

<b>Πρακτικά 3ου Συνεδρίου Μαΐος 1986</b>			
<b>Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.</b>	<b>Τομ.</b>	<b>σελ.</b>	<b>Αθήνα</b>
	<b>XX/3</b>	<b>303-319</b>	<b>1988</b>
<b>Bull. Geol. Soc. Greece</b>	<b>Vol.</b>	<b>pag.</b>	<b>Athens</b>

## ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ- ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Ι. ΔΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ\*, Κ. ΜΑΚΡΟΠΟΥΛΟΣ\*, Α. ΤΣΕΛΕΝΤΗΣ\*

### Περίληψη

Είναι γενικά αποδεκτό, ότι η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων μπορεί να συντελέσει στην επίλυση πολύπλοκων γεωτεχνικών προβλημάτων επιτυγχάνοντας σημαντικά οικονομικά ωφέλη.

Στην εργασία αυτή, παραθέτουμε δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής γεωφυσικών μεθόδων, της γεωηλεκτρικής διασκόπησης και της σεισμικής διάθλασης για την επίλυση δύο γεωτεχνικών προβλημάτων στην Ελλάδα.

Το πρώτο παράδειγμα αναφέρεται στο πως η εφαρμογή της μεθόδου της γεωηλεκτρικής διασκόπησης συνετέλεσε στην κατανόηση των αιτιών που προκάλεσαν την εκτεταμένη κατολίσηση στην περιοχή θεμελίωσης του αγωγού Ιλίκης - Αθηνών στην θέση Κρεμιάδα του Ν. Βοιωτίας. Στην περιοχή έγιναν 18 γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις και η επεξεργασία των στοιχείων έδειξε ότι η κινητικότητα του πρηνούς θεμελίωσης οφειλόταν στο έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο του υποβάθρου και την ύπαρξη ενός λεπτού υδροφόρου στρώματος ακριβώς επάνω από το βραχώδες υπόβαθρο, προκαλώντας έτσι την δραστηκή ελάττωση της περιοχής θεμελίωσης σε διατμητικές τάσεις.

Το δεύτερο παράδειγμα αναφέρεται στην χρήση μεθόδων σεισμικής διάθλασης στην περιοχή του φράγματος του Αχελώου στην θέση Μουζάκη του Ν. Τρικάλων. Εκτός από τις κλασικές μετρήσεις διαμήκων σεισμικών κυμάτων και την εύρεση του πάχους των αλλουβιακών αποθέσεων, έγιναν και μετρήσεις σεισμικής ταχύτητας εγκάρσιων κυμάτων και υπολογίστηκαν οι ελαστικές σταθερές στην περιοχή θεμελίωσης του φράγματος. Η χρήση των πιο πάνω ελαστικών παραμέτρων σε συνδιασμό με την κατασκευή ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της περιοχής επέτρεψε τον υπολογισμό της σεισμικής συμπεριφοράς (συντελεστής ενίσχυσης) της περιοχής θεμελίωσης του φράγματος.

\* Πανεπιστήμιο Αθηνών-Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας

## Εισαγωγή

Είναι πλέον γνωστή η χρησιμότητα της γεωφυσικής στην επίλυση διάφορων γεωτεχνικών προβλημάτων. Η ορθολογιστική χρήση γεωφυσικών μεθόδων πριν από κάθε γεωτεχνικό έργο, μεγάλο ή μικρό, βοηθά στο να κατανοήσουμε καλύτερα τις ειδικές γεωτεχνικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, αποκαλύπτοντας, τυχόν ιδιομορφίες που μπορούν να αποβούν κρίσιμες στην όλη μετέπειτα εξέλιξη και συμπεριφορά του έργου.

Η μεγάλη πρόοδος που παρατηρήθηκε πρόσφατα στον τομέα της τεχνολογίας κατασκευής γεωφυσικών οργάνων καθώς και η ανακάλυψη νέων μεθόδων επεξεργασίας γεωφυσικών μετρήσεων, σε συνδυασμό με την χρήση ισχυρών φορητών μικροπολογιστών είχε σαν αποτέλεσμα την επιτάχυνση των διαδικασιών λήψης και επεξεργασίας των διάφορων γεωφυσικών στοιχείων. Είναι λοιπόν δυνατόν μέσα σε λίγες ώρες από την λήψη των μετρήσεων να έχει ολοκληρωθεί και η επεξεργασία των γεωφυσικών στοιχείων.

Στην εργασία αυτή δεν θα αναφερθούμε σε μία εκτενή παρουσίαση των δυνατών εφαρμογών της γεωφυσικής στα διάφορα γεωτεχνικά προβλήματα δεδομένου ότι υπάρχουν πολλά παραδείγματα την διεθνή βιβλιογραφία, αλλά θα περιορισθούμε σε δύο αντιπροσωπευτικά παραδείγματα από τον Ελληνικό χώρο.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ Ι

Πρόβλημα : Κατανόηση των αιτίων που προκάλεσαν την καθίζηση στην περιοχή θεμελίωσης του αγωγού Υλίκης - Αθηνών στην Θέση Κρεμμάδα του Ν.Βοιωτίας.

Μέθοδος : Γεωηλεκτρικές διασκοπίσεις

### Γενικά

Το κανάλι ακολουθεί στο τμήμα που μας ενδιαφέρει ένα ρήγμα, αποτέλεσμα της μεταλπικής γεωλογικής εξέλιξης της περιοχής. Το ρήγμα αυτό καθ'αυτό δεν έχει μεγάλη σημασία μια και είναι ανενεργό, όπως δείχνουν τα λεπτομερή σεισμολογικά στοιχεία στην περιοχή έρευνας. Η σημασία του για την συγκεκριμένη περίπτωση βρίσκεται στο γεγονός ότι τούτο διαχωρίζει δύο εντελώς διαφορετικούς σχηματισμούς. Ανάντη του καναλιού Νηρητικούς ασβεστόλιθους του Τριαδικού και κατάντη αυτού Νεογενείς σχηματισμούς αργιλικής σύστασης.

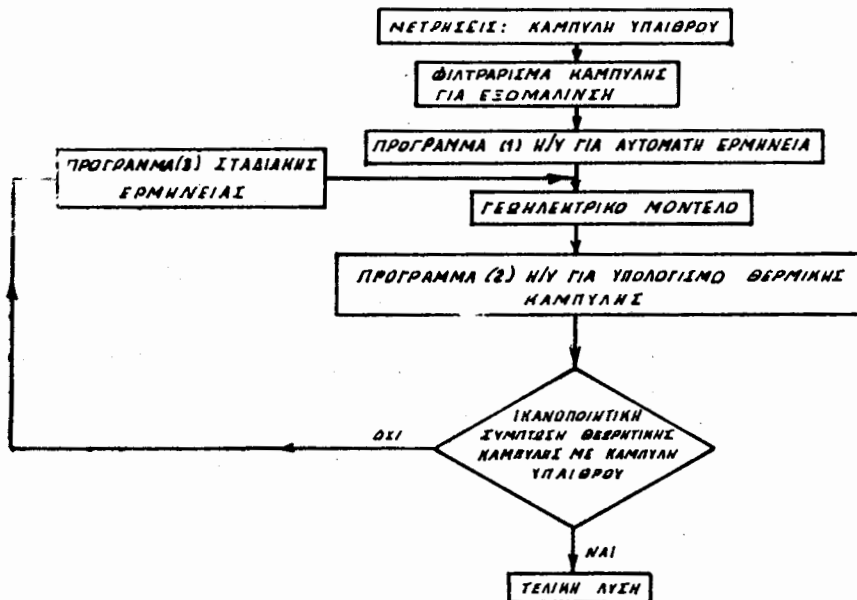
Σε πολλά σημεία παρατηρούνται τοπικά βυθίσματα του ασβεστολιθικού σχηματισμού με αποτέλεσμα την εισροή υλικού αργιλικής σύστασης. Το υλικό αυτό κατά την περίοδο των βροχών μεταπίπτει σε κατάσταση κορεσμού με αποτέλεσμα να ελαττώνεται κατά πολύ η αντοχή σε διάτμηση. Έτσι με δεδομένη την φόρτιση του υλικού από το κανάλι δημιουργούνται επιφάνειες ολίσθησης που προκαλούν κατολισθήσεις μάλλον περιστροφικής μορφής οι οποίες συμπαρασύρουν το κανάλι στην κίνησή τους με αποτέλεσμα την δημιουργία ρωγμών.

Γεωφυσικές μετρήσεις υπαίθρου και επεξεργασία των

Κατά την διάρκεια της εκτέλεσης των εργασιών υπαίθρου στην Θέση Κρεμμάδα, έγιναν 18 γεωηλεκτρικές βυθοσκοπίσεις με μέσο ανάπτυγμα γραμμής ρεύματος  $640\mu$  ( $AB/2 = 320\mu$ ).

Οι γεωηλεκτρικές βυθοσκοπίσεις έγιναν επί δικτύου και χωρίζονται σε 3 τραβέρσες Τ, Τα, Τβ παράλληλα προς το κανάλι προς τα κατάντη αυτού και με απόσταση  $50\mu$  η μια από την άλλη ενώ η απόσταση μεταξύ των βυθοσκοπίσεων ήταν  $100\mu$ .

Σε ορισμένα σημεία έγιναν επίσης και INSITOU μετρήσεις της ειδικής αντίστασης με χρήση ειδικής διάταξης. Η ερμηνεία των γεωηλεκτρικών μετρήσεων έγινε στο ύπαιθρο με φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή IBM PC και τρία διαφορετικά προγράμματα επεξεργασίας. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα ροής.

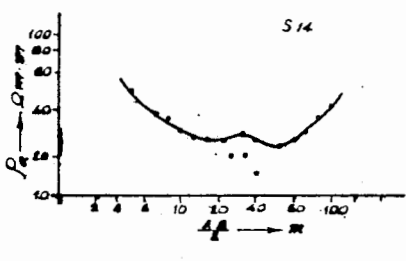
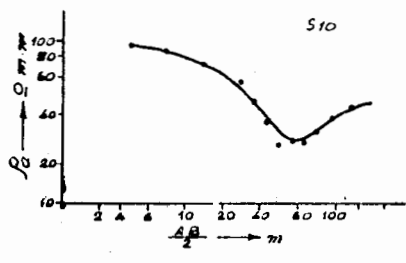
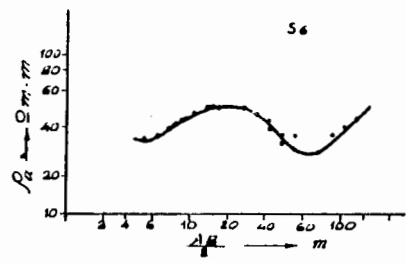
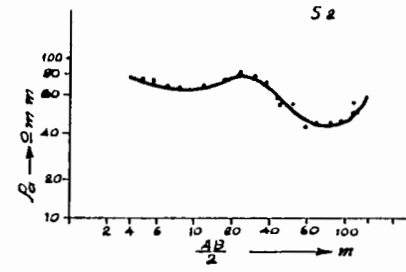


Σχ.1. Διάγραμμα ροής.

#### Αποτελέσματα

Οι μετρήσεις υπαίθρου μαζί με τις θεωρητικές καμπύλες που προέκυψαν από τα αντίστοιχα γεωηλεκτρικά μοντέλα παρουσιάζονται στο Σχ. 2. Όπως φαίνεται από τις παραπάνω καμπύλες, παρατηρείται μια κάποια διαφορά στους πρώτους κλάδους των, γεγονός που υποδηλοί την ανομοιογένεια των νεογενών σχηματισμών, ενώ το φαινόμενο αυτό δεν συναντάται στα τελευταία τμήματα των καμπυλών όπου η παρατηρούμενη άνοδος της τιμής της γεωηλεκτρικής αντίστασης οφείλεται στον υποκείμενο ασβεστόλιθο.

Επειδή το αντικείμενο της ερευνητικής εργασίας ήταν η εύρεση του ασβεστολιθικού υποβάθρου στη θέση Κρεμμάδας, δόθηκε έμφαση στον όσο το δυνατόν πιο ακριβή εντοπισμό του, παρά στην λεπτομερή περιγραφή των ενδιάμεσων στρωματογραφικών εναλλαγών



Σχ. 2. Μετρήσεις ηχηθώου και αντίστοιχες θεωρητικές καμπύλες

των υπερκλειμένων του ασβεστολίθου χαλαρών σχηματισμών.

Για καλύτερη εποπτική παρουσίαση, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό μορφή διαγράμματος τριών διαστάσεων (βλ. σχ. 3), όπου η κάθε κολώνα παριστά το αντίστοιχο πάχος των νεογενών σχηματισμών.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της ερμηνείας των μετρήσεων, το ασβεστολιθικό υπόβαθρο στο πρανές κατάντη του καναλιού, στην περιοχή που ερευνήθηκε, συναντάται σε βάθος που κυμαίνεται από 15 μ. έως 45 μ. και παρουσιάζει δύο τοπικά βυθίσματα στις θέσεις μεταξύ  $S_{100}$ ,  $S_{200}$  και στην θέση  $S_{500}$  με μέσα βάθη 33 μ. και 42 μ. αντίστοιχα.

Τα βυθίσματα αυτά εντοπίστηκαν και στις άλλες δύο τραβέρρες  $T_{\alpha}$  και  $T_{\beta}$  που έγιναν χαμηλότερα στο πρανές και πρέπει να οφείλονται σε παλιά ρήγματα του υποβάθρου που στην συνέχεια διευρύνθηκαν με την δράση του νερού.

Είναι φανερό ότι η μορφολογία της άνω επιφάνειας του ασβεστολιθικού υποβάθρου υποβοηθεί σε ορισμένες θέσεις λόγω των δημιουργουμένων μεγάλων κλίσεων την ολίσθηση των υπερκλειμένων χαλαρών σχηματισμών.

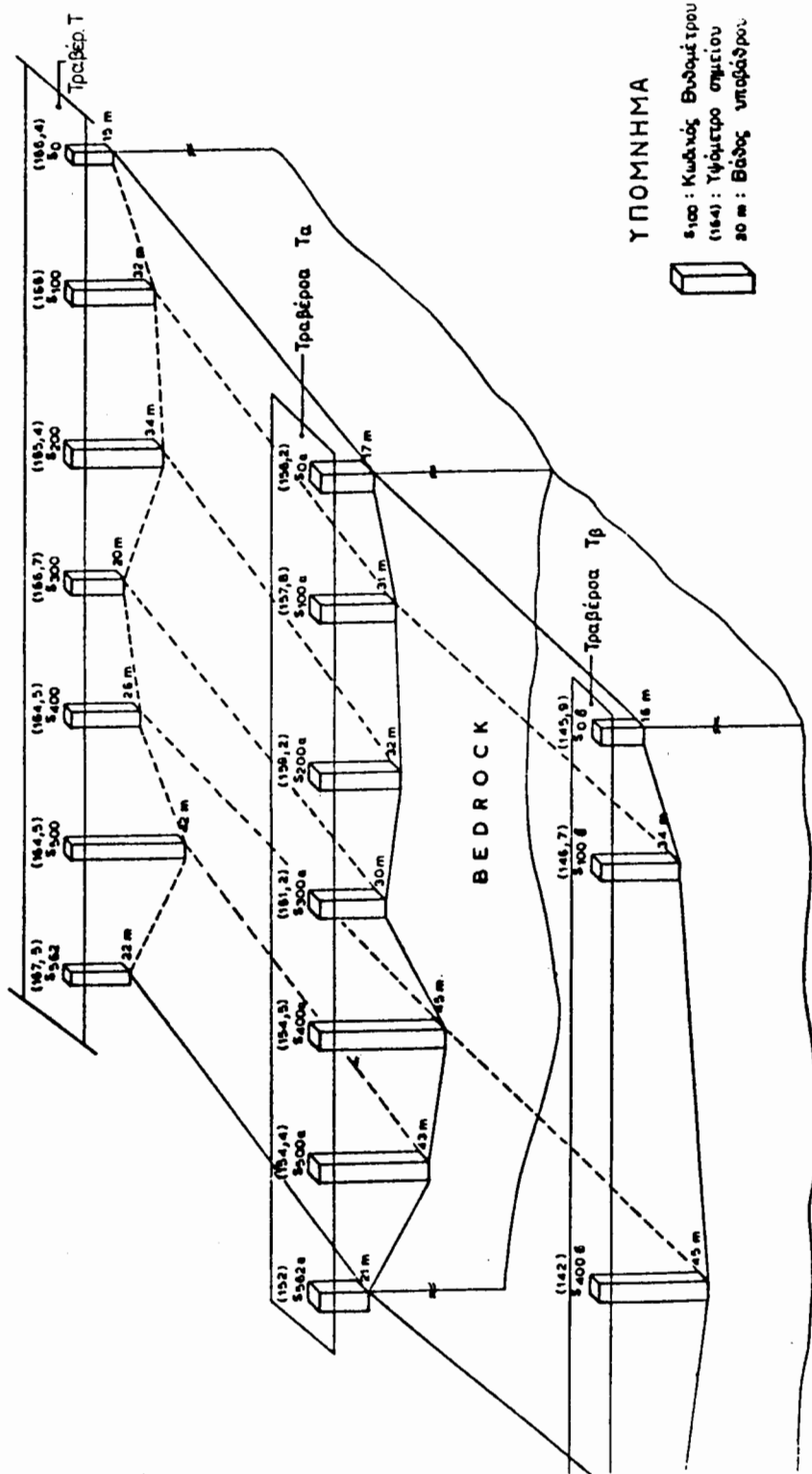
Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις κλίσεις που βρέθηκαν για το υπόβαθρο με κατεύθυνση κάθετη προς το κανάλι στις αντίστοιχες θέσεις των γεωηλεκτρικών βυθοσκοπίσεων για την τομή T.

ΠΙΝΑΚΑΣ I

ΘΕΣΗ	ΚΛΙΣΗ %
S0	4
S100	-5
S200	-4
S300	20
S400	38
S500	2
S562	-2

Αθήνα

Τανάγρα



Σχ. 3. Διάγραμμα τριών διαστάσεων

Αρνητικές τιμές υποδηλούν ότι το ασβεστολιθικό υπόβαθρο ανέρχεται όσο απομακρυνόμαστε από το κανάλι.

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα, οι μεγαλύτερες κλίσεις παρατηρούνται στην περιοχή μεταξύ  $S_{300}$  και  $S_{400}$  γεγονός το οποίο συμπίπτει απόλυτα με τις παρατηρούμενες εκτεταμένες καθιζήσεις στο πρανές και στον δρόμο δίπλα στο κανάλι.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που προέκυψε από την ανάλυση των μετρήσεων είναι η ύπαρξη ενός στρώματος πολύ μικρής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που υπέρκειται του ασβεστολίθου. Η χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση του στρώματος αυτού υποδηλώνει ότι είναι κορεσμένο με νερό γεγονός το οποίο διευκολύνει την δημιουργία επιφάνειας ολίσθησης στην επαφή χαλαρών σχηματισμών βράχου.



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΙΙ

Πρόβλημα : Εύρεση της δομής και των ελαστικών σταθερών του υ-πεδάφους , στην θέση θεμελίωσης του φράγματος του Αχελώου στην περιοχή Μουζάκι Ν. Τρικάλων, με σκοπό την κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς της περιοχής.

Μέθοδος : Γεωσεισμικές διασκοπήσεις με εγκάρσια και διαμήκη κύματα.

### Γενικά

Τα πλάτη των εδαφικών κινήσεων που παρατηρούνται σε μια περιοχή κατά την διάρκεια ενός σεισμού , επηρεάζονται πολύ από τα πάχη και τις ελαστικές παραμέτρους των διάφορων γεωλογικών σχηματισμών που επικρατούν στην εν λόγω περιοχή.

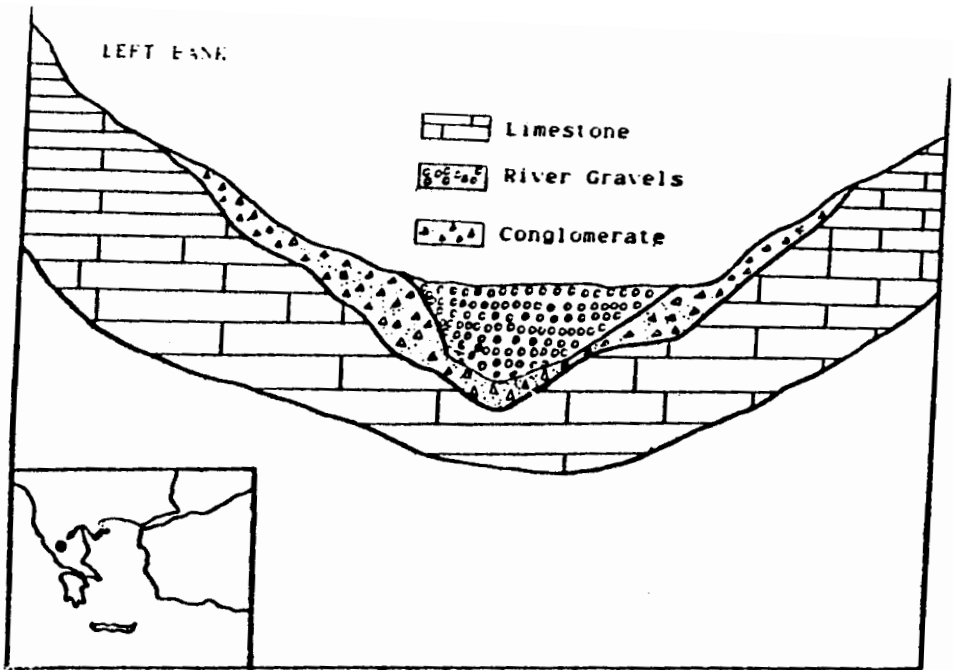
Δεδομένου δε , ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τόσο τα πάχη όσο και οι διάφορες φυσικές παράμετροι των παραπάνω σχηματισμών μπορούν να προσδιορισθούν πολύ εύκολα με την χρήση γεωφυσικών μεθόδων, είναι προφανές ότι η χρήση τέτοιων μεθόδων σε περιοχές εκτέλεσης κρίσιμων γεωτεχνικών έργων επιτρέπει όχι μόνο την πιο σωστή εκτέλεση των εργασιών θεμελίωσης αλλά και μια πρώτη εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής στην συγκεκριμένη θέση και την αντίστοιχη προσαρμογή των διάφορων συντελεστών κατασκευής του έργου, ώστε να τηρούνται οι από τον νόμο προβλεπόμενοι κανόνες ασφάλειας.

### Γεωλογία της Περιοχής

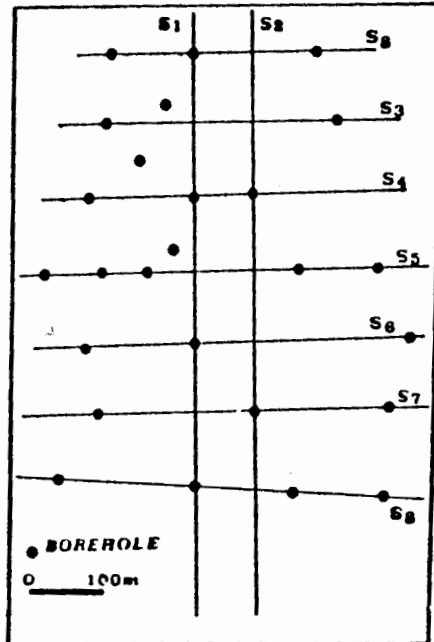
Η περιοχή που μελετήθηκε και αφορά τη θέση του φράγματος είναι το στενό που ενώνει τη λεκάνη του Πάμισου (παραπόταμος του Αχελώου) με το Μουζάκι.

Στην περιοχή αυτή απαντούν αλπικοί σχηματισμοί, που δομούν τους ορεινούς όγκους και τις παρυφές τους προς τον Πάμισο ποταμό και μεταλλικές αποθέσεις που αποτελούνται από πλευρικά κορήματα και αποθέσεις του ποταμού.

Οι μεταλλικές αποθέσεις που απαντούν στην περιοχή αυτή διακρίνονται κυρίως (Σχ. 4) σε :



Σχ.4. Γεωλογική τομή της περιοχής μελέτης



Σχ. 5. Σεισμικές οδεύσεις

α) Πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων, κυρίως από άσβεστολιθικές και λιγότερο κερατολιθικές λατύπες ποικίλου μεγέθους, που είναι κατά θέσεις ασθενώς ως μέτρια συγκολλημένες με ανθρακικό κατά κανόνα υλικό.

β) Αποθέσεις κοίτης και αναβαθμίδων του Πάμισου από κροκαλολατύπες, ποικίλου μεγέθους και σύστασης, άμμους και αργιλλοχώματα οι οποίες κατά θέσεις εναλλάσσονται εξαιτίας κυρίως της αλλαγής της ροής του ποταμού

#### Γεωφυσικές μετρήσεις υπαίθρου

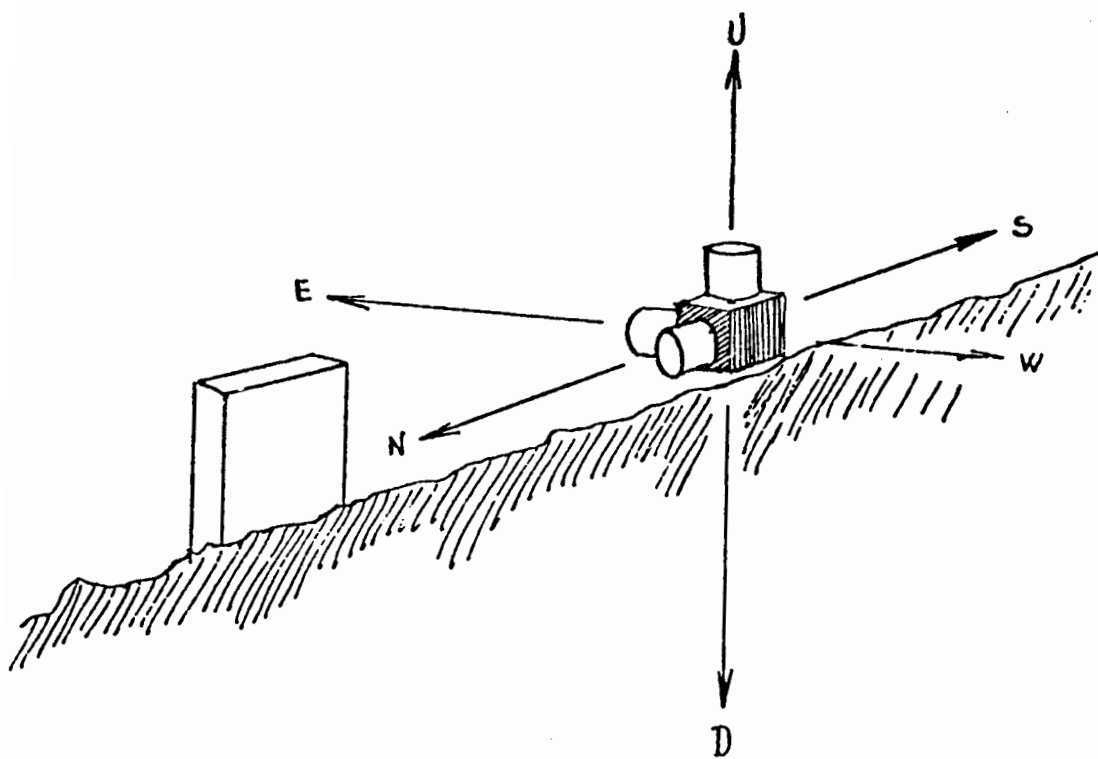
Κατά την διάρκεια των εργασιών υπαίθρου έγιναν 9 γεωσεισμικές οδεύσεις (Σχ. 5) συνολικού μήκους 5.4 ΚΜ. Από αυτές δύο τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν του άξονα του ρέματος του ποταμού και οι υπόλοιπες κάθετα σαυτόν με μέση απόσταση 100Μ μεταξύ τους. Οι καταγραφές έγιναν με όργανο τύπου ABEM TRIO 12 καναλιών. Η κάθε σεισμική τραβέρσα αποτελείται από ένα αριθμό αναπτυγμάτων 12 γεωφώνων το καθένα, με απόσταση μεταξύ των γεωφώνων 10 Μ και 20 Μ ανάλογα και επικάλυψη 2 γεωφώνων από ανάπτυγμα σε ανάπτυγμα. Σε κάθε ανάπτυγμα έγιναν 7 εκρήξεις.

Με την βοήθεια μικρότερων αναπτυγμάτων σε ορισμένα σημεία κατά μήκος των σεισμικών τομών και με τη χρήση συσκευής πίπτοντος βάρους προσδιορίστηκε η ταχύτητα των επιφανειακών αποθέσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια.

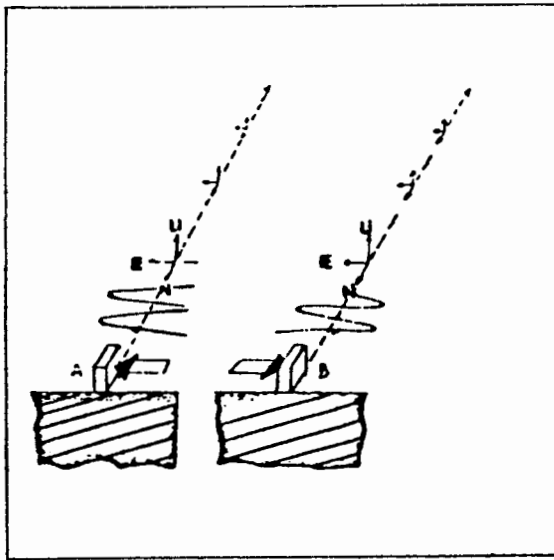
Εκτός από τις πιο πάνω μετρήσεις, σε συγκεκριμένες θέσεις της περιοχής έγιναν μετρήσεις σεισμικών εγκαρσίων κυμάτων με χρήση ειδικής διάταξης.

Η γένεση εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων επιτεύχθηκε με πλευρικά κτυπήματα εύλινης δοκού σταθερά πακτωμένης στο έδαφος με γύψο. Η καταγραφή των κυμάτων έγινε με χρήση γεωφώνων 4.5 ΗΖ σε 3 συνιστώσες Σχ. 6. Η διέγερση της δοκού έγινε με δύο αντιδιαμετρικά κτυπήματα με σφύρα με κατεύθυνση κάθετη προς την ευθεία του αναπτύγματος, με σκοπό την δημιουργία εγκάρσιων κυμάτων με διαφορά φάσης 180 και τον ακριβή υπολογισμό του χρόνου άφιξης Σχ. 7 & 8.

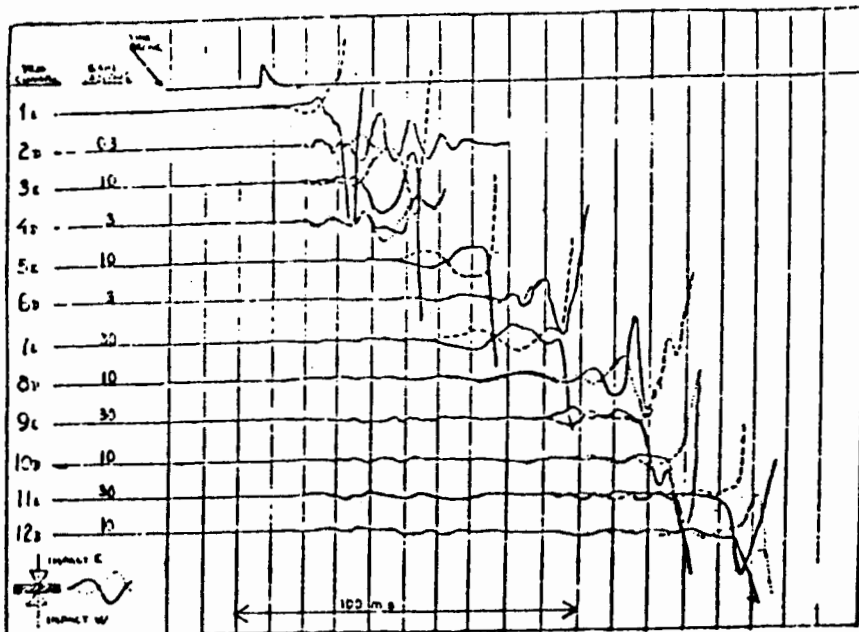
Τα αποτελέσματα της γεωσεισμικής έρευνας παρουσιάζονται στο Σχ. 4, όπου δίνεται ένα γενικό σκαρίφημα της δόμης του υπεδάφους στην θέση θεμελίωσης του φράγματος. Οι αντί-



Σχ.6. Σχηματική παράσταση γεωφώνων τριών συνιστωσών



Σχ.7. Δημιουργία εγκάρσιων κυμάτων με διαφορά φάσης  $180^\circ$



Σχ.8. Παράδειγμα σεισμικής καταγραφής

στοιχες σεισμικές ταχύτητες των γεωλογικών σχηματισμών δίνονται στον πίνακα II.

### Μαθηματικό μοντέλο της περιοχής

Η ελαστοδυναμική συμπεριφορά μιας περιοχής για την περίπτωση οριζόντια πολωμένων εγκάρσιων κυμάτων περιγράφεται από την σχέση (Brebbia, 1977).

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial \psi^2} + \left( \frac{\omega}{\beta_j} \right)^2 u_j + \Lambda^j = 0$$

όπου  $\omega$  η κυκλική συχνότητα και  $\beta$  η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων στο στρώμα 3 .

Η χρήση αναλυτικών μεθόδων για την λύση της παραπάνω εξίσωσης δεν ενδείκνυται για την συγκεκριμένη περίπτωση λόγω της πολυπλοκότητας της περιοχής , γιαυτό υιοθετήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

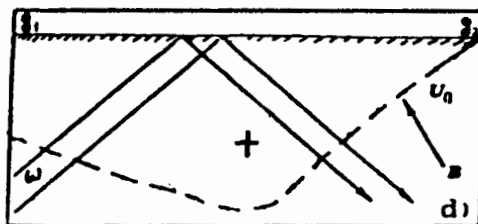
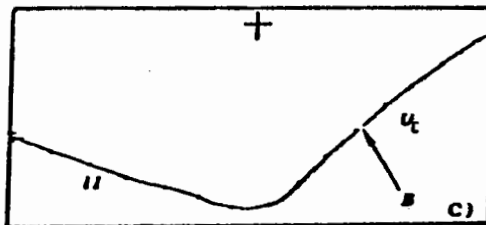
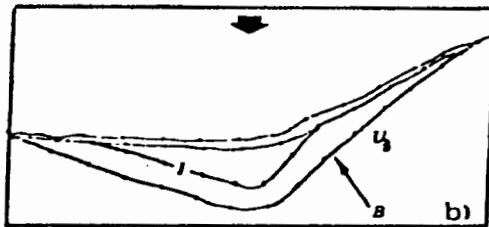
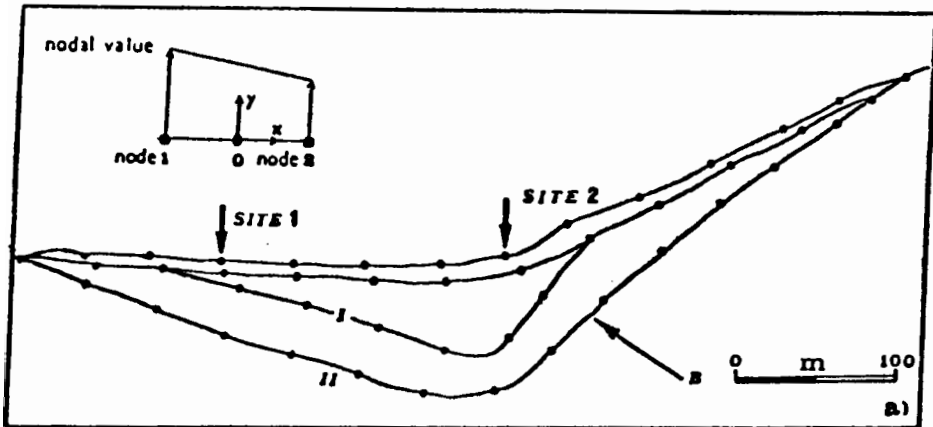
Χρησιμοποιώντας το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάζεται στο Σχ. 9 υπολογίστηκε η μεταβολή του συντελεστή ενίσχυσης σε διάφορα σημεία κατά μήκος της κοιλάδας για γωνίες πρόσπτωσης  $0^\circ$  και  $90^\circ$ .

Στο Σχ. 10 φαίνονται οι μεταβολές του συντελεστή ενίσχυσης, Amplification Factor, σε δύο σημεία . Η παρατηρούμενη αύξηση στην θέση Β οφείλεται στο σχετικά μεγάλο πάχος των αλουβίων στην συγκεκριμένη θέση.

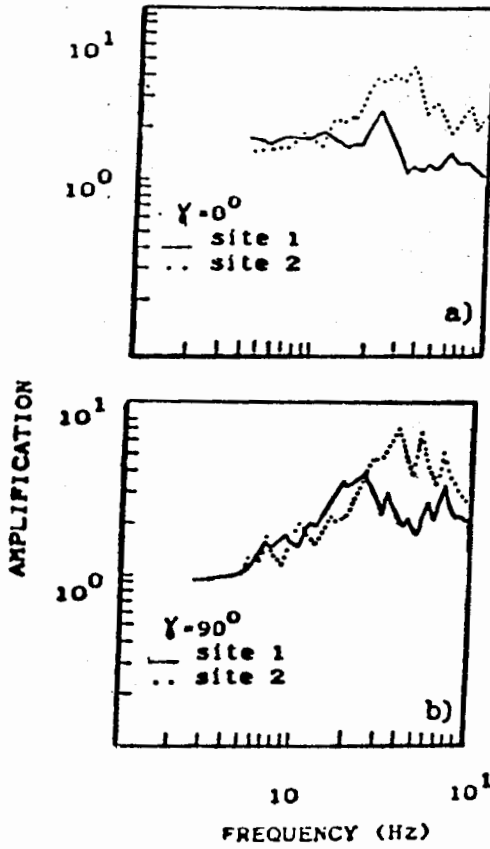
Τέλος στο Σχ. 11 φαίνεται η μεταβολή της μέγιστης τιμής του συντελεστή ενίσχυσης κατά μήκος της κοιλάδας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙ

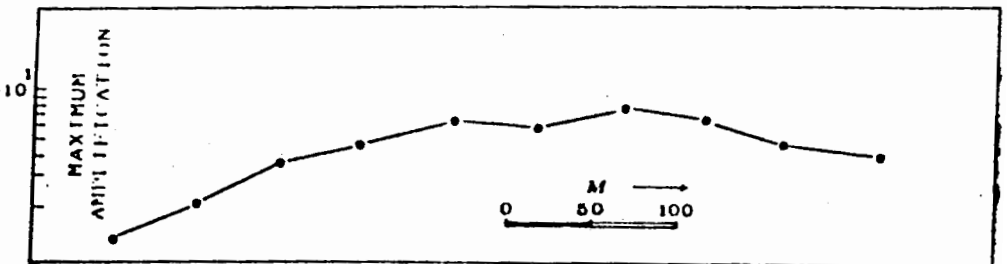
	P - wave	S - wave (km/s)
στρώμα 1	0.8	0.4
στρώμα 2	1.5	0.8
στρώμα 3	2.3	1.3
στρώμα 4	3.8	2.2



Σχ. 9. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων



Σχ.10. Μεταβολές συντελεστή ενίσχυσης



Σχ.11. Μεταβολή μέγιστης τιμής του συντελεστή ενίσχυσης κατά μήκος της κοιλάδας.



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάσθηκαν δύο παραδείγματα από την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στην επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων.

Το πρώτο παράδειγμα έδειξε πως μια σειρά από γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις αποκάλυψε τα αίτια που προκάλεσαν την κατολίσθηση στο πρηνές θεμελίωσης του αγωγού Υλίκης Αθηνών.

Το δεύτερο παράδειγμα είχε σχέση με την εφαρμογή της μεθόδου σεισμικής διάθλασης στην περιοχή θεμελίωσης του φράγματος του Αχελώου, και αφού βρέθηκαν τα πάχη των διάφορων αλυσιακών σχηματισμών υπολογίστηκαν οι συντελεστές σεισμικής ενίσχυσης.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η ορθολογιστική χρήση γεωφυσικών μεθόδων πριν από κάθε γεωτεχνικό έργο, μεγάλο ή μικρό, βοηθά στο να κατανοήσουμε καλύτερα τις ειδικές γεωτεχνικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, αποκαλύπτοντας τυχόν ιδιομορφίες που μπορούν να αποβούν κρίσιμες στην όλη μέτρητα εξέλιξη και συμπεριφορά του έργου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Biebbia C. 1977. The boundary element method Prentice Hall Publ. London 198 pp.