

# Μορφοκλασματική ανάλυση των μετρήσεων του δικτύου Βόλβης - Λαγκαδά

**Μ. Ε. Κονταδάκης, Μ. Συτζανάκη**

*Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΑΠΘ*

**Περίληψη:** Στην εργασία αυτή γίνεται μία επανεξέταση των μετρήσεων της στάθμης των αβαθών υδάτων του δικτύου Βόλβης Λαγκαδά με την χρήση της Μορφοκλασματικής (Fractal) ανάλυσης. Η Μορφοκλασματική μορφή του φάσματος ισχύος των μεταβολών της στάθμης ως προς την συχνότητα μας δίνει την δυνατότητα να αποφανθούμε για το είδος των παρατηρούμενων μεταβολών (τυχαίων ή συστηματικών) και να αποφανθούμε για την καταλληλότητα ή όχι των χρησιμοποιούμενων πηγαδιών παρατήρησης του δικτύου για την ανίχνευση μεταβολών που σχετίζονται με την τεκτονική δράση, και επιπλέον να κρίνουμε με μεγαλύτερη ασφάλεια αν μία διαφοροποίηση του φάσματος οφείλεται σε τεκτονική δράση της περιοχής ή όχι. Τα συμπεράσματά μας δείχνουν ότι τα πηγάδια Άσσηρος 1, Μελισσουργός 1 και 2 και Λητής είναι τα πλέον κατάλληλα για την ανίχνευση μεταβολών που σχετίζονται με την τεκτονική δράση, και ότι οι μεταβολές στα πηγάδια Μελισσουργός 1 και 2 το 1992 συνδέονται πολύ πιθανόν με την σεισμική δράση της περιοχής.

## 1. Εισαγωγή

Ο σεισμός του 1978 υπήρξε καταστροφικός για την πόλη της Θεσσαλονίκης και αποτέλεσε την αιτία εντατικής μελέτης του σεισμοτεκτονικού περιβάλλοντος της Μυθονίας λεκάνης (Pavlidis & Syrides 1997). Ο σεισμός αυτός προκάλεσε ουσιαστικά την έναρξη της συστηματικής σεισμολογικής και γεωτεχνικής έρευνας στην Ελλάδα, λόγω του ότι για πρώτη φορά χτυπήθηκε μια μεγάλη σύγχρονη πόλη. Ο Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης είχε αναλάβει και συνεχίζει την εκπόνηση ενός αριθμού προγραμμάτων για την παρακολούθηση και μελέτη μεταβολών ενός πλήθους Γεωδαιτικών και Γεωφυσικών παραμέτρων. Στα πλαίσια αυτά ξεκίνησε και το πρόγραμμα για την μελέτη της στάθμης του υπόγειου νερού σε περιοχές με έντονη τεκτονική δραστηριότητα στις αρχές της δεκαετίας του 1980, μιας και είναι εύκολα κατανοητό ότι κινήσεις του φλοιού της γης και η συστολή ή η διαστολή του εδάφους προκαλούν αλλαγές στο πορώδες του υπεδάφους και διαταράσσουν το σύστημα των υπόγειων υδάτων. Για αυτό τον λόγο ξαφνικές αλλαγές στη στάθμη του υπόγειου νερού μπορεί να ανακλούν τεκτονικές μεταβολές και άρα να συνδέονται με την σεισμική δραστηριότητα ενός τόπου. Πράγματι η έρευνα αυτή είχε σημαντικά αποτελέσμα-

τα τα οποία οδήγησαν σε ένα πλήθος δημοσιεύσεων (ενδεικτικά βλέπε Asteriadis and Livieratos (1989), Asteriadis and Contadakis (1993), Asteriadis and Contadakis (2001), Contadakis and Asteriadis (2001)).

Το πρόγραμμα αυτό ήταν χαμηλού κόστους και για τούτο στην επιλογή των πηγαιδιών του δικτύου παρακολούθησης των υπογείων υδάτων έγινε με όρους κυρίως φθηνής προσπέλασης, που σημαίνει ότι δεν ελέγχθηκε επαρκώς η καταλληλότητα των πηγαιδιών για την παρακολούθηση των μεταβολών των σχετιζομένων με τεκτονικές μεταβολές. Με απλά λόγια θα ήταν επιθυμητό τα πηγάδια αυτά να μετρούσαν την στάθμη υδροφορέων που να μην επηρεαζόταν από δραματικές μεταβολές του υδρολογικού περιβάλλοντος, ισχυρά υπόγεια ρεύματα, έντονη υδρομάστευση κλπ.

Παράλληλα, την δεκαετία του 1980 αναπτύχθηκε η θεωρία των. Ο όρος fractal προέρχεται από τη λατινική λέξη fractus (σπασμένος, θρυμματισμένος) και εισήχθη από τον B. Mandelbrot στην πρώτη έκδοση του βιβλίου του Fractal geometry of nature (1982). Στα ελληνικά ο νεολογισμός Fractals αποδόθηκε από τον όρο Μορφοκλασματικά μεγέθη (Μορφοκλασματικές κατανομές) από τον Νικόλη.

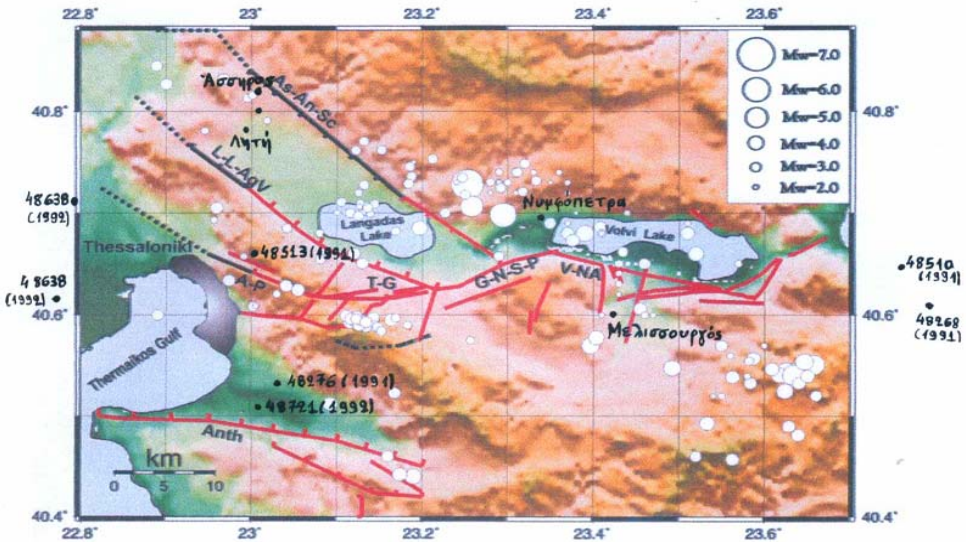
Τα fractals βρίσκονται ακριβώς στο σύνορο ανάμεσα σε έναν απλό κόσμο και την πολυπλοκότητα της φύσης. Θα έλεγε κανείς ότι άνοιξε διάπλατα μια πύλη και αποκαλύφθηκε ένας κόσμος που έμενε ανεξερεύνητος, επειδή δεν υπήρχαν τα κατάλληλα μέσα για να παρατηρηθεί και να μελετηθεί. Αυτή ακριβώς τη δυνατότητα ήρθαν να προσφέρουν τα μαθηματικά των fractals, σε συνδυασμό με τις εκπληκτικές εξελίξεις της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Παράλληλα με τις μορφοκλασματικές κατανομές (fractals) αναπτύχθηκε και η θεωρία του χάους, που περιγράφει την απρόβλεπτη εξέλιξη δυναμικών συστημάτων στο χρόνο. Σήμερα πολλοί μιλούν για τα fractals και το χάος ως τους δυο πιο βασικούς πυλώνες της νέας επιστήμης της πολυπλοκότητας. Η χρησιμότητα των fractals στις γεωεπιστήμες ήταν τεράστια λόγω του ότι δίνει την δυνατότητα της ανάλυσης των παρατηρήσεων με όρους γεωμετρίας της Φύσης.

Στην εργασία αυτή αναλύουμε τα αποτελέσματα δύο ετών παρατηρήσεων της στάθμης των αβαθών υπογείων υδάτων της περιοχής των λιμνών Βόλβης Λαγκαδά με την βοήθεια των μέσων που μας παρέχει η θεωρία (μεθοδολογία) των Μορφοκλασματικών μεγεθών (fractals).

## **2. Σεισμικότητα της περιοχής**

Η Σερβομακεδονική μάζα αποτελεί μια από τις πιο σεισμικά ενεργές ζώνες του βορειοελλαδικού χώρου με μεγάλη συγκέντρωση εστίων μεγάλων σεισμών. Η λεκάνη της Μυγδονίας, η οποία όπως έχουμε ήδη αναφέρει ανήκει κυρίως στη Σερβομακεδονική μάζα, παρουσιάζει έντονο σεισμικό ενδιαφέρον και επηρεάζεται από την τεκτονική δράση της τάφρου του Βορείου Αιγαίου. Μια κύρια συγκέ-

ντρωση σεισμικών εστιών παρατηρείται στη γειτονιά του σεισμικού ρήγματος Βασιλουδίου – Γερακαρούς – Νικομηδινού – Στίβου. Η πλειοψηφία των εστιών δίνει επιφανειακούς σεισμούς με εστιακά βάρη που κυμαίνονται από 5-15km. Οι σημαντικότεροι σεισμοί του προηγούμενου αιώνα είναι της Ασσήρου (5 Ιουλίου 1902,  $M_s = 6.6$ ), της Κresna (4 Απριλίου 1904,  $M_s = 7.6$ ), του Αγίου Όρους (8 Νοεμβρίου 1905,  $M_s = 7.4$ ), της Ιερισσού ( 26 Σεπτεμβρίου 1932,  $M_s = 7.0$ ) και του Στίβου (20 Ιουνίου 1978,  $M_s = 6.5$ ). Στο σχήμα 1 φαίνονται με τις κόκκινες γραμμές τα κύρια ρήγματα στη λεκάνη της Μυγδονίας, στην οποία ανήκουν και οι περιοχές μελέτης.



**Σχήμα 1.** Ρήγματα στη λεκάνη της Μυγδονίας, το δίκτυο των πηγαδιών παρατήρησης και τα επίκεντρα των σεισμών για τα έτη 1991 και 92 (ο χάρτης είναι από Papazachos B.& Papazachos K.(1997)

Στους πίνακες 1 και 2 δίνονται οι σεισμούς που καταγράφηκαν στην περιοχή της Μυγδονίας λεκάνης κατά τα έτη 1991 και 1992 αντίστοιχα. Τα δεδομένα είναι από

**Πίνακας 1.** Σεισμοί στην περιοχή της Μυγδονίας λεκάνης κατά το έτος 1991.

Ιουλιανή ημέρα	$\varphi$ ( $^{\circ}$ )	$\lambda$ ( $^{\circ}$ )	Ένταση
48268.37886574	40.61	23.80	2.9
48276.39348380	40.54	23.29	3.0
48510.47563657	40.65	23.76	3.0
48513.87331019	40.65	22.99	3.3
48513.87511574	40.80	23.03	3.8

**Πίνακας 2.** Σεισμοί στην περιοχή της Μυγδονίας λεκάνης κατά το έτος 1992.

Ιουλιανή ημέρα	$\varphi(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	Ένταση
48638.26899306	40.61	22.77	3.3
48638.43857639	40.71	22.79	3.1
48721.24380787	40.51	23.11	3.7

το μηνιαίο δελτίο του Σεισμολογικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (SINOA). Στο σχήμα 1 έχουν σημειωθεί οι σεισμοί και η Ιουλιανή ημερομηνία της εκδήλωσης των.

### 3. Το δίκτυο της περιοχής του Λαγκαδά

Το δίκτυο για την παρατήρηση της στάθμης του υπόγειου νερού στον Λαγκαδά εγκαταστάθηκε τον Δεκέμβριο του 1983. Αποτελείται από 6 πηγάδια σε 4 χωριά (Άσσηρος, Μελισσουργός, Νυμφόπετρα, Λητή) στην περιοχή της λίμνης του Λαγκαδά και της λίμνης Βόλβης. Στην Άσσηρο έχουμε 2 πηγάδια, το ίδιο και στον Μελισσουργό, ενώ στη Νυμφόπετρα και τη Λιτή έχουμε από 1 πηγάδι. Η περιοχή αυτών των τεσσάρων χωριών εκτείνεται από  $\varphi = 40.60N$  μέχρι  $40^{\circ}.90N$  και από  $\lambda = 23^{\circ}.00 E$  μέχρι  $23^{\circ}.50 E$ .

**Πίνακας 3.** Θέση - βάθος των πηγαδιών του δικτύου του Λαγκαδά και χρονική περίοδος των μετρήσεων της στάθμης του υπόγειου νερού.

Πηγάδι	$\varphi(^{\circ})N$	$\lambda(^{\circ})E$	Βάθος(m)	Χρονική περίοδος μετρήσεων
Άσσηρος 1	40.82	23.03	4.2	1991, 1992
Άσσηρος 2	40.82	23.03	2.2	1991, 1992
Μελισσουργός 1	40.60	23.42	4.1	1991, 1992
Μελισσουργός 2	40.60	23.42	5.1	1991, 1992
Νυμφόπετρα	40.69	23.34	10.0	1991
Λητή	40.75	22.98	11.0	1986

Το βάθος των πηγαδιών κυμαίνεται μεταξύ 2.2 m και 11.0 m (ρηχά πηγάδια), επομένως οι αντίστοιχοι υδροφορείς ανήκουν στη ζώνη αερισμού. Τα πηγάδια που επιλέχθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων δεν χρησιμοποιούνταν πλέον, αφού η παροχή νερού για τους κατοίκους της περιοχής διεξαγόταν προ πολλού από δη-

μόσιο δίκτυο. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη μη άντληση νερού για γεωργικούς σκοπούς στην γειτονική περιοχή των πηγαδιών.

Η Άσσηρος, ο Μελισσουργός και η Λητή ανήκουν στο Προμυγδονιακό σύστημα, ενώ η Νυμφόπετρα στο Μυγδονιακό σύστημα, επομένως τα γεωλογικά χαρακτηριστικά τους θα ταυτίζονται με αυτά των αντίστοιχων συστημάτων (βλέπε Μουντράκης 1985). Έτσι, η Άσσηρος, ο Μελισσουργός και η Λητή αποτελούνται από ψαμμίτες, αργιλοψαμμιτικά ιζήματα εναλλαγών αργίλου, άμμου και ιλύος και από ερυθροστρώματα τα οποία συνίστανται από αργιλικά υλικά, κροκάλες και άμμους. Αυτό σημαίνει, πως η υδραυλική αγωγιμότητα  $K$  του εδάφους μπορεί να είναι  $10^{-9}$  -  $10^{-8}$  για τις περιοχές που αποτελούνται από αμμώδη άργιλο, θα αυξάνεται σε  $10^{-8}$  -  $10^{-7}$  για τις περιοχές που αποτελούνται από ιλύ και μπορεί να φτάσει μέχρι  $10^{-3}$  -  $10^{-2}$  όταν έχουμε άμμο αναμεμιγμένη με χαλίκι. Οι μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου νερού στο δίκτυο της περιοχής του Λαγκαδά ήταν ημερήσιες και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 4 electric contact gauges-KLT type, με ακρίβεια 1mm στη μέτρηση της στάθμης και 2 Hellmann type rain gauges που επεξεργάζονται και απαλείφουν την επίδραση της βροχόπτωσης στις μεταβολές της στάθμης του υπόγειου νερού. (Astneriadis & Contadakis 2001). Στο σχήμα 1 φαίνεται το δίκτυο της περιοχής του Λαγκαδά. Στον πίνακα 2 δίνουμε τη θέση των πηγαδιών του δικτύου του Λαγκαδά, το βάθος τους και την χρονική περίοδο των μετρήσεων της στάθμης του υπόγειου νερού στις οποίες θα αναφερθούμε. Σε όλες τις περιπτώσεις οι μετρήσεις είναι ημερήσιες.

#### 4. Ανάλυση των δεδομένων

Όπως είπαμε, σκοπός του προγράμματος ήταν η διαπίστωση της υπάρξεως μεταβολών στην στάθμη των επιφανειακών υδάτων της περιοχής της Μυγδονίας Λεκάνης οι οποίες είναι δυνατόν να συσχετισθούν με την σεισμική δραστηριότητα της περιοχής. Τα δεδομένα μας λοιπόν αποτελούνται από τις διακριτές χρονικές σειρές των σταθμών ελεύθερης επιφανείας των πηγαδιών που ελήφθησαν με δειγματοληπτικό βήμα μίας ημέρας από τα πηγάδια του δικτύου που προαναφέρθει για ορισμένο χρονικό διάστημα. Αναλύομε λοιπόν τα δεδομένα μας με την βοήθεια του Διακριτών Μετασχηματισμών «Fourier»

Με τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier υπολογίζουμε την φασματική πυκνότητα ισχύος των χρονοσειρών των μετρήσεων. Η φασματική πυκνότητα ισχύος,  $P$ , ακολουθεί μια εκθετική σχέση ως προς τη συχνότητα, της μορφής  $P \approx f^{-b}$ . Η σχέση όμως αυτή είναι χαρακτηριστική για κατανομές που εμφανίζουν ανεξαρτησία κατά κλίμακα (scale invariance), δηλαδή Μορφοκλασματική (fractal) συμπεριφορά. Ο εκθέτης  $b$  ευρίσκεται εύκολα από την κλίση του λογαριθμικού διαγράμματος της φασματικής πυκνότητας ισχύος με τη συχνότητα. Οι τιμές του εκθέτη  $b$  είναι εν-

δεικτικές του τρόπου μεταβολής της υπό μέτρηση στάθμης, η οποία είναι συνεχής, και των χαρακτηριστικών της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιούμε.

Πιο συγκεκριμένα έχουμε τις παρακάτω περιπτώσεις (βλέπε επίσης Κονταδάκης 2009):

**α)** Αν η πειραματική διάταξη έχει **ασθενή μνήμη** στο διάστημα δειγματοληψίας της, οι διάφοροι τυχαίοι παράγοντες που προκαλούν την απόκλιση της μέτρησης θα προκαλούν συνολικό αποτέλεσμα που θα είναι ανεξάρτητο στις διαδοχικές μετρήσεις.

Έτσι, η χρονοσειρά των μετρήσεων σε αυτή την περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί λευκός θόρυβος (white noise). Όπως είναι γνωστό, ο λευκός θόρυβος είναι εργοδική μη επίμονη σειρά και συνεπώς το φάσμα του δεν έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, έτσι το λογαριθμικό διάγραμμα του φάσματος ισχύος του θα έχει κλίση μηδέν ( $b = 0$ ).

Αντιστρόφως, αν το λογαριθμικό διάγραμμα του φάσματος ισχύος μίας χρονικής σειράς, που παρατηρείται με μία δεδομένη πειραματική διάταξη έχει κλίση μηδέν ( $b=0$ ), τότε η πειραματική διάταξη έχει ασθενή μνήμη και η χρονική σειρά έχει τα στατιστικά χαρακτηριστικά του λευκού θορύβου. Τυχόν εξάρσεις στο φάσμα υποδεικνύουν την ύπαρξη ιδίων μεταβολών του υπό μέτρηση μεγέθους, οι οποίες τελικά βρίσκονται με το φιλτράρισμα της σειράς για την συχνότητα που υποδεικνύει το φάσμα.

**β)** Αν η πειραματική διάταξη έχει **ισχυρή μνήμη** σε σχέση με το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας, τότε οι διάφοροι τυχαίοι παράγοντες που προκαλούν την τυχαία απόκλιση του μετρούμενου μεγέθους επενεργούν προσθετικά στις γειτονικές τιμές της σειράς μετρήσεως και η τελική σειρά του δείγματος θα παρουσιάζει επιμονή. Με απλά λόγια, οι διαδοχικές τιμές του δείγματος θα συσχετίζονται μερικώς, η χρονοσειρά των μετρήσεων προσομοιάζει με τον θόρυβο Μπράουν (Brownian noise) και η κλίση της θα είναι  $b = -2$  (Turcotte 1997).

Αντιστρόφως, αν το λογαριθμικό διάγραμμα του φάσματος ισχύος μίας χρονικής σειράς, που παρατηρείται με μία δεδομένη πειραματική διάταξη έχει κλίση  $-2$  ( $b = -2$ ), τότε η πειραματική διάταξη έχει ασθενή μνήμη και η χρονική σειρά έχει τα στατιστικά χαρακτηριστικά του θορύβου Μπράουν. Πάλι τυχόν παρεκκλίσεις από αυτό το σχήμα ή απότομες εξάρσεις υποδηλώνουν την ύπαρξη μη τυχαίων μεταβολών. Οι συχνότητες αυτές απομονώνονται με κατάλληλο φιλτράρισμα.

**γ)** Τέλος, αν η υπό μέτρηση συνεχής χρονοσειρά παρουσιάζει συστηματικές μεταβολές τότε η παρατηρούμενη διακριτή χρονοσειρά παρουσιάζει Μορφοκλασματικό θόρυβο Μπράουν (fractal Brownian noise) και το λογαριθμικό φάσμα ισχύος θα έχει κλίση  $b \neq -2$  (Turcotte 1997).

Συμπερασματικά λοιπόν, με τη χρήση της μορφολογίας του λογαριθμικού φάσμα-

τος ισχύος μιας χρονοσειράς μπορούμε να αποφανθούμε για τη φύση των μεταβολών ενός μετρούμενου μεγέθους.

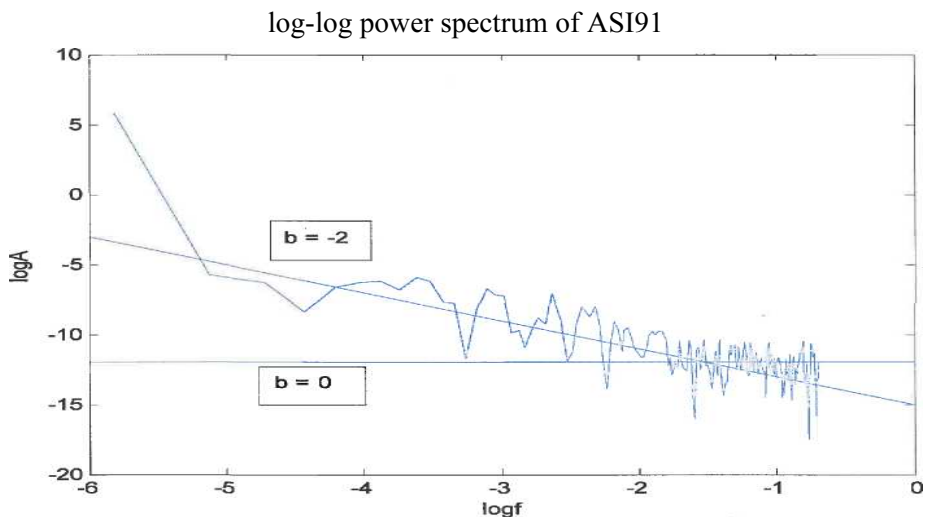
Στην προκειμένη περίπτωση όπου οι μετρήσεις μας είναι μία χρονοσειρά της στάθμης ενός πηγαδιού που ανακλά τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της ζώνης αερισμού της άμεσης περιοχής του πηγαδιού μπορούμε να ξεχωρίσουμε την περιοχή του τυχαίου θορύβου που οφείλεται στα χαρακτηριστικά της διάταξης παρατηρήσεων από τον περιβαλλοντικό τυχαίο θόρυβο ο οποίος επηρεάζει τις μετρήσεις μας και την τυχόν επιπρόσθετη άλλου θορύβου που θα οφείλεται πιθανόν σε μεταβολή του πορώδους του περιβάλλοντος λόγω τεκτονικής δράσης ή πιθανόν σε τυχούσες ισχυρές υπόγειες ροές του άμεσου περιβάλλοντος.

Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι το βήμα δειγματοληψίας είναι μία ημέρα, η διάταξη παρατηρήσεων αναμένεται να έχει σχεδόν μηδενική μνήμη όσον αφορά τις ίδιες τυχαίες μεταβολές με περίοδο μερικών ημερών και συνεπώς η κλίση του λογαριθμικού φάσματος ισχύος θα είναι  $b = 0$ , δηλαδή υποδηλώνει λευκό θόρυβο (white noise). Οι τυχαίες μεταβολές του άμεσου περιβάλλοντος με περίοδο πάνω από το όριο αυτό θα συμβάλλουν στη διαμόρφωση των διαδοχικών μετρήσεων κατά τυχαίο τρόπο και άρα αναμένεται η κλίση του λογαριθμικού φάσματος ισχύος να είναι  $b = -2$ , δηλαδή θα υποδηλώνει «Brownian noise». Τέλος, η συμβολή συστηματικών περιβαλλοντικών μεταβολών που οφείλονται σε τυχόν τεκτονική δράση, έντονη συστηματική υδρομάστευση ή έντονες μεταβολές της υπόγειας ροής θα διαμορφώνει μεταβολές στις μετρήσεις που θα έχουν χαρακτηριστικά Μορφοκλασματικό θόρυβο Μπράουν «fractal Brownian noise» και το λογαριθμικό φάσμα ισχύος θα έχει κλίση  $b \neq -2$ .

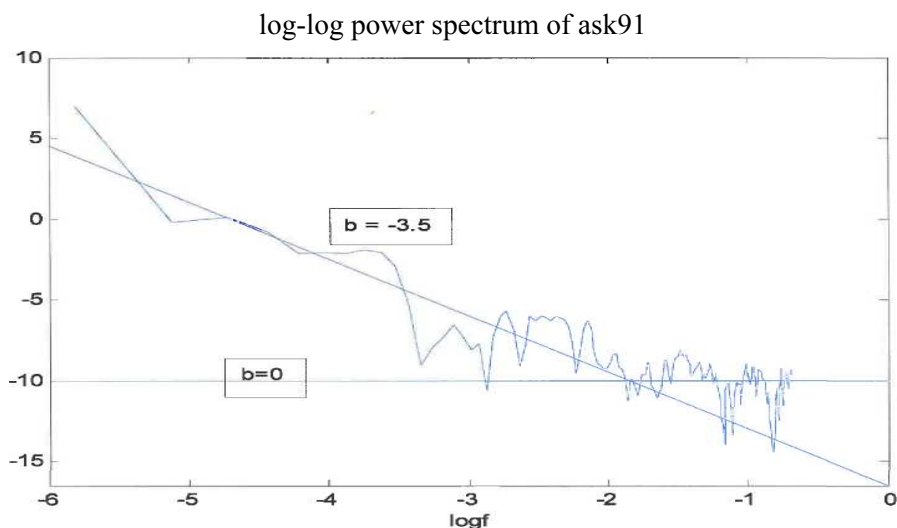
#### 4. Αποτελέσματα

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν αναμένουμε το λογαριθμικό διάγραμμα του φάσματος μιάς σειράς ημερησίων μετρήσεων της στάθμης ενός πηγαδιού να έχει χαρακτηριστικά λευκού θορύβου για τις υψηλές συχνότητες, όπου η διάταξη παρατηρήσεων έχει ασθενή μνήμη, και χαρακτηριστικά θορύβου Μπράουν (Brownian noise) ή χαρακτηριστικά Μορφοκλασματικού θορύβου Μπράουν (fractal Brownian noise), για τις χαμηλότερες συχνότητες, όπου η διάταξη παρατηρήσεων έχει ισχυρή μνήμη. Από την μορφολογία αυτού του τμήματος του φάσματος μπορούμε να συνάγουμε ορισμένα συμπεράσματα για το υδρολογικό περιβάλλον και την αιτιολογία των παρατηρουμένων μεταβολών της στάθμης.

Πράγματι, στα σχήματα 2,3,4 και 5 παρουσιάζονται ενδεικτικώς τα λογαριθμικά διαγράμματα του φάσματος ισχύος των σειρών μετρήσεως της στάθμης για τα πηγάδια Άσσηρος 1 και Άσσηρος 2 για το έτος έτος 1991 (Σχημ. 2 και 3) και για το πηγάδι Μελισσουργός 1 για τα έτη 1991 και 1992.



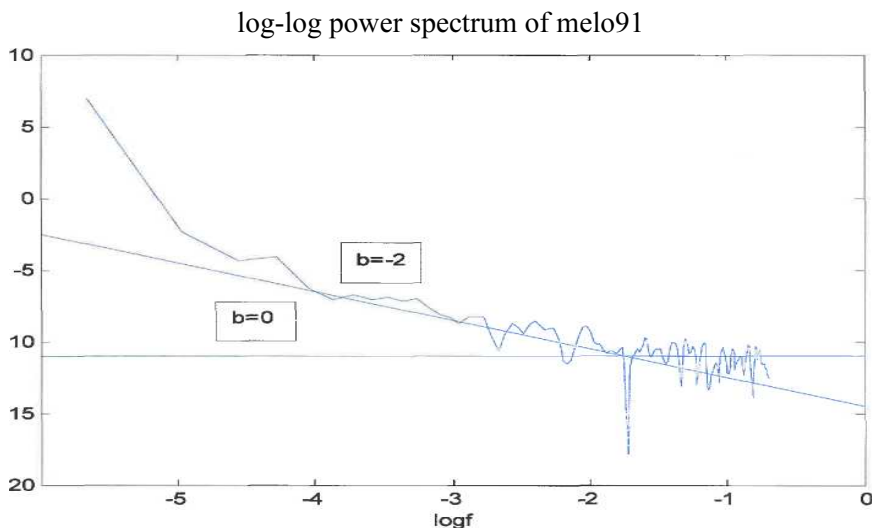
**Σχήμα 2.** Λογαριθμικό διάγραμμα του φάσματος ισχύος της στάθμης του υδροφορέα της Ασσήρου (πηγάδι 1) για το έτος 1991



**Σχήμα 3.** Λογαριθμικό διάγραμμα του φάσματος ισχύος της στάθμης του υδροφορέα της Ασσήρου (πηγάδι 2) για το έτος 1991.

Από τα διαγράμματα αυτά φαίνεται πως η περιοχή των υψηλών συχνοτήτων  $f > 0.1738$  c/d έχει δομή λευκού θορύβου ( $b = 0$ ), (δηλαδή μέχρι τις 6 ημέρες,  $T = 1/f = 1/0.1738 = 6$ , η χρονοσειρά των μετρήσεων έχει δομή λευκού θορύβου). Ενώ για την περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων  $f < 0.1738$  c/d (περίοδος  $T > 6$  ημερών).



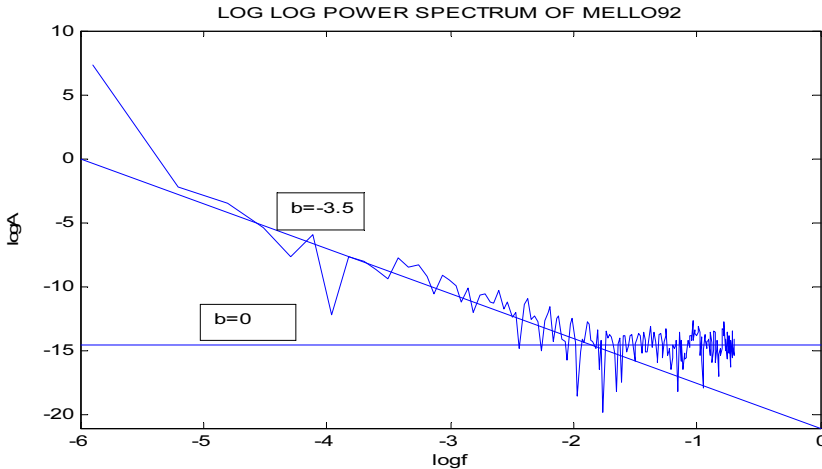


**Σχήμα 4.** Λογαριθμικό διάγραμμα του φάσματος ισχύος της στάθμης του υδροφορέα του Μελισσουργού (πηγάδι 1) για το έτος 1991.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι διακυμάνσεις των μετρήσεων της στάθμης των πηγαδιών που μελετάμε είναι αποτέλεσμα του θορύβου της πειραματικής διάταξης, του θορύβου από τυχαίες μεταβολές του περιβάλλοντος και του θορύβου από συστηματικές μεταβολές του περιβάλλοντος. Από τη θεωρία των Μορφοκλασματικών κατανομών και με βάση την τιμή του εκθέτη  $b$  μπορούμε να διαπιστώσουμε το είδος του θορύβου που επηρεάζει τις μετρήσεις μας σε κάθε πηγάδι: Η κλίση  $b$  του λογαριθμικού διαγράμματος του φάσματος ισχύος της στάθμης του πηγαδιού έχει τιμή  $b = 0$ ,  $b = -2$ ,  $b < -2$  αντίστοιχα.

Από στατιστικά τεστ που έχουν γίνει για το δίκτυο του Λαγκαδά, έχει προκύψει ότι η βαρομετρική πίεση επηρεάζει ελαφρώς τις μετρήσεις, ενώ η βροχόπτωση δεν επηρεάζει άμεσα τη στάθμη του υπόγειου νερού, αλλά μόνο μακροπρόθεσμα (Astneriadis & Contadakakis 2001). Επιπλέον παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάζουν τις μετρήσεις είναι ισχυρές υδάτινες ροές, άλλωστε στην περιοχή βρίσκονται δύο λίμνες (Λαγκαδά, Βόλβης), η έντονη υδρομάστευση, η αυξημένη υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους κοντά σε κάποια πηγάδια, καθώς και η έντονη τεκτονική δραστηριότητα που παρατηρείται στην περιοχή μελέτης. Τα πηγάδια που μελετάμε είναι ρηχά, παρ' όλα αυτά παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι και τα ρηχά πηγάδια είναι ευαίσθητα σε τεκτονικά και μη τεκτονικά φαινόμενα. Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κλίσεις των λογαριθμικών διαγραμμάτων του φάσματος ισχύος για τους υδροφορείς των περιοχών μελέτης για τα έτη των μετρήσεων που έχουμε στη διάθεση μας. Από τον πίνακα 3 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: Για το πηγάδι 1 του υδροφορέα της Ασσήρου η κλίση του λογαριθμικού διαγράμματος του φάσματος ισχύος της στάθμης του είναι και για

τα δύο έτη  $b = -2$ , δηλαδή ο θόρυβος του περιβάλλοντος έχει Brownian μορφή. Αυτό, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, σημαίνει πως οι μετρήσεις μας επηρεάζονται από περιβαλλοντικό τυχαίο θόρυβο. Το πηγάδι αυτό κρίνεται κατάλληλο για το πρόγραμμα ανίχνευσης μεταβολών της στάθμης που πιθανώς συνδέεται με τεκτονική δράση.



**Σχήμα 5.** Λογαριθμικό διάγραμμα του φάσματος ισχύος της στάθμης του υδροφορέα του Μελισσουργού (πηγάδι 1) για το έτος 1992.

Για το πηγάδι 2 του υδροφορέα της Ασσήρου η κλίση του λογαριθμικού διαγράμματος του φάσματος ισχύος της στάθμης του είναι και για τα δύο έτη  $b = -3.5$ . Παρόλο που τα πηγάδια 1 και 2 της Ασσήρου βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους παρατηρούμε ότι εμφανίζονται διαφορετικές κλίσεις, επομένως και διαφορετικού είδους επιδράσεις στις μετρήσεις. Έτσι, ενώ στο πηγάδι 1 έχουμε τυχαίο θόρυβο του περιβάλλοντος, στο πηγάδι 2 οι μετρήσεις επηρεάζονται από συστηματικές περιβαλλοντικές μεταβολές. Αυτές οι συστηματικές μεταβολές πιθανόν συνδέονται με ισχυρά υπόγεια ρεύματα ή έντονη υδρομάστευση στην περιοχή του πηγαδιού 2 της Ασσήρου. Επίσης, είναι πιθανό το έδαφος κοντά στο πηγάδι 2 να έχει μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα σε σχέση με το έδαφος κοντά στο πηγάδι 1. Από τα συγκριτικά αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι το πηγάδι Ασσηρος 1 είναι πιο κατάλληλο για την παρατήρηση εκτάκτων γεγονότων, πιθανώς τεκτονικής αιτιολογίας από ότι το πηγάδι Ασσηρος 2.

Όσον αφορά τον Μελισσουργό παρατηρούμε ότι για το έτος 1991 και στα δύο πηγάδια έχουμε κλίση  $b = -2$ , δηλαδή οι μετρήσεις επηρεάζονται από τυχαίο θόρυβο του περιβάλλοντος. Παρ' όλα αυτά, για το έτος 1992 και στα δύο πηγάδια η κλίση γίνεται  $b = -3.5$ , πράγμα που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το 1992 κάποιο ιδιαίτερο γεγονός έχει επηρεάσει τις μετρήσεις μας. Αυτή η αύξηση

**Πίνακας 3.** Κλίσεις των λογαριθμικών διαγραμμάτων του φάσματος ισχύος

	1986	1991	1992
Άσσηρος 1		-2	-2
Άσσηρος 2		-3.5	-3.5
Μελισσουργός 1		-2	-3.5
Μελισσουργός 2		-2	-3.5
Νυμφόπετρα		-4.5	
Λητή	-2		

της κλίσης του λογαριθμικού διαγράμματος σε σχέση με το έτος 1991 πιθανόν να οφείλεται σε ισχυρές ροές κατά το έτος 1992 ή σε τεκτονική δράση στην περιοχή των δύο πηγαδιών. Από τον πίνακα 2.2, διαπιστώνουμε ότι όντως έχουν καταγραφεί σεισμοί κοντά στον Μελισσουργό κατά το έτος 1992, γεγονός που ενισχύει το ενδεχόμενο επίδρασης τεκτονικών παραγόντων στη στάθμη των πηγαδιών. Επίσης τα συμπεράσματα αυτά μας υποδεικνύουν ότι και τα δύο πηγάδια αυτά είναι κατάλληλα για το πρόγραμμα το οποίο επελέγησαν.

Όσον αφορά το πηγάδι της Νυμφόπετρας, η έντονη κλίση του λογαριθμικού διαγράμματος του φάσματος ισχύος της στάθμης του ( $b = -4.5$ ) είναι ενδεικτική συστηματικών επιδράσεων του περιβάλλοντος που πιθανόν να οφείλονται στο ότι η Νυμφόπετρα βρίσκεται κοντά στη λίμνη Βόλβη και υφίσταται ισχυρές ροές ή στο γεγονός ότι στην περιοχή του πηγαδιού υπάρχει έντονη καλλιεργητική δραστηριότητα και άρα έντονη υδρομάστευση ακόμα και στο έδαφος της περιοχής που πιθανόν να παρουσιάζει μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα. Επίσης, έχουμε ήδη αναφέρει πως η περιοχή μελέτης είναι περιοχή με έντονη σεισμική δραστηριότητα, επομένως οι συστηματικές επιδράσεις του περιβάλλοντος είναι πιθανόν να οφείλονται στους σεισμούς που έλαβαν χώρα κοντά στην περιοχή της Νυμφόπετρας το 1991. Το πηγάδι αυτό είναι μάλλον ακατάλληλο για το πρόγραμμα ανίχνευσης τυχόν μεταβολών της στάθμης τεκτονικής προέλευσης και τα αποτελέσματα των μεταβολών της στάθμης πρέπει να εξετάζονται μετά μεγάλης προσοχής.

Τέλος, για το πηγάδι της Λητής, για το οποίο έχουμε μετρήσεις μόνο για το έτος 1986, η κλίση  $b = -2$  δηλώνει πως οι μετρήσεις της στάθμης του επηρεάζονται από τυχαίο περιβαλλοντικό θόρυβο. Φαίνεται ότι το πηγάδι αυτό είναι κατάλληλο για την ανίχνευση μεταβολών πιθανής τεκτονικής αιτιολογίας. Δυστυχώς όμως σύντομα υποχώρησε λόγω ανομβρίας ο υδροφόρος ορίζοντας και το πηγάδι τέθηκα εκτός λειτουργίας.

## 5. Συμπεράσματα

Η Μορφοκλασματική μορφή του φάσματος ισχύος των μεταβολών της στάθμης ως προς την συχνότητα μας δίνει την δυνατότητα να αποφανθούμε για το είδος των

παρατηρούμενων μεταβολών (τυχαίων ή συστηματικών) και να αποφανθούμε για την καταλληλότητα ή όχι των χρησιμοποιούμενων πηγαδιών παρατήρησης του δικτύου για την ανίχνευση μεταβολών που σχετίζονται με την τεκτονική δράση, και επιπλέον να κρίνουμε με μεγαλύτερη ασφάλεια αν μία διαφοροποίηση του φάσματος οφείλεται σε τεκτονική δράση της περιοχής ή όχι. Πιο συγκεκριμένα τα πηγάδια Άσσηρος 1, Μελισσουργός 1 και 2 και Λητής κρίνονται κατάλληλα για την ανίχνευση μεταβολών της στάθμης των αβαθών υπογείων υδάτων που πιθανώς οφείλονται σε τεκτονική δράση η δε μεταβολές της στάθμης στα πηγάδια Μελισσουργός 1 και δύο σχετίζονται με μεγάλη πιθανότητα με την σεισμική δραστηριότητα της περιοχής.

## **Βιβλιογραφία**

- Asteriadis, G. and Livieratos, E. (1989) Pre-Seismic Responses of the Underground Water Level and Temperature concerning a 4.8 Magnitude Earthquake in Greece on 20 October 1988, *Tectonophysics*, 170, 165–169, 1989.
- Asteriadis, G. and Contadakis, M. E. (1993) Variation on the Shallow Underground Water Level and Temperature Related to the Seismic Activity, *Proceedings of the XXIII General Assembly of the European Seismological Commission, Prague 7–12 September 1992, Vol. II*, 333–337.
- Asteriadis, G., Contadakis M.E. (2001) Hydrologic changes as Possible Earthquake Precursor in Greece, *Natural hazards* 23: 29-47, Kluwer Academic Publishers, Netherlands
- Contadakis, M.E., Asteriadis G. (2001), Recent results of the research for preseismic phenomena on the underground water and temperature in Pieria, Northern Greece, *Nat. Hazards Earth Syst.Scienc.* Vol 1, 3, 165-170.
- Κονταδάκης, Μ.Ε. (2009), Μια Μέθοδος για την Ανίχνευση Ασθενών Παροδικών Περιοδικοτήτων σε μιά χρονική σειρά, «ΥΔΡΟΓΑΙΑ», τιμητικός Τόμος για τον Καθηγητή Χρήστο Τζιμόπουλο υπό Σταύρου Γιαννόπουλου. Σελ. 517-530. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Mandelbrot, B. B. (1982) *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman San Francisco
- Μουντράκης, Δ. (1985) *Γεωλογία της Ελλάδας*, University Studio Press,
- Papazachos, B.J. , Papazachos, C. (1997) *The earthquakes of Greece*, Ziti Press, Thessaloniki
- Pavlidis, S. , Syrides, G. (1997) Field trip to Mygdonia basin (active faults of Thessaloniki 1978 earthquake, Central Macedonia, northern Greece), *The 29<sup>th</sup> General Assembly of IASPEI 1997*
- Turcotte, D. (1997) *Fractals and chaos in geology and geophysics*, Second edition, Cambridge university press