

Πρότυπη Μέθοδος Γεωφυσικής Διερεύνησης Υπεδάφους, μέσω Συχνοτικού Προσδιορισμού Σεισμικών Κυμάτων και Πιλοτική Εφαρμογή της σε Καρστικούς Ασβεστόλιθους του Νεογενούς στην Περιοχή Κουνουπιδιανά, Χανίων

Π. ΚΩΛΕΤΤΑΣ

Υπ. Δρ - Πολιτικός Μηχανικός
Τμ. Μηχ. Ορ. Πόρων
Πολυτεχνείο Κρήτης

Α. ΒΑΦΕΙΔΗΣ

Καθηγητής
Τμ. Μηχ. Ορ. Πόρων
Πολυτεχνείο Κρήτης

Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ

Καθηγητής
Τμ. Μηχ. Ορ. Πόρων
Πολυτεχνείο Κρήτης

Περίληψη

Είναι γνωστό ότι για την έδραση μεγάλων έργων (κτιρίων, φραγμάτων, γεφυρών, σηράγγων, κ.λ.π) και για την αποτροπή ενδεχομένων αστοχιών που οφείλονται σε άγνωστες ή υποεκτιμημένες παραμέτρους της μηχανικής συμπεριφοράς του υπεδάφους απαιτείται όπως η εκπόνηση της γεωτεχνικής μελέτης η οποία θα μελετήσει τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων της περιοχής έδρασης, να χαρακτηρίζεται από επάρκεια, ποιότητα και επιστημονική πληρότητα.

Η γεωτεχνική αυτή έρευνα επιδρά σημαντικά όχι μόνο στον καθορισμό του τρόπου και της κατασκευής ενός έργου αλλά και στις βασικές παραμέτρους που έχουν σχέση με το κόστος της θεμελίωσης και με την οικονομικότητά του.

Η παρούσα δημοσίευση παρουσιάζει τη συστηματική προσπάθεια επεξεργασίας και αξιολόγησης των γεωλογικών, γεωφυσικών, γεωτρητικών και εργαστηριακών δεδομένων που προκύπτουν από τη μελέτη της συμπεριφοράς των σεισμικών κυμάτων.

Η αξιολόγηση και επεξεργασία των δεδομένων αυτών γίνεται μέσω εξειδικευμένων πληροφοριακών προγραμμάτων. Το βασικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου σε καρστικούς βιογενείς ασβεστόλιθους, είναι ότι στις θέσεις όπου η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι υψηλή, τόσο το επίπεδο της συχνότητας του λαμβανόμενου σήματος όσο και της ισχύος του είναι σχετικά υψηλό, ενώ όπου η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μειώνεται αισθητά, τόσο το επίπεδο της συχνότητας του λαμβανόμενου σήματος όσο και αυτό της ισχύος του παρουσιάζει αισθητή μείωση. Παρατηρείται δηλαδή ανάλογης και ομοιότροπης μορφής μεταβολή του επιπέδου της συχνότητας και της ισχύος του λαμβανομένου σήματος με αυτό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια νεωτεριστική μεθοδολογία γεωφυσικής διερεύνησης του υπεδάφους αξιοποίησης της συχνοτικής προσδιορισμού σεισμικών κυμάτων σε καρστικούς ασβεστόλιθους.

Υποβλήθηκε: 16.10.2007 Έγινε δεκτή: 12.2.2008

ολογώντας τις μεταβολές της κυρίαρχης συχνότητας των σεισμικών κυμάτων που διαδίδονται μέσω των εδαφικών σχηματισμών.

Στόχος, είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον χαρακτηρισμό των εδαφικών σχηματισμών, μελετώντας τη συχνοτική συμπεριφορά των κυμάτων αυτών και τη διαφοροποίηση που υφίστανται διερχόμενα μέσω των εδαφικών σχηματισμών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόσθηκε σε δεδομένα σεισμικής διάθλασης σε χώρο της Πολυτεχνείου πολης στα Χανιά όπου εμφανίζονται καρστικές δομές σε βιογενείς ασβεστολίθους του Νεογενούς.

Το αναμενόμενο τελικό αποτέλεσμα έχει σχέση με την πληροφόρηση για την εδαφική διαστρωμάτωση, αποσκοπεί στον χαρακτηρισμό των εν λόγω σχηματισμών όσον αφορά στην καταλληλότητα τους για ανάληψη τάσεων προερχόμενων από θεμελιώσεις μεγάλων έργων (λιμνοδεξαμενών, φραγμάτων, λιμανιών, μεγάλων γεφυρών κ.λ.π) και εν γένει με τη πληροφόρηση για την ποιοτική σύσταση του υπεδάφους.

Η καινοτόμος παράμετρος της μελέτης αυτής συνίσταται στην επεξεργασία και συγκριτική αξιολόγηση των γεωλογικών, γεωφυσικών, γεωτρητικών και εργαστηριακών δεδομένων με τα δεδομένα που προκύπτουν από την μελέτη της συμπεριφοράς των σεισμικών κυμάτων. Επίσης καινοτόμο και διαφορετικό δύναται να θεωρηθεί το νέο πεδίο έρευνας που αναδύεται από την μελέτη αυτή, διότι επιχειρείται χαρακτηρισμός του υπεδάφους με σεισμικά κύματα και επεξεργασία – σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τα αντίστοιχα αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων σεισμικής διάθλασης και ηλεκτρικής τομογραφίας καθώς και με γεωτρητικά στοιχεία, χρησιμοποιώντας υψηλής πιστότητας εξειδικευμένα πληροφοριακά προγράμματα.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται η παρούσα εργασία, έχει σχέση με τις ιδιότητες των μετασχηματισμών Fourier τόσο για σήματα συνεχούς, όσο και για σήματα διακριτού χρόνου και διακριτής συχνότητας. Οι μετασχηματισμοί Fourier διαδραματίζουν σήμερα σημαντικό ρόλο στους διάφορους τομείς των εφαρμοσμένων μαθηματικών και της φυσικής. Αποτελούν θεμελιώδες εργαλείο για την επεξεργασία ψηφιακού σήματος και εικόνας.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο Nonequispaced Fast Fourier Transform (NFFT), για τον υπολογισμό του οποίου χρησιμοποιούνται στοιχεία από τον Discrete Fourier Transform (DFT) και τον Fast Fourier Transform (FFT) [1].

Ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT)

$$f_j = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \hat{f}_k e^{-2\pi i k j / N} \quad (j = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}-1)$$

για να καταστεί εφαρμόσιμος και χρήσιμος στην ψηφιακή επεξεργασία σημάτων απαιτείται να επιλυθεί για διάφορες τιμές των παραμέτρων του [2].

Οι γρήγοροι μετασχηματισμοί Fourier (FFTs) ανήκουν στους αλγόριθμους με βάση το 10. Ο FFT χρειάζεται μόνο ($N \log N$) και όχι (N^2) βήματα που χρειάζεται ο DFT για την επίλυση του, χρησιμοποιώντας προσεγγιστικές παραδοχές. Απαιτεί ακόμη δειγματοληψία σε ισοδιάστατο κάναβο, γεγονός όμως που θέτει σημαντικούς περιορισμούς σε πολλές εφαρμογές.

Ο μετασχηματισμός NFFT (Nonequispaced Fast Fourier Transform), αξιοποιώντας καλά εντοπισμένα μη ισοδύναμα παραθύρα άντλησης πληροφορίας χρόνου και συχνότητας προσεγγίζει αποτελεσματικότερα την πραγματική τιμή [3].

$$f(x_j) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \hat{f}_k e^{-2\pi i k x_j} \quad (j = 1, \dots, Q) \text{ για } x \in [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$$

Ο υπολογισμός του NFFT είναι βασισμένος στην προσέγγιση του τριγωνομετρικού πολυωνύμου.

$$f(x) := \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \hat{f}_k e^{-2\pi i k x}$$

με κατάλληλους γραμμικούς συνδυασμούς μιας παραθυρικής παραμέτρου φ , που έχει μεγάλη ακρίβεια στον τομέα συχνότητας – χρόνου. Η αριθμητική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου είναι 04, όπου το ε δηλώνει την απαραίτητη ακρίβεια.

Εν κατακλείδι ο NFFT είναι ένας προσεγγιστικός αλγόριθμος που με χαρακτηριστική απλότητα εκμεταλλεύεται την αξιοποίηση καλά εντοπισμένων μη ισοδύναμων παραθύρων.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η πρότυπη αυτή γεωτεχνική έρευνα διεξάγεται σε επιλεγμένο χώρο εντός των γηπεδικών ορίων του Πολυτεχνείου Κρήτης στο Ακρωτήρι Χανίων. Ακριβέστερα ο υπόψη χώρος βρίσκεται στην Ανατολικά πλευρά της Πολυτεχνειούπολης και το κεντρικό στίγμα στο χώρο αυτό έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Γεωγραφικό Μήκος $24^\circ 4'16.68''$ E, Γεωγραφικό Πλάτος $35^\circ 31'46.20''$ N και Ύψος 147 m από την επιφάνεια της θάλασσας (Εικόνα 1).

Ο γεωλογικός σχηματισμός της περιοχής αυτής αποτελείται κυρίως από μαργαϊκό ασβεστόλιθο ο οποίος λόγω καρστικοποίησης εμφανίζει κατά θέσεις διαφορετικό πορώδες.

Για την συγκεκριμένη περιοχή υπάρχουν γεωτρητικά στοιχεία τριών γεωτρήσεων (Γ_1 , Γ_2 και Γ_3 , βλέπε δορυφορική φωτογραφία) και στοιχεία εφαρμογής μεθόδων Σεισμικής Διάθλασης και Ηλεκτρικής Τομογραφίας η αξιοποίηση των οποίων και η σύνθεση τους με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας θα συμπληρώσουν και βελτιώσουν ποιοτικά τη γεωτεχνική πληροφορία [4]. Προς επαλήθευση δε των αποτελεσμάτων των παραπάνω αναφερομένων μεθόδων παρατίθενται ενδεικτικά και αποτελέσματα (Πίνακας 1) που προέκυψαν από την ανάλυση των πυρήνων της γεώτρησης Γ_2 η προβολή της οποίας αντιστοιχεί στο σημείο (+33.00) από την αρχή των αξόνων όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.

Πίνακας 1 Αποτελέσματα ανάλυσης πυρήνων της γεώτρησης Γ_2

Βάθος (m)	RQD	Χαρακτηρισμός
0 - 1.6	41.88	<ul style="list-style-type: none"> Τετάρτογενή ιζήματα terra rossa για 0.00-0.80 m.
1.6 - 3.2	76.88	<ul style="list-style-type: none"> Ερυθρότεφρος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με ανξομειούμενο πορώδες για 0.80-3.20 m.
3.2 - 4.8	75.31	
4.8 - 6.4	30.00	<ul style="list-style-type: none"> Ερυθρότεφρος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με ανξομειούμενο πορώδες.
6.4 - 8.0	16.88	
8 - 9.6	63.75	
9.6 - 11.2	88.44	<ul style="list-style-type: none"> Ερυθρότεφρος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με ανξομειούμενο πορώδες για 10.0-13.6 m.
11.2 - 12.8	27.19	
12.8 - 14.4	25.00	<ul style="list-style-type: none"> Ερυθρότεφρος μαργαϊκός ασβεστόλιθος με ανξομειούμενο πορώδες για 13.00-15.00 m.
14.4 - 15.0	0.00	
Μέσος όρος:		
44.53		

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους, καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Στην ηλεκτρική τομογραφία, η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής ανίστασης κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση, εντοπίζοντας έτσι ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών, όπως ρήγματα [5].



Εικόνα 1 Δορυφορική φωτογραφία της ευρύτερης περιοχής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Διακρίνεται η περιοχή μελέτης.

Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης βασίζεται στον πειραματικό προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των απευθείας και των μετωπικών κυμάτων και στη χρησιμοποίηση τους για τον προσδιορισμό των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και του πάχους των εδαφικών σχηματισμών. Η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων περιλαμβάνει τη λήγη καταγραφών πλούσιων σε επιφανειακά κύματα Rayleigh και την αντιστροφή των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς τους, για τον καθορισμό της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων κατανεμημένης με το βάθος [6].

Για την επίευξη λοιπόν του στόχου της μελέτης αυτής εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός NFFT σε σεισμικές καταγραφές. Επιλέγεται για αξιολόγηση η διαφοροποίηση της κυρίαρχης συχνότητας και της μέγιστης ισχύος των σεισμικών κυμάτων όταν αυτά διέρχονται μέσω των σχηματισμών του εδάφους και εφαρμόζεται ο παραθυρικός NFFT σε μη ισοδύναμα και άνισα χρονικά διαστήματα – παράθυρα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα προγράμματα Autosignal της εταιρίας Seasolve και Specgramdemo του Signal Analysis toolbox της Matlab 6.5 της εταιρίας Mathworks [7].

Χρησιμοποιούνται τα δεδομένα έντεκα (11) ηλεκτρικών

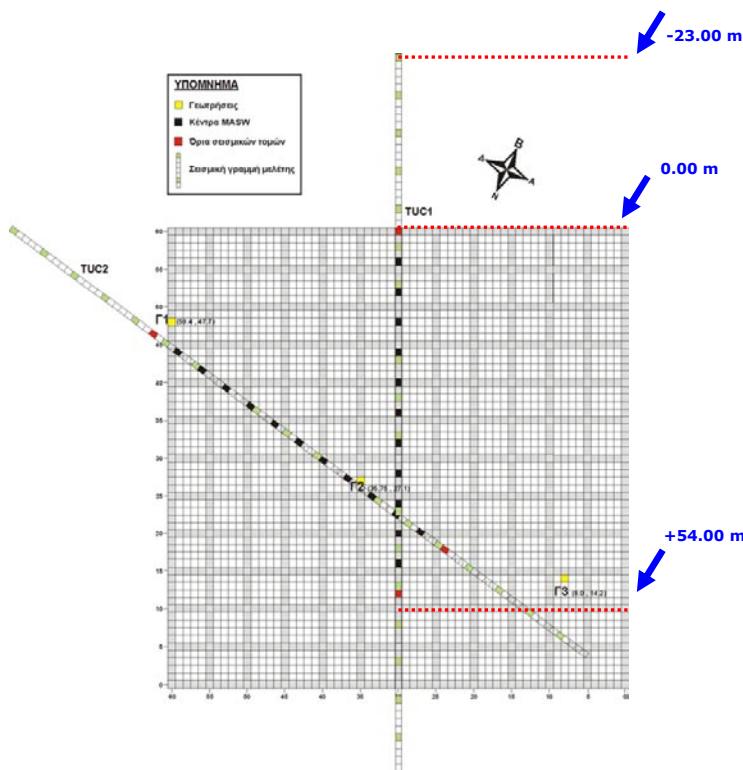
και δύο (2) σεισμικών γραμμών που πραγματοποιήθηκαν στον υπόψη χώρο εμβαδού 3,600 m² όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Αναλυτικότερα:

Για την εξέταση της γραμμής 1 (TUC 1), η διεύθυνση της οποίας συμπίπτει με την διεύθυνση Βορρά – Νότου, το μήκος της οποίας σχεδιάστηκε στα 94 m, χρησιμοποιούνται 2 αναπτύγματα των 48 m με κάθε ανάπτυγμα να αποτελείται από 24 γεώφωνα σε ισαπόσταση 2 m. Η αφετηρία δε των μετρήσεων της γραμμής αυτής βρίσκεται 23 m βορειότερα της αφετηρίας των μετρήσεων με την ηλεκτρική μέθοδο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σκαρίφημα.

Ως σεισμική – δονητική πηγή χρησιμοποιείται ένα μεταλλικό σφυρί βάρους 5 kg το οποίο προσπίπτει με σταθερή δύναμη και από σταθερό ύψος επί μεταλλικής πλάκας που βρίσκεται στο έδαφος.

Ως χρονικό διάστημα δειγματοληψίας λαμβάνεται το 1 msec και ως συνολική διάρκεια καταγραφής τα 512 msec.

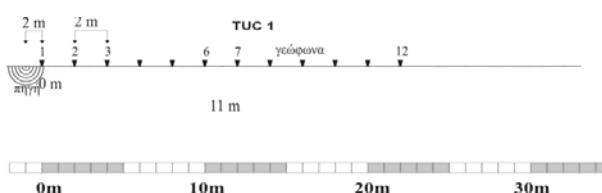
Για τη συλλογή των σεισμικών δεδομένων χρησιμοποιείται διάταξη κοινής πηγής και κύλιση της με σταθερό βήμα προχώρησης το οποίο ορίστηκε στα 4 m και πραγματοποιούνται 13 πειράματα για κάθε γραμμή μελέτης. Σε κάθε πείραμα η πηγή βρίσκεται 2 m βορειότερα του πρώτου γεωφώνου.



Εικόνα 2 Ευρύτερη περιοχή μελέτης όπου απεικονίζονται οι δύο (2) σεισμικές γραμμές (TUC 1) και (TUC 2) (χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της γραμμής TUC 1).

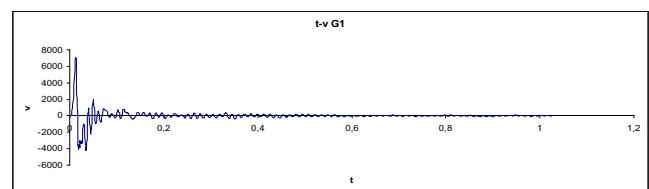
Από τα 13 πειράματα της γραμμής 1, ελήφθησαν τα δεδομένα του 7^{ου}, 8^{ου} και 9^{ου} πειράματος, σκαρίφημα του αναπτύγματος του οποίου τη στιγμή της λήψης των δεδομένων απεικονίζεται στην Εικόνα 3 με τη πηγή στο σημείο μηδέν -1.00 m (για το 7^ο πείραμα), +3.00 m (για το 8^ο πείραμα) και +7.00 m (για την 9^η πείραμα).

Με τον τρόπο αυτό εξετάζεται – μελετάται και αξιολογείται ολόκληρη η περιοχή η οποία έχει μελετηθεί με τη μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας και εκτείνεται από 0.00 m έως 54.00 m [8].



Εικόνα 3 Γεωμετρία της γραμμής μελέτης (TUC 1) κατά τη στιγμή λήψης της μέτρησης 1.

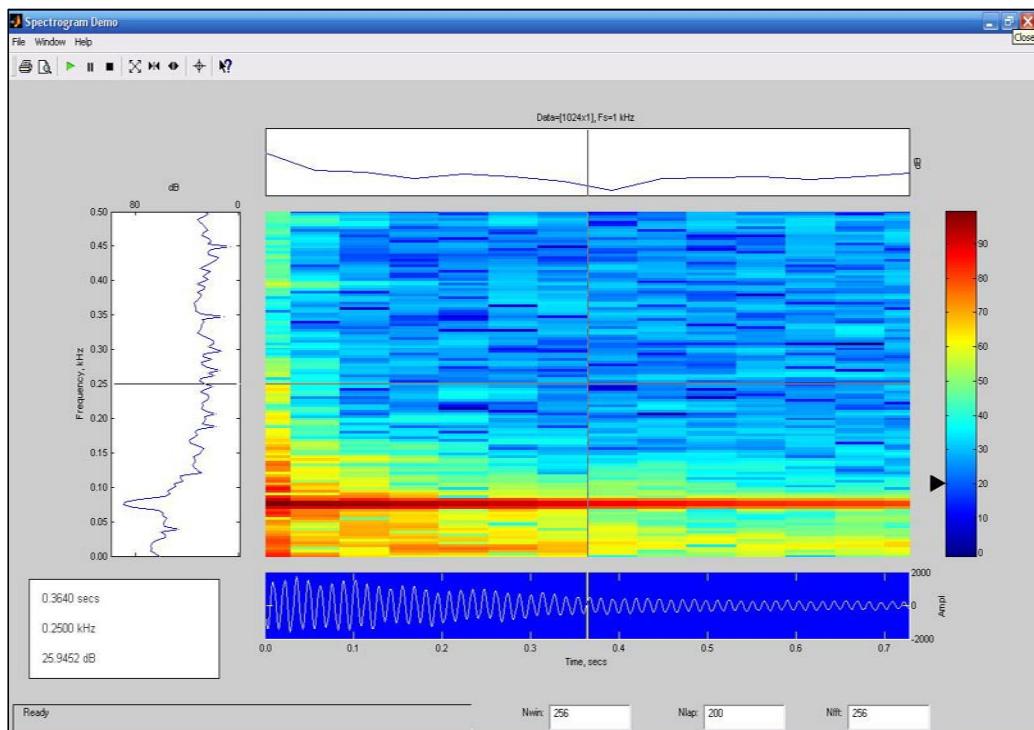
Τα σεισμικά αυτά δεδομένα (επιφανειακά κύματα) ελήφθησαν σε μορφή αρχείων .dat και .sgy (για κάθε μέτρηση), τα οποία περιείχαν πέραν των τεχνικών πληροφοριών της μέτρησης, πίνακα με 24 στήλες (όσα και τα γεώφωνα της διάταξης) και 1024 γραμμές (όσος και ο αριθμός των καταγραφών που πραγματοποιήθηκαν). (Εικόνα 4).



Εικόνα 4. Τυπική σεισμική καταγραφή.

Στη συνέχεια τα στοιχεία αυτά εισήχθησαν στο πρόγραμμα Specgramdemo του signal analysis toolbox της Matlab και αναλύθηκαν με τον αλγόριθμο NFFT με στόχο την εξαγωγή του συχνοτικού τους περιεχομένου. Το παράθυρο των αποτελεσμάτων της εφαρμογής Specgramdemo, περιλαμβάνει πληροφορίες για το συχνοτικό περιεχόμενο του εισαγόμενου σε αυτό σήματος (καταγραφή 1024 σημείων κάθε γεωφώνου, κάθε μέτρησης). Αναλυτικότερα, μέσω της χρήσης ενός σταυρονήματος που περιέχει η εφαρμογή, ο χρήστης δύναται να μελετήσει τη χρονική μεταβολή της συχνότητας και της ισχύος του σήματος. Η χρωματική κλίμακα που διαθέτει η συγκεκριμένη εφαρμογή κάνει ευκολότερα αντιληπτά τα σημεία μέγιστης μεταφοράς ενέργειας του σήματος (συντονισμός).

Από την προσεκτική παρατήρηση του φάσματος με τη χρήση του παραθυρικού FFT για τις 24 καταγραφές κοινής πηγής (ενδεικτικά παρουσιάζεται το φάσμα για μία από αυτές στην Εικόνα 5), διαπιστώθηκε ότι ένα από τα κοινά



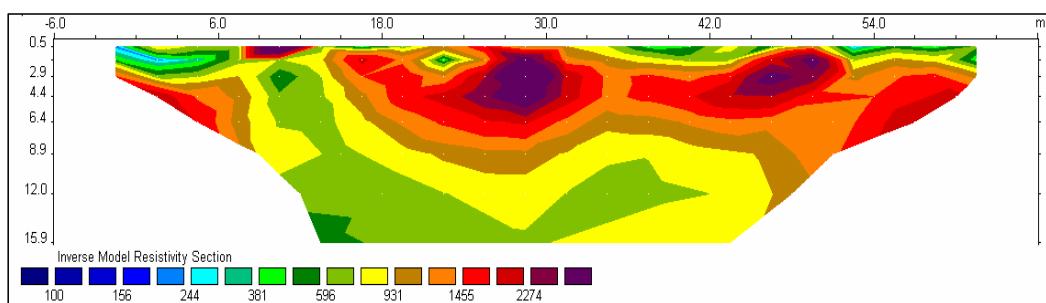
Εικόνα 5. Παράθυρο αποτελεσμάτων εφαρμογής Specgramdemo.

χαρακτηριστικά τους, είναι η παρουσία επίπεδου συχνότητας στο οποίο παρατηρείται συνεχής υψηλή μεταφορά ενέργειας και που απεικονίζεται με έντονη κόκκινη γραμμή παράλληλη με τον άξονα του χρόνου (time, sec). Μέσω της μετακίνησης του σταυρονήματος κατέστη δυνατό να ευρεθεί το επίπεδο της συχνότητας (Hz) στο οποίο γίνεται αυτή η συνεχής υψηλή μεταφορά ενέργειας καθώς και η ισχύς του σήματος (dB) κατά την διάρκεια του χρόνου [9].

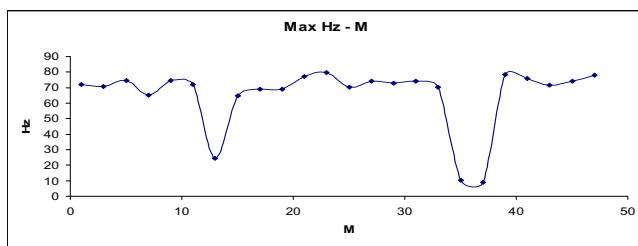
Η κυρίαρχη συχνότητα κάθε καταγραφής συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης του αντίστοιχου γεωφόνου παρουσιάζεται στα σχήματα 7, 9 και 11. Για τη συγκριτική δε επαλήθευση της εξαγόμενης πληροφορίας, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής μεθόδου στην γραμμή 6 που συμπίπτει με την γραμμή μελέτης 1 (TUC 1) της σεισμικής μεθόδου. Στη γεωηλεκτρική τομή

6 (Εικόνα 6), εμφανίζονται δύο γεωηλεκτρικά στρώματα τα οποία σύμφωνα με τη γεώτρηση Γ2 αποδίδονται σε βιογενείς ασβεστόλιθους του Νεογενούς. Στο επιφανειακό στρώμα (πάχους περίπου 6.5 μέτρων) η ειδική ηλεκτρική αντίσταση παρουσιάζει έντονη πλευρική μεταβολή λόγω του κάρστ και αυξημένες τιμές σε σχέση με το υποκείμενο στρώμα στο οποίο εμφανίζονται τυπικές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε βιογενείς ασβεστόλιθους του Νεογενούς.

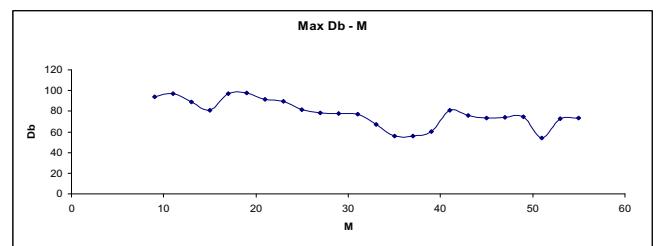
Επιπρόσθετα δημιουργήθηκαν διαγράμματα της χωρικής μεταβολής της μέγιστης ισχύος του φάσματος (σχήματα 8, 10 και 12), καθώς και οι συγκριτικές απεικονίσεις αυτών (όπου M εννοούνται οι αποστάσεις των γεωφόνων από την αφετηρία για κάθε μέτρηση), από τα οποία εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα.



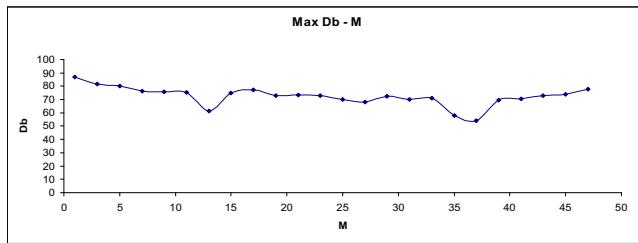
Εικόνα 6 Γεωηλεκτρική τομή στην γραμμή 6. Ο κατακόρυφος άξονας περιγράφει το βάθος σε μέτρα, ο οριζόντιος στην απόσταση των ηλεκτροδίων σε μέτρα και η χρωματική κλίμακα την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε $\Omega \cdot m$.



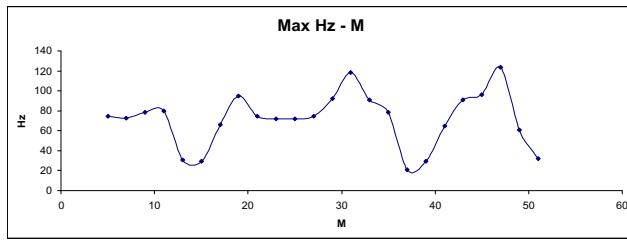
Εικόνα 7 Διάγραμμα μεταβολής της κυρίαρχης συχνότητας κατά μήκος της γραμμής μελέτης για το 7^o πείραμα.



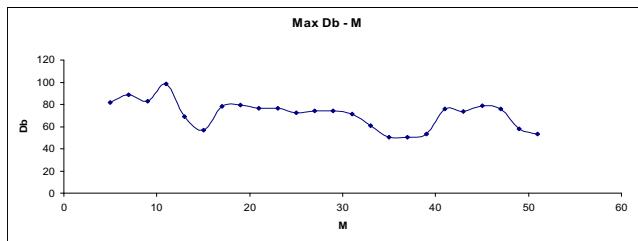
Εικόνα 12. Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης ισχύος κατά μήκος της γραμμής μελέτης για πείραμα 9.



Εικόνα 8 Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης ισχύος κατά μήκος της γραμμής μελέτης για το 7^o πείραμα.



Εικόνα 9 Διάγραμμα μεταβολής της κυρίαρχης συχνότητας κατά μήκος της γραμμής μελέτης για το πείραμα 8.

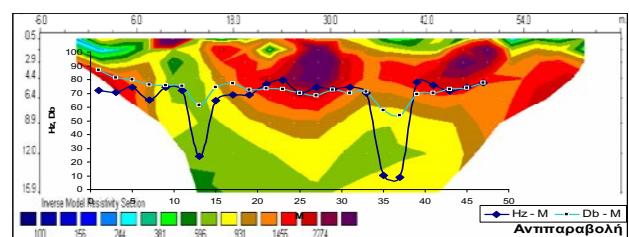


Εικόνα 10 Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης ισχύος κατά μήκος της γραμμής μελέτης για το πείραμα 8.

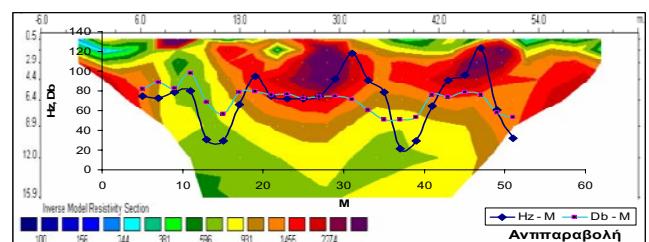
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της σεισμικής μεθόδου στη γραμμή 1 (TUC 1) η οποία συμπίπτει χωρικά με τη γραμμή 6 της Ηλεκτρικής Τομογραφίας οδήγει στις εξής παρατηρήσεις:

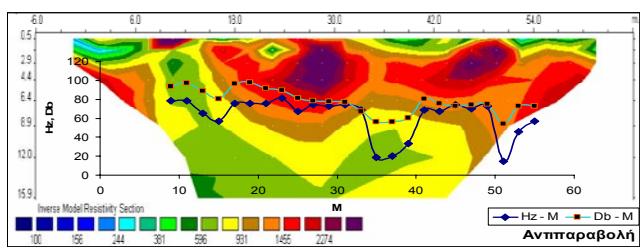
1. Η κυρίαρχη συχνότητα στα τρία επιμέρους πειράματα (7^o, 8^o, 9^o, σχήματα 7, 9 και 11) παρουσιάζει τοπικά ελάχιστα στα σημεία +13 m, +37 m, +51 m από την αφετηρία της διάταξης – σημείο 0 m.
2. Η μέγιστη ισχύς στα τρία επιμέρους πειράματα (7^o, 8^o, 9^o, σχήματα 8, 10 και 12) παρουσιάζει τοπικά ελάχιστα στα ίδια σημεία +13 m, +37 m, +51 m από την αφετηρία της διάταξης.
3. Στο επιφανειακό στρώμα (πάχους περίπου 6.5 μέτρων) της γεωηλεκτρικής τομής 6 (Εικόνα 6), η ειδική ηλεκτρική αντίσταση παρουσιάζει έντονη πλευρική μεταβολή λόγω του κάρστ.



Εικόνα 13 Συγκριτική απεικόνιση των Διαγραμμάτων Hz - M και Db - M με τα αποτελέσματα της Ηλεκτρικής Τομογραφίας για το 7^o πείραμα.



Εικόνα 14 Συγκριτική απεικόνιση των Διαγραμμάτων Hz - M και Db - M με τα αποτελέσματα της Ηλεκτρικής Τομογραφίας για το 8^o πείραμα.



Εικόνα 15 Συγκριτική απεικόνιση των Διαγραμμάτων $Hz - M$ και $Db - M$ με τα αποτελέσματα της Ηλεκτρικής Τομογραφίας για το 9^ο πείραμα.

4. Στις θέσεις όπου η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε αυτό το στρώμα είναι υψηλή, τόσο η κυρίαρχη συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος όσο και η μέγιστη ισχύς του είναι σχετικά υψηλές, ενώ όπου η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μειώνεται αισθητά, τόσο η κυρίαρχη συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος όσο και η μέγιστη ισχύς του παρουσιάζουν αντίστοιχη μείωση. Παρατηρείται δηλαδή ανάλογης και ομοιότροπης μορφής μεταβολή του επιπέδου της συχνότητας και της ισχύος του λαμβανομένου σήματος με αυτό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
5. Η πλοιοτική εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής στην υπό μελέτη περιοχή υπέδειξε ότι αναγνωρίζει περιοχές με χαμηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Σε επόμενη φάση θα διερευνηθεί η δυνατότητα συσχέτισης των αποτελεσμάτων αυτών με χαρακτηριστικές ιδιότητες των πετρωμάτων.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η μελέτη αυτή εκπονήθηκε εντός των πλαισίων του Προγράμματος Π.Ε.Ν.Ε.Δ 03 ΕΔ 392 με τίτλο «Μεθοδολογία

πρότυπων γεωτεχνικών ερευνών με συνδυασμό γεωλογικών, γεωφυσικών, γεωτρητικών και εργαστηριακών δεδομένων». Η συμβολή του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και ειδικότερα των Κυρίων Κρητικάκη και Hamdan υπήρξε σημαντική ίδιαίτερα σε ό,τι αφορά στην παροχή των απαραίτητων γεωφυσικών δεδομένων για την υπόγη περιοχή μελέτης.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Agarwal R. P. and P. J. Y. Wong, 1993, “Error Inequalities in Polynomial Interpolation and Their applications” Volume 262 of Mathematics and its Applications, Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht.
2. Alpert B., G. Beylkin, R. Coifman, and V. Rokhlin, 1993, «Wavelet-like bases for the fast solution of second-kind integral equations», SIAM Journal on Scientific Computing, Volume 14 , Issue 1, p.: 159 – 184.
3. Καραγιάννης Γ. και Δ. Καλλινίκος, 1991, «Σήματα και συστήματα με έμφαση στο διακριτό χρόνο», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 253 σελ..
4. Αγιουτάντης Ζ., 2002, «Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων», Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, 400 σελ.
5. Βαφείδης Α., Χανιά 2001, «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική», Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
6. Βαφείδης Α., 1993, «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική – Σεισμικές Μέθοδοι», Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
7. Vorgelegt Von, 2005, «Fast Fourier Transform At Nonequispaced Nodes and Applications», Manheim, 130p.
8. Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, 2005, «Project Crinno – Final Report», Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης
9. Mitra S.K., 2001 «Digital Signal Processing – A Computer Based Approach», McGraw-Hill, 855p.

Extended summary

A Novel Method for the Geophysical Characterization of the Subsoil, via Frequency Analysis of Seismic Waves

P. KOLETTAS

Phd Candidate. - Civil Engineer

Department of Mineral Resources
Technical University of Crete

A. VAFEIDIS

Professor

Department of Mineral Resources
Technical University of Crete

Z. AGIOYTANTIS

Professor

Department of Mineral Resources
Technical University of Crete

Extended abstract

The development of novel methods for the investigation of the subsoil contributes to the improvement of geotechnical research, enhances the obtained geotechnical characterization and may reduce the investigation cost by reducing the number of required tests.

This study presents a systematic effort for the processing and evaluation of the geological, geophysical, drilling and laboratory data that may be obtained as a result of a comprehensive seismic refraction study of the subsoil. Seismic data are processed using a novel technique of spectral analysis available through special Matlab packages employing Fourier transform methods.

Fourier methods play an important role in various areas of applied mathematics and physics. Originally designed by Fourier (1768-1830) for the solution of differential equations they became one of the fundamental principles in digital signal and image processing. The main premise to make Fourier methods applicable in practice was the development of an algorithm for the fast computation of the discrete Fourier transform (DFT)

$$f_j = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} f_k e^{-2\pi i k j / N} \quad (j = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2} - 1)$$

Using a divide and conquer approach, the number of floating point operations is reduced from (N^2) (DFT) for a straightforward computation to only $(N \log N)$ (Fast Fourier Transform, FFT).

However, the (FFT) requires sampling on an equally spaced grid, which poses a significant limitation to many applications. The fast Fourier transform for nonequispaced nodes (NFFT) efficiently computes approximations of sums

$$f(x_j) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \hat{f}_k e^{-2\pi i k x_j} \quad (j = 1, \dots, Q)$$

$$x \in [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$$

In this study, the NFFT transformation is applied to seismic waves travelling through the subsoil using the Autosignal program (by Seasolve) and the Specgramdemo program included in the Signal Analysis toolbox of Matlab 6.5 (Mathworks).

Data from eleven (11) electric and two (2) seismic geophysical surveys are used that were performed over a carstic limestone formation covering an area of roughly 3,600 m² inside the campus of the Technical University of Crete as shown in Figure 1. More specifically, line 1 (TUC 1) was surveyed using two spans of 48 m each employing 24 geophones with a spacing of 2m. A steel hammer weighing 5kg dropped on a metal plate was used as a seismic source. Sampling time interval was set to 1ms for a total recording duration of 512ms. Using a common source configuration, the monitoring line was rolled 13 times with a step of 4m. Thus 13 experiments were realized for each line of study.

By carefully analyzing the 24 depictions of each measurement (like the one presented indicatively in Figure 4), it was noticed that one of their common characteristics is the presence of a frequency level in which a continuous high transportation of energy is observed and is portrayed with the intense red line parallel with the axis of time (s). By moving the crosshairs in the analysis window, it was possible to determine the frequency level (Hz) in which this continuous high transportation of energy occurs as well as the signal intensity (Db) for this time duration.

This data as well as location data for the geophones were imported in a Microsoft Excel sheet for analysis and evaluation. In addition the results of the electric method in line

6 (Figure 6) that coincide with line 1 (TUC1) of the seismic method were used in order to qualitatively evaluate the generated information. Hz - M, and Db - M diagrams were created, where M are the distances between the geophones. Results indicate that:

- For each measurement (verified for three individual experiments [7, 8, 9]), the diagrams Hz - M and Db - M present similar fluctuations of levels of frequency and strength respectively. More specifically, the maximum or minimum values occur at the same locations.
- In the cases where the value of the special electric resistance is high, both the level of frequency of the received signal and its strength are relatively high, while in the

cases where the value of the special electric resistance decreases perceptibly, both the level of frequency of the received signal and that of its strength show a significant reduction. Thus a proportional and similar form of change of frequency level and the strength of the received signal with that of the special electric resistance is observed.

- The results derived by applying the proposed technique coincide with the results of the seismic and electrical methods with respect to the identification of regions with low electric resistances. In the next phase the possibility of cross-correlation of these results with the characteristic attributes of rocks will be investigated.

