστάσεις των στοιχείων (Δr, Δc και Δv) και η υδραυλική αγωγιμότητα K, μπορούν να εκφραστούν με μία σταθερή ποσότητα αγωγιμότητας, με διαστάσεις μεταφορικότητας (transmissivity) $[L^2T^{-1}]$, ως εξής :

$$\left.\begin{aligned}
CR_{i,j-1/2,k} &= KR_{i,j-1/2,k} \cdot \frac{\Delta c_i \cdot \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} \\
CR_{i,j+1/2,k} &= KR_{i,j+1/2,k} \cdot \frac{\Delta c_i \cdot \Delta v_k}{\Delta r_{j+1/2}} \\
CC_{i-1/2,j,k} &= KC_{i-1/2,j,k} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta v_k}{\Delta c_{i-1/2}} \\
CC_{i+1/2,j,k} &= KC_{i+1/2,j,k} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta v_k}{\Delta c_{i+1/2}} \\
CV_{i,j,k-1/2} &= KV_{i,j,k-1/2} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta c_i}{\Delta v_{k-1/2}} \\
CV_{i,j,k+1/2} &= KV_{i,j,k+1/2} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta c_i}{\Delta v_{k+1/2}}
\end{aligned}\right\} \qquad \text{Εξ. 3.16}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Οι Εξ.3.10-3.15 με τη βοήθεια της Εξ. 3.16 μετατρέπονται σε μια λιγότερο πολύπλοκη μορφή :

$$\left.\begin{aligned}
q_{i,j-1/2,k} &= CR_{i,j-1/2,k} \cdot \left(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}\right) \\
q_{i,j+1/2,k} &= CR_{i,j+1/2,k} \cdot \left(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}\right) \\
q_{i-1/2,j,k} &= CC_{i-1/2,j,k} \cdot \left(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}\right) \\
q_{i+1/2,j,k} &= CC_{i+1/2,j,k} \cdot \left(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}\right) \\
q_{i,j,k-1/2} &= CV_{i,j,k-1/2} \cdot \left(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}\right) \\
q_{i,j,k+1/2} &= CV_{i,j,k+1/2} \cdot \left(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}\right)
\end{aligned}\right\} \qquad \text{Εξ. 3.17}$$

Οι Εξ.3.17 ισχύουν μόνο για εσωτερικές ροές από τα έξι στοιχεία προς το στοιχείο (i,j,k). Για την περίπτωση κατά την οποία συμβαίνουν εισροές ή εκροές από εξωτερικές πηγές όπως ποτάμια, λίμνες, πηγάδια, εξατμισοδιαπνοή και άλλα, οι ροές αυτές αντιπροσωπεύονται από την έκφραση :

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n}\, h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \qquad \text{Εξ. 3.18}$$

όπου :

$a_{i,j,k,n}$ αντιπροσωπεύει τη ροή από τη n-οστή εξωτερική πηγή στο κελί (ι,j,k) σε $[L^3T^{-1}]$

$p_{i,j,k,n}$ σταθερή ποσότητα σε μονάδες $[L^2T^{-1}]$

$q_{i,j,k,n}$ σταθερή ποσότητα σε μονάδες $[L^3T^{-1}]$

Για το σύνολο των πραγματοποιούμενων εξωτερικών εισροών ή εκροών από N εξωτερικές πηγές προς το κελί (i,j,k), μπορεί να γραφτεί :

$$\sum_{n=1}^{N} a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^{N} p_{i,j,k,n} \cdot h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^{N} q_{i,j,k,n} \qquad \text{Εξ. 3.19}$$

όπου καθένας από τους όρους της Εξ.3.19, είναι ίσος με :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

$$\left.\begin{aligned} \sum_{n=1}^{N} a_{i,j,k,n} &= QS_{i,j,k} \\ \sum_{n=1}^{N} p_{i,j,k,n} &= P_{i,j,k} \\ \sum_{n=1}^{N} q_{i,j,k,n} &= Q_{i,j,k} \end{aligned}\right\} \qquad \text{Εξ. 3.20}$$

άρα για το σύνολο των εξωτερικών ροών θα ισχύει :

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k}\, h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \qquad \text{Εξ. 3.21}$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση συνέχειας Εξ.3.9 για το στοιχείο (i,j,k) και λαμβάνοντας υπ' όψη τις ροές από τα έξι γειτονικά του στοιχεία Εξ.3.17 καθώς και το σύνολο των εξωτερικών ροών Εξ.3.21 προκύπτει :

$$q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \cdot \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \qquad \text{Εξ. 3.22}$$

όπου :

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$ είναι η προσέγγιση της παραγώγου του φορτίου ως προς το χρόνο $[LT^{-1}]$

$Ss_{i,j,k}$ η ειδική αποθηκευτικότητα του στοιχείου (i,j,k) $[L^{-1}]$

$\Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k$ ο όγκος του στοιχείου (i,j,k) $[L^3]$

Αν αντικατασταθούν οι Εξ.3.17 και Εξ.3.21 στην Εξ. 3.22 τότε η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών γράφεται :

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} \cdot \left(h^m{}_{i,j-1,k} - h^m{}_{i,j,k}\right) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot \left(h^m{}_{i,j+1,k} - h^m{}_{i,j,k}\right) \\ & + CC_{i-1/2,j,k} \cdot \left(h^m{}_{i-1,j,k} - h^m{}_{i,j,k}\right) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} \cdot \left(h^m{}_{i+1,j,k} - h^m{}_{i,j,k}\right) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot \left(h^m{}_{i,j,k-1} - h^m{}_{i,j,k}\right) + \\ & CV_{i,j,k+1/2} \cdot \left(h^m{}_{i,j,k+1} - h^m{}_{i,j,k}\right) \\ & + P_{i,j,k} \cdot h^m{}_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \cdot \left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}\right)^m \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \end{aligned} \qquad \text{Εξ. 3.23}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

όπου m το χρονικό βήμα

Αν αντικατασταθεί η προσέγγιση της παραγώγου του φορτίου με διαφορές ανάμεσα σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή t^m όπου το φορτίο είναι άγνωστο και ίσο με $h^m_{i,j,k}$ και σε μία χρονική στιγμή αμέσως προηγούμενη, την t^{m-1} όπου το φορτίο είναι γνωστό και ίσο με $h^{m-1}_{i,j,k}$, θα προκύψει ένα σχήμα πίσω διαφορών ή πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα :

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}\right)^m = \frac{h^m{}_{i,j,k} - h^{m-1}{}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}} \qquad \text{Εξ. 3.24}$$

Άλλο σχήμα που μπορεί εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά, είναι το σχήμα των εμπρός διαφορών (forward differences) ή ρητό υπολογιστικό σχήμα :

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}\right)^m = \frac{h^{m+1}{}_{i,j,k} - h^m{}_{i,j,k}}{t^{m+1} - t^m} \qquad \text{Εξ. 3.25}$$

Στο σχήμα αυτό το φορτίο σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή t^{m+1} είναι άγνωστο και ίσο με $h^{m+1}_{i,j,k}$, ενώ σε μια χρονική στιγμή αμέσως προηγούμενη, την t^m, είναι γνωστό και ίσο με $h^m_{i,j,k}$. Το ρητό υπολογιστικό σχήμα είναι απλούστερο στην επίλυση, γιατί σε κάθε εξίσωση υπάρχει μόνο ένας άγνωστος και μπορεί να λυθεί απευθείας, δίνει όμως αστάθεια στις λύσεις με αποτέλεσμα η αριθμητική λύση να αποκλίνει τελείως από την αναλυτική. Αντίθετα, το πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα, είναι μεν πιο πολύπλοκο, αφού κάθε εξίσωση έχει 7 αγνώστους και η λύση απαιτεί την ταυτόχρονη επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων, αλλά δίνει ευσταθείς αριθμητικές λύσεις, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να συγκλίνουν.

Το πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα ή πίσω διαφορών είναι ευσταθές άνευ όρων, όπως αποδεικνύεται παρακάτω στην ανάλυση ευστάθειας και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται στο μοντέλο **MODFLOW**.

Λαμβάνοντας υπόψη την Εξ. 3.24, η Εξ. 3.23 γράφεται :

$$\begin{aligned}
&CR_{i,j-1/2,k}\cdot\left(h^m{}_{i,j-1,k} - h^m{}_{i,j,k}\right) + CR_{i,j+1/2,k}\cdot\left(h^m{}_{i,j+1,k} - h^m{}_{i,j,k}\right)\\
&+CC_{i-1/2,j,k}\cdot\left(h^m{}_{i-1,j,k} - h^m{}_{i,j,k}\right)\\
&+CC_{i+1/2,j,k}\cdot\left(h^m{}_{i+1,j,k} - h^m{}_{i,j,k}\right) + CV_{i,j,k-1/2}\cdot\left(h^m{}_{i,j,k-1} - h^m{}_{i,j,k}\right) +\\
&CV_{i,j,k+1/2}\cdot\left(h^m{}_{i,j,k+1} - h^m{}_{i,j,k}\right)\\
&+P_{i,j,k}\cdot h^m{}_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k}\cdot\frac{h^m{}_{i,j,k} - h^{m-1}{}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}}\cdot\Delta r_j\cdot\Delta c_i\cdot\Delta v_k \qquad \text{Εξ. 3.26}
\end{aligned}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Η εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών Εξ.26 αποτελεί μία προσομοίωση της διαφορικής εξίσωσης κίνησης του υπόγειου νερού στις τρεις διαστάσεις με μερικές παραγώγους. Όλοι οι συντελεστές είναι γνωστοί, καθώς επίσης και το φορτίο στην χρονική στιγμή m-1. Άγνωστοι είναι τα φορτία στο κελί (i,j,k) και στα 6 γειτονικά του τη χρονικής στιγμή m, δηλαδή 7 άγνωστοι που πρέπει να βρεθούν στην χρονική στιγμή m. Αν το i παίρνει τιμές από 1 ως NROW, το j από 1 ως NCOL και το k από 1 ως NLAY, θα έχουμε ένα σύστημα εξισώσεων (NROW-2) (NCOL -2) (NLAY-2) με αγνώστους (NROW NCOL NLAY). Άρα χρειάζονται 6 επιπλέον εξισώσεις οι οποίες προκύπτουν από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Επίσης χρειάζεται και μία αρχική συνθήκη που θα δίνει τα φορτία h στην χρονική στιγμή m=1. Επομένως η Εξ.3.26 γράφεται για κάθε ένα από τα στοιχεία του πλέγματος και σε συνδυασμό με την αρχική συνθήκη πιεζομετρίας και τις 6 οριακές συνθήκες ροής (σταθερό φορτίο, αδιαπέρατο όριο, σταθερή ροή) στα όρια του υδροφορέα, προκύπτει τελικά ένα σύστημα n- αλγεβρικών εξισώσεων με n- αγνώστους. Αν στην παραπάνω σχέση χωρίσουμε γνωστούς από αγνώστους για το συγκεκριμένο στοιχείο (i,j,k) προκύπτει :

$$
\begin{aligned}
& CR_{i,j-1/2,k} \cdot \left(h^m{}_{i,j-1,k}\right) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot \left(h^m{}_{i,j+1,k}\right) + CC_{i-1/2,j,k} \cdot \left(h^m{}_{i-1,j,k}\right) \\
& + CC_{i+1/2,j,k} \cdot \left(h^m{}_{i+1,j,k}\right) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot \left(h^m{}_{i,j,k-1}\right) + CV_{i,j,k+1/2} \cdot \left(h^m{}_{i,j,k+1}\right) \\
& - (CR_{i,j-1/2,k} + CR_{i,j+1/2,k} + CC_{i-1/2,j,k} \\
& + CC_{i+1/2,j,k} + CV_{i,j,k-1/2} + CV_{i,j,k+1/2} + \mathrm{HCOF}_{i,j,k})\, h^m{}_{i,j,k} = \mathrm{RHS}_{i,j,k}
\end{aligned}
\qquad \text{Εξ. 3.27}
$$

όπου

$$\mathrm{HCOF}_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SCI}{t^m - t^{m-1}} \qquad [L^2T^{-1}]$$

$$\mathrm{RHS}_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} + \mathrm{SCI}_{i,j,k} \cdot \frac{h^{m-1}{}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}} \qquad [L^3T^{-1}]$$

$$\mathrm{SCI}_{i,j,k} = \mathrm{Ss}_{i,j,k} \;\; \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \qquad [L^2] \qquad \text{Εξ. 3.28}$$

η οποία γράφεται με τη μορφή μητρώων, για n-αριθμό στοιχείων (i,j,k) ως εξής :

$$[A]\,[h] = [q] \qquad \text{Εξ. 3.29}$$

όπου

[A] το μητρώο των σταθερών συντελεστών των φορτίων

[h] ο πίνακας - διάνυσμα των αγνώστων τιμών των φορτίων στο χρονικό βήμα m

[q] ο πίνακας - διάνυσμα των σταθερών όρων και φορτίων που αντιστοιχούν στη χρονική στιγμή m-1 και περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία του πλέγματος.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

3.2.4 Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών

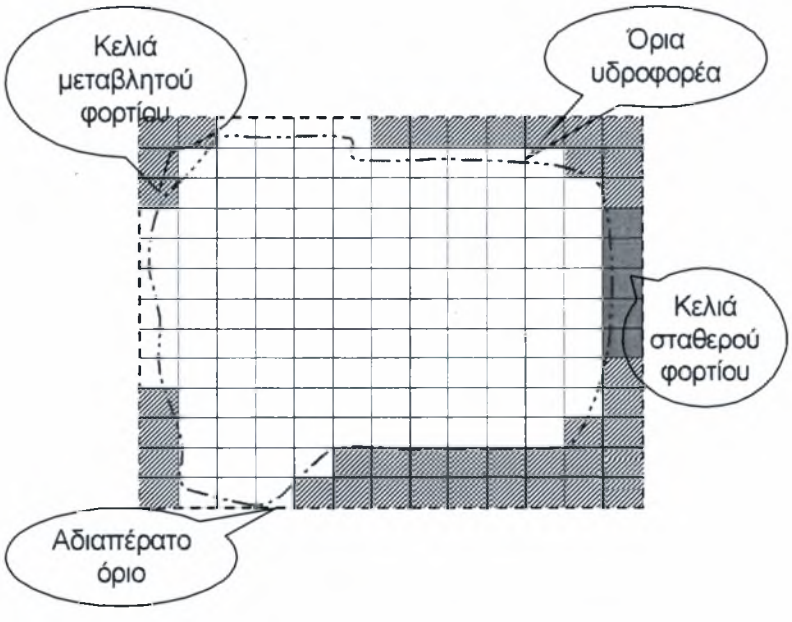
Στο **MODFLOW**, για τις ανάγκες της εξομοίωσης των οριακών συνθηκών του εκάστοτε προβλήματος, τα κελιά που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

a. Κελιά σταθερού φορτίου, όπου το υδραυλικό φορτίο καθορίζεται εκ των προτέρων και παραμένει σταθερό σε όλα τα βήματα της προσομοίωσης.

b. Ανενεργά ή αδιαπέρατα κελιά, στα οποία η ροή δεν επιτρέπεται από ή προς αυτά καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

c. Κελιά μεταβλητού φορτίου. Είναι όλα τα υπόλοιπα, στα οποία τα φορτία δεν καθορίζονται, αλλά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Οι οριακές συνθήκες ενός προβλήματος προσεγγίζονται μόνο από κελιά σταθερού φορτίου και ανενεργά ή αδιαπέραστα. Τα πρώτα μπορεί να προσομοιώνουν την επικοινωνία του υδροφορέα με επιφανειακούς πόρους (όπως λίμνες ή ποτάμια), ενώ τα δεύτερα κελιά τα έξω όρια του υδροφορέα ή τα αδιαπέραστα όριά του. Όπου υπάρχουν όρια σταθερής εισροής ή μεταβαλλόμενης με το φορτίο μπορούν να προσομοιωθούν ως εξωτερικές πηγές ή ως συνδυασμός αδιαπέραστων κελιών και εξωτερικής πηγής. Στο αμέσως επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η διακριτοποίηση ενός υποθετικού υδροφορέα με τις οριακές του συνθήκες.



Σχήμα 3.4 Τύποι κελιών και προσομοίωση οριακών συνθηκών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

3.2.5 Πακέτα υποστήριξης του MODFLOW

Στο **Modflow** εκτός από το κεντρικό πρόγραμμα περιλαμβάνεται και μια σειρά από ανεξάρτητα υποπρογράμματα ***(packages)***. Τα υποπρογράμματα συνίστανται από υπορουτίνες ***(modules)***. Η κάθε υπορουτίνα επιτελεί συγκεκριμένους υπολογισμούς. Με απλά λόγια τα modules έχουν ομαδοποιηθεί με τη μορφή «πακέτων» και κάθε πακέτο είναι μια ομάδα από modules, που σχετίζεται με μια φάση της προσομοίωσης.

Κατά το ¨τρέξιμο¨ του προγράμματος χρησιμοποιούνται μόνον εκείνα από τα προσφερόμενα πακέτα, τα οποία είναι απαραίτητα για τη συγκεκριμένη περίπτωση προσομοίωσης. Τα κυριότερα υποπρογράμματα (*packages*) είναι τα εξής:

- Basic package
- BCF2 (block centered flow) package
- River package ή Stream package
- Well package
- Recharge package
- Drain package
- Evapotranspiration package
- General-head package
- Constant head package
- SIP solution package
- SSOR solution package
- PCG2 solution package και Output control package

Μια γρήγορη παρουσίαση αυτών γίνεται παρακάτω :

1. Βασικό πακέτο (Basic Package, BAS)

   Τα δεδομένα που εισάγονται στο βασικό πακέτο αφορούν:

   - τον αριθμό των γραμμών και στηλών
   - τον αριθμό των υδροφόρων στρωμάτων
   - τη χρονική περίοδο προσομοίωσης και το βήμα κάθε περιόδου
   - τον καθορισμό των μονάδων μέτρησης
   - τις οριακές συνθήκες σε κάθε κόμβο του καννάβου

Ως αρχική συνθήκη εισάγεται η πιεζομετρία στην αρχή της χρονικής περιόδου, που προέρχεται από μετρήσεις πεδίου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

2. Block-Centered Flow Package (BCF)

Στο πακέτο αυτό εισάγονται πληροφορίες που αφορούν:

- τον τύπο του υδροφορεα (ελεύθερος, υπό πίεση, ημιελεύθερος)
- τις συνθήκες ροής (μόνιμη ή μη μόνιμη κατάσταση ροής)
- τις διαστάσεις των κυψελίδων κατά τη διεύθυνση των αξόνων x και y
- τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες ή της μεταβιβαστικότητας για τους υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες
- τον συντελεστή αποθηκευτικότητας ή το ενεργό πορώδες

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι κάθε κόμβος να εντοπίζεται στο κέντρο κάθε κυψελίδας του μοντέλου.

3. Υδατορεύματα (Rivers, RIV)

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει τη ροή νερού μεταξύ υδατορρεύματος (ποταμού, λίμνης) και υδροφορέα. Τα υδατορεύματα τροφοδοτούν τον υδροφορεα ή τροφοδοτούνται από αυτόν ανάλογα με την υδραυλική κλίση μεταξύ του επιφανειακού υδάτινου σώματος και του υδροφορέα.

Το πακέτο Rivers απαιτεί τις παρακάτω πληροφορίες για κάθε κυψελίδα που περιέχει όριο ποταμού:

- Το υψόμετρο της στάθμης του υδατορεύματος, το οποίο μπορεί να αλλάζει με το χρόνο
- Το υψόμετρο του πυθμένα του υδατορεύματος (υψόμετρο κοίτης)
- Την αγωγιμότητα (**C**). Είναι μια αριθμητική παράμετρος που αντιπροσωπεύει την αντίσταση στη ροή μεταξύ υδατορεύματος και υδροφόρου στρώματος. Υπολογίζεται από το μήκος του υδατορεύματος ανά κυψελίδα (**L**), το πλάτος του υδατορεύματος ανά κυψελίδα (**W**), το πάχος του υποστρώματος της κοίτης (**M**) και την υδραυλική αγωγιμότητά τους (**K**).Έτσι η αγωγιμότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\boxed{C = \frac{K \cdot L \cdot W}{M}} \qquad \text{Εξ. 3.30}$$

4. Γεωτρήσεις (Well Package)

Το πακέτο αυτό αναφέρεται στα δεδομένα των γεωτρήσεων άντλησης ή εμπλουτισμού σε ένα υδροφορέα για μια δεδομένη περίοδο. Θετικές τιμές της παροχής υποδηλώνουν εμπλουτισμό, ενώ οι αρνητικές κατάσταση άντλησης. Ο ρυθμός άντλησης θεωρείται ανεξάρτητος, τόσο από την έκταση της κυψελίδας, όσο και από την πιεζομετρική στάθμη σ΄ αυτή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

5. Εμπλουτισμός (Recharge Package, RCH)

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει την επιφανειακή κατανομή του εμπλουτισμού προς το υπόγειο υδροφόρο σύστημα. Ο εμπλουτισμός αναφέρεται, είτε στην κατείσδυση από τις βροχοπτώσεις, είτε σε τεχνητό εμπλουτισμό. Ο εμπλουτισμός μπορεί να εισαχθεί μόνο στο ανώτερο στρώμα (top layer). Έτσι δεν χρειάζεται ο υπολογισμός του εμπλουτισμού, που λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα σε πολλαπλά επίπεδα μιας κατακόρυφης στήλης, επειδή ο φυσικός εμπλουτισμός εισέρχεται στον υδροφορέα από την επιφάνεια του εδάφους.

6. Στραγγιστήρια (Drains)

Το πακέτο αυτό έχει σχεδιασθεί για να προσομοιώνει τα αποτελέσματα της επιστροφής του αρδευτικού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα. Τα δεδομένα εισόδου που απαιτεί είναι το βάθος των στραγγιστηρίων και η αγωγιμότητα C.

7. Evapotranspiration (ET)

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει τα αποτελέσματα της διαπνοής των φυτών και της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους. Στο **MODFLOW** η εξατμισιδιαπνοή εισάγεται στην οροφή του ανώτερου στρώματος το οποίο απαιτεί το ύψος της εξατμισοδιαπνοής σε mm ή m σε κάποια χρονική μονάδα sec.

8. General Head Boundary (G.H.B.)

Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για να προσομοιώσει την υπόγεια υδραυλική επικοινωνία γειτονικών υδροφορέων. Έτσι αυτό το πακέτο μπορεί να προσομοιώσει την υδραυλική σύνδεση με έναν υδροφορέα, που βρίσκεται εκτός των ορίων της προσομοιούμενης περιοχής και υποδηλώνει την ύπαρξη μιας πλευρικής τροφοδοσίας. Τα αντικείμενα, για την προσομοίωση των οποίων χρησιμοποιείται το πακέτο αυτό, μπορούν να καθοριστούν με τη χρήση σημείων, τόξων ή πολυγώνων.

Η παροχή τροφοδοσίας είναι ανάλογος προς τη διαφορά της στάθμης ανάμεσα στην εξωτερική αυτή πηγή και σε κάθε κυψελίδα στην περιοχή του μοντέλου. Η παροχή αυτή επίσης εξαρτάται από την αγωγιμότητα ***(conductance)*** των υλικών ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και στην κυψελίδα ή τις κυψελίδες του μοντέλου με τις οποίες γειτνιάζει. Η αγωγιμότητα είναι μια αριθμητική παράμετρος και ορίζεται ως η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα της κυψελίδας πολλαπλασιαζόμενη με την εγκάρσια διατομή αυτής και διαιρούμενη με την απόστασή της από την εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.

Το πακέτο αυτό απαιτεί, για κάθε κυψελίδα που περιέχει το όριο αυτό:

- Το γενικό φορτίο: Αυτό το φορτίο είναι το επίπεδο της υδάτινης επιφάνειας στο όριο. Αυτό μπορεί να είναι φυσικά καθορισμένο όπως π.χ. η επιφάνεια μιας λίμνης ή μπορεί να ληφθεί από τη ρύθμιση του μοντέλου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- Την αγωγιμότητα: Αντιπροσωπεύει την αντίσταση της ροής ανάμεσα στο όριο γενικού φορτίου και τα υπόγεια νερά της προσομοιούμενης περιοχής.

9. Constant head

Τα όρια σταθερού φορτίου μένουν αμετάβλητα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό προϋποθέτει ότι στην έναρξη και στο τέλος της προσομοίωσης τα φορτία είναι σταθερά ζητούνται απλά τιμές υδραυλικού φορτίου στα άκρα του ορίου.

10. Ισχυρά πεπλεγμένη μέθοδος (Strongly Implicit Procedure Package, SIP)

Το πακέτο αυτό συνιστά μια μέθοδο επίλυσης του συστήματος γραμμικών εξισώσεων, που προκύπτει με τη χρήση επαναληπτικών διαδικασιών. Όπως έχει προαναφερθεί για κάθε κυψελίδα χρησιμοποιείται μια εξίσωση πεπερασμένων διαφορών. Το σύνολο των εξισώσεων του καννάβου πρέπει να επιλύεται ταυτόχρονα σε κάθε βήμα. Η επίλυση συνίσταται στη λήψη μιας τιμής της πιεζομετρικής στάθμης για κάθε κόμβο.

11. Έλεγχος Αποτελεσμάτων (Output Control)

Στο πακέτο αυτό καθορίζεται ο τρόπος και η μορφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με άλλα βοηθητικά προγράμματα για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό από τα παραπάνω ότι τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου (*input data*) για την εφαρμογή του **Modflow** είναι:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα
- Αρχικές συνθήκες, δηλ. οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου σε όλους τους κόμβους του καννάβου.
- Οριακές συνθήκες είτε με τιμές πιεζομετρικού φορτίου, είτε με τη μορφή ροής στα όρια του καννάβου.
- Βάθη υδροφόρων στρωμάτων.
- Υδραυλικές παράμετροι (υδραυλική αγωγιμότητα, συντελεστής αποθηκευτικότητας κ.ά.)
- Παροχές αντλήσεων ή εμπλουτισμού.
- Δεδομένα κατείσδυσης, που προκύπτουν από τις βροχοπτώσεις, την εξατμισιδιαπνοή και το είδος των γεωλογικών σχηματισμών.
- Διηθήσεις από ποταμούς ή χειμάρρους.
- Επιστροφές άρδευσης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

3.2.6 Σχεδιασμός του καννάβου

Χρησιμοποιούνται γραμμές καννάβου για να χωριστεί η περιοχή μελέτης σε κελιά, τα οποία είναι ορθογώνια κατά τις δύο διαστάσεις τους, αλλά η καθ' ύψος διάσταση μπορεί να ακολουθήσει τη γεωλογική δομή. Τα κελιά του καννάβου δεν χρειάζεται να είναι όλα του ιδίου μεγέθους, παρόλα αυτά καμιά σειρά ή στήλη δεν πρέπει να είναι κατά 50% μεγαλύτερη από γειτονική της. Η διαφορά στο μέγεθος επιβαρύνει το σφάλμα του μοντέλου και εάν η διαφορά στα μεγέθη εφαπτόμενων σειρών ή στηλών είναι πολύ μεγάλη, τα προκύπτοντα σφάλματα μπορεί να είναι σημαντικά.

Επειδή η επίλυση της προσομοίωσης του μοντέλου μπορεί να πάρει αρκετό χρόνο, είναι χρήσιμο να χρησιμοποιούνται μικρά κελιά μόνο σε εκείνα τα τμήματα του μοντέλου, στα οποία απαιτούνται λεπτομερή αποτελέσματα ή όπου οι κλίσεις είναι μάλλον απότομες. Πιο απότομες κλίσεις βρίσκονται κοντά στα πηγάδια άντλησης και σε άλλα σημεία απορροής. Αν ο υδροφορέας προς εξομοίωση είναι ανισότροπος, ο κάνναβος πρέπει να ευθυγραμμιστεί με τις διευθύνσεις της μεγαλύτερης και της μικρότερης υδραυλικής αγωγιμότητας. Διαφορετικά, ο κάνναβος θα πρέπει να ευθυγραμμιστεί με όποιον τρόπο είναι πιο βολικός.

Υπάρχει η δυνατότητα κάποια κελιά του καννάβου να καθοριστούν ως ανενεργά, με αποτέλεσμα να εξαιρούνται από το μοντέλο. Τα όρια του συστήματος ροής πρέπει να προσεγγιστούν από ένα κλειστό όριο. Εάν η επαναφόρτιση δεν είναι ομοιόμορφη, η περιοχή που εκτείνεται γύρω από κάθε ζώνη διαφορετικής επαναφόρτισης πρέπει να είναι κοντά στα πραγματικά της όρια, έτσι ώστε η ποσότητά της να είναι προσεγγιστικά σωστή.

3.3 Τρόποι προσέγγισης του MODFLOW

Τα μοντέλα προσομοίωσης του **MODFLOW** μπορούν να κατασκευαστούν με δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις:

- Την <u>προσέγγιση του καννάβου</u> (Grid Approach). Αυτή συνεπάγεται την απευθείας εργασία πάνω στον τρισδιάστατο κάνναβο και την εφαρμογή των οριακών συνθηκών, καθώς και την εισαγωγή όλων των υπολοίπων παραμέτρων του μοντέλου από κελί σε κελί.
- Την <u>προσέγγιση του εννοιολογικού μοντέλου</u> (Conceptual Model Approach). Εδώ η εργασία προϋποθέτει τη χρήση εργαλείων προερχόμενων από τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, πάνω σε ψηφιοποιημένο χάρτη της περιοχής που πρόκειται να προσομοιωθεί. Τα δεδομένα του εννοιολογικού μοντέλου εν συνεχεία αντιγράφονται στον κάνναβο.

Σημειώνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η προσέγγιση του εννοιολογικού μοντέλου είναι αποτελεσματικότερη σε σχέση με την προσέγγιση του καννάβου. Εντούτοις, η πρώτη είναι χρήσιμη σε απλά προβλήματα ή σε ακαδημαϊκές ασκήσεις, όπου η εισαγωγή στοιχείων κελί προς κελί θεωρείται απαραίτητη.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

3.3.1 Προσέγγιση Καννάβου

Τα βήματα της εργασίας στην προσέγγιση αυτή είναι τα ακόλουθα:

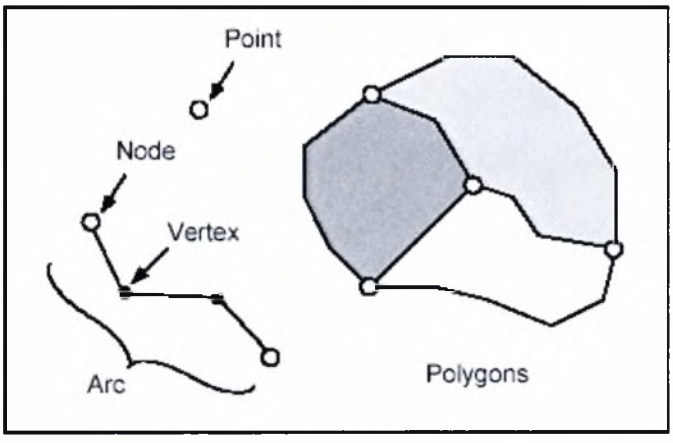
- Αρχικά δημιουργείται ο κάνναβος, ορίζοντας τις τρεις διαστάσεις του, αφού έχει επιλεχθεί η κατάλληλη μονάδα μέτρησης. Μαζί με αυτές, καθορίζεται και ο επιθυμητός αριθμός των κελιών για κάθε διάσταση.
- Στη συνέχεια εισάγονται οι βασικές επιδράσεις που δέχεται το μοντέλο (ντραίνα, πηγάδια, επαναφορτίσεις ή ό,τι άλλο περιλαμβάνει η εξεταζόμενη περιοχή), καθώς και τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων.
- Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστούν τα ενεργά, ανενεργά ή σταθερού φορτίου κελιά και έπειτα τα αρχικά φορτία, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εξομοίωση μεταβαλλόμενης ροής. Εάν πρόκειται για εξομοίωση σταθερής ροής, μια αρχική τιμή του σταθερού φορτίου δε θα επηρέαζε προφανώς σημαντικά την τελική λύση. Εξάλλου, όσο πλησιέστερες είναι οι αρχικές τιμές φορτίου στις τελικές, τόσο γρηγορότερα καταλήγει το **Modflow** σε λύση. Επιπρόσθετα, για ορισμένους τύπους στρωμάτων, αν οι αρχικές τιμές είναι πολύ χαμηλές, το **Modflow** μπορεί να θεωρήσει τα εν λόγω κελιά ¨ξηρά¨.
- Σε αυτό το σημείο εισάγονται τα δεδομένα που αφορούν τη ροή κάθε στρώματος. Βάσει αυτών υπολογίζονται οι αγωγιμότητες μεταξύ των κελιών του καννάβου και καθορίζονται οι εξισώσεις των πεπερασμένων διαφορών για τη ροή από κελί σε κελί. Το πρόγραμμα απαιτεί σε αυτή τη φάση – για τον υπολογισμό των παραπάνω αγωγιμοτήτων - τον καθορισμό ενός συνόλου παραμέτρων για κάθε επίπεδο, παράμετροι που εξαρτώνται σαφώς από το είδος του. Συνεπώς, ορίζονται το είδος, το πάνω και κάτω όριο, καθώς και την οριζόντια και κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα κάθε επιπέδου.
- Τελευταίο βήμα, η εισαγωγή της επαναφόρτισης του υδροφορέα εξαιτίας της βροχόπτωσης, συνεπώς και της κατείσδυσης. Ομοίως, ορίζονται τα τυχόν ντραίνα με τα υψόμετρα και την αγωγιμότητά τους, καθώς και τα πηγάδια με τις αντλήσεις τους.
- Έπειτα από τα παραπάνω βήματα, αφού αποθηκευτεί – όπως πάντα σε αυτό το σημείο – η προσομοίωσή , εκτελείτε το πρόγραμμα. Το GMS ¨διαβάζει¨ αυτόματα τη λύση του **Modflow**, όταν κλείσει το παράθυρο διαλόγου του τελευταίου. Είναι ορατές πλέον οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες της λύσης μας.

Το **Modflow** παρέχει τη δυνατότητα επιλογής του τρόπου εμφάνισης των αποτελεσμάτων, καθώς και πλήθος επιλογών για την ανάλυσή τους, όπως ιστογράμματα, δείκτες σφαλμάτων, κ.ά.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

3.3.2 Προσέγγιση του Εννοιολογικού Μοντέλου

Όπως εισαγωγικά προαναφέρθηκε, το εννοιολογικό μοντέλο συνεπάγεται υλοποίηση μιας υψηλού επιπέδου και ταυτόχρονα απλοποιημένης αναπαράστασης του μοντέλου με τη χρήση χαρακτηριστικών αντικειμένων της σχεδιαστικής υπορουτίνας (*Map* module), (Σχήμα 3.5). Από τη στιγμή που το μοντέλο έχει καθοριστεί, ο κάνναβος δημιουργείται αυτόματα, ενώ επίσης αυτόματα το GMS αντιστοιχίζει τις οριακές συνθήκες και τις λοιπές παραμέτρους με τα κατάλληλα κελιά. Για τη διαμόρφωση του εννοιολογικού μοντέλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν σχεδιαστικά εργαλεία σημεία, τόξα και πολύγωνα.



Σχήμα 3.5 Χαρακτηριστικά αντικείμενα του Map module

Η δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου απαιτεί δεδομένα που αφορούν:

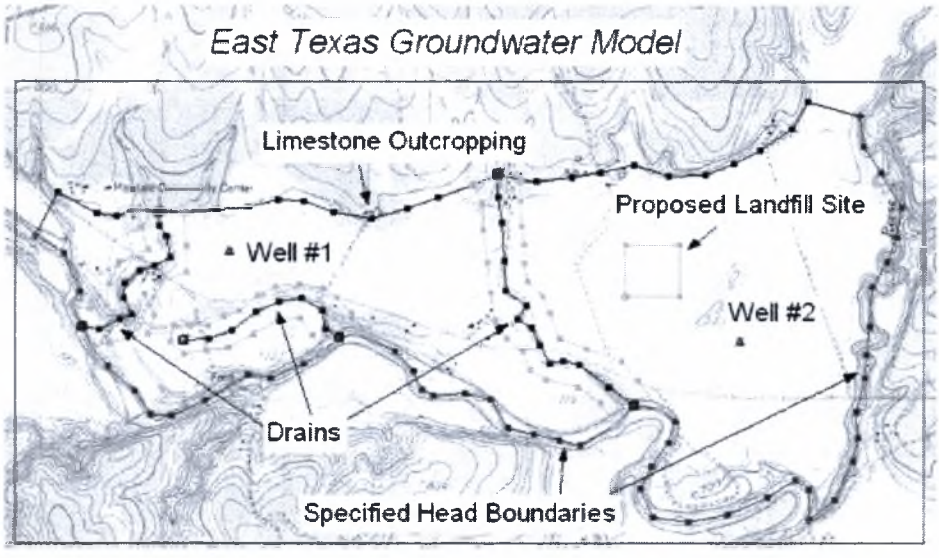
- στην αναγνώριση των ορίων των υδρολογικών λεκανών.
- στην αναγνώριση των ορίων του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων και των υδραυλικών διαχωρισμάτων, των αδιαπέραστων ορίων και των περιοχών επαναφορτίσεων.
- στις ιδιότητες κάθε υδρολογικής μονάδας (παράμετροι). Αυτές είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταφορικότητα, η ειδική αποθηκευτικότητα, ο συντελεστής αποθηκευτικότητας, η ειδική απόδοση των φρεάτιων υδροφορέων.
- στην προέλευση του νερού του μοντέλου και την ποσότητά του, που μπορεί να αναφέρεται σε διαρροή από έναν άλλο υδροφορέα ή σε επαναφόρτιση του ίδιου του υδροφορέα.
- σε όλες τις τοποθεσίες και τις διαδικασίες μέσω των οποίων το νερό εγκαταλείπει το σύστημα, συμπεριλαμβανομένων των αντλήσεων των πηγαδιών, την απορροή προς τα ποτάμια ή τα ντραίνα, την εξατμισιδιαπνοή και τυχαίες άλλες διαδικασίες.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- στην εκτίμηση των ρυθμών επαναφόρτισης ή απορροής όλων των μηχανισμών.
- στις αρχικές συνθήκες, για περιπτώσεις προσομοίωσης μεταβαλλόμενης ροής.

Τα βήματα που πραγματοποιούνται για τη δημιουργία ενός εννοιολογικού μοντέλου έχουν ως εξής :

- Σε πρώτη φάση εισάγεται ένας ψηφιοποιημένος χάρτης της υπό εξέταση περιοχής που πρόκειται να προσομοιωθεί.
- Στη συνέχεια, κατασκευάζεται η τοπική κάλυψη, η οποία περιλαμβάνει τα όρια της περιοχής αλλά και τα τοπικά χαρακτηριστικά -πηγές και φρέατα- συμπεριλαμβάνοντας πηγάδια, ποτάμια, ντραίνα και τα όρια των γενικών φορτίων (Σχήμα 3.6).

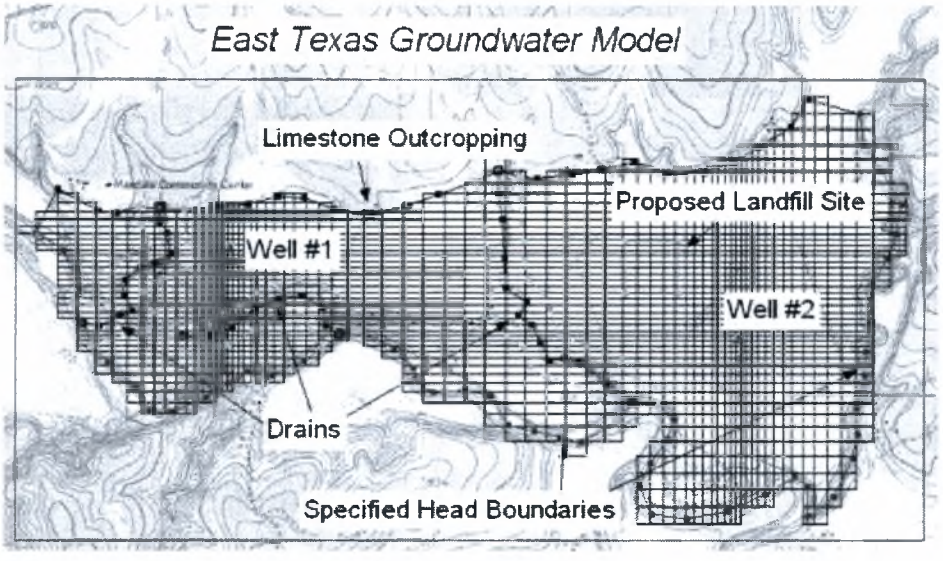


Σχήμα 3.6 Δημιουργία εννοιολογικού μοντέλου.

- Σε αυτό το αρχικό σημείο, συνήθως ορίζονται οι μονάδες μέτρησης.
- Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η κάλυψη της περιοχής με τις πηγές και τα φρέατά της, μπορεί πλέον να αντιγραφεί, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο νέα επίπεδα (**coverages**), όμοια με το αρχικό της περιοχής, καθένα απ' τα οποία θα αντιπροσωπεύει διαφορετικό μηχανισμό του μοντέλου. Έτσι αντιστοιχεί ένα επίπεδο για κάθε υδροφορέα και ένα για την επαναφόρτιση της περιοχής.
- Έπειτα καθορίζονται οι επαναφορτίσεις, η υδραυλική αγωγιμότητα (οριζόντια και κάθετη), καθώς και τα άνω και κάτω όρια του κάθε επιπέδου, όλα στα αντίστοιχα πεδία των παραθύρων διαλόγου του καθενός.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- Αφού έχουν εισαχθεί όλα τα στοιχεία, τότε καθορίζεται ο κάνναβος του μοντέλου (Σχήμα 3.7) και ορίζονται ως ενεργά τα κελιά που βρίσκονται μέσα στα όρια του μοντέλου, ενώ ανενεργά τα εξωτερικά. Εν συνεχεία, εάν δεν έχουν ορισθεί προηγουμένως τα υψόμετρα της επιφάνειας, να εισαχθούν με αρχείο και κατόπιν να υπολογιστούν αυτά των υδροφορέων.



Σχήμα 3.7 Δημιουργία καννάβου εννοιολογικού μοντέλου

- Αφού ολοκληρωθούν όλα τα παραπάνω, εκτελείται το πρόγραμμα.

Αξίζει να τονισθεί ότι το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα του ελέγχου και της διόρθωσης των σφαλμάτων τόσο στα υψόμετρα, όσο και γενικότερα στις παραμέτρους και στα δεδομένα που έχουν εισαχθεί. Τέλος, όταν τελικά αποθηκευτεί η προσομοίωση, δεν αποθηκεύονται μόνο τα αρχεία Modflow, αλλά δημιουργείται και ένα αρχείο αποτελεσμάτων με όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

3.4 Ρύθμιση του μοντέλου

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να τονισθεί ότι σημαντικό μέρος κάθε προσομοίωσης υπόγειων νερών αποτελεί η εργασία ρύθμισης του μοντέλου (**Model Calibration**), η οποία και διασφαλίζει την επιτυχή προσομοίωση της συμπεριφοράς του υδροφορέα. Πρόκειται για μια διαδικασία κατά την οποία ορισμένες από τις παραμέτρους του μοντέλου, όπως π.χ η επαναφόρτιση και η υδραυλική αγωγιμότητα, τροποποιούνται συστηματικά και το μοντέλο επαναπροσδιορίζεται συνεχώς, έως ότου η υπολογισμένη λύση ταιριάξει πλέον με τις παρατηρημένες τιμές του πεδίου, σε αποδεκτά επίπεδα ακριβείας.

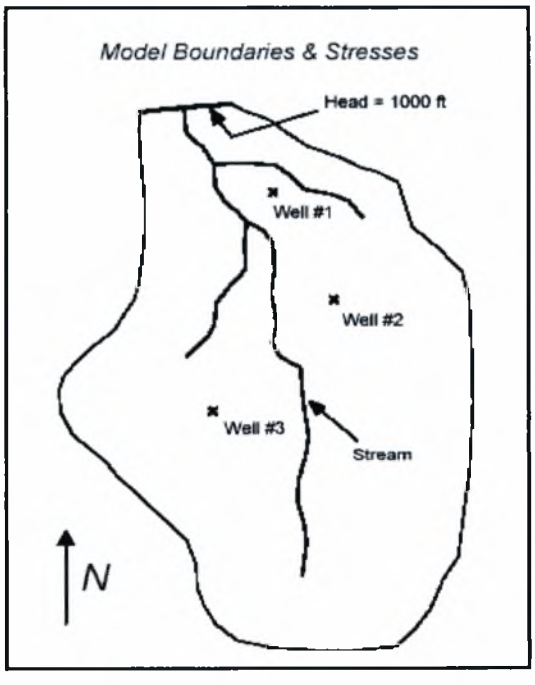
Η ρύθμιση στοχεύει στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην επίλυση του μοντέλου, ακολουθώντας την ανάστροφη μέθοδο προσέγγισης του προβλήματος, μέσα από μια συνεχή διαδικασία δοκιμής και επανάληψης. Η εργασία

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

της ρύθμισης στην περίπτωση ενός μοντέλου Modflow που εξετάζουμε, γίνεται αφού έχει πραγματοποιηθεί η εννοιολογική προσέγγιση. Ωστόσο, τα εργαλεία της ρύθμισης στο GMS προορίζονται για γενική χρήση σε οποιοδήποτε μοντέλο.

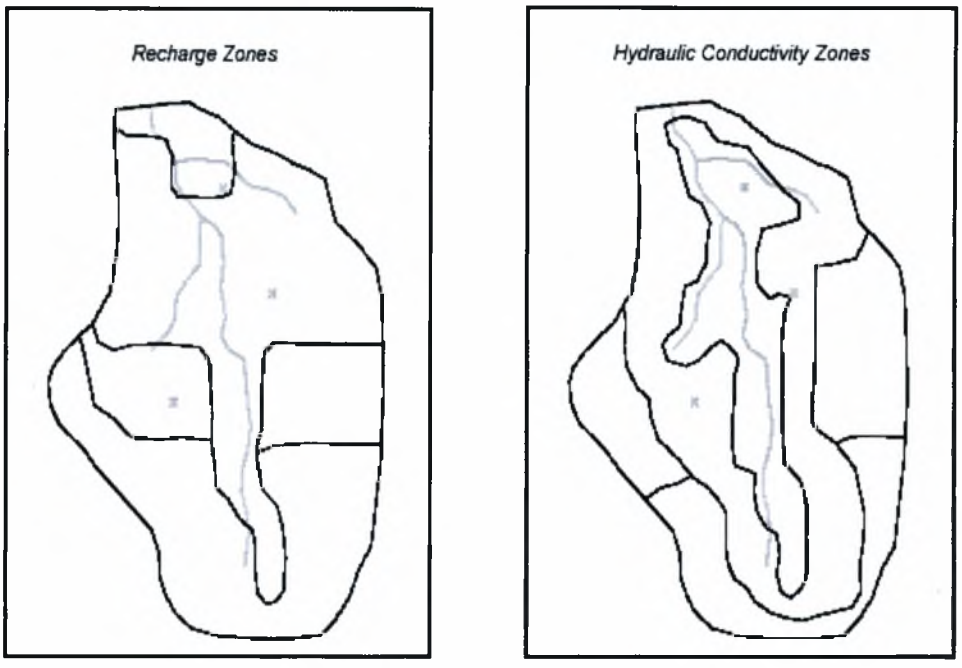
Δύο τύποι δεδομένων παρατήρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία: παρατηρήσεις σημείων και ροής. Καθορίζονται στο μοντέλο του χάρτη και συσχετίζονται με σημεία, τόξα ή πολύγωνα. Τα σημεία αντιστοιχούν σε πηγάδια παρατήρησης και η αριθμητική τιμή του δεδομένου αντιστοιχεί στο υδραυλικό φορτίο του υδροφορέα στο σημείο αυτό. Οι ροές αναπαρίστανται με γραμμικά ή επιφανειακά στοιχεία, που αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα χείμαρρους ή δεξαμενές, όπου η απώλεια ή το κέρδος για τον υδροφορέα αναφορικά με το αντικείμενο έχει μετρηθεί ή εκτιμηθεί (Σχήμα 3.8).

Για την κατανόηση της διαδικασίας αναφέρεται το περιεχόμενο παράδειγμα του προγράμματος με την ακόλουθη σειρά ενεργειών: Εισήχθη ένα προϋπάρχον μοντέλο της περιοχής - ενός επιπέδου- που περιείχε μία αρχική εκτίμηση των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των επαναφορτίσεων (Σχήμα 3.9). Επίσης εισήχθη η λύση που υπολογίστηκε βάσει αυτού του αρχικού μοντέλου και στη συνέχεια αναλύθηκε το σφάλμα της. Κατόπιν, με νέες πλέον τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας ή/και επαναφόρτισης, βρέθηκε νέα λύση και υπολογίστηκε εκ νέου το σφάλμα αυτής. Τα βήματα αυτά επαναλήφθηκαν μέχρις ότου το σφάλμα έγινε πρακτικά πολύ μικρό.



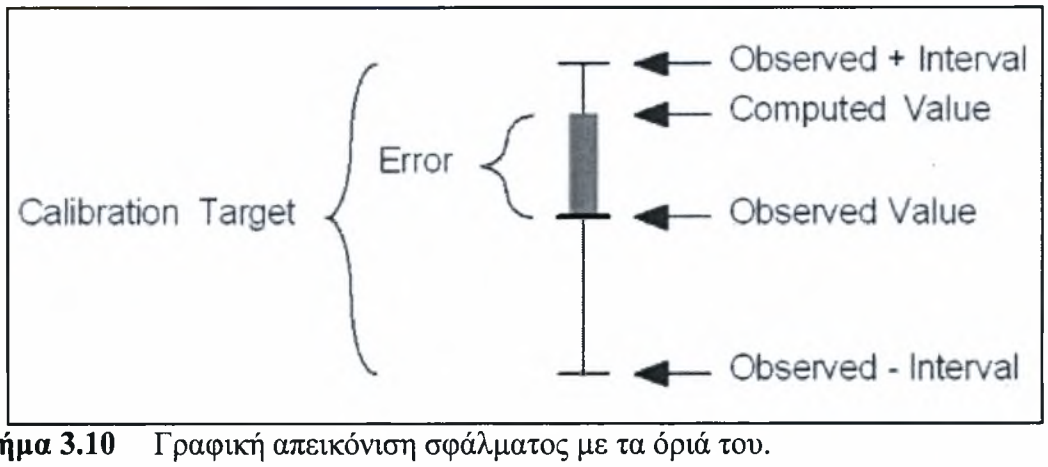
Σχήμα 3.8 Δείγμα μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία της ρύθμισης μοντέλου MODFLOW – Σημειακά και γραμμικά στοιχεία.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



Σχήμα 3.9 Ζώνες επαναφόρτισης και υδραυλικής αγωγιμότητας.

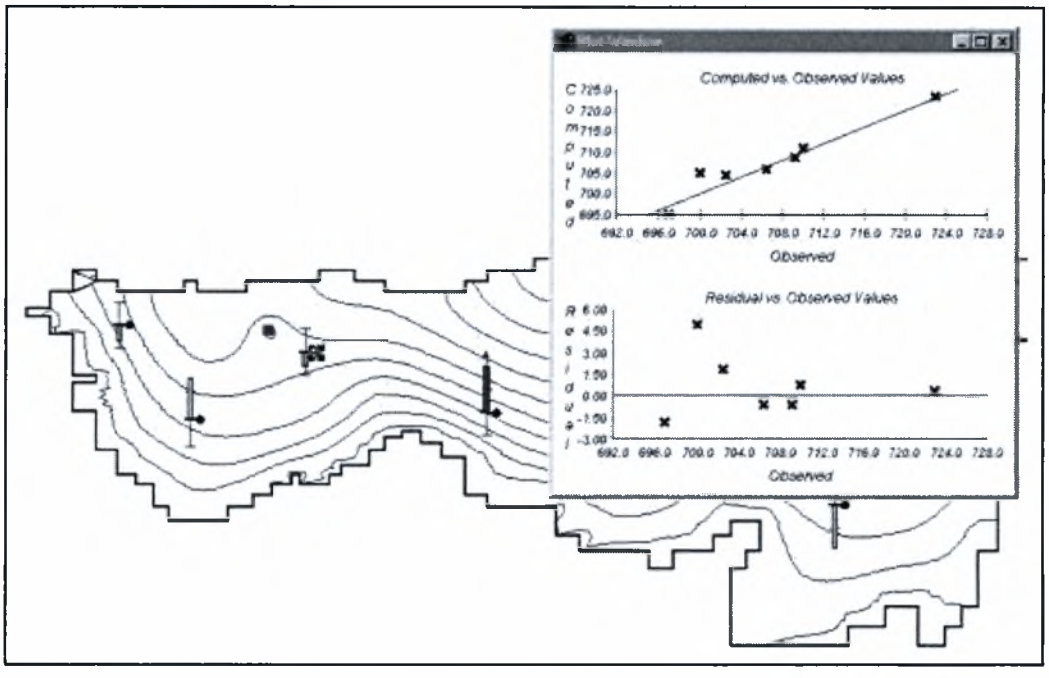
Για κάθε νέα λύση, τα σφάλματα εμφανίζονται δίπλα στα επί μέρους σημεία παρατήρησης του μοντέλου, ως διαφορές μεταξύ υπολογισμένης και παρατηρημένης τιμής, ενώ αποδίδονται στο ίδιο γράφημα και τα όριά τους (Σχήμα 3.10). Για να κατανοηθεί η έννοια του σφάλματος στην περίπτωση του Model Calibration αξίζει να σημειωθούν τα εξής: Κάθε σημείο παρατήρησης (π.χ. πηγάδι) προσδιορίζεται – εκτός από τις συντεταγμένες του – και από το υδραυλικό φορτίο του (***head***) και το εκτιμώμενο σφάλμα (±) (***interval***) αυτής της παρατηρημένης τιμής. Επίσης, γνωστή πρέπει να είναι και η τιμή της εμπιστοσύνης που ανταποκρίνεται στην παραπάνω εκτίμηση σφάλματος. Το εκτιμώμενο σφάλμα είναι αυτό που συνήθως χρησιμοποιείται ως "στόχος" της ρύθμισης (*Calibration Target*). Η ρύθμιση του μοντέλου επιτυγχάνεται όταν η τιμή φορτίου της λύσης βρίσκεται εντός του πεδίου: [*παρατηρημένη τιμή – εκτιμώμενο σφάλμα*]—[*παρατηρημένη τιμή + εκτιμώμενο σφάλμα*]



Σχήμα 3.10 Γραφική απεικόνιση σφάλματος με τα όριά του.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Το πρόγραμμα διαθέτει εκτός των άλλων και επιλογές γραφικής απόδοσης στατιστικών στοιχείων. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν εδώ τα γραφήματα που δείχνουν την πορεία της εργασίας της ρύθμισης και τη σύγκριση μεταξύ υπολογισμένων και καταγεγραμμένων τιμών, με βάση το αποδεκτό εύρος σφάλματος (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11 Γραφήματα με εμφάνιση στατιστικών υπολογισμών.

Σε πολλές περιπτώσεις η ρύθμιση του μοντέλου επιτυγχάνεται γρηγορότερα με την εφαρμογή της αυτόματης εκτίμησης παραμέτρων ή αλλιώς με τη χρήση αντίστροφων μοντέλων. Το αντίστροφο μοντέλο είναι μία εσωτερική διαδικασία ή ένα εξωτερικό πρόγραμμα, που αυτοματοποιεί την εργασία της εκτίμησης των παραμέτρων, διότι συστηματικά προσαρμόζει μια ομάδα παραμέτρων εισόδου -καθορισμένων από το χρήστη- ωσότου η διαφορά μεταξύ των υπολογισμένων και των παρατηρημένων τιμών να ελαχιστοποιηθεί. Οι επιλογές που δίνει το GMS είναι τρεις: MODFLOW 2000 PES process, PEST, και UCODE.

3.5 Στοχαστική Προσομοίωση μέσω του MODFLOW

Υπάρχει πάντα ένα σημαντικό ποσό αβεβαιότητας που συνδέεται με ένα μοντέλο υπόγειων ροών. Αυτή η αβεβαιότητα μπορεί να οφείλεται στο μοντέλο αυτό καθαυτό ή με τα στοιχεία και τις παραμέτρους που συνδέονται με τα διάφορα συστατικά του μοντέλου. Μερικές παράμετροι όπως η υδραυλική αγωγιμότητα και η επαναφόρτιση είναι ιδιαίτερα επιρρεπής στην αβεβαιότητα. Ρυθμίζοντας (calibration) ένα μοντέλο έχοντας αρκετά δεδομένα παρατήρησης (observation data) όπως φρεάτια ελέγχου, ροές ρευμάτων, κλπ μπορεί κάπως να μειωθεί αυτή η αβεβαιότητα. Εντούτοις, τα δεδομένα ρύθμισης (calibration data) είναι συχνά λιγοστά και ακόμα και τα καλά-ρυθμιζόμενα (well-calibrated) μοντέλα έχουν ένα υψηλό επίπεδο αβεβαιότητας.

Μια μέθοδος που έχει να κάνει με την αβεβαιότητα είναι η χρήση μιας στοχαστικής προσέγγισης. Με μια μη-στοχαστική προσέγγιση, το μοντέλο το οποίο αναπτύσσεται

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

αντιπροσωπεύει την καλύτερη εκτίμηση της προσομοίωσης του πραγματικού συστήματος. Αυτό το πρότυπο χρησιμοποιείται για να κάνει τις προβλέψεις. Με μια στοχαστική προσέγγιση, κατασκευάζεται ένα σύνολο μοντέλων όπου όλα έχουν ίση πιθανότητα να πραγματοποιηθούν. Κάθε μοντέλο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη ή προσομοίωση ενός σεναρίου και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της πιθανότητας ότι ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα θα πραγματοποιηθεί.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι στο GMS για την πιθανολογική χρησιμοποίηση (Stochastic Modeling) του MODFLOW 2000 :

1. ***Parameter Randomization*** (Δημιουργία Τυχαίας Παραμέτρου) στην οποία χρησιμοποιείται είτε η Monte Carlo (Random Sampling) είτε η Latin Hypercube προσέγγιση. Απαιτούνται οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων που προσεγγιστούν. Η μέθοδος αυτή δίνει και μια επιπλέον δυνατότητα εισαγωγής τιμών ή πεδίων τιμών από το χρήστη, «user –define».
2. ***Indicators Simulation*** (Προσομοίωση Δεικτών) στην οποία τα πιθανολογικά αποτελέσματα παράγονται από το πακέτο T-PROGS (Transition Probability Geostatistical Software). Απαιτούνται για δεδομένα γεωλογικές διαστρωματώσεις του υπεδάφους.

Στην παρούσα μελέτη είναι προφανές ότι εφόσον υπάρχουν μετρημένες οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάποιες θέσεις του πεδίου χρησιμοποιείται η πρώτη, υπό διαφορετική προσέγγιση. Το μειονέκτημα του Modflow για την πρώτη μέθοδο είναι ότι δεν μπορεί να αποδώσει διαφορικές τιμές της αβέβαιης παραμέτρου σε κάθε κελί, παρά μόνο σε κάθε πολύγωνο. Για αυτό το λόγο άλλωστε χρησιμοποιήθηκε το GSLIB και παρήχθησαν από αυτό τα πολλαπλά πεδία με τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας διαφορετικές σε κάθε κελί.

Έτσι λοιπόν εισήχθηκαν τα αρχεία εξόδου από το GSLIB με τις προσομοιωμένες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο Modflow.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ GSLIB, MODFLOW ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ

4.1 Δομή – Γεωμετρία της Προσομοιωμένης Περιοχής

Στο πρώτο Κεφάλαιο έγινε η παρουσίαση των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της ευρύτερης λεκάνης της Κάρλας. Η υπό προσομοίωση περιοχή που αντιστοιχεί ουσιαστικά στον υπόγειο υδροφορέα της λεκάνης της Κάρλας περικλείεται μέσα σε αυτήν τη λεκάνη.

Η επιλογή του συγκεκριμένου πεδίου έρευνας είχε ως κριτήριο αφενός τη σχετικά απλή δομή του υδροφορέα στην περιοχή και αφετέρου τη λειτουργικότητα αυτού αναφορικά με τις δραστηριότητες που συνεπάγονται κατανάλωση υπόγειου νερού (ύδρευση, άρδευση κλπ). Ως εκ τούτου, από ένα σύνολο καρστικών και προσχωματικών υδροφόρων στρωμάτων το ενδιαφέρον περιορίστηκε στην πεδινή περιοχή της λίμνης και συγκεκριμένα στον υδροφόρο ορίζοντα των σύγχρονων προσχωματικών αποθέσεων. Την επιλογή αυτή ενίσχυσε και η γενική παραδοχή των υφιστάμενων μελετών σχετικά με την ανυπαρξία υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ καρστικών κρασπέδων και προσχωματικών υδροφοριών. Η περιοχή φαίνεται στο Σχήμα 2 του Παραρτήματος. Ουσιαστικά πρόκειται για τέσσερις ζώνες υδροφορίας της υδρογεωλογικής λεκάνης της Ανατολικής Θεσσαλίας, οι οποίες αντιμετωπίστηκαν ως ενιαίος υδροφορέας, εξαιτίας της πιεζομετρικής τους συνέχειας και χάριν απλούστευσης του προβλήματος. Η σύγκριση της υπό προσομοίωση περιοχής σε σχέση με την ευρύτερη λεκάνη της Κάρλας παρουσιάζεται στο Γεωλογικό Χάρτη τους Σχήματος 4.1, όπου αυτή περιορίζεται - όπως αναφέρθηκε και παραπάνω – στο πεδινό τμήμα των αλλουβιακών αποθέσεων. Τα όρια της παριστάνονται με την κόκκινη συνεχή γραμμή.

Η παραπάνω επιλογή έχει να κάνει με την επιλογή του υπό προσομοίωση Υδροφορέα ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Για το κατακόρυφο επίπεδο αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο ότι διακρίνονται τρεις τύποι υδροφορέων : οι **αργιλοαμμώδεις λιμναίες αποθέσεις**, οι **αδρομερείς προσχώσεις και τα κορήματα** με τα **μάρμαρα** (Μπεζές 2004). Οι τρεις παραπάνω υδροφόροι ορίζοντες είναι τοποθετημένοι ο ένας επάνω στον άλλο (επάλληλοι ορίζοντες). Η προσομοίωση περιορίστηκε στα δύο πρώτα στρώματα, γιατί :

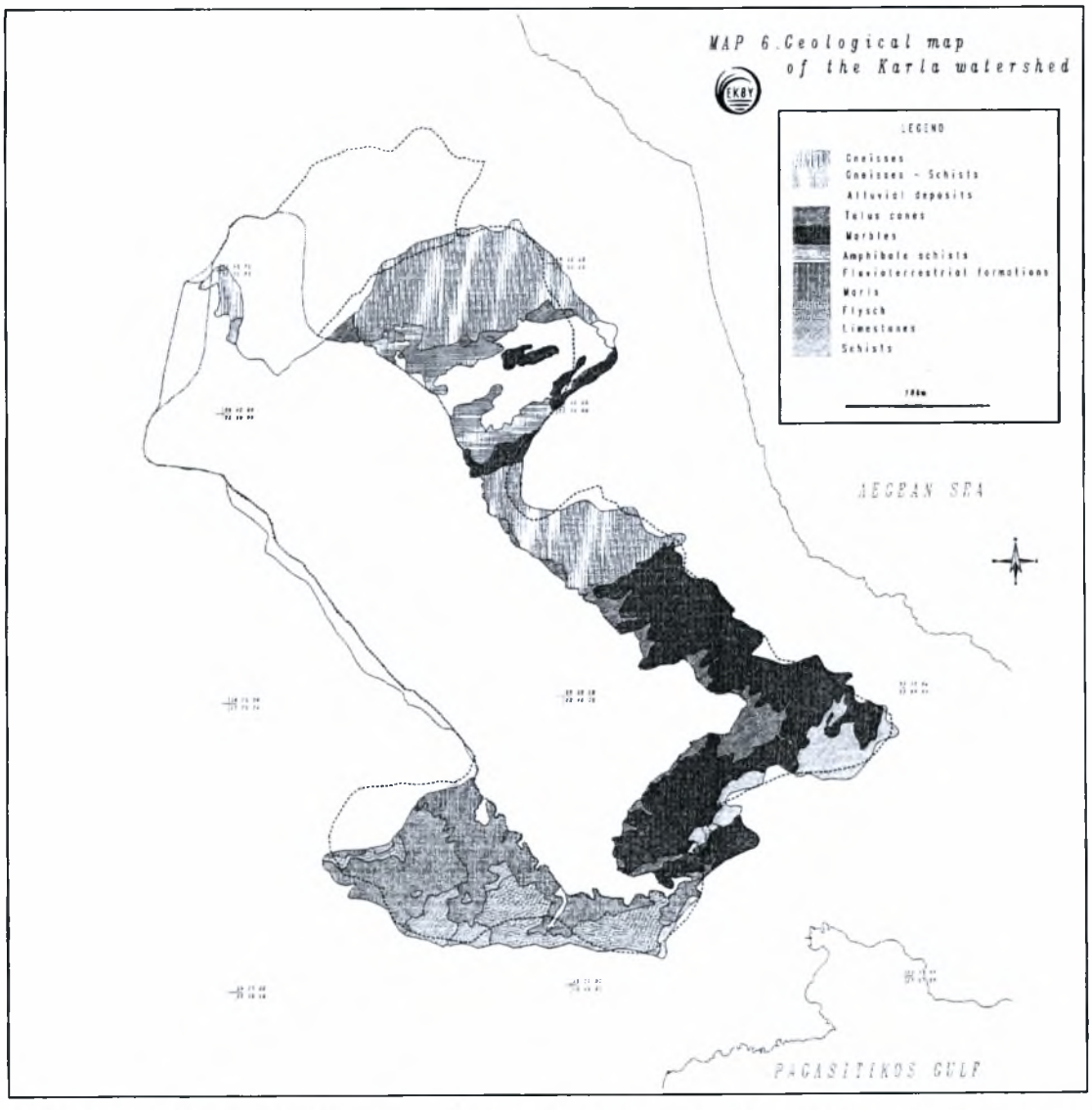
- η υδραυλική επικοινωνία αυτών των δύο πρώτων υδροφορέων με τον υδροφορέα των μαρμάρων είναι αρκετά μικρή σε σχέση με την μεταξύ τους υδραυλική επικοινωνία.
- ο υδροφορέας των μαρμάρων δεν συνεισφέρει στις απολήψεις των γεωτρήσεων, για τις αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες.

Οι δύο αυτοί υδροφορείς προσομοιώθηκαν στο Modflow με ένα κατακόρυφο επίπεδο (layer). Αντιμετωπίστηκαν ουσιαστικά σαν ένας υδροφορέας αφού :

- ο υδροφορέας των αργιλοαμμωδών λιμναίων αποθέσεων εναποτίθεται πάνω σε αυτόν των αδρομερών προσχώσεων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- η υδραυλική τους επικοινωνία είναι σημαντική, ώστε να επιτρέπει αυτή τη θεώρηση.
- τα υδρογεωλογικά τους χαρακτηριστικά δε διαφέρουν και πολύ.



Σχήμα 4.1 Η προσομοιωμένη περιοχή του Υπόγειου Υδροφορέα σε σχέση με την ευρύτερη Λεκάνη.

Έτσι μια απεικόνιση της προσομοιωμένης περιοχής του υδροφορέα στο κατακόρυφο επίπεδο θα είναι σαν αυτή του Σχήματος 4.2, το οποίο αποτελεί μια κατακόρυφη τομή του. Η παρουσίαση όλων των υδραυλικών χαρακτηριστικών αλλά και των οριακών συνθηκών γίνεται παρακάτω.

4.2 Παρουσίαση όλων των χαρακτηριστικών – δεδομένων του μοντέλου

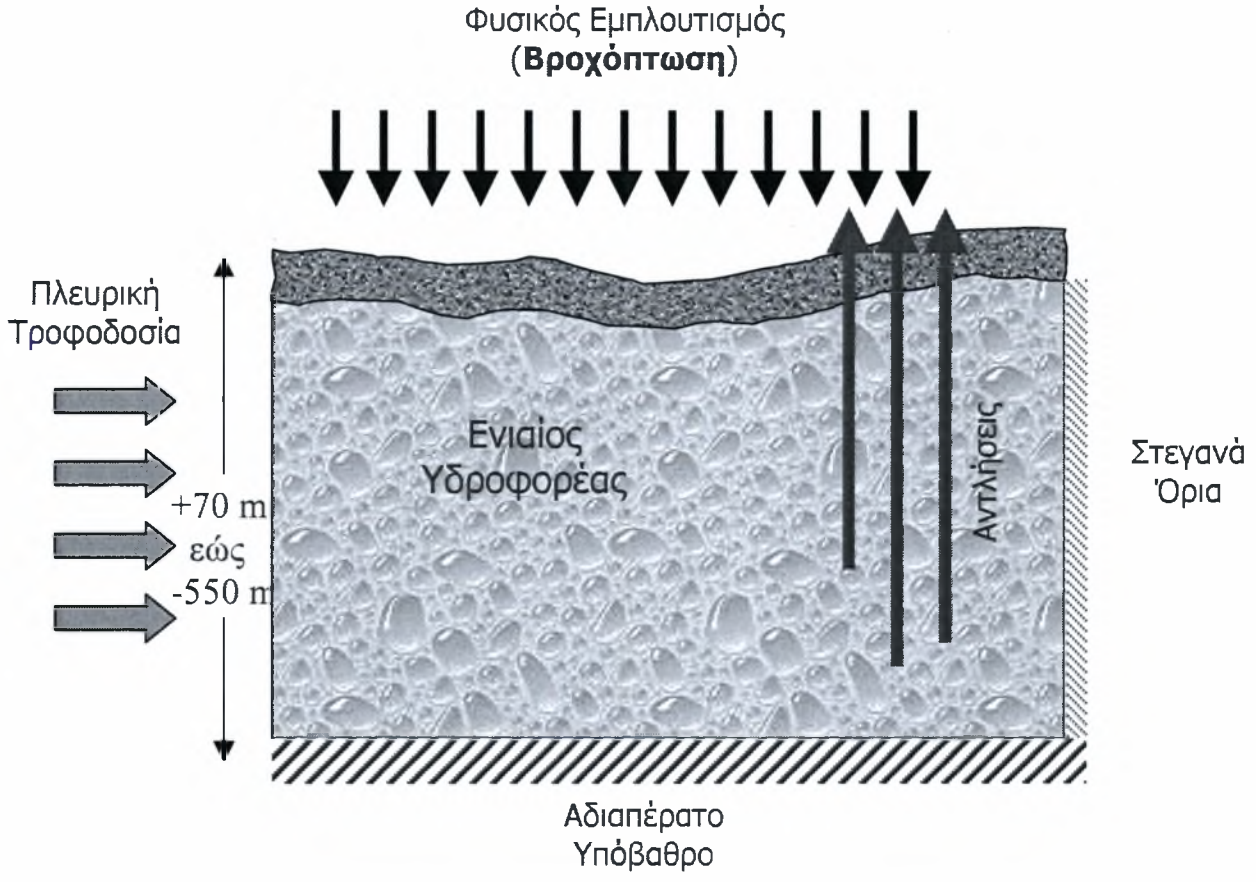
Αφού εισήχθη στο Modflow η εικόνα του Σχήματος 2 του Παραρτήματος ξεκίνησε η δόμηση του μοντέλου μέσω της εννοιολογικής προσέγγισης.

Ξεκινώντας από τις οριακές συνθήκες, στο μοντέλο συναντούνται οι :

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

- Συνθήκες Newman: Εντοπίζονται κατά μήκος του ανατολικού ορίου της περιοχής (τμήμα ορίου AB Σχήμα 4.3), λόγω παρουσίας στεγανών σχηματισμών (γνεύσιοι, αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι). Συγκεκριμένα, οι συνθήκες αυτές είναι μηδενικής ροής (no flow boundary).

- Συνθήκες Cauchy: Εντοπίζονται κατά μήκος των δυτικών παρυφών της περιοχής προσομοίωσης και συγκεκριμένα εκφράζουν ροή εξαρτώμενη από το εκάστοτε υδραυλικό φορτίο, χρησιμοποιώντας το πακέτο General Head Boundary. Η ροή αυτή προέρχεται από την πλευρική τροφοδοσία από τη ζώνη ανάπτυξης των πλειοκαινικών λόφων και των κώνων κορημάτων που σχηματίζουν οι παραπόταμοι του Πηνειού.



Σχήμα 4.2 Τομή της υπό προσομοίωση περιοχής, όπως αυτή αναπαρίσταται από το εννοιολογικό μοντέλο που καταρτίστηκε.

Η περίοδος προσομοίωσης είναι από την 1η Ιαναουαρίου 1987 έως την 1η Ιαναουαρίου 1997. Ως αρχική συνθήκη επιλέχθηκε η 1η Ιαναουαρίου 1987. Η επιλογή οφείλεται στο γεγονός ότι ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του '80 και έπειτα, οι συνέπειες της υπέραντλησης είναι εμφανείς στον υπόγειο υδροφορέα. Με άλλα λόγια η περίοδος του καθεστώτος υπερεκματάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα ξεκινά αμεσώς μετά από αυτήν την περίοδο (Σχήματα 1.5 έως 1.9).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από 27 πηγάδια παρατήρησης. Τα πηγάδια μέτρησαν το βάθος που παρατηρήθηκε ο υπόγειος υδροφορέας και με αφαίρεση από το υψόμετρο της περιοχής προέκυψαν τα αρχικά απόλυτα ύψη, όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.1, ενώ οι θέσεις στους φαίνονται στο Σχήμα 4.5. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα με τα αρχικά ύψη (1/1/1987).

Πηγάδι	**X**	**Y**	**Αρχικά Ύψη (m)**
P6L	637874	4394211	52.82
LB310	649089	4371386	48.93
AD15	653522.3	4370390	40.8
SR63a	652594.2	4364801	34.68
SR63b	652600	4364806	44.45
AG17a	649002	4366046	59.82
AD13a	653349.3	4370961	43.15
PZ15	650170.5	4372364	40.62
AD13	653227.5	4370877	37.2
AG14	644246	4376506	51.66
SR43	643202	4370724	64.4
SR32	637576.8	4375596	68.35
SR31	640758.1	4378887	58.33
PZ67	641486	4380913	54.2
402	650046.8	4381276	43.69
SR66	646465.5	4378039	39.8
PZ50	638888	4387371	53.12
P17L	631492	4383752	67.52
PZ7	642281.8	4391853	56.5
SR30	632522.3	4380364	72.95
AD11	636705.3	4382399	59.9
PZ68	645376.4	4367725	71.77
E3	654937	4361328	47.98
LB202	653280	4378456	34.25
PZ65	660104.5	4373872	27.78
PZ45	644182	4388225	41.08
PZ64	657371.6	4375602	32.45

Πίνακας 4.1 Πηγάδια παρατήρησεις των αρχικών υψών της 1^{ης} Ιανουαρίου 1987.

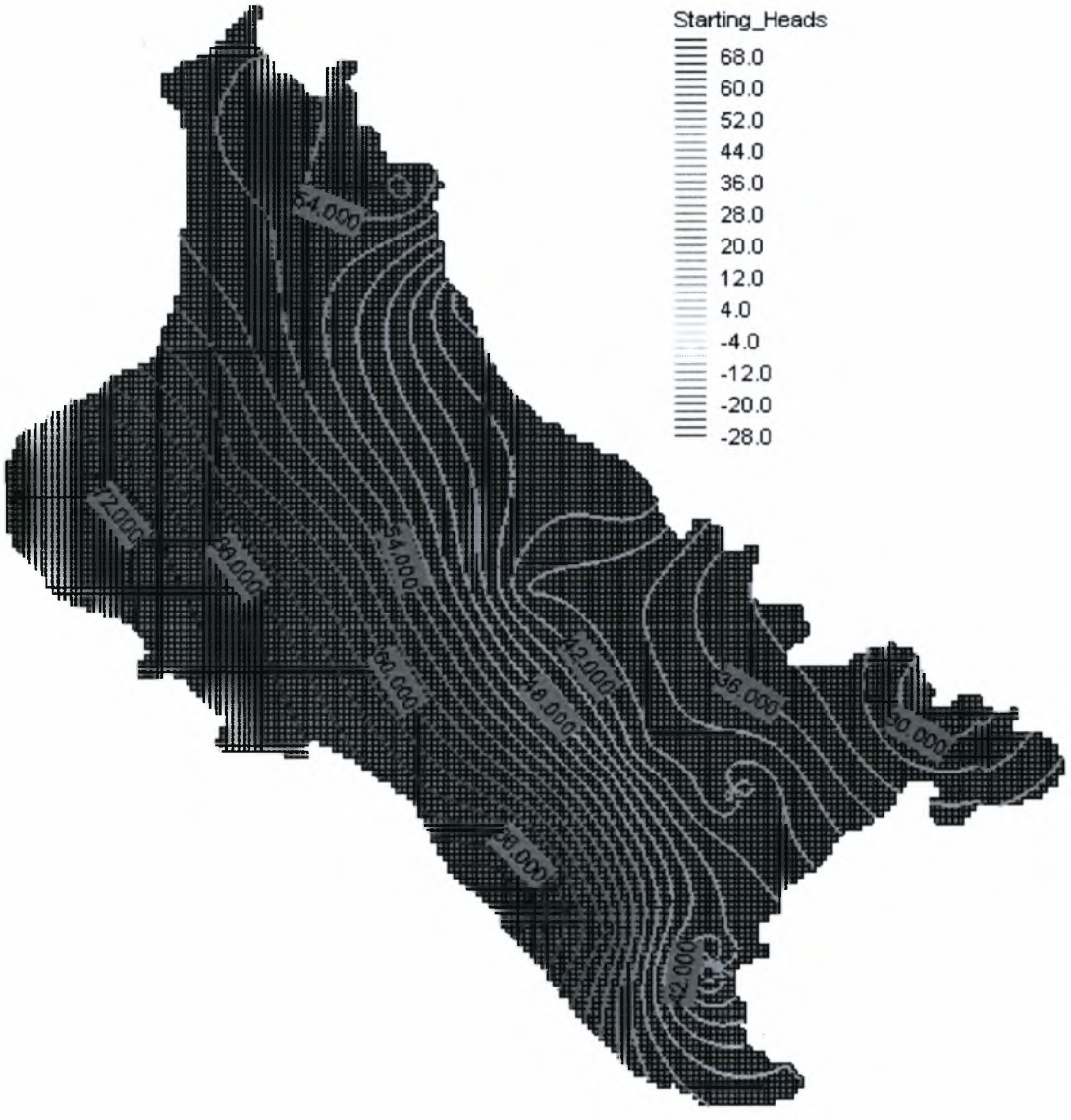
Το ανάγλυφο της περιοχής εισήχθη από αρχείο GIS (Μουστάκα Ε., 2002), ενώ όσο αφορά τον αδιαπέραστο πυθμένα πάρθηκε από το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη της Sogreah '74.

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι ισοϋψεις των τριών μέτρων του ανάγλυφου της περιοχής. Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο η περιοχή μελέτης είναι κυρίως πεδινή με το υψόμετρο να κυμαίνεται μεταξύ των 45m με 65m, αλλά στο νοτιοδυτικό όριο που εμφανίζεται το Χαλκοδόνιο Όρος παρατηρείται μια ανοδική κλίση του ανάγλυφου με μέγιστο υψόμετρο τα 130.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Οι εισροές στο πεδίο προέρχονται από την κατείσδυση, λόγω της βροχόπτωσης και από τις πλευρικές εισροές στο δυτικό όριο του.

Η κατείσδυση εισήχθη μηνιαίως στο μοντέλο και είναι προϊόν της μελέτης Υδατικού Ισοζυγίου της Λεκάνη Απορροής της Κάρλας από τον Αναπλ. Καθηγητή Θ. Λουκά (Loukas et al., 2007). Τα δεδομένα αυτής αυξήθηκαν κατά 10% εκφράζοντας την επιστροφή στον υπόγειο υδροφορέα του νερού της άρδευσης (Σχήμα 4.6).



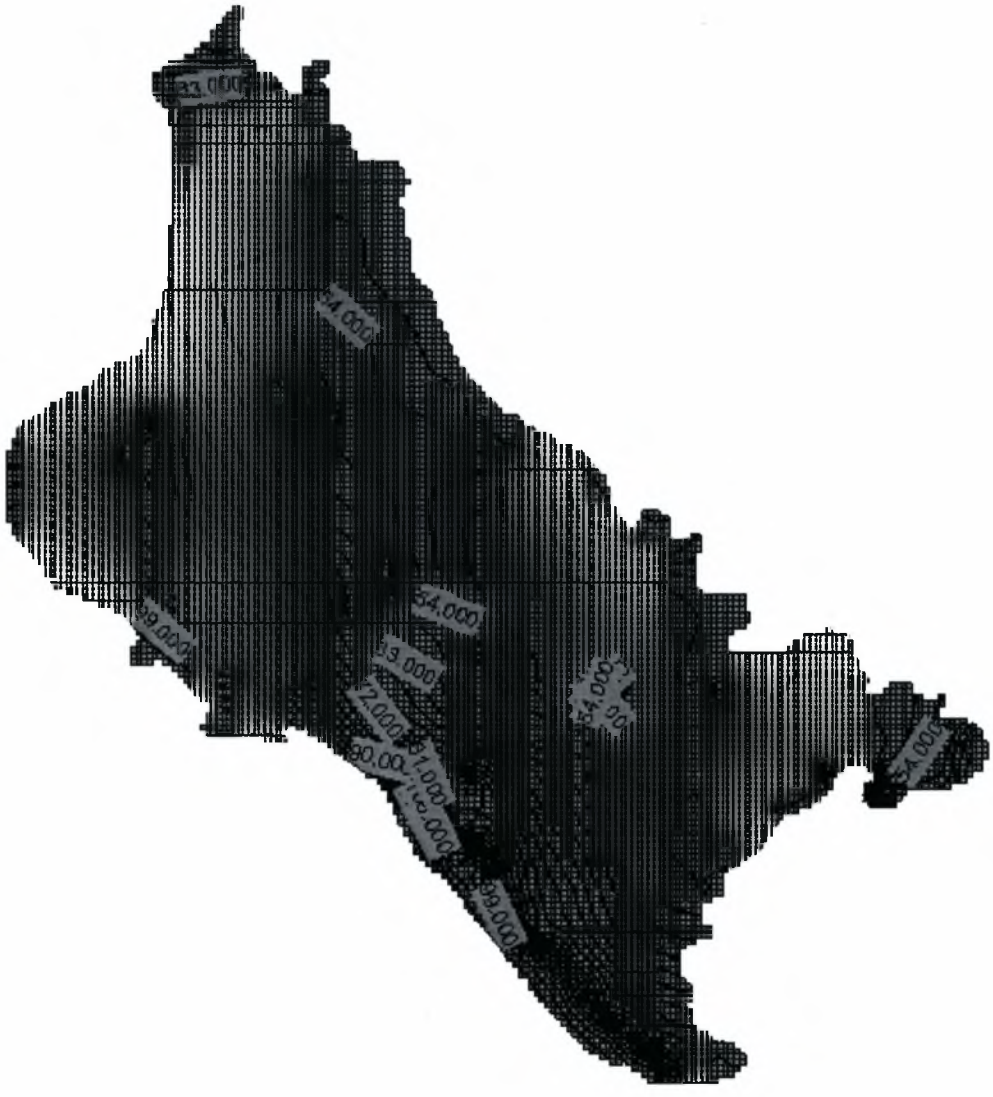
Σχήμα 4.3 Αχικά ύψη για την 1η Ιανουαρίου 1987.

Η πλευρική εισροή προσομοιώθηκε από το πακέτο General Head Boundary. Δόθηκε η τιμή της παραμέτρου conductance ίση με 0,0094 (m^2/d)(m) (SOGREAH–Grénoble1974) και οι τιμές των υδραυλικών φορτίων στα σημεία Α, Β, Γ όπως φαίνονται στον Πίνακα 1 του Παραρτήματος.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Η εκροή από τον υπόγειο υδροφορέα οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό από την υπεράντληση των γεωτρήσεων και σε ένα πολύ μικρό ποσοστό στην κίνηση του νερού προς το γειτονικό υδροφορέα.

Το πεδίο μελέτης χωρίστηκε σε επτά ζώνες άντλησης (Σχήμα 4.5), εκ των οποίων οι πέντε ανήκουν στο Νομό Μαγνησίας, ενώ οι άλλες δύο ζώνες ανήκουν στο Νομό Λαρίσης.



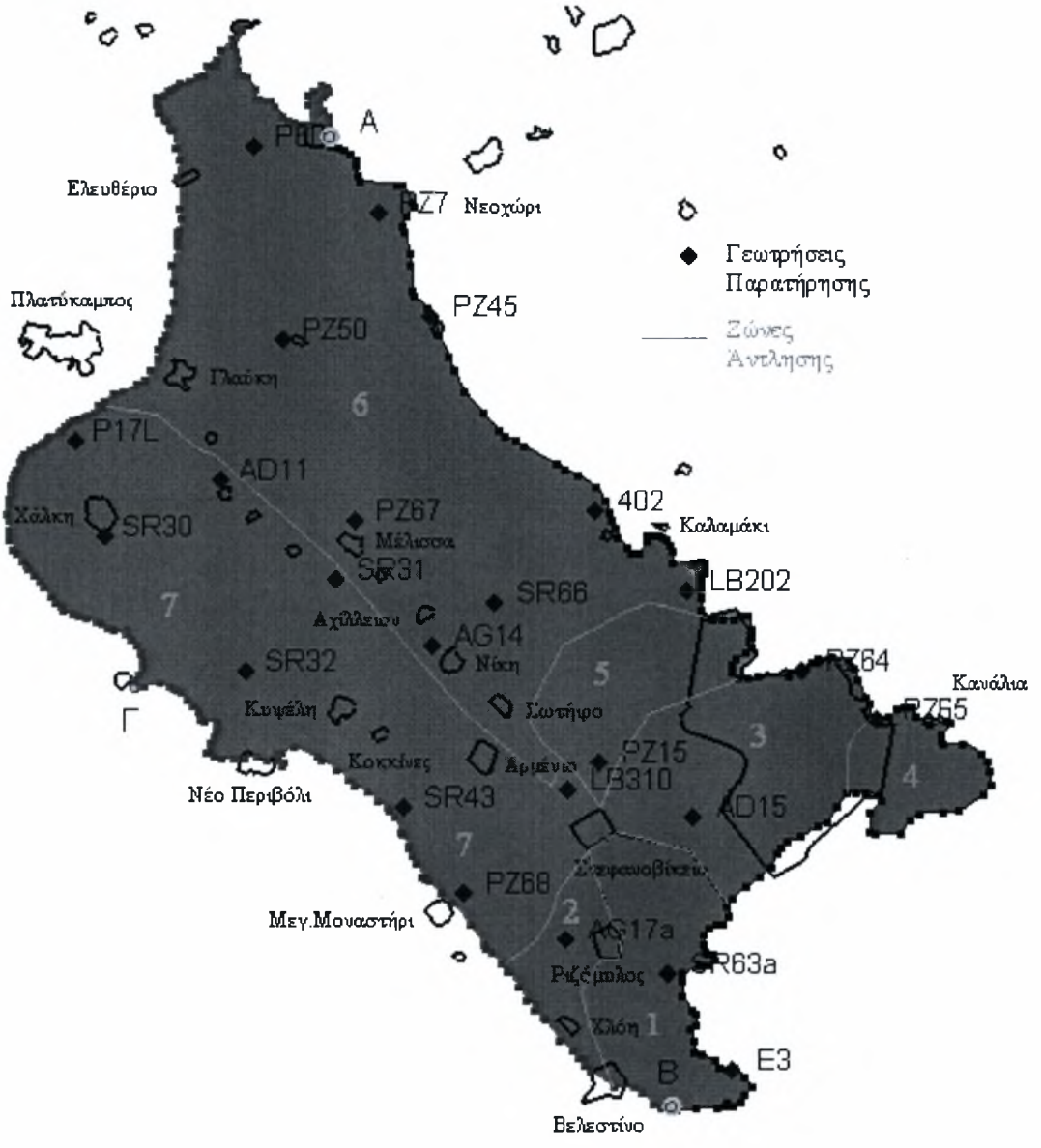
Σχήμα 4.4 Ισουψείς των 3m για το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης.

Σύμφωνα με τη «Μελέτη Επαναδημιουργίας Λίμνης Κάρλας – Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη, 1999», η ευρύτερη περιοχή, γύρω από το μελλοντικό ταμιευτήρα της Κάρλας διαχωρίστηκε σε πέντε ζώνες (Σχήμα 4.5). Ο διαχωρισμός αυτός λαμβάνει υπόψη τόσο τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των υπογείων υδροφοριών, όπως επίσης και τα όρια των παλαιών κοινοτήτων της περιοχής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Ο διαχωρισμός του Νομού Λαρίσης έγινε σε δύο ζώνες διότι στη ζώνη 7 η άρδευση και ύδρευση γίνεται εξ' ολοκλήρου από γεωτρήσεις, ενώ στη ζώνη 6 ανήκει η περιοχή του ΤΟΕΒ Πηνειού.

Στον Πίνακα 2 του Παραρτήματος δίδονται η αντλούμενη, από τον υπόγειο υδροφορέα, ποσότητα νερού για άρδευση και ύδρευση για την περίοδο προσομοίωσης, και η έκταση των ζωνών άντλησης.



Σχήμα 4.5 Οι θέσεις των πηγαδιών παρατήρησης, τα σημεία Α, Β, Γ οι ζώνες άντλησης.

Ο αριθμός των γεωτρήσεων δεν ανταποκρίνεται στον πραγματικό αριθμό αυτών που υπάρχουν σε όλη τη περιοχή μελέτης, αφού ο αριθμός αυτών είναι πραγματικά τεράστιος(έως και 40000 σύμφωνα με προφορικές πηγές). Η συντριπτική τους πλειοψηφία είναι παράνομες και τον ακριβή αριθμό τους δεν γνωρίζουν ούτε καν οι αρμόδιες υπηρεσίες. Αυτό

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

όμως που είναι γνωστό είναι η συνολική παροχή που αντλείται για κάθε ζώνη, αλλά και ένα εύρος της παροχής που μπορεί να αντλήσει μια γεώτρηση. Η τελευταία έχει να κάνει με τη γεωμορφολογία της ζώνης.

Στη **ζώνη 1** εκτάσεως περίπου 36267 στρεμμάτων περιλαμβάνει την περιοχή ανατολικά των χωριών Στεφανοβίκειου – Ριζόμυλου – Βελεστίνου. Αντλούνται από τον υπόγειο υδροφορέα από $15,232*10^6$ έως $19,04*10^6$ m^3. Η ζώνη αυτή ανήκει στην περιοχή της τρίτης ομάδας πιεζόμετρων – όπως παρουσιάστηκε στο πρώτο κεφάλαιο – στην οποία η πτώση είναι μεγάλη και έντονη. Οι παροχές των γεωτρήσεων είναι αρκετά μεγάλες, ώστε σε περιόδους μη αιχμής να αντλούν 100 m^3/h, ενώ έχουν καταγραφεί παροχές της τάξεως των 300 m^3/h σε περιόδους αιχμής.

Η **ζώνη 2** εκτάσεως 14910 στρεμμάτων περιλαμβάνει τα Δ-ΝΔ περιθώρια της ζώνης 1 με όριο τη νοητή γραμμή μεταξύ των χωριών ΜέγαΜοναστήρι – Χλόη – Βελεστίνο - Αγ. Γεώργιος. Αντλούνται από τον υπόγειο υδροφορέα από $1,4*10^6$ έως $3*10^6$ m^3. Ανήκει και αυτή στην τρίτη ομάδα πιεζόμετρων. Οι παροχές των γεωτρήσεων δεν είναι μεγάλες, με αυτές να φτάνουν σε ώρες μη αιχμής τα 30 m^3/h και σε ώρες αιχμής να μην ξεπερνούν τα 100 m^3/h.

Στις **ζώνες 3** και **5** περικλείουν την περιοχή που οριοθετείται από τα χωριά Κανάλια – Στεφανοβίκιεου – Σωτήριου – και νοτίως Καλαμακίου, εκτάσεως 79931 στρεμμάτων. Αναπτύσσονται μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες στις σύγχρονες αποθέσεις.. Ανήκουν στη δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων, στην οποία η πτώση είναι μεγάλη, αλλά όχι έντονη. Στις δύο αυτές ζώνες, εξ αιτίας του μικρού γενικά δυναμικού των υπογείων υδροφοριών οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων δεν είναι μεγάλες. Έτσι στη ζώνη 3 αντλείται αντλούνται από $1,5*10^6$ έως $1,875*10^6$ m^3 με παροχή γεωτρήσεων στα 35 m^3/h σε ώρες μη αιχμής και στα 105 m^3/h ώρες αιχμής. Στη ζώνη 5 αντλείται παροχή από $1,2*10^6$ έως $1,5*10^6$ m^3 με παροχή γεωτρήσεων στα 20 m^3/h σε ώρες μη αιχμής και στα 60 m^3/h ώρες αιχμής

Η **ζώνη 4** περιλαμβάνει τον κώνο του ρέματος Ξεριά και των άλλων ρεμάτων στην περιοχή Καναλιών, εκτάσεως 15000 στρεμμάτων. Ανήκει και αυτή στην δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων. Αντλούνται από τα υπόγεια νερά περίπου $1,875*10^6$ έως $2,8*10^6$ m^3. Οι γεωτρήσεις δίνουν μικρές παροχές της τάξεως των 20 m^3/h σε ώρες μη αιχμής 70 m^3/h ώρες αιχμής.

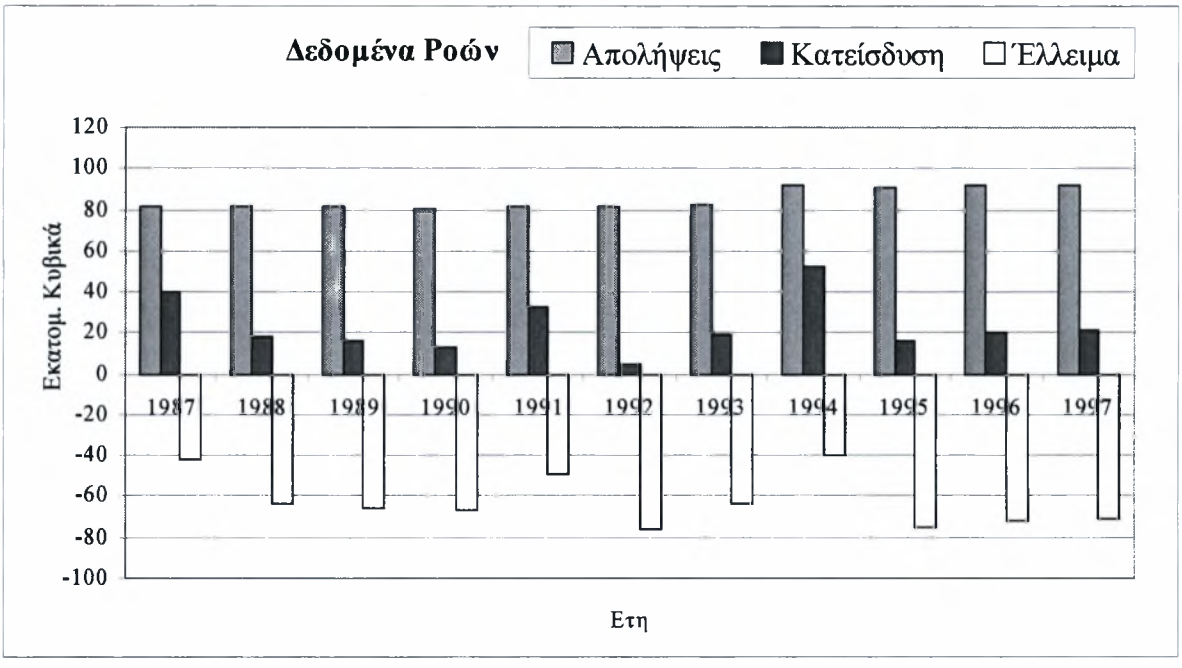
Η **ζώνη 6** οριοθετείται από τα χωριά - νοτίως του Καλαμακίου – Αρμένιο – Σωτήριο – Νίκη – Αχχίλειον – Γλαύκη – Ελευθέριο – Δήμητρα και Νεοχώρι. Έχει έκταση 210263 στρεμμάτων και το βόρειο τμήμα της ανήκει στην πρώτη ομάδα πιεζομέτρων, ενώ το νότιο στη δεύτερη. Είναι η περιοχή η οποία αρδεύεται από το ΤΟΕΒ Πηνείου. Η ποσότητα που αντλείται είναι περίπουυ των $22*10^6$ m^3. Οι παροχές των γεωτρήσεων κυμαίνονται από 55 m^3/h έως και 220 m^3/h.

Τέλος η **ζώνη 7**, εκτάσεως 143840 στρεμμάτων, αποτελεί την πιο επιβαρυμένη περιοχή της πεδιάδας της Κάρλας. Οι ανάγκες για άρδευση και ύρδευση καλύπτονται αποκλειστικά από γεωτρήσεις. Ανήκει στην τρίτη ομάδα πιεζομέτρων και συναντώνται οι μεγαλύτερες ταπεινώσεις που τους καλοκαιρινούς μήνες φτάνουν και τα 100 m. Αυτό όμως οφείλεται στο γεγονός ότι το βάθος του υδροφορέα είναι αρκτά μεγάλο, μιας και από τη μελέτη της SOGREAH–Grénoble 1974, ο αδιαπέρατος πυθμένας φτάνει στα -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

550 m (απόλυτο υψόμετρο). Αντλούνται από $37,95*10^6$ m^3 έως $43,7*10^6$ m^3. Οι παροχές των γεωτρήσεων κυμαίνονται από 70 m^3/h έως και 220 m^3/h.

Έτσι οι εισροές και εκροές του υδροφορέα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.6 Δεδομένα εισροών – εκροών του υδροφορέα και το έλλειμα.

Σκόπιμα αφέθηκε για το τέλος η παρουσίαση των υδραυλικών παραμέτρων αφού η στοχαστική προσομοίωση έγινε για μια εξ' αυτών, την υδραυλική αγωγιμότητα. Ο συντελεστής αποθήκευσης (Specific Storage) ελήφθη ίσος με 0.02 και ο συντελεστής απόδοσης (Specific Yield) ίσος με 0.1 (SOGREAH–Grénoble 1979, Δ. Κωνσταντινίδης – Π. Περγιαλιώτης 1984, Constandinidis 1978).

4.2.1 Στοχαστική Προσομοίωση της Υδραυλικής Αγωγιμότητας

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια η στοχαστική προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα, έγινε κυρίως λόγω της αβεβαιότητας που εισέρχεται στο μοντέλο από τη μη καλή γνώση των πεδίου τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η αβεβαιότητα όμως μπορεί να υπάρχει και στις οριακές συνθήκες, και στις μετρήσεις των υδραυλικών υψών και ακόμη σε κάποιες τιμές συντελεστών / παραμέτρων που στο μοντέλο θεωρούνται δεδομένες.

Όμως αυτή η εργασία σκοπό έχει να εκτιμήσει την αβεβαιότητα που προέρχεται από την χωρική μεταβλητότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας. Βέβαια στην υπόγεια υδραυλική, η υδραυλική αγωγιμότητα και η μεταφορικότητα θεωρούνται από τις πιο αβέβαιες υδραυλικές παραμέτρους εξαιτίας της ετερογένειας των πεδίων και της μη επαρκούς δειγματοληψίας.

Για την εκτίμηση της αβεβαιότητας της υδραυλικής αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε η Ακολουθιακή Κανονική Προσομοίωση (Sequential Gaussian Simulation), με στόχο την παραγωγή **εξαρτημένων** και **μη εξαρτημένων** πολλαπλών πεδίων K.

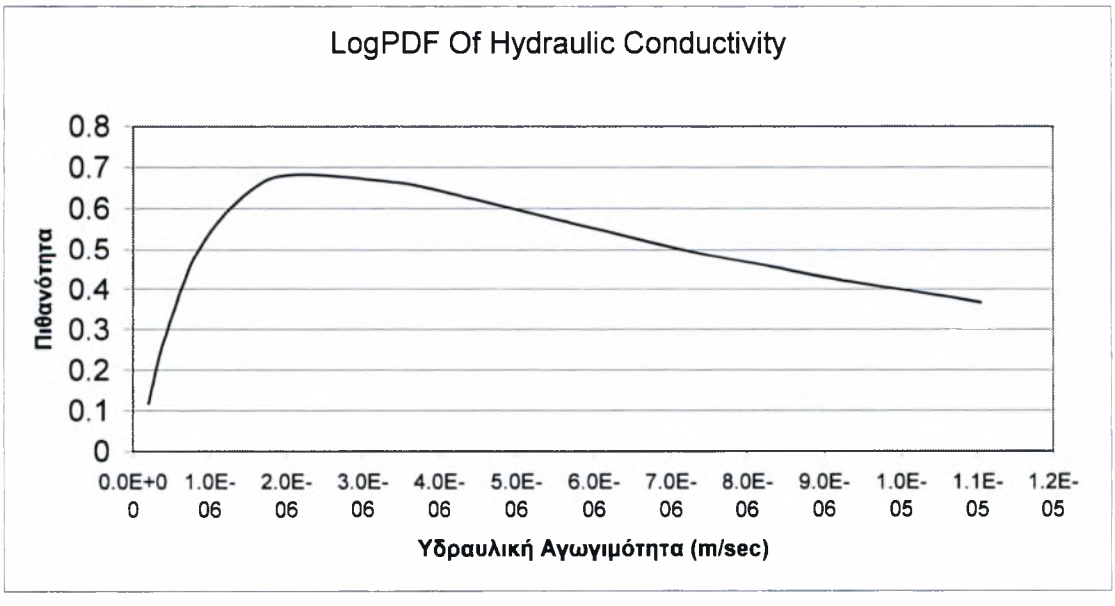
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Στο Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι 15 δειγματοληπτικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, με τα ονόματα και τις συντεταγμένες των γεωτρήσεων που έγιναν.

Πηγάδι	X	Y	Θέση	K(m/sec)
PZ7	642281.783	4391852.765	Νεοχώρι	1.53163E-06
AD11	636705.3156	4382398.7256	Μόδεστρος	2.14928E-06
AD15	653522.269	4370389.987	Κάρλα	5.18898E-06
AG12	636100	4389500	Πλατύκαμπος	2.59884E-07
SR66	646465.4860	4378039.3443	Νίκη	2.00803E-07
SR43	643202.000	4370724.000	Κοκκίνες	4.04676E-07
SR32	637576.8300	4375595.9400	Κυψέλη	7.07214E-06
SR31	640758.0645	4378886.7745	Μέλισσα	5.38851E-06
SR30	632522.3300	4380364.0900	Χάλκη	3.95257E-06
AG14	644246.0385	4376506.0770	Νίκη	8.64242E-07
SR65	652000	4379250	Καλαμάκι	1.10375E-05
SR78	646900	4372800	Αρμένιο	8.52152E-06
SR79	656400	4370100	Γωνία Ταμιευτ.	8.93495E-06
SR61	662200	4372300	Κανάλια	8.37851E-06
SR63b	652600.000	4364806.000	Ριζόμυλος	3.55872E-06

Πίνακας 4.2 Οι δειγματοληπτικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας.

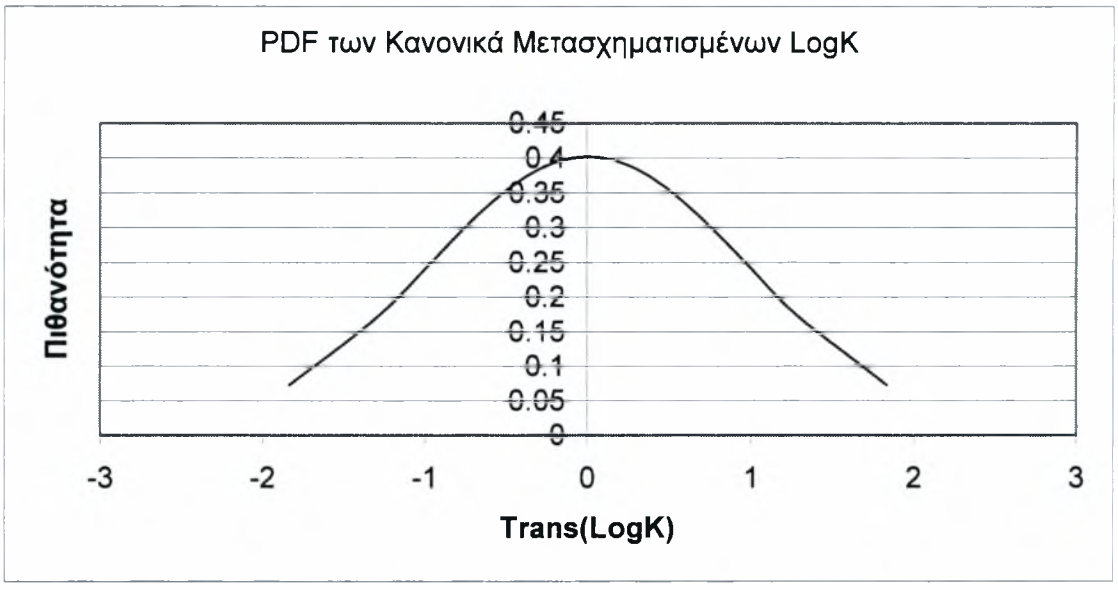
Όπως σε όλα τα προβλήματα προσομοίωσης υπόγειας ροής οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας μετατρέπονται σε λογαριθμικές. Έτσι λοιπόν η μέση τιμή αυτών είναι logm = -5.607 και η τυπική απόκλιση $\log\sigma^2 = 0.581$. Η δε λογαριθμική κατανομή τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Λογαριθμική Κατανομή της Υδραυλικής Αγωγιμότητας

Οι παραπάνω τιμές όμως μετασχηματίζονται ώστε η κατανομή πιθανότητας να είναι κανονική, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.8.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



Σχήμα 4.8 Κανονική Κατανομή Πιθανότητας των Μετασχηματισμένων LogK.

Το αρχείο του Σχήματος 4.9 αποτέλεσε το αρχείο εισόδου στο GSLIB και με τη χρήση του αλγορίθμου Gamv, που γράφτηκε όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 προέκυψε το πειραματικό ημιμεταβλητόγραμμα του Σχήματος 4.11.

LogHydraulic conductivities
4
X
Y
Z
LogK

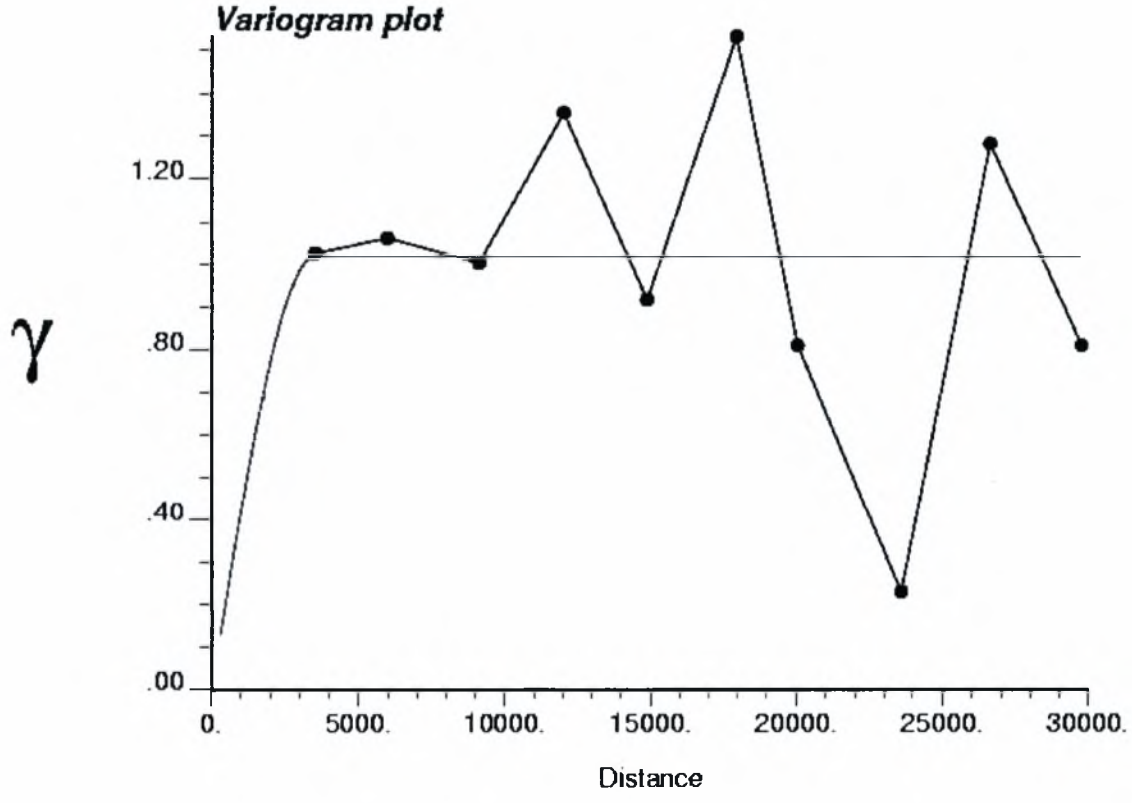
646465.4860	4378039.3443	0	-6.697229343
636100	4389500	0	-6.585220655
643202.000	4370724.000	0	-6.392892273
644246.0385	4376506.0770	0	-6.063364638
642281.783	4391852.765	0	-5.814846669
636705.3156	4382398.7256	0	-5.667707596
640758.0645	4378886.7745	0	-5.44870632
652600.000	4364806.000	0	-5.44870632
632522.3300	4380364.0900	0	-5.403120521
653522.269	4370389.987	0	-5.284917884
637576.8300	4375595.9400	0	-5.150449409
662200	4372300	0	-5.076833126
646900	4372800	0	-5.069483094
656400	4370100	0	-5.048907701
652000	4379250	0	-4.957128198

Σχήμα 4.9 Το αρχείο εισόδου για το GSLIB, το οποίο περιέχει τα LogK.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

```
                    Parameters for GAMV
                    **************************
START OF PARAMETERS:
C:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\data\LogK_GSLIB.txt
1 2 3                    - columns for X, Y and Z coordinates
4                        - columns for variables
-1E+21 1E+21             - trimming limits
c:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\save\GV_LogK_GSLIB.out
10                       - number of lags
2975.17                  - lag separation distance
1487.585                 - lag tolerance
1                        - number of Directions
0 90 40153.522191056 0 0 10000      -azm, atol, bandh, dip, dtol, bandv
1                        - standardize sill? (0=no, 1=yes)
1                        - number of variograms
1 1 1                    - Tail var, head var, vario type
```

Σχήμα 4.10 Ο αλγόριθμός Gamv για τη δημιουργία του πειραματικού ημιμεταβλητογράμματος.



Σχήμα 4.11 Το πειραματικό ημιμεταβλητόγραμμα και το θεωρητικό ημιμεταβλητόγραμμα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Το θεωρητικό μεταβλητόγραμμα ακολουθεί σφαιρική καμπύλη με εξίσωση :

$$\gamma(h) = \begin{cases} 1*\left[1.5*\dfrac{h}{3520} - 0.5*\left(\dfrac{h}{3520}\right)^3\right], & \text{όταν } h \leq 3520 \text{ m} \\ 1 & \text{, όταν } h \geq 3520 \text{ m} \end{cases}$$

Το παραπάνω χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του συστήματος της Simple Kriging, που επιλέχθηκε, αφού αποτελεί την βέλτιση από τις άλλες μεθόδους για την SGSIM.

Η γεωστατιστική προσέγγιση της υδραυλικής αγωγιμότητας κλείνει με την εκτέλεση του αλγορίθμου SGSIM, όπως αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12.

```
Parameters for SGSIM
************************

START OF PARAMETERS:
C:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\data\LogK_GSLIB.txt
1 2 3 4 0 0                 -columns for X,Y,Z,vr,wt,sec.var.
-1E+21 1E+21                -trimming limits
1                           -transform the data (0=no, 1=yes)
c:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\save\sgsim.trn
0                           -consider ref. dist (0=no, 1=yes)
c:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\data\histsmth.out
1 2                         -columns for vr and wt
-7 -4                       -zmin,zmax (tail extrapolation)
1 -7                        -lower tail option
1 -4                        -upper tail option
1                           -debug level (0-3)
c:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\save\SGS_LogK_GSLIB.dbg
c:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\save\SGS_LogK_GSLIB.out
100                         -number of realizations to generate
200 627331.6 193.3          -nx, xmin, xsize
200 4357968.16 212          -ny, ymin, ysize
1 0 1                       -nz, zmin, zsize
69069                       -random number seed
0 8                         -Min and max original data for sim
32                          -number of simulated nodes to use
1                           -assign data to nodes (0=no, 1=yes)
0 1                         -multiple grid search (0=no, 1=yes), num
0                           -maximum data per octant (0=not used)
19330 212 25                -maximum search radii (hmax, hmin, vert)
0 0 0                       -angles for search ellipsoid
```


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

```
388 424 1                    -size of covariance lookup table
0 0 1                        -kType: 0=SK,1=OK,2=LVM,3=EXDR,4=COLC
c:\Metaptixiako\Dipolmatiki\GSLIB\LogGSLIB\data\ydata.dat
1                            -column
1 0                          -nst, nugget NOFILE
1 1.02 0 0 0                 -it, cc, ang1, ang2, ang3
3520 3520 3520               -a_hmax, a_hmin, a_vert
```

Σχήμα 4.12 Ο αλγόριθμός SGSIM για την παραγωγή των πολλαπλών πεδίων LogK.

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων κρίνεται σκόπιμο να γραφτεί ο διαχωρισμός της εξαρτημένης προσομοίωσης από την μη-εξαρτημένη, ως προς τη διαδικασία τους.

Έτσι στη μεν μη-εξαρτημένη προσομοίωση δόθηκαν μόνο η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των δειγματοληπτικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας, αλλά με δύο περιορισμούς στην παρούσα προσομοίωση. Πρώτον οι τιμές μετατράπηκαν σε λογαριθμικές για την επίτευξη της στασιμότητας και έπειτα σε κανονικές για να αποδώσουν κατανομή Gauss. Άρα επόμενο είναι η μέση τιμή να είναι ίση με το μηδέν και η τυπική απόκλιση ίση με τη μονάδα.

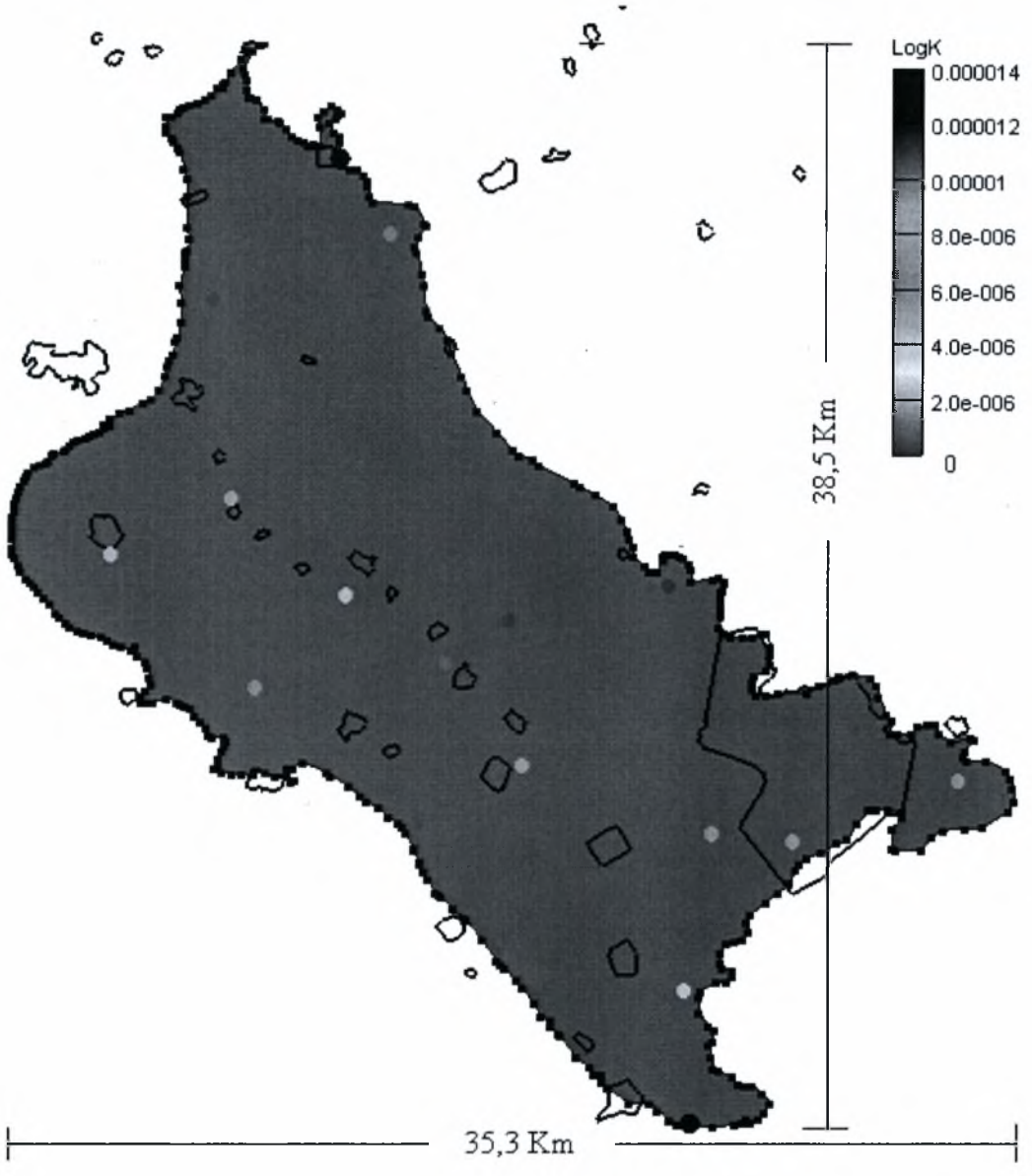
Οι παραπάνω δύο μετατροπές των αρχικών δειγματοληπτικών τιμών έγιναν και στην εξαρτημένη προσομοίωση, με τη διαφορά ότι σε αυτήν λήφθηκαν υπόψη τόσο οι τιμές τους, όσο και οι θέσεις τους. Δηλαδή στα 100 πεδία των K που προέκυψαν, οι παραπάνω τιμές (στις συγκεκριμένες θέσεις) δεν άλλαξαν. Η διαδικασία αυτή περιγράφθηκε από τον (Journel, 1974) ως εξής :

- με τις γνωστές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάποια σημεία του πεδίου, χρησιμοποιήθηκε η Simple Kriging και δόθηκαν τιμές αυτής σε κάθε κελί του καννάβου
- πραγματοποιήθηκε αρχικά μια μη-εξαρτημένη προσομοίωση της υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε κελί
- επιλέχθηκαν οι τιμές των K από την παραπάνω μη-εξαρτημένη προσομοίωση στις θέσεις που υπήρχαν τα δεδομένα και χρησιμοποιήθηκε η Simple Kriging δίνοντας επίσης ένα χάρτη με τιμές K σε κάθε κελί
- υπολογίσθηκε η διαφορά των τιμών της K, που προέκυψαν από τη μη-εξαρτημένη προσομοίωση, από αυτές που προέκυψαν από το τελευταίο Simple Kriging, για κάθε κελί
- προστέθηκαν αυτές οι διαφορές στις τιμές της K του αρχικού Simple Kriging, με τις τιμές όμως των δεδομένων να παραμένουν οι ίδιες.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι λογαριθμικές τιμές των δεδομένων της υδραυλικής αγωγιμότητας, όπως αυτές εισήχθηκαν στο GSLIB με το αρχείο του Σχήματος 4.9, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.1 Οι θέσεις των λογαριθμικών τιμών των δεδομένων της Υδραυλικής Αγωγιμότητας.

Έχοντας αυτή την εικόνα ως αρχή (για την υδραυλική αγωγιμότητα) από τη μια και την εικόνα του Σχήματος 4.3 με τα αρχικά ύψη (1/1/1987) από την άλλη, συν τις οριακές συνθήκες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, είναι πλέον έτοιμο το μοντέλο για να τρέξει για την περίοδο προσομοίωσης 1/1/1987 έως 1/1/1997.

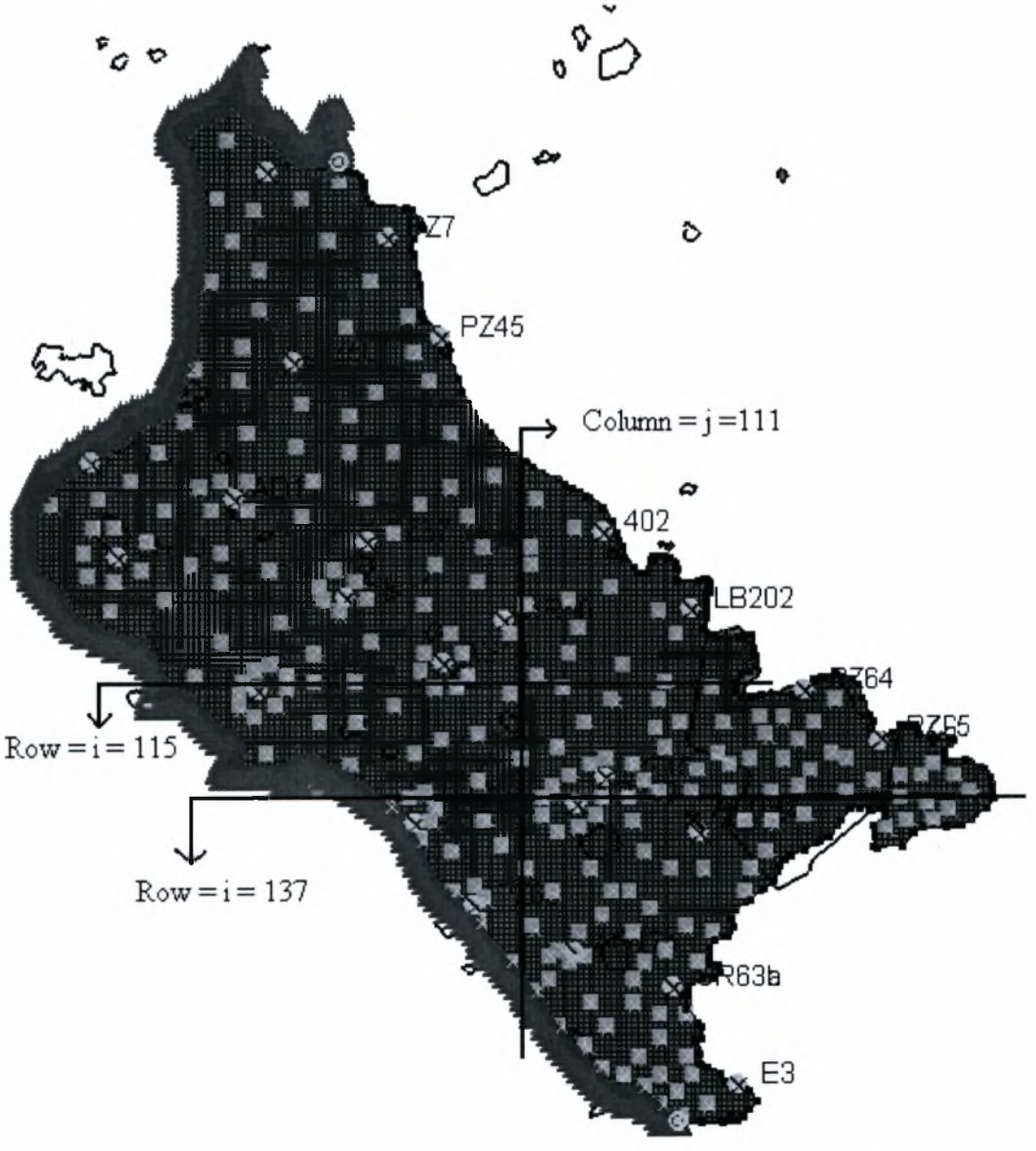
Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της αβεβαιότητας στον υπολογισμό των υδραυλικών υψών, που προέρχεται από την χωρικά μεταβαλλόμενη υδραυλική αγωγιμότητα σε καθεστώς **υπερεκμετάλλευσης** του υπόγειου υδροφορέα. Αυτή η κατάσταση της υπερεκμετάλλευσης τονίζεται ιδιαιτέρως

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

γιατί, όπως θα αποδειχθεί παρακάτω, η παρουσία γεωτρήσεων αυξάνει την αβεβαιότητα στα σημεία όπου αυτές βρίσκονται.

Η αβεβαιότητα όμως αυτή μπορεί να εκτιμηθεί μόνο μέσω της στοχαστικής προσομοίωσης. Η τελευταία έδωσε χάρτες με τις τυπικές αποκλίσεις των πεδίων που προέκυψαν από τις παρατηρούμενες τιμές (1/1/1997).

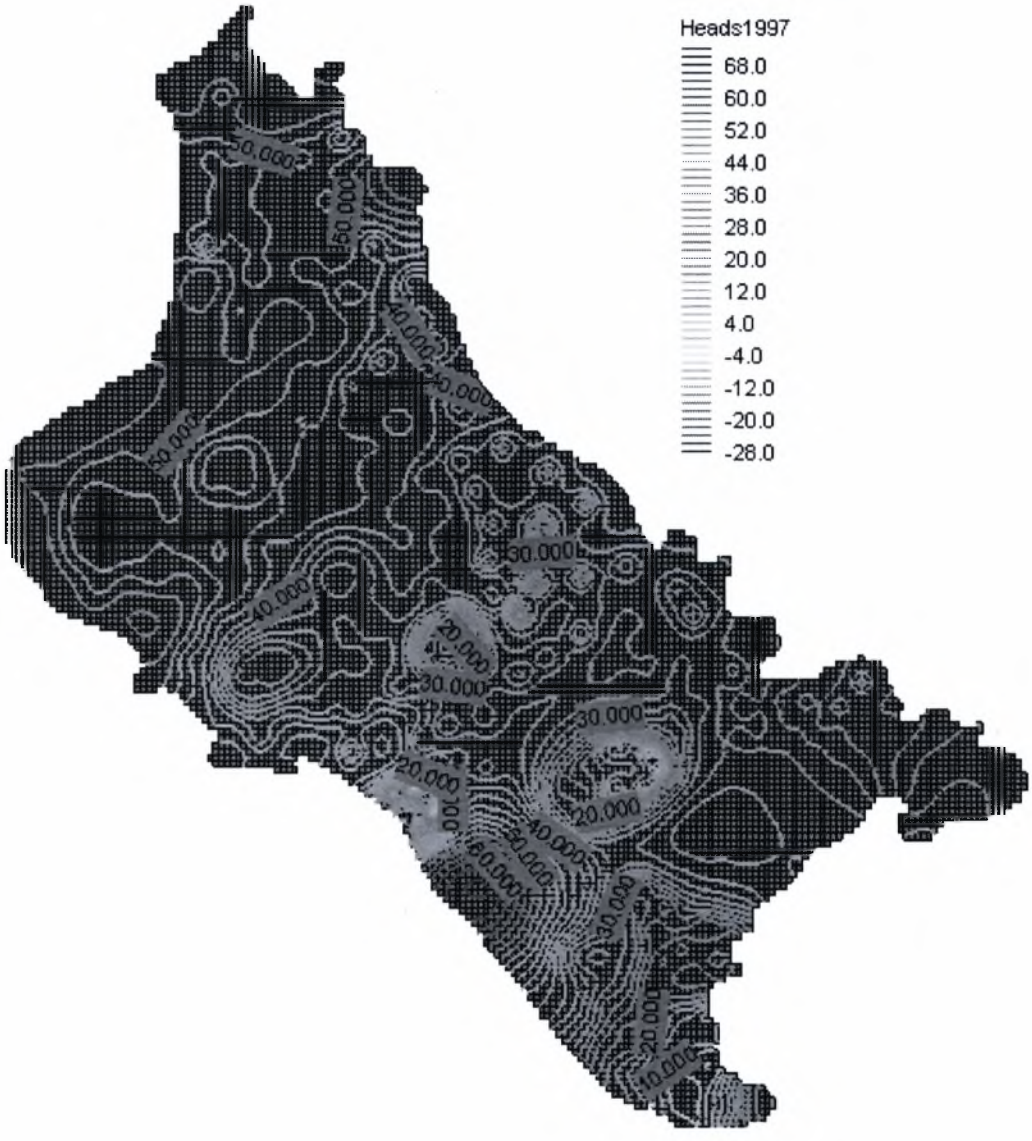
Εκτός από τους χάρτες που θα παρουσιαστούν παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και σε κάποιες τομές του πεδίου. Η επιλογή των στηλών – γραμμών του καννάβου στις οποίες αναφέρονται οι τομές δεν είναι καθόλου τυχαία. Πάνω στις δύο γραμμές εμφανίζονται ο μεγαλύτερος αριθμός γεωτρήσεων με ποικίλες παροχές (Σχήμα 5.2), ενώ στη στήλη 111 η παρουσία των γεωτρήσεων είναι αραιή, για να παρουσιαστεί αυτή η αντίθεση.



Σχήμα 5.2 Τομές του καννάβου για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Οι παρατηρούμενες τιμές των υδραυλικών υψών για το τέλος της προσομοίωσης (1/1/1997) προέρχονται από τα ίδια πηγάδια παρατήρησης, που προήλθαν και τα αρχικά ύψη. Έτσι η τελική εικόνα του υπόγειου υδροφορέα, με την οποία έγινε και η σύγκριση των στοχαστικών προσομοιώσεων είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 5.3.

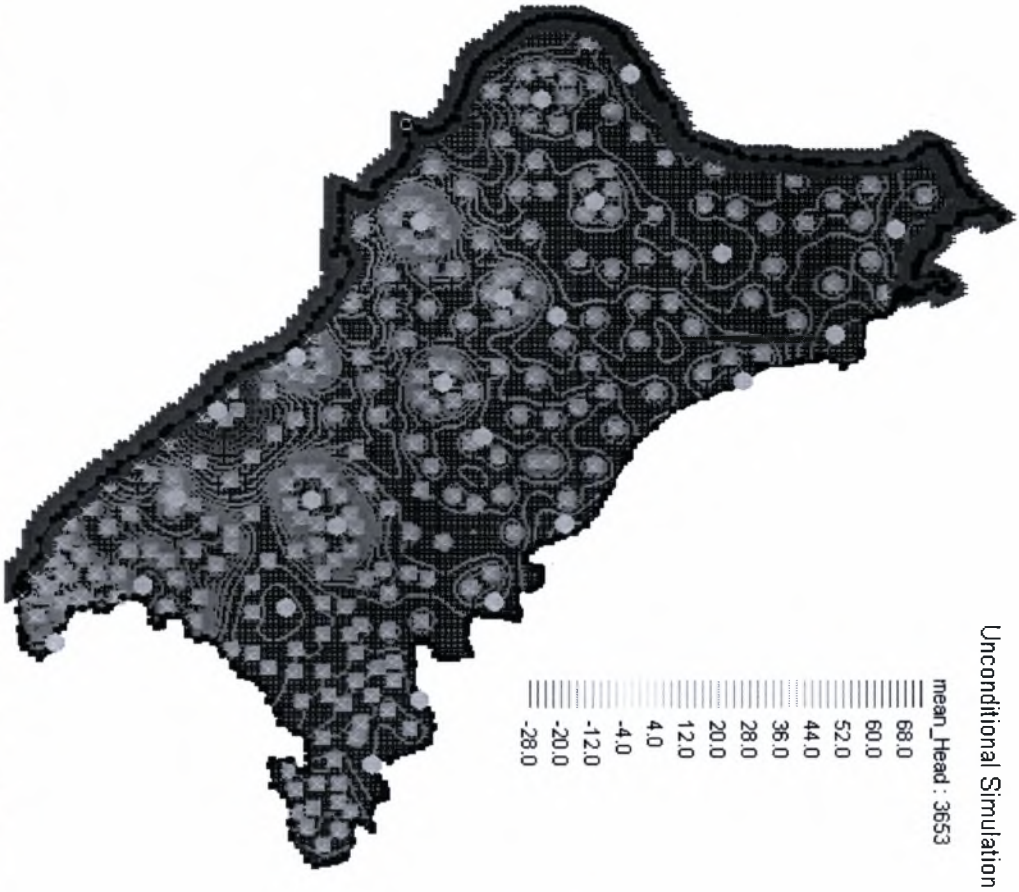


Σχήμα 5.3 Απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα στο τέλος της προσομοίωσης 1/1/1997 σύμφωνα με τις παρατηρούμενες τιμές.

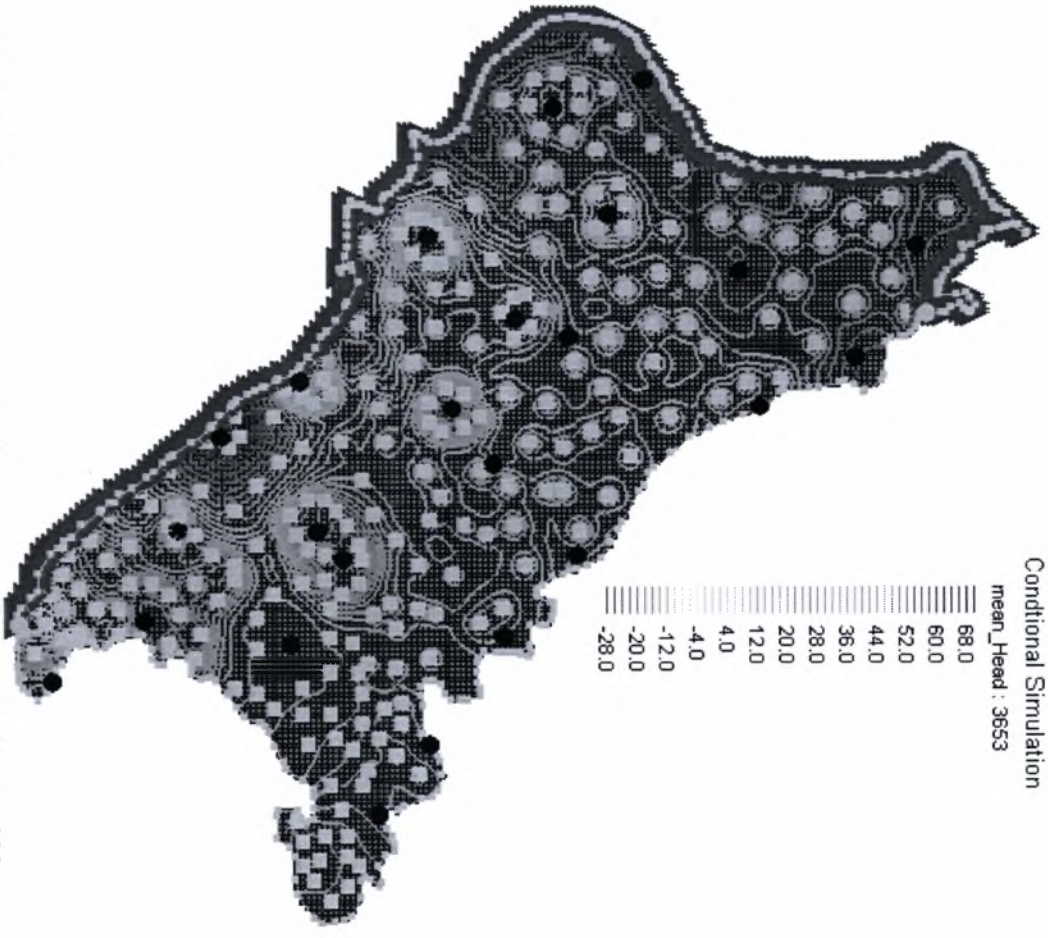
Ο χάρτης, με τις μέσες τιμές των υδραυλικών υψών που προέκυψαν από τις 100 μη εξαρτημένες προσομοιώσεις, για την 1/1/1997 παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4, ενώ για τις τυπικές αποκλίσεις στο Σχήμα 5.6.

Οι αντίστοιχοι χάρτες για την εξαρτημένη προσομοίωση παρουσιάζονται στα σχήματα 5.5 και 5.7.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

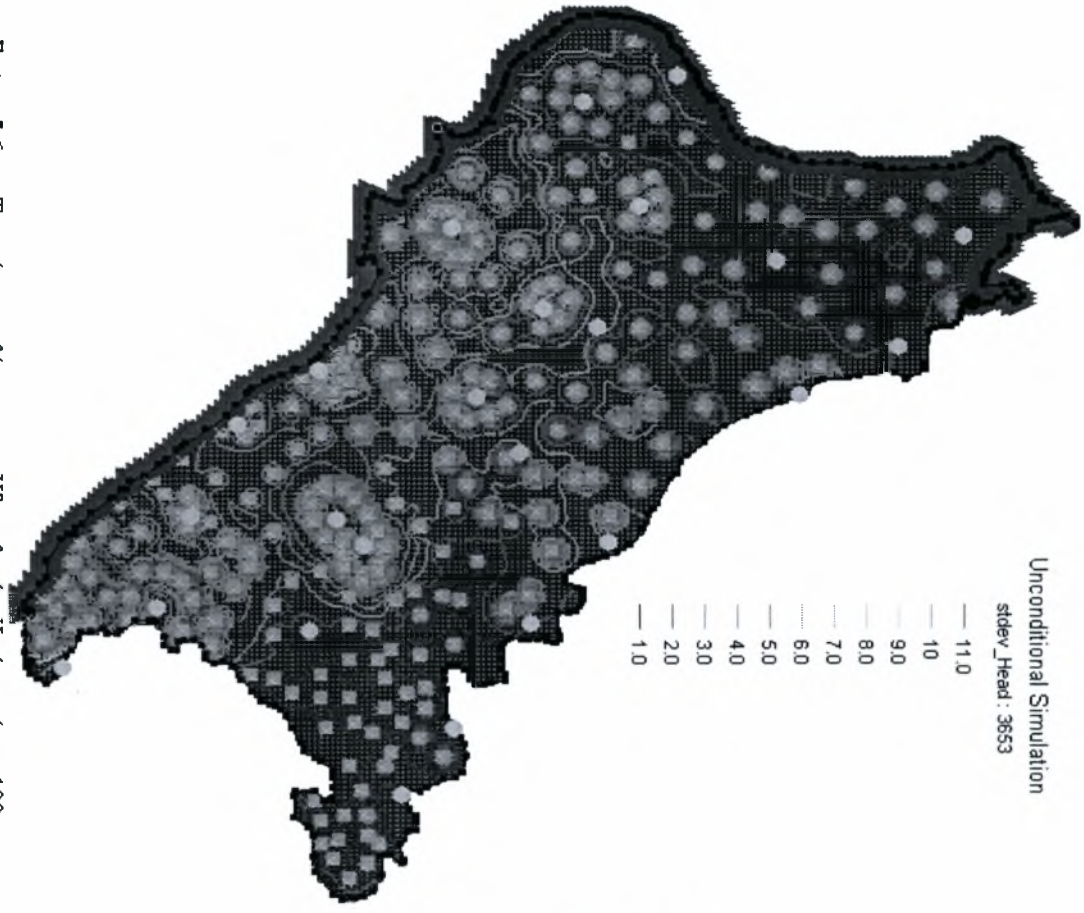


Σχήμα 5.4 Μέσες τιμές των Υδραυλικών Υψών από τις 100 μη εξομοιώσεις στοχαστικές προσομοιώσεις δεδομένων στο υπόγειο υδροφορέα.

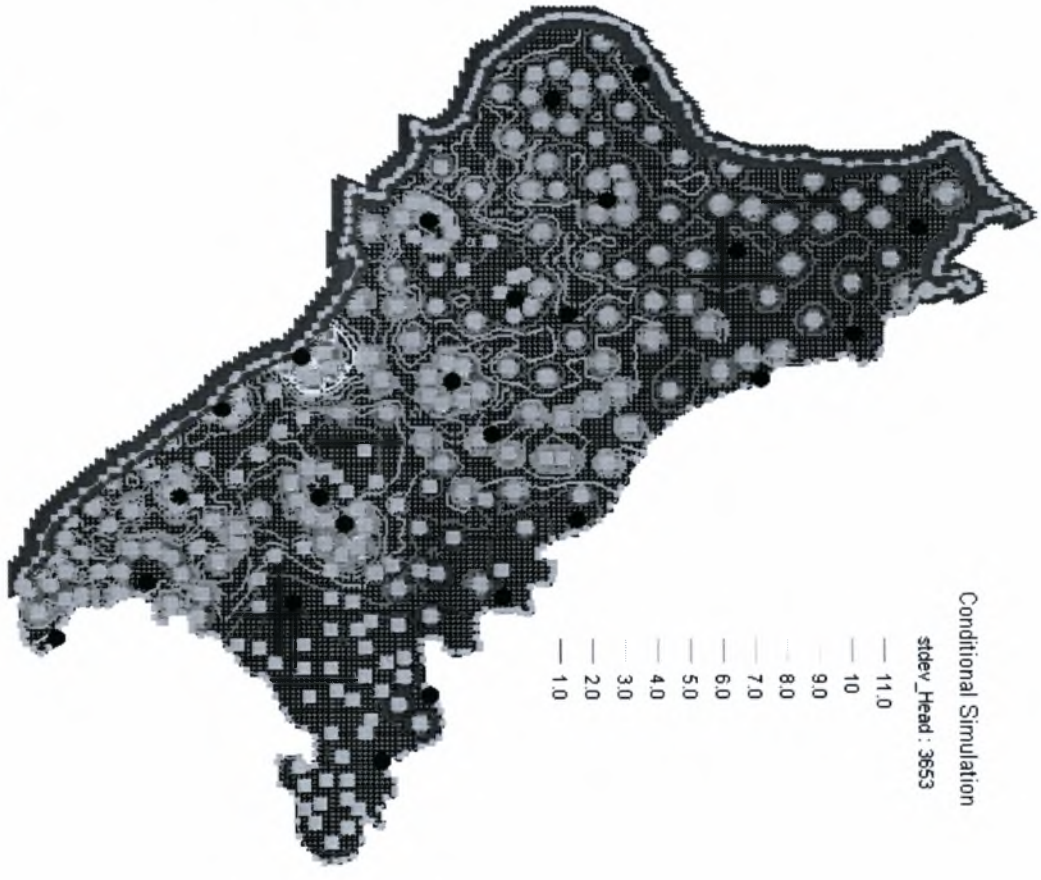


Σχήμα 5.5 Μέσες τιμές των Υδραυλικών Υψών από τις 100 εξομοιώσεις στοχαστικές προσομοιώσεις δεδομένων στο υπόγειο υδροφορέα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



Σχήμα 5.6 Τυπικές αποκλίσεις των Υδραυλικών Υψών από τις 100 μη εξομαλυσμένες στοχαστικές προσομοιώσεις.



Σχήμα 5.7 Τυπικές αποκλίσεις των Υδραυλικών Υψών από τις 100 εξομαλυσμένες στοχαστικές προσομοιώσεις.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Πριν προχωρήσουμε στην αναλυτικότερη παρουσίαση με τις τομές ας εξαγάγουμε κάποια πρώτα συμπεράσματα που προκύπτουν αβίαστα παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα.

Πρώτον από μια πρώτη σύγκριση των απεικονίσεων του υπόγειου υδροφορέα μεταξύ της αρχής της περιόδου προσομοίωσης (1/1/1987 Σχήμα 4.3) και του τέλους αυτής (1/1/1997 Σχήμα 5.3) γίνεται αντιληπτό το πόσο έχουν διαταραχθεί οι ισοδυναμικές γραμμές από την παρουσία των γεωτρήσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την 1/1/1997 δε λειτουργεί καμία γεώτρηση – αφού η λειτουργία τους περιορίζεται στη ξηρή περίοδο - και παρόλα αυτά ο υδροφορέας δεν έχει ανακάμψει. Με άλλα λόγια εξαιτίας του καθεστώτος υπερεκμετάλλευσης στο οποίο βρίσκεται ο υπόγειος υδροφορέας, δεν μπορεί να ανακάμψει, έτσι ώστε να εμφανίζει την εικόνα που είχε στα μέσα της δεκαετίας του ’80, πριν δηλαδή γίνουν εμφανείς οι συνέπειες της μεγάλη έκρηξης στη διάνοιξη γεωτρήσεων που ξεκίνησε από τις αρχές της ίδια δεκαετίας (Γκούμας 2005).

Δεύτερον από τα σχήματα 5.6 και 5.7 παρατηρείται ότι η τυπική απόκλιση αυξάνει κοντά στις γεωτρήσεις. Εφόσον η τυπική απόκλιση είναι μέτρο εκτίμησης της αβεβαιότητας, αυτό συνεπάγεται ότι αυξάνει η αβεβαιότητα για τον σωστό υπολογισμό των υδραυλικών υψών στα σημεία αυτά.

Και τρίτον ότι η μη εξαρτημένη προσομοίωση δίνει μεγαλύτερες τιμές τυπικής απόκλισης σε όλο το πεδίο από την εξαρτημένη.

Αλλά αυτό παρουσιάζεται καλύτερα στα παρακάτω σχήματα που αποδίδουν το πώς μεταβάλλονται τόσο οι μέσες τιμές των υδραυλικών υψών από τις δύο μεθόδους προσομοίωσης όσο και οι τυπικές τους αποκλίσεις.

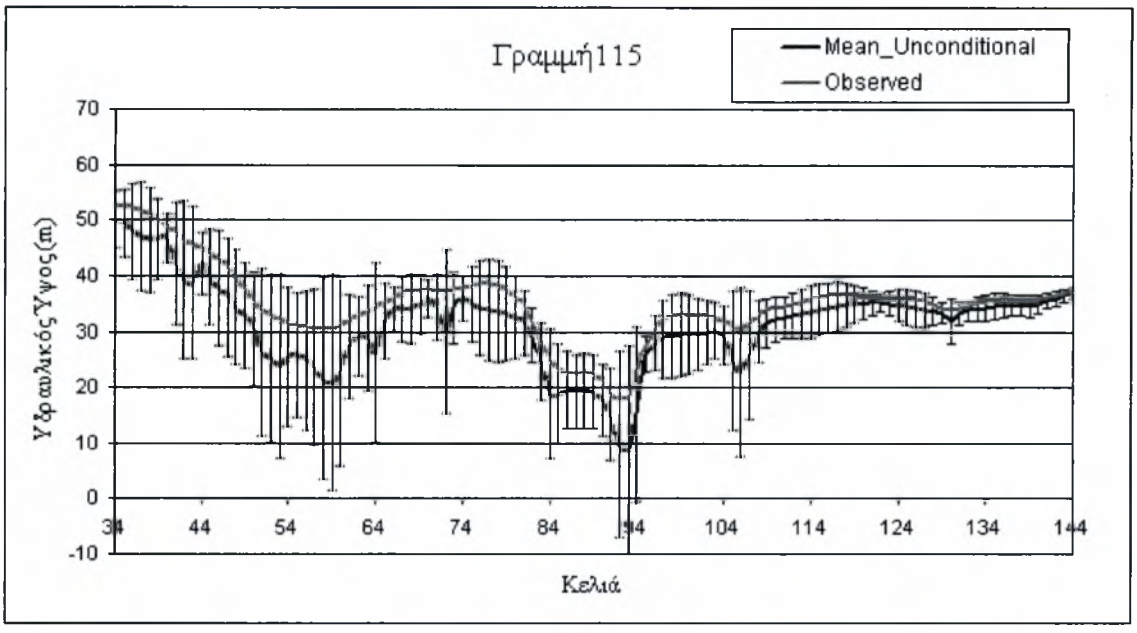
Επιπλέον στα σχήματα 5.8 και 5.9 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των υδραυλικών υψών με διαστήματα εμπιστοσύνης $\pm 2\sigma$ και οι παρατηρούμενες τιμές για τη γραμμή 115 για τη μη εξαρτημένη προσομοίωση και για την εξαρτημένη αντίστοιχα.

Στα σχήματα 5.10 και 5.11 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα για τη γραμμή 137 και στα σχήματα 5.12 και 5.13 για τη στήλη 111.

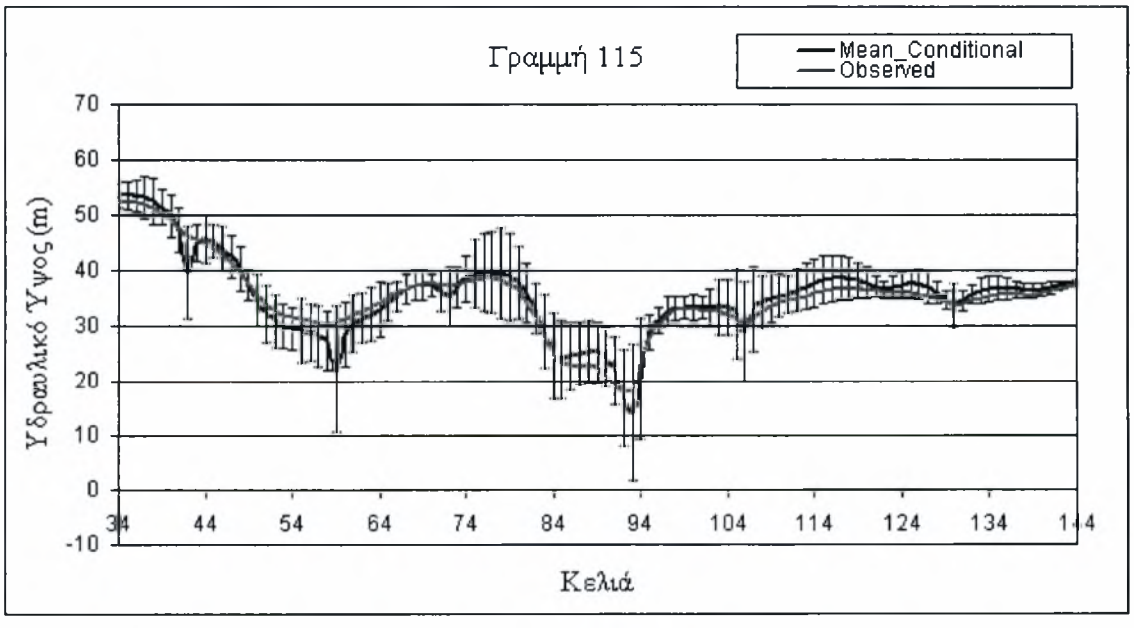
Η στατιστική όμως ανάλυση συνεχίστηκε και έδωσε και χάρτες με τα μέγιστα και ελάχιστα ύψη που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις. Οι αποκλίσεις τους είναι ένα επιπλέον μέτρο εκτίμησης της αβεβαιότητας. Έτσι στα σχήματα 5.14 και 5.15 παρουσιάζονται τα ελάχιστα και μέγιστα ύψη της μη εξαρτημένης προσομοίωσης έπειτα από μεγέθυνση σε περιοχή με έντονη την παρουσία γεωτρήσεων (διασταύρωση $137^{ης}$ γραμμής με $115^{ης}$ στήλης). Ενώ στα σχήματα 5.16 και 5.17 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα για την εξαρτημένη.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται και σε επίπεδο τομών, με τα σχήματα 5.18 και 5.19 για τη γραμμή 115. Στα σχήματα 5.20 και 5.21 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα για τη γραμμή 137 και στα σχήματα 5.22 και 5.23 για τη στήλη 111.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

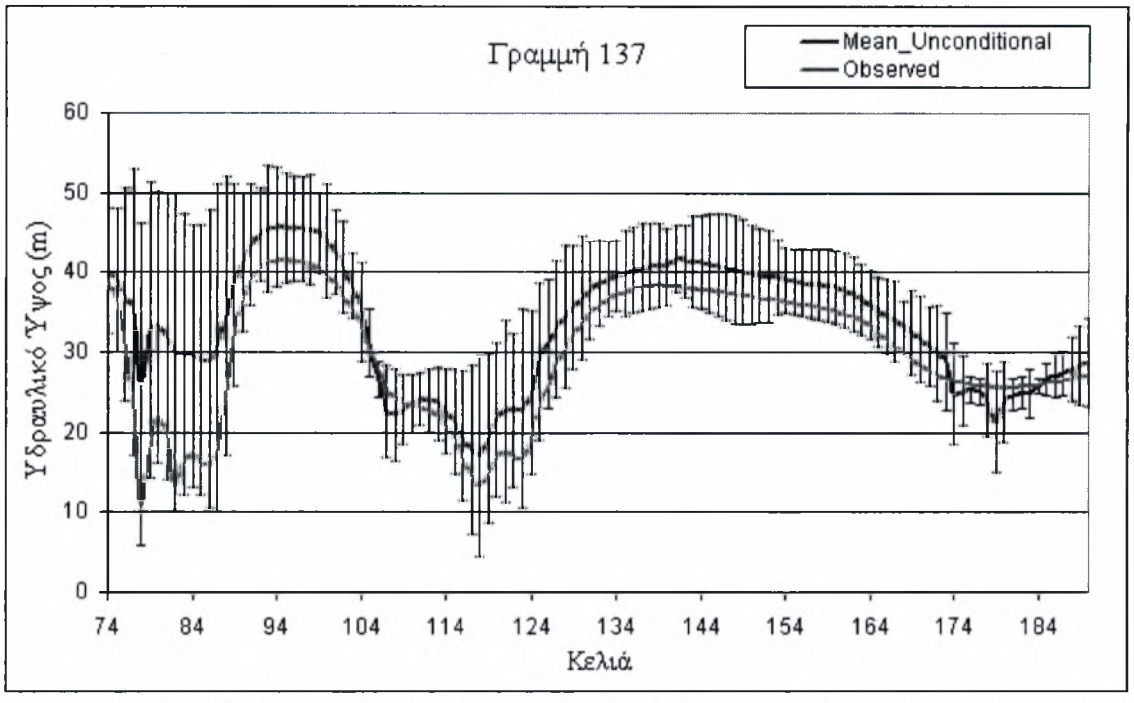


Σχήμα 5.8 Μέσες τιμές Υδραυλικού Ύψους των 100 μη εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη γραμμή 115.

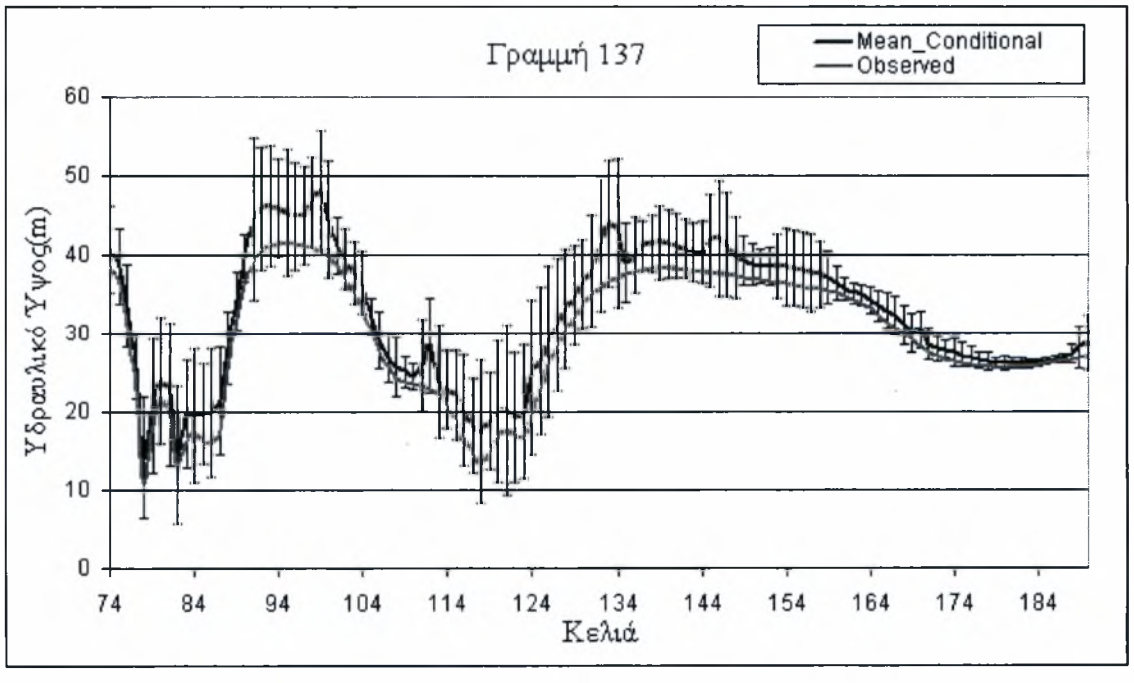


Σχήμα 5.9 Μέσες τιμές Υδραυλικού Ύψους των 100 εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη γραμμή 115.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

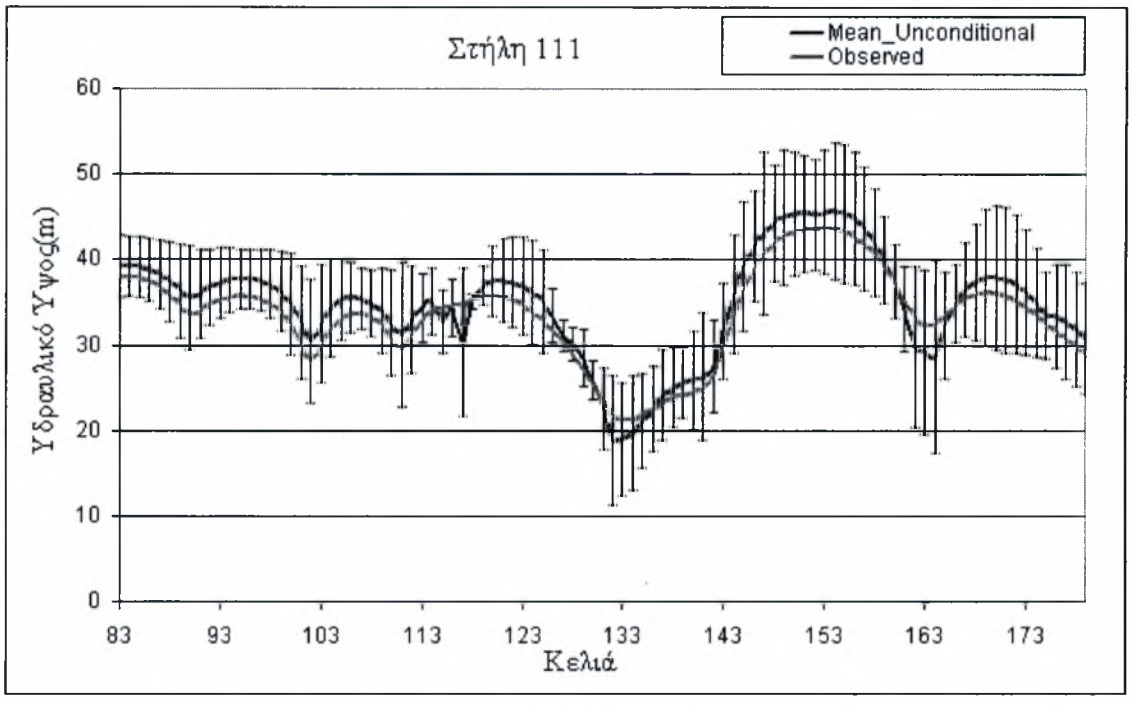


Σχήμα 5.10 Μέσες τιμές Υδραυλικού Ύψους των 100 μη εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη γραμμή 137.

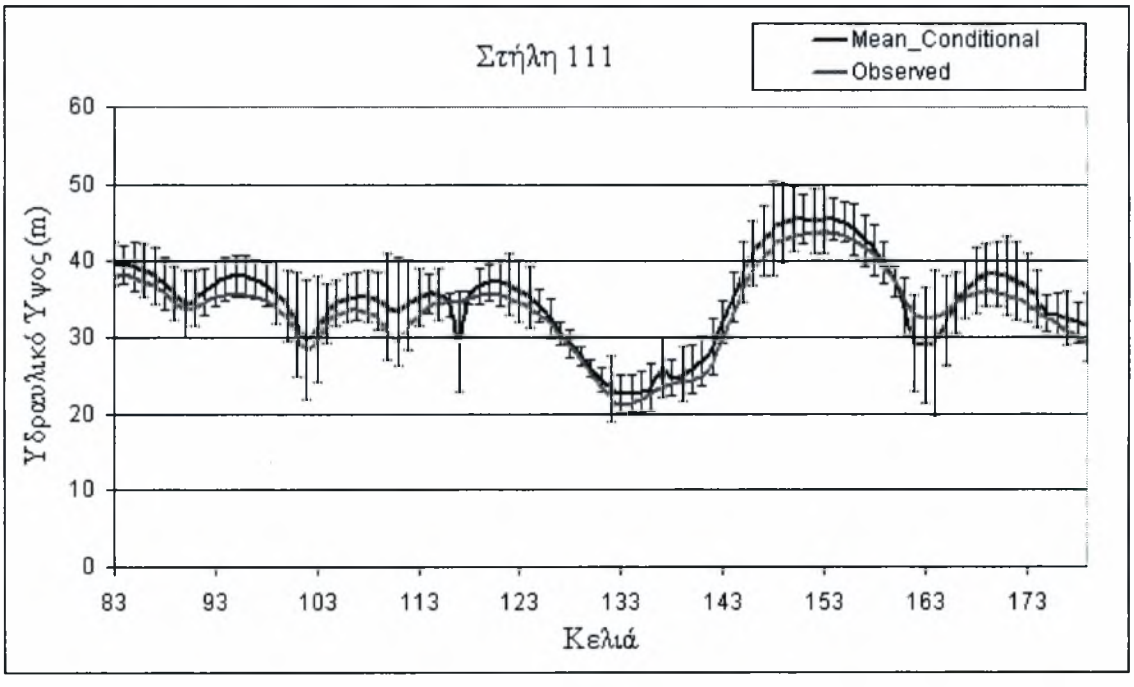


Σχήμα 5.11 Μέσες τιμές Υδραυλικού Ύψους των 100 εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη γραμμή 137.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

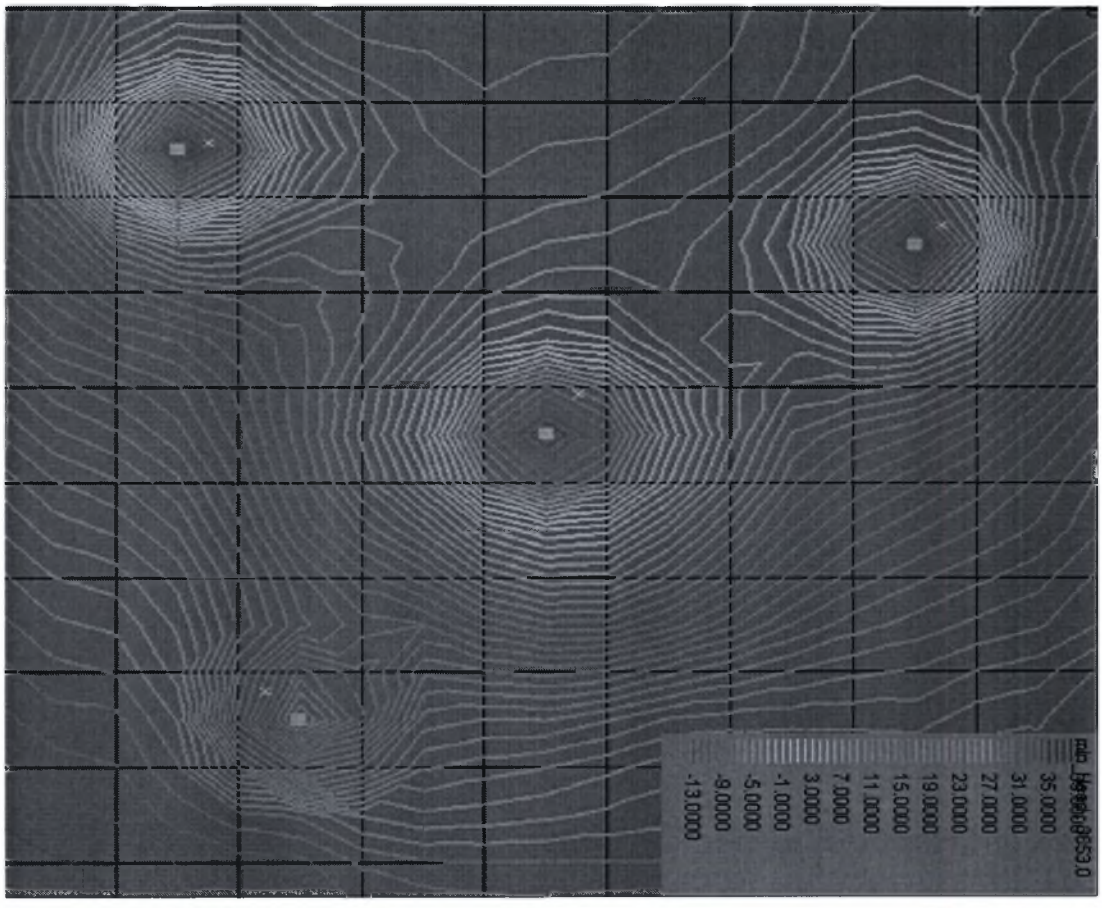


Σχήμα 5.12 Μέσες τιμές Υδραυλικού Ύψους των 100 μη εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη στήλη 111.

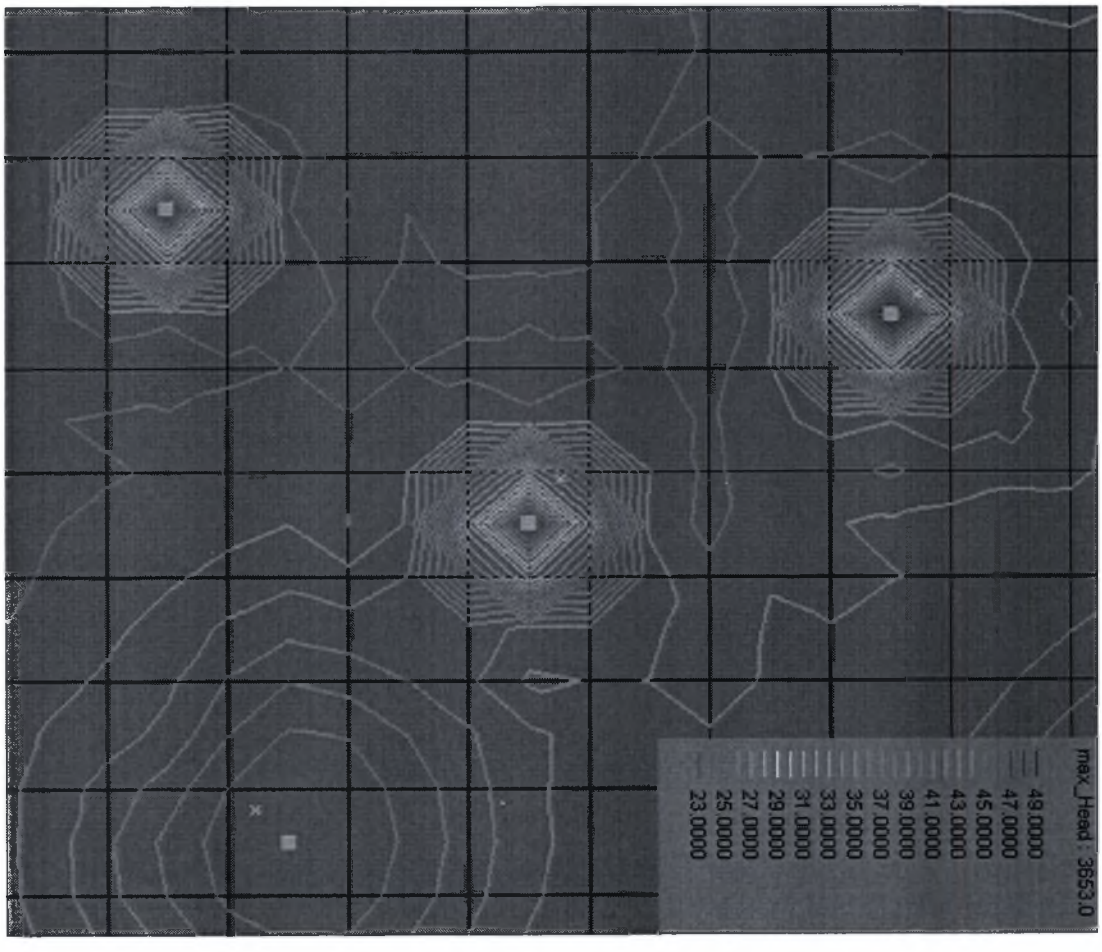


Σχήμα 5.13 Μέσες τιμές Υδραυλικού Ύψους των 100 εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη στήλη 111.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

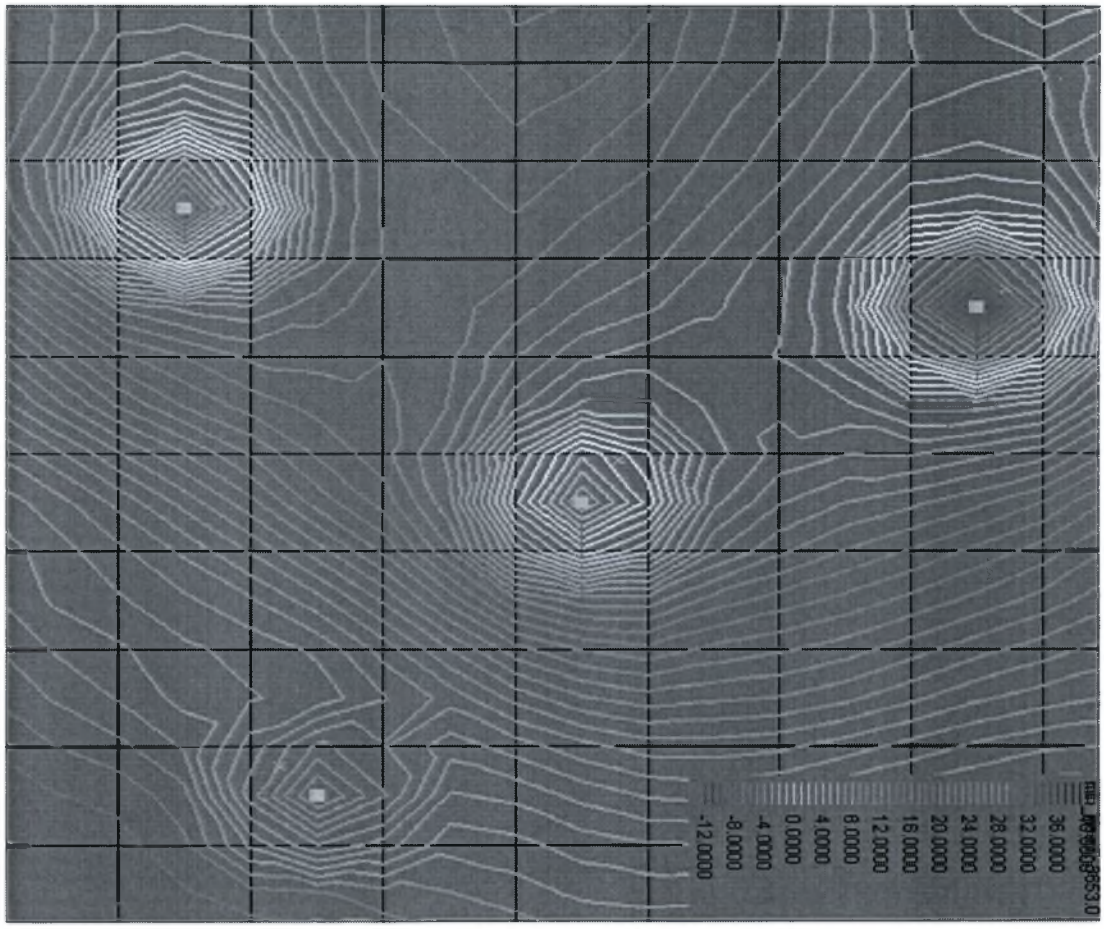


Σχήμα 5.14 Ελάχιστα ύψη των 100 μη εξαρτημένω προσομοιώσεων.

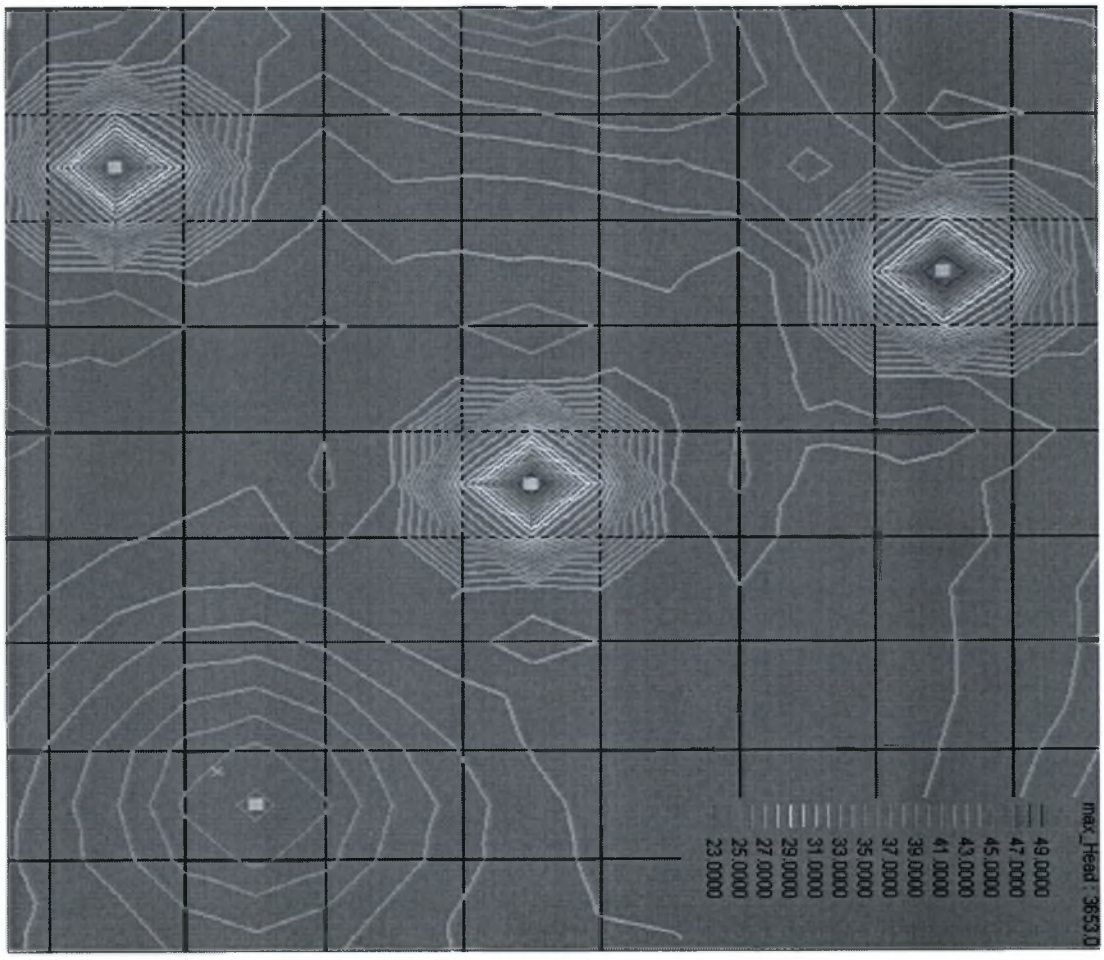


Σχήμα 5.15 Μέγιστα ύψη των 100 μη εξαρτημένων προσομοιώσεων

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

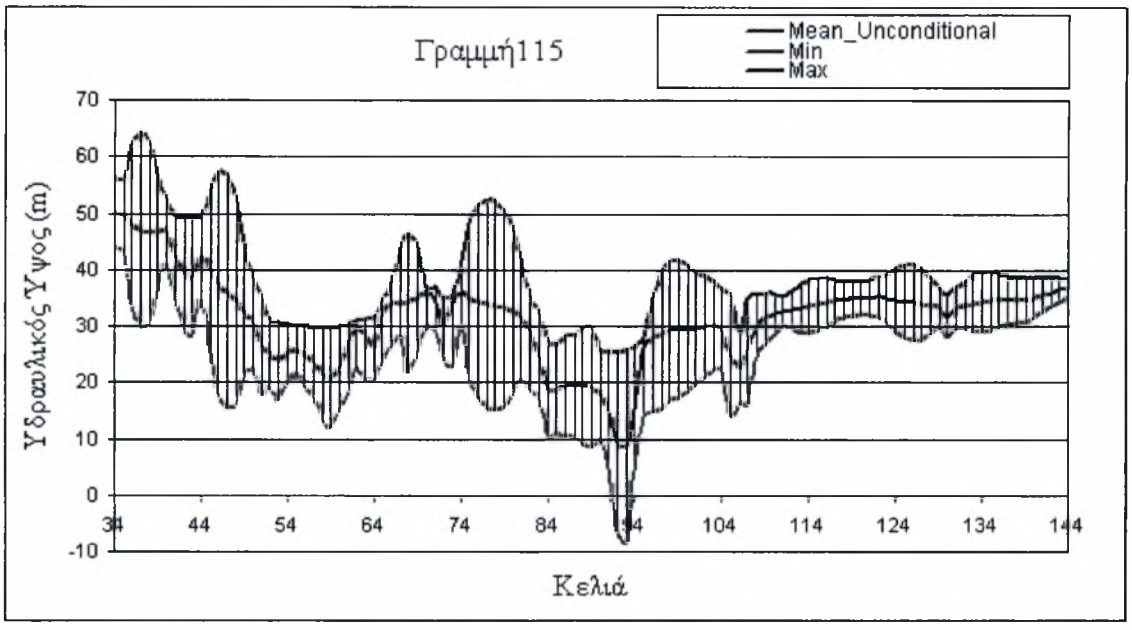


Σχήμα 5.16 Ελάχιστα ύψη των 100 εξαρτημένων προσομοιώσεων.

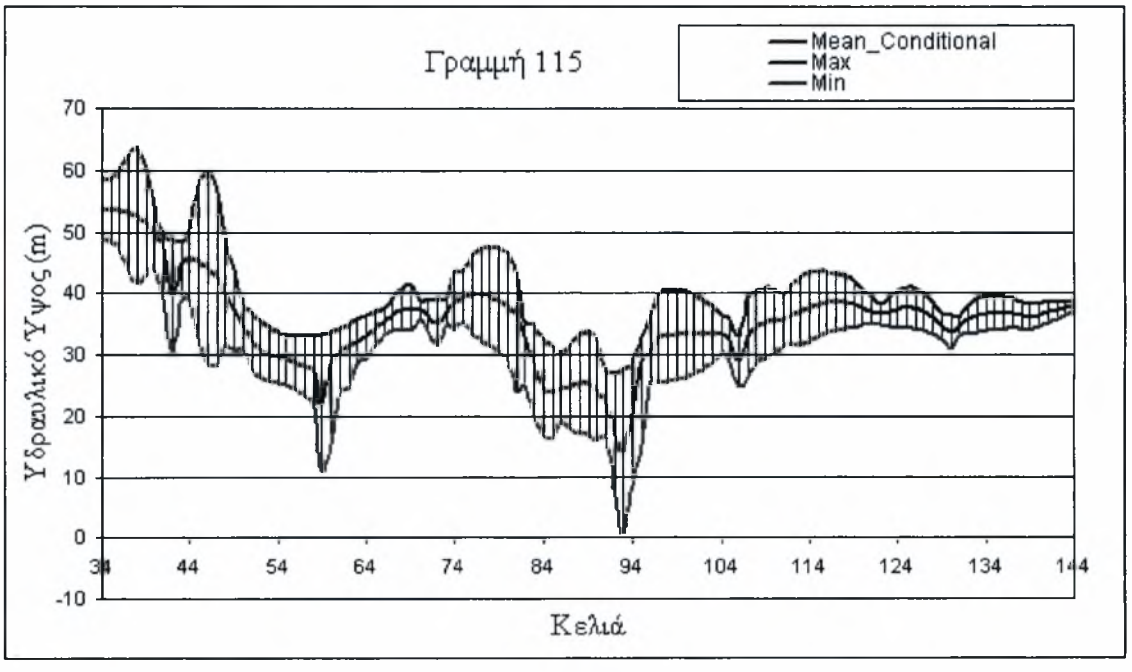


Σχήμα 5.17 Μέγιστα Υψη των 100 εξαρτημένων προσομοιώσεων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

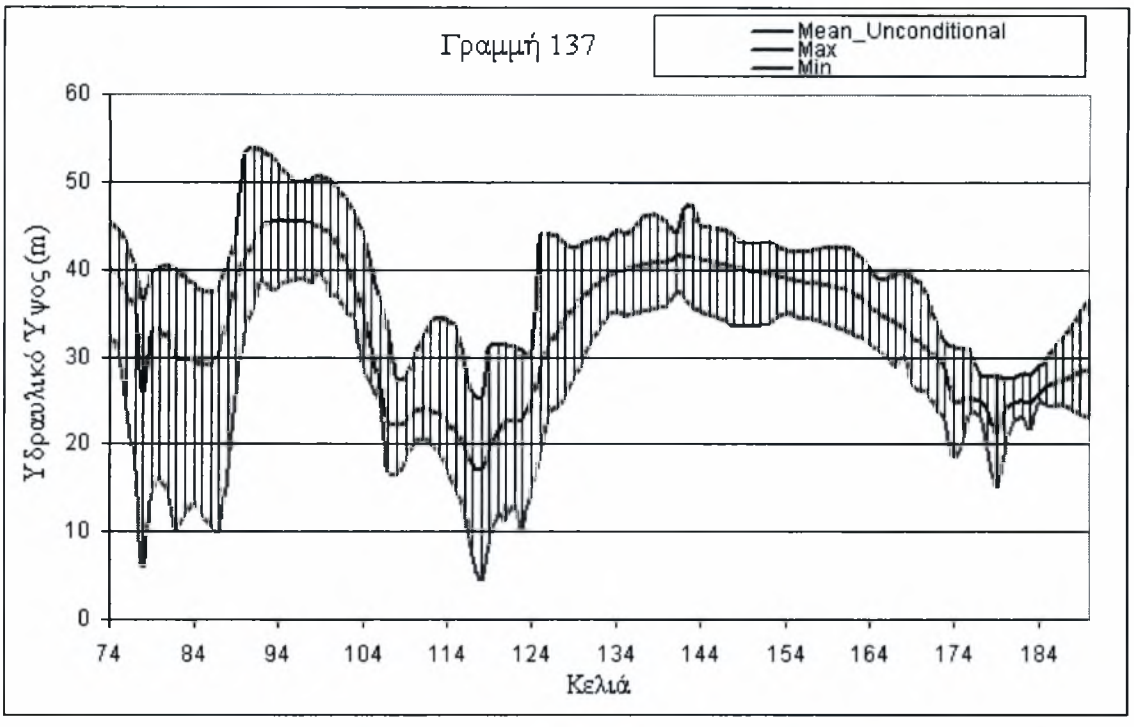


Σχήμα 5.18 Μέγιστα, ελάχιστα και μέσα ύψη των 100 μη εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη γραμμή 115.

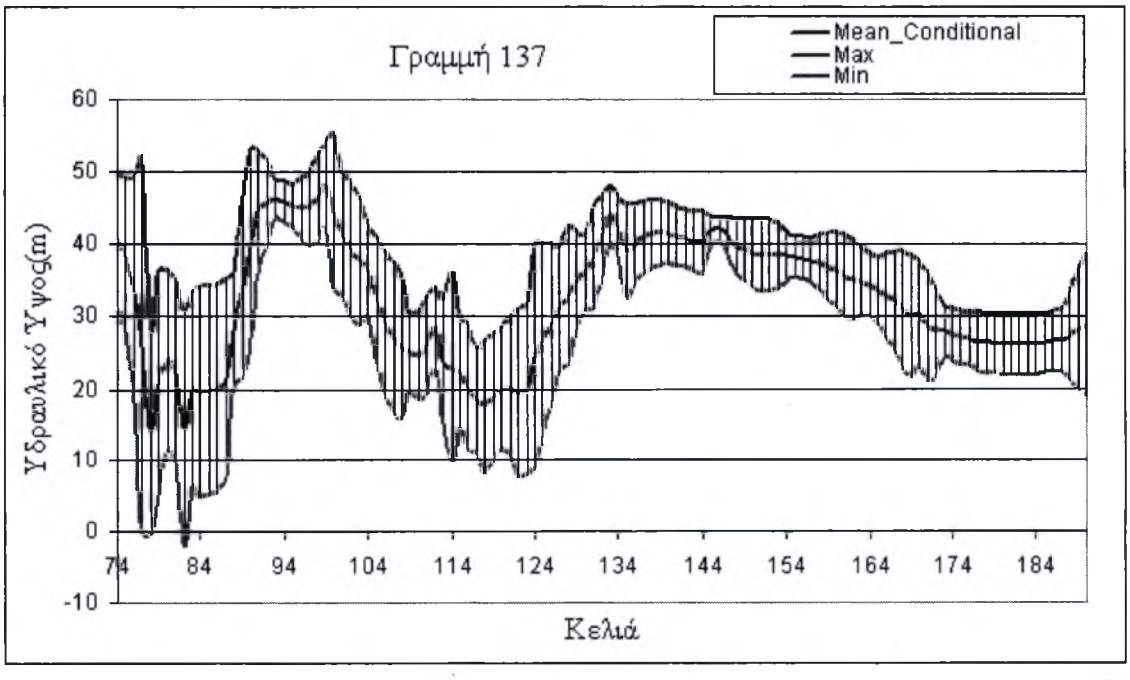


Σχήμα 5.19 Μέγιστα, ελάχιστα και μέσα ύψη των 100 εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη γραμμή 115.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

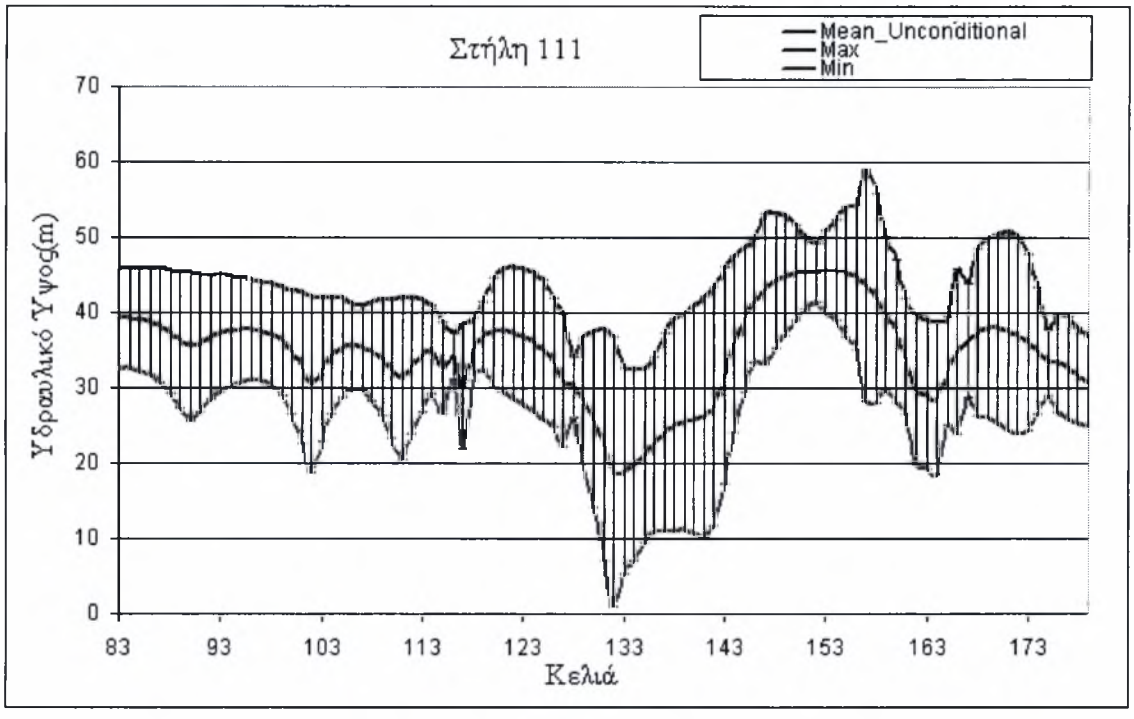


Σχήμα 5.20 Μέγιστα, ελάχιστα και μέσα ύψη των 100 μη εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη γραμμή 137.

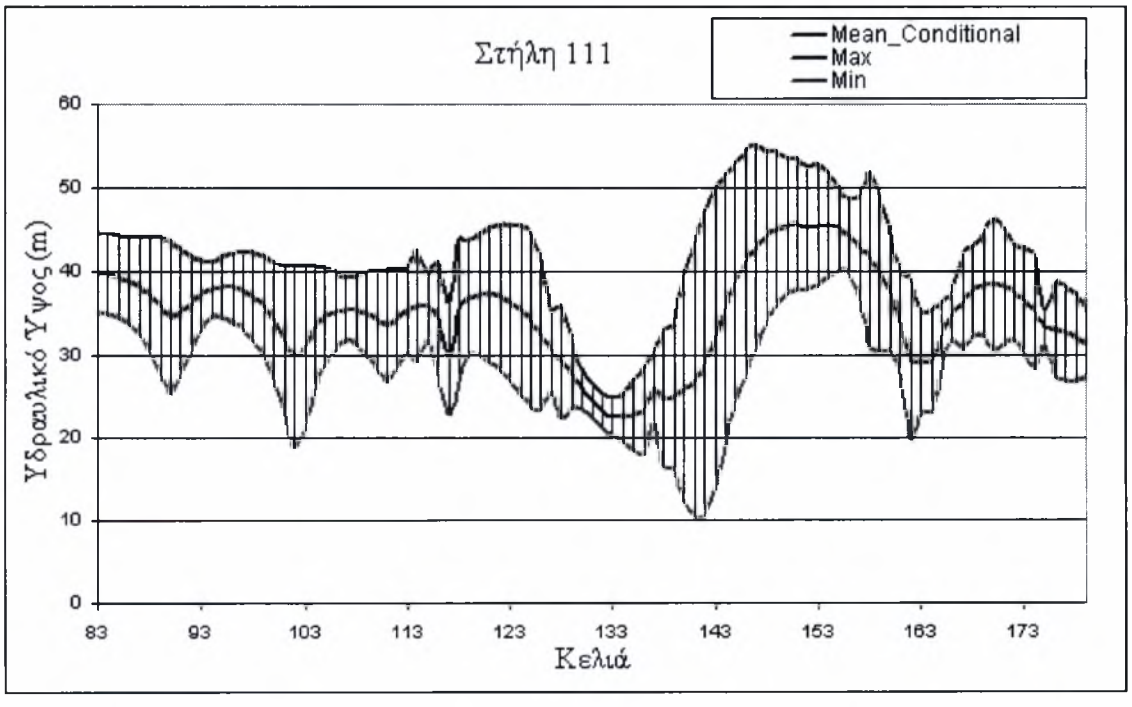


Σχήμα 5.21 Μέγιστα, ελάχιστα και μέσα ύψη των 100 εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη γραμμή 137.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



Σχήμα 5.22 Μέγιστα, ελάχιστα και μέσα ύψη των 100 μη εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη στήλη 111.



Σχήμα 5.23 Μέγιστα, ελάχιστα και μέσα ύψη των 100 εξαρτημένων προσομοιώσεων για τη στήλη 111.

Από την προσεκτική παρατήρηση των παραπάνω σχημάτων προκύπτει τελικά το πώς επηρεάζει η χωρική μεταβλητότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας την προσπάθειά μας στη σωστή εκτίμηση των υδραυλικών υψών του υπόγειου υδροφορέα, έχοντας σα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

μέτρο την αβεβαιότητα που προκύπτει, καθώς επίσης και ποια από τις δύο μεθόδους στοχαστικής προσομοίωσης δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Έτσι :

- Η χωρική μεταβλητότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας έχει τη μεγαλύτερή της επίδραση στις γεωτρήσεις και στην περιοχή γύρω από αυτές. Αυτές είναι οι περιοχές του πεδίου στις οποίες παρατηρούνται οι μέγιστες τυπικές αποκλίσεις, αλλά και οι μέγιστες αποκλίσεις των μέσων προσομοιωμένων τιμών από τις παρατηρούμενες .
- Η τιμή της τυπικής απόκλισης – άρα και η αβεβαιότητα – αυξάνεται όσο αυξάνεται η παροχή άντλησης από τις γεωτρήσεις.
- Στις περιοχές όμως όπου η παρουσία γεωτρήσεων είναι αραιή ή οι παροχές αυτών είναι μικρής τάξεως (τελευταία κελιά των γραμμών 115 και 137 και στήλη 111) η αβεβαιότητα σχεδόν μειώνεται σημαντικά, αφού οι τιμές της τυπικής απόκλισης είναι αρκετά μικρές,
- Με αποτέλεσμα και οι δύο μέθοδοι της στοχαστικής προσομοίωσης να προσεγγίζουν αρκετά καλά τις παρατηρούμενες τιμές, αλλά
- Στις περιοχές όπου υπάρχει παρουσία γεωτρήσεων τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων προσομοίωσης παρεκκλίνουν από τις παρατηρούμενες τιμές και μάλιστα
- Όσο πιο μεγάλη η παροχή των γεωτρήσεων ή η πυκνότητα αυτών τόσο πιο μεγάλη είναι η τυπική απόκλιση αυτή, με τη διαφορά ότι η εξαρτημένη προσομοίωση δίνει καλύτερες τιμές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα πεδία της υδραυλικής αγωγιμότητας που προκύπτουν από την εξαρτημένη προσομοίωση, κρατούν την πληροφορία των τιμών των δεδομένων στις θέσεις όπου αυτά υπάρχουν.
- Άρα γίνεται αντιληπτό ότι η εξαρτημένη προσομοίωση πλεονεκτεί της μη εξαρτημένης για την στοχαστική προσομοίωση ενός υπόγειου υδροφορέα που βρίσκεται σε καθεστώς υπερεκμετάλλευσης.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν τρεις μέσα εκτίμησης της αβεβαιότητας, στα οποία το ένα επαληθεύει το άλλο. Τα μέσα αυτά είναι :

1. Διαστήματα εμπιστοσύνης $\pm 2\sigma$ των μέσων τιμών των προσομοιωμένων υδραυλικών υψών (Σχήματα 5.8 έως 5.13) για τις τομές που επιλέχθηκαν και σύγκριση με τις παρατηρούμενες.
2. Οι αποκλίσεις των μέσων τιμών προσομοιωμένων υδραυλικών υψών από τις αντίστοιχες μέγιστες και ελάχιστες (Σχήματα 5.18 έως 5.23) για τις τομές που επιλέχθηκαν.
3. Οι χάρτες με τις τυπικές αποκλίσεις των προσομοιωμένων υδραυλικών τιμών μεταξύ τους που έδωσαν έδωσαν οι δύο μέθοδοι (Σχήματα 5.6 και 5.7).

Κι όλα αυτά γιατί η εκτίμηση της αβεβαιότητα επηρεάζει κατά πολύ τόσο το στήσιμο του μοντέλου σε πρώτη φάση, όσο και τη διαχείριση που γίνεται έπειτα στον υδροφορέα. Πρώτα από όλα, οι αποφάσεις για τη διαχείριση γενικά των υδατικών πόρων, πρέπει να λαμβάνονται με πλήρη γνώση των αβεβαιοτήτων που συναντώνται.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Κατά δεύτερον η αβεβαιότητα παίζει σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία στων προβλέψεων του μοντέλου που θα προκύψουν από τα επιλεγμένα σενάρια. Η υπερεκτίμηση του μοντέλου από τον μελετητή, σε συνδυασμό με την αγνόηση της αβεβαιότητας που αυτό περιέχει μόνο σε αξιόπιστα και χρήσιμα για την επιστήμη αποτελέσματα δε θα οδηγήσει. Βέβαια ο σκοπός της εργασίας αυτής σταματά στο πρώτο μέρος και δεν προχωρά στη διαχείριση. Αλλά αυτό μπορεί να αποτελέσει και κίνητρο για επιπλέον έρευνα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γκούμας Κ. 2005. *Οι αρδεύσεις στη Θεσσαλική πεδιάδα : Επιπτώσεις στα υπόγεια και επιφανειακά νερά.* Υδατικοί Πόροι και Γεωργία (39-53).

ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. 2001. *Συμπληρωματικές πριβαλλοντικές δράσεις του κανονισμού 2078/92 Ε.Ο.Κ. – Μελέτη φυσικών πόρων και παραγόντων που επιδρούν στην απόδοση και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καλλιεργειών της Θεσσαλίας.* Λάρισα

Κωνσταντινίδης Δ., Περγαλιώτης Π. 1984. *Ανάπτυξη υπόγειων υδάτων Θεσσαλίας. Μαθηματικά Μοντέλα. Αναρίθμηση των μοντέλων υπόγειων υδροφορέων.* Υπουργείο Γεωργίας. Αθήνα.

Μουστάκα Ε. 2002. *Διαχείριση Υδατικών Πόρων της υπό ανασύστασης Λίμνης Κάρλας με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.* Διπλωματική εργασία, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.

Μπεζές Κ. 2004. *Μελέτη έργων ενίσχυσης της ύδρευσης της μείζονος περιοχής Βόλου – Υδρογεωλογική Μελέτη.* ΥΠΕΧΩΔΕ.

ΥΠΕΧΩΔΕ, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Εγγειοβελτιβτικών Έργων 1999, *Επαναδημιουργία Λίμνης Κάρλας: Περιβαλλοντική Τεχνική Έκθεση, Μελέτη Κόστους - Οφέλους και Υποστηρικτικές Μελέτες, Παράρτημα ΙΙΙ.2, Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη.* Αθήνα

Arlen W. Harbaugh and Michael G. McDonald, 2000. *User's Documentation for MODFLOW-200, an update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model,* United States Government Printing Office, Washington.

Costandinidis D. 1978. *Hydrodynamique d'un systeme aquifere heterogene, Hydrogeologie de la Thessalie Orientale.* Doctora D'Etat, Grenoble.

Delhomme J. 1976 *Applications de la theorie des variables regionalisees dans les sciences de l'eau.* These de Docteur – Ingenieur, University Pierre et Marie Curie, Paris.

Delhomme J. 1979 *Spatial Variability and Uncertainty in Grounwater Flow Parameters: A Geostatistical Approach.* WRR 15(2), 269-280.

Deutsch C., Journel A., 1998. *Geostatistical Software Library and User's Guide 2nd Edition.* Oxford University Press.

Hantush, Mahdi S., 1964. *Advances in Hydroscience*, chapter *Hydraulics of Wells*, pp 281-442. Academic Press.

Journel A.G, 1974. *Simulations conditionnelles -Theorie et Pratique.* Doctorate Thesis,University of Nancy, Nancy.

Journel A.G, 1989. *Fundamentals of Geostatistics in five Lessons.* Stanford Center for Reservoir Forecasting. Department of applied Earth Sciences. Stanford University, Stanford.

SOGREAH - GRENOBLE 1974. *Μελέτη αναπτύξεως υπογείων υδάτων πεδιάδος Θεσσαλίας. Τελική έκθεση, R 11971*, Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνση Γεωργ. Αναπτ. & ΥΕΒ.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Ημερομηνία	Υδραυλικό Ύψος (m)		
	A	B	Γ
1/1/1987	52.82	49.98	71.35
1/2/1987	53.25	50.15	72.4
1/3/1987	53.85	51.08	73.1
1/4/1987	53.1	51.91	72.44
1/5/1987	52.7	52.18	73.22
1/6/1987	52.35	52.15	72.95
1/7/1987	52.47	51.08	72.08
1/8/1987	52.4	50.51	69.15
1/9/1987	52.35	50.76	69.15
1/10/1987	52.62	51.58	70.52
1/11/1987	52.62	52.1	69.75
1/12/1987	52.75	52.46	70
1/1/1988	53.04	52.66	70.4
1/2/1988	52.95	52.67	70.4
1/3/1988	53.01	52.76	70.8
1/4/1988	52.89	52.81	69.14
1/5/1988	52.77	52.42	68.53
1/6/1988	52.78	52.03	68.26
1/7/1988	52.63	51.06	61.34
1/8/1988	52.4	49.9	61.4
1/9/1988	52.3	47.87	61.4
1/10/1988	52.42	50.22	63.4
1/11/1988	52.68	50.28	64.44
1/12/1988	54.3	52.46	64.4
1/1/1989	53.1	50.82	64.09
1/2/1989	52.97	50.56	65.87
1/3/1989	52.31	50.41	59.73
1/4/1989	52.42	50.35	58.28
1/5/1989	52.45	50.34	56.85
1/6/1989	52.26	47.92	58.73
1/7/1989	52.35	48.38	36.4
1/8/1989	52.11	48.2	49.05
1/9/1989	52.14	50.22	51.32
1/10/1989	52.02	50.28	53.98

Ημερομηνία	Υδραυλικό Ύψος (m)		
	A	B	Γ
1/11/1989	51.91	52.46	55
1/12/1989	52.17	48.36	55.4
1/1/1990	52.33	48.28	56.26
1/2/1990	52.72	48.36	57.15
1/3/1990	52.75	50.41	57.86
1/4/1990	52.82	50.35	59.1
1/5/1990	52.84	50.34	57.53
1/6/1990	52.68	47.92	57.44
1/7/1990	52.84	48.38	37.4
1/8/1990	52.78	48.2	45.4
1/9/1990	52.86	50.22	47.18
1/10/1990	52.6	50.28	48.32
1/11/1990	52.77	52.46	52.75
1/12/1990	52.98	48.36	56.9
1/1/1991	52.78	48.28	54.4
1/2/1991	52.83	48.36	54.4
1/3/1991	52.53	50.41	54.72
1/4/1991	52.98	50.35	54.44
1/5/1991	52.94	50.34	53.29
1/6/1991	52.97	39.06	54.08
1/7/1991	53.02	30.45	53.66
1/8/1991	52.67	25.21	52.4
1/9/1991	52.44	31.95	51.36
1/10/1991	52.22	29.34	45.23
1/11/1991	52.26	32.06	47.53
1/12/1991	52.3	32.11	48.68
1/1/1992	52.54	32.03	49.61
1/2/1992	52.67	31.88	50.18
1/3/1992	53.12	31.66	50.36
1/4/1992	53.14	31.48	50.15
1/5/1992	52.92	36.95	46.94
1/6/1992	52.67	43.08	47.27
1/7/1992	52.54	27.38	29.81
1/8/1992	52.23	22.08	32.4

Ημερομηνία	Υδραυλικό Ύψος (m)		
	A	B	Γ
1/9/1992	52.11	28.58	37.4
1/10/1992	52.13	38.9	39.4
1/11/1992	52.05	41.01	40.33
1/12/1992	52.38	42.05	42.15
1/1/1993	52.49	42.22	43.66
1/2/1993	53.1	42.68	44.27
1/3/1993	53.09	43.88	45.16
1/4/1993	52.93	42.71	45.53
1/5/1993	52.98	35.88	44.05
1/6/1993	52.72	32.66	27.96
1/7/1993	52.8	24.96	16.08
1/8/1993	52.78	21.36	-2.04
1/9/1993	52.55	26.28	-3.5
1/10/1993	52.35	36.53	27.52
1/11/1993	52.57	38.96	33.04
1/12/1993	52.38	40.01	36.4
1/1/1994	52.49	40.71	37.34
1/2/1994	53.1	41.57	38.11
1/3/1994	53.09	41.68	39.28
1/4/1994	52.93	42.75	39.57
1/5/1994	52.98	39.7	38.22
1/6/1994	52.72	28.53	24.4
1/7/1994	52.8	25.53	12.4
1/8/1994	52.58	20.4	-10.7
1/9/1994	52.47	32.91	-0.5
1/10/1994	52.4	35.58	2.24
1/11/1994	52.38	36.76	3.45
1/12/1994	52.58	37.65	29.68
1/1/1995	52.88	38.79	31.92
1/2/1995	53.18	39.16	33.65
1/3/1995	53.22	39.68	34.97
1/4/1995	53.13	39.93	35.92
1/5/1995	52.87	29.75	21.84
1/6/1995	52.9	23.33	3.9

Ημερομηνία	Υδραυλικό Ύψος (m)		
	A	B	Γ
1/7/1995	52.9	18.97	-6.95
1/8/1995	52.92	20.2	-10.7
1/9/1995	52.68	24.68	-0.5
1/10/1995	53.2	33.13	2.24
1/11/1995	52.6	35.37	3.45
1/12/1995	52.56	36.08	29.68
1/1/1996	53.15	37.48	31.92
1/2/1996	53.1	38.38	33.65
1/3/1996	52.9	38.64	34.97
1/4/1996	52.87	39.28	35.92
1/5/1996	52.8	39.51	21.84
1/6/1996	52.86	31.83	3.9
1/7/1996	52.58	33.88	-6.95
1/8/1996	53.1	20.9	-10.7
1/9/1996	52.77	27.13	-0.5
1/10/1996	52.61	33.32	2.24
1/11/1996	52.75	34.18	3.45
1/12/1996	52.97	35.15	29.68
1/1/1997	54.3	35.91	43.66

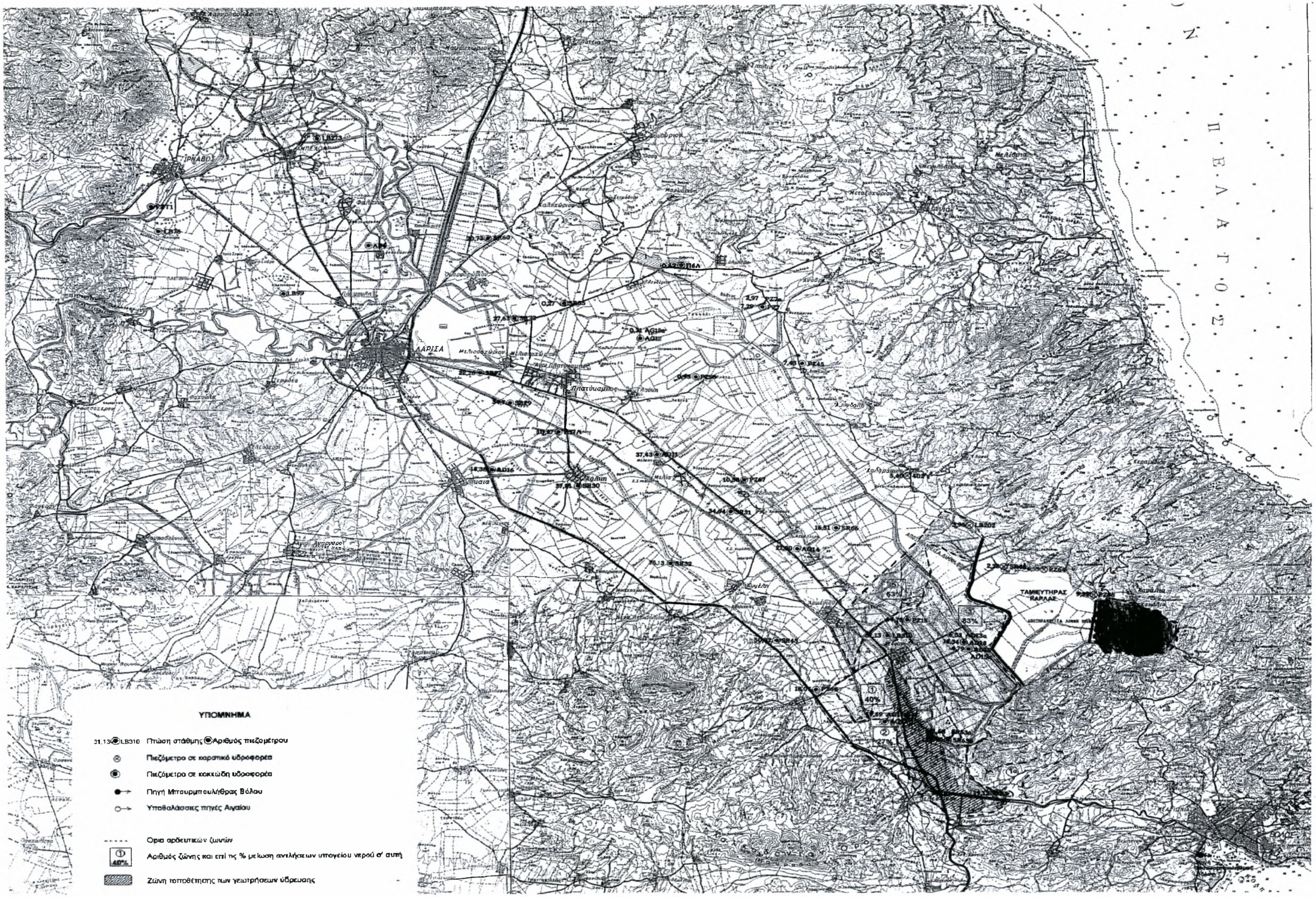
Πίνακας 1. Τιμές Υδραυλικών Φορτίων στα σημεία Α, Β και Γ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Ζώνες	Έκταση Km^2	Αριθμός Γεωτρήσεων	Αντλούμενη Ποσότητα του Υπόγειου Νερού (10^6 m^3)										
			1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
1	36.267	34	15.232	15.232	15.232	15.232	15.232	15.232	15.232	15.232	15.232	15.232	19.04
2	14.9115	17	2.448	2.448	2	1.4	2.448	2.448	2.448	3	2	3	3
3	49.2923	28	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.875	1.875	1.875	1.875
4	14.9982	15	1.875	1.875	1.875	1.875	1.875	1.5	2.8	1.5	1.5	1.5	1.5
5	30.6419	13	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.5	1.5	1.5	1.5
6	210.264	60	21.622	21.622	21.622	21.622	21.622	21.622	21.622	21.622	21.622	21.622	21.622
7	143.8396	69	37.95	37.95	37.95	37.95	37.95	37.95	37.95	43.7	43.7	43.7	43.7

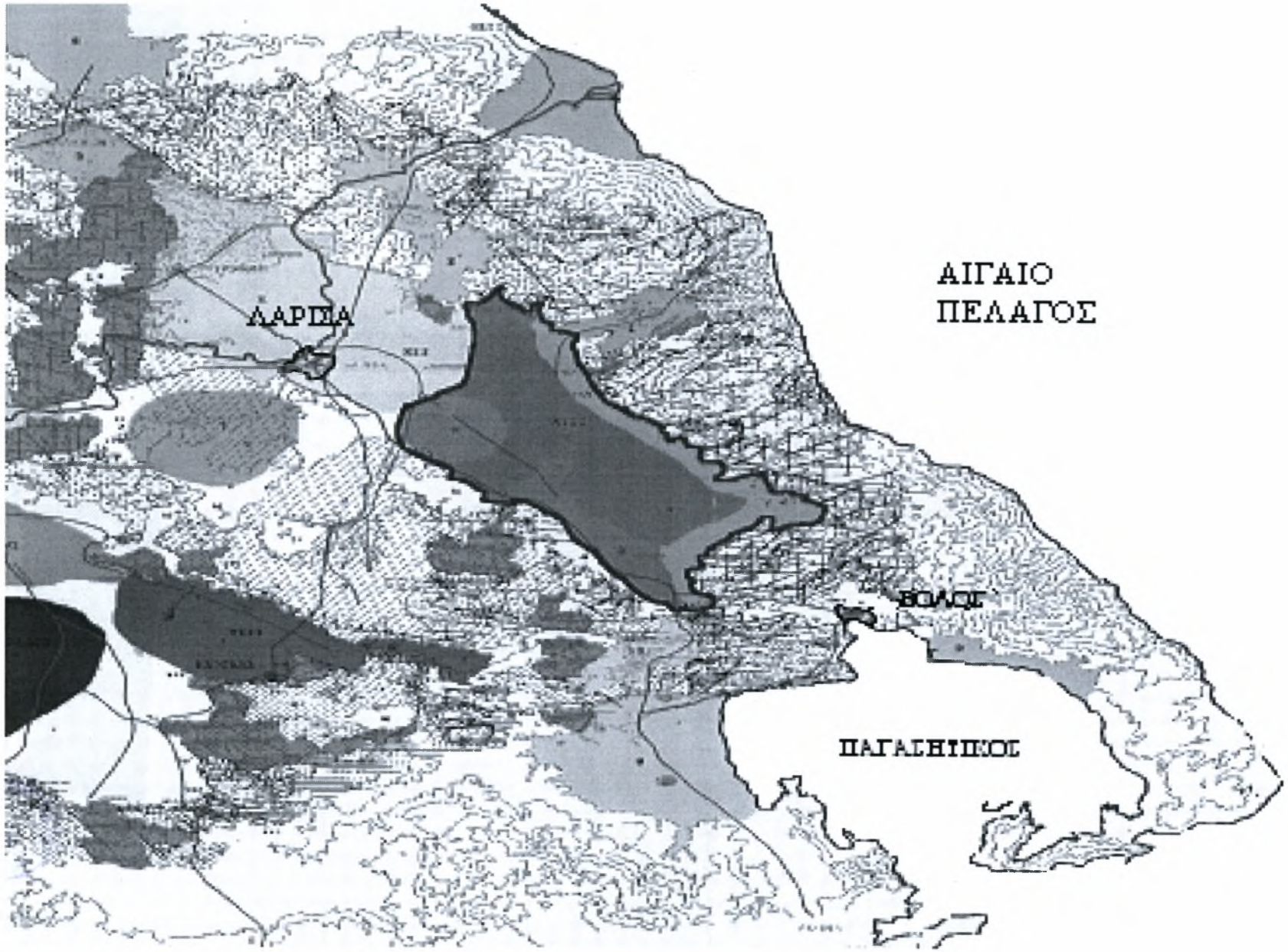
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Αντλούμενη ποσότητα υπόγειου νερού για κάθε ζώνη στην περίοδο προσομοίωσης και οι εκτάσεις / αριθμός γεωτρήσεων των ζωνών αυτών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



Σχήμα 1. Θέσεις των πιεζομέτρων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196



Σχήμα 2. Ζώνες Υδροφορίας της Ανατολικής Θεσσαλίας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
0040000085953
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
27/07/2024 06:49:09 EEST - 3.12.152.196