

Η ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΣΑΝ ΜΕΣΟ ΣΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΚΕΝΩΝ

Από την

ΜΑΡΙΝΑ ΠΑΠΑΙΩΑΝΝΟΥ

ABSTRACT

One of the greatest exploration problems has always been the detection of underground voids. They usually occur in many applications such as geotechnical and engineering, hydrogeological, archaeological, speleological etc.. The geophysical approach of such cases, is increasingly appreciated and used. The various techniques presented and evaluated are, resistivity, gravity, seismic, electromagnetic and ground penetrating radar.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανίχνευση και ο εντοπισμός υπογείων κενών ήταν και παραμένει ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα πάρα πολλών εφαρμογών. Οι συνθετέστερες είναι, γεωτεχνικές, μηχανικές, υδρογεωλογικές αρχαιολογικές, σπηλαιολογικές κλπ. Η χρήση γεωφυσικών τεχνικών όπως ηλεκτρικές, βαρυτικές, σεισμικές, ηλεκτρομαγνητικές, γεωραντάρ, ενισχύεται συνεχώς, αφού είναι η μόνη μη καταστροφική λύση στα προβλήματα αυτά.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη και η αυξανόμενη επιτυχία εφαρμογής γεωφυσικών μεθόδων και τεχνικών σε περιπτώσεις που σχετίζονται με την ανίχνευση υπογείων κενών, είναι ένα γεγονός το οποίο ενισχύεται από την ανάγκη για χρήση μη καταστροφικής έρευνας.

Η διαγνωστική ικανότητα της γεωφυσικής στην περίπτωση των κενών εξαρτάται κυρίως από το κατά πόσο το κενό - στόχος διαφοροποιείται ως προς τις φυσικές του ιδιότητες από το περιβάλλον πέτρωμα. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι: ηλεκτρικές, σεισμικές, βαρυτικές, ηλεκτρομαγνητικές και το γεωραντάρ. Σε συνδυασμό μεταξύ τους όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν, μπορούν να δώσουν αποτελέσματα με υψηλό βαθμό επιτυχίας.

2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΚΕΝΩΝ.

Το πρόβλημα που προκύπτει από την ύπαρξη υπογείων κενών, είτε αυτά είναι φυσικά είτε τεχνητά, είτε είναι πληρωμένα με αέρα ή με άλλο υλικό, παρεμβαίνει στην διεξαγωγή πολλών έργων. Μία μεγάλη κατηγορία είναι οι γεωτεχνικές εφαρμογές. Η καθίζηση του εδάφους λόγω ύπαρξης κενών είναι συνηθισμένο φαινόμενο, το οποίο τις περισσότερες φορές γίνεται φανερό, αφού επιβαρυνθεί το έδαφος με διάφορα φορτία. Κατασκευές όπως αυτοκινητόδρομοι, φράγματα, βιομηχανικές μονάδες ή ακόμα και σταθμοί ατομικής ενέργειας κινδυνεύουν ανά

* Geophysics as a mean of detecting underground voids

** M.Papaioannou, University of Patras, sector of Geology, RIO, PATRA

πάσα στιγμή από την ύπαρξη κενών. Η δε ανακάλυψή τους κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του έργου ή και μετά την αποπεράτωσή του, συνήθως συνεπάγεται μεγάλων οικονομικών επιβαρύνσεων ή και αναγκαστικής εγκατάλειψης τους.

Μία άλλη κατηγορία, είναι οι υδρογεωλογικές εφαρμογές, όταν π.χ. παρατηρείται το φαινόμενο πλημμύρας σε περιπτώσεις που το υλικό είναι αδιαπέρατο, με πολλά επερχόμενα προβλήματα. Επίσης σε όλες τις υδρογεωλογικές μελέτες είναι απαραίτητη η εκ των προτέρων ανίχνευση τυχόν υπογείων κενών. Η αρχαιολογία είναι ένας ακόμα τομέας στον οποίο ο εντοπισμός κενών είναι καθοριστικής σημασίας. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους.

Είτε γιατί το κενό είναι και το ζητούμενο έρευνας, όπως τάφοι, κτίρια κλπ., είτε γιατί η ύπαρξη κενών θέτει σε κίνδυνο αρχαιολογικά μνημεία ώστε καθορίζει και τον τρόπο διάσωσής τους. Στην σπηλαιολογία, η ανίχνευση υπογείων κενών είναι μάλλον συνώνυμη με το πρώτο τουλάχιστον στάδιο της επιστήμης αυτής, πόσο μάλλον όταν με την βοήθεια της γεωφυσικής είναι δυνατή μιας μορφής χαρτογράφηση και αξιολόγησή των σπηλαίων.

Ακόμη, πολλά γεωλογικά προβλήματα συνδέονται με κενά όπως δόμοι άλατος, καρστικά κενά, κενά από ροή λάβας κλπ.. Στις περιπτώσεις αυτές οι έρευνες είναι μεγάλης κλίμακας, όπως είναι και οι στόχοι, και στις γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται δίνεται ιδιαίτερη σημασία στο βάθος στο οποίο μπορεί να φτάσει η διαγνωστική ικανότητα των μεθόδων αυτών, παρά στη διακριτική τους ικανότητα, πράγμα που αντιθέτως είναι πολύ σημαντικό όταν οι στόχοι είναι μικροί σε μέγεθος. Η εξερεύνηση πετρελαίου είναι ένα ακόμα γεωλογικό πρόβλημα, το οποίο μπορεί να συνδέεται στενά με την ύπαρξη κενών.

Τέλος έχουν υπάρξει και ιδιαίτερες περιπτώσεις όπου η ανίχνευση κενών μπορεί να έχει εφαρμογή. Οι περιπτώσεις αυτές αναφέρονται στην τυχόν ύπαρξη τούνελ ή άλλου είδους κενών για πολιτικούς ή στρατιωτικούς λόγους.

3. ΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΚΕΝΩΝ.

3.1. Ηλεκτρικές μέθοδοι

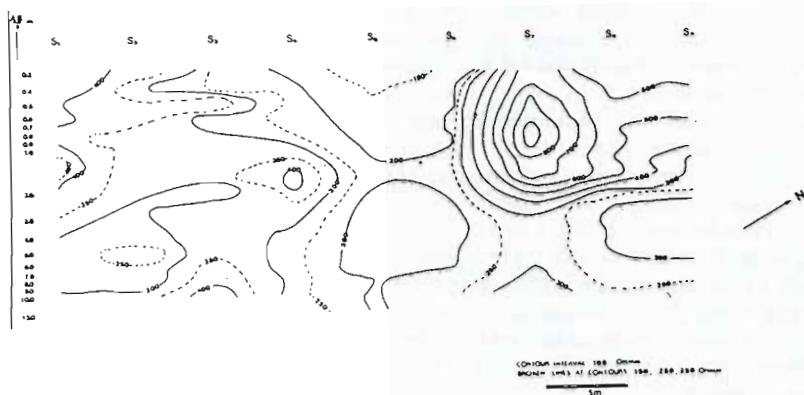
Οι ηλεκτρικές μέθοδοι είναι από τις πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση κενών. Οι διάφορες διατάξεις που μπορούν και έχουν εφαρμοστεί είναι:

- Μενονωμένες βαθσκοπήσεις οι οποίες δίνουν μόνον εκτίμηση βάθους
- Οι διάφορες διατάξεις διπόλων με τις οποίες παρέχονται εκτιμήσεις βάθους και μεγέθους
- Διάταξη Wenner και offset Wenner με εκτίμηση βάθους και μεγέθους
- Ηλεκτρική τομογραφία με εκτίμηση βάθους, μεγέθους ακόμα και σχήματος.

Η επιλογή της διατάξεως εξαρτάται από την συγκεκριμένη κάθε φορά περίπτωση, δηλαδή από το βάθος του αναμενόμενου στόχου, το μέγεθος, το σχήμα του, το υλικό πλήρωσής του, το περιβάλλον πέτρωμα κλπ.. Η μέθοδος Wenner πχ., είναι λιγότερο ευαίσθητη από τις άλλες για τοπικά φαινόμενα.

Ενας παράγοντας που επιτρέπει να βαθμονομηθούν οι ηλεκτρικές διατάξεις είναι το όριο ανίχνευσης h/R , δηλαδή ο λόγος του βάθους του στόχου προς την ακτίνα του στόχου. Για τις διατάξεις Wenner και Schlumberger το όριο αυτό είναι ίσο με 3, ενώ για την διάταξη διπόλου-διπόλου ανεβαίνει στο 2.

Ενα παράδειγμα ψευδοτομής από ηλεκτρικές βαθσκοπήσεις φαίνεται στην εικόνα 1. Στην τομή αυτή και κάτω από την βαθσκοπήση S7 διαγράφεται πολύ καλά μία ανωμαλία υψηλών τιμών, η οποία οφείλεται σε κενό (Parapanopoulos et al., 1985).



Εικόνα 1. Ψευδοτομή φαινόμενης αντιστάσεως σχηματιζόμενη από τις βαθυσκοπήσεις S1 έως και S9. Η ανωμαλία υψηλών τιμών κάτω από την βαθυσκόπηση S7 οφείλεται στην ύπαρξη κενού. (Parasganiopoulos et al. 1985).

3.2. Βαρυτικές μέθοδοι

Ενας άλλος τύπος γεωφυσικών μεθόδων που εφαρμόζεται στην ανίχνευση υπογείων κενών είναι οι βαρυτικές μέθοδοι οι οποίες βασίζονται στην διαπίστωση τοπικών αρνητικών βαρυτικών ανωμαλιών. Ο σχεδιασμός της έρευνας στην περίπτωση των βαρυτικών μετρήσεων πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός, λόγω του θορύβου που παρουσιάζεται κυρίως από διακυμάνσεις στην γεωλογία και στην τοπογραφία. Αυτό έχει σαν συνέπεια να παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις στο μέγεθος της πραγματικής ανωμαλίας οι οποίες διορθώνονται αν:

- οι μετρήσεις παίρνονται σε γραμμές με κοντινά τοποθετημένους σταθμούς.
- οι υψομετρικές διαφορές μετρούνται με ακρίβεια 0.01 ft.

Ένα παράδειγμα βαρυτικών ανωμαλιών προερχόμενων από την ύπαρξη κενών, φαίνεται στην εικόνα 2. Η πρώτη ανωμαλία οφείλεται σε κενό γεμάτο με αέρα και η δεύτερη σε κενό γεμάτο με νερό. Και οι δύο στόχοι έχουν το ίδιο μέγεθος και βρίσκονται στο ίδιο βάθος. Η απόλυτη τιμή της έντασης της ανωμαλίας στην πρώτη περίπτωση είναι διπλάσια από αυτή της δεύτερης περίπτωσης. (Owen, 1983). Ορισμένες ενδεικτικές τιμές διαφοράς της τιμής της βαρύτητας του κενού από την τιμή του μέσου είναι:

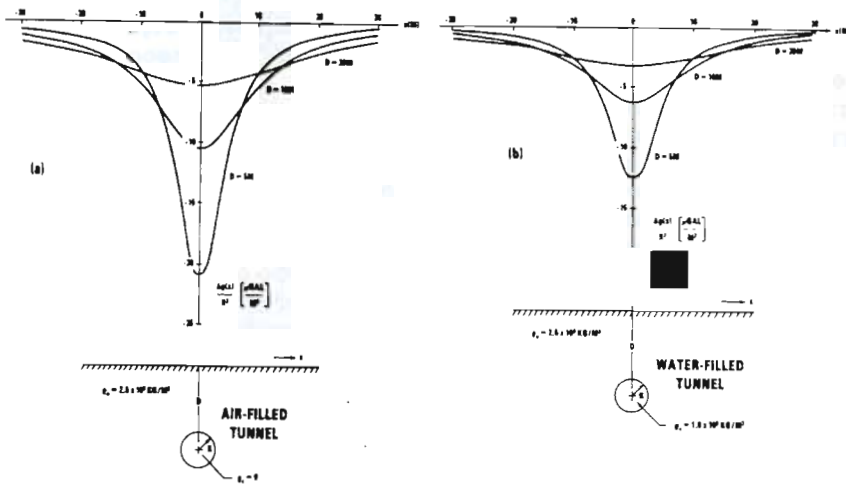
Κενό με αέρα $\Delta\rho = -2.5 \times 10 \text{ Kg/m}$

Κενό με νερό $\Delta\rho = -1.5 \times 10 \text{ Kg/m}$

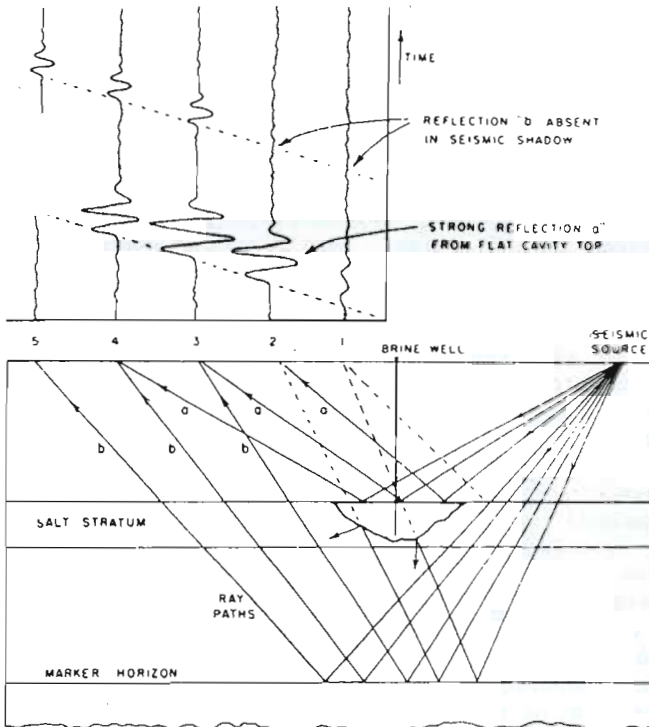
Κενό με χαλαρό υλικό και λάσπη $\Delta\rho = -1.0 \times 10 \text{ Kg/m}$ (Owen, 1983)

3.3. Σεισμικές μέθοδοι

Η κύρια σεισμική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση υπογείων κενών είναι η σεισμική διάθλαση. Έχουν συχνά παρατηρηθεί σε σεισμικά προφίλ, σκιές από στρώματα υψηλών ταχυτήτων κάτω από ορίζοντες ορυχείων. Η επιτυχία των σεισμικών μεθόδων εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του κενού που βρίσκεται υπό έρευνα. Για μικρού μεγέθους κενά που συνήθως βρίσκονται μέσα σε αποασθραμμένα ή διαταραγμένα πετρώματα, χρησιμοποιούνται και μέθοδοι σεισμικής ανάκλασης υψηλής διακριτικότητας. Στην εικόνα 3, φαίνεται η σεισμική σκιά στο σεισμόγραμμα που οφείλεται στην ύπαρξη του κενού μέσα στο στρώμα άλατος (Cook, 1964). Ακόμα διακρίνεται πολύ καθαρά η ισχυρή ανάκλαση που οφείλεται στο επίπεδο πάνω μέρος του κενού.



Εικόνα 2. Βαρυτικές ανωμαλίες που οφείλονται σε τούνελ γεμάτο με αέρα και γεμάτο με νερό (Owen, 1983).



Εικόνα 3. Σεισμόγραμμα ιδανικής κατάστασης κενού, στο οποίο φαίνεται η σεισμική σκιά που παρουσιάζεται λόγω της ύπαρξης του κενού (Cook, 1964).

3.4 Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι για την ανίχνευση κενών, βασίζονται στην μεγάλη διαφορά που έχει ένα κενό με το περιβάλλον πέτρωμα, όσον αφορά στις ηλεκτρικές τους ιδιότητες (διηλεκτρική σταθερά κλπ.).

Δύο από τις σημαντικότερες και πιο αποτελεσματικές τέτοιες μεθόδους είναι το γεωραντάρ και το Sirotem.

Το γεωραντάρ βασίζεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικού κύματος από έναν πομπό και τη λήψη του από έναν δέκτη. Το αποτέλεσμα είναι κατακόρυφες τομές που παρουσιάζουν τις διαφορές στις διηλεκτρικές σταθερές των υλικών.

Ένα παράδειγμα κενού είναι και αυτό της εικόνας 4. Σε βάθος 1.5 μέτρων περίπου διακρίνεται η ηλεκτρομαγνητική ταυτότητα ενός κενού αγωγού διαμέτρου περίπου 1 μέτρου. (Παπαμαρινόπουλος, et al. 1995, υπό δημοσίευση).

Με το Sirotem, οι μετρήσεις γίνονται σε κλειστό σχήμα (loop), από το οποίο και εξαρτάται το βάθος ανίχνευσης στο οποίο μπορεί να φτάσει η μέθοδος.

Η εικόνα 5, είναι ένας οριζόντιος χάρτης ο οποίος δημιουργήθηκε αποκτώντας τα δεδομένα σε σχήμα 1 μέτρου και 5 στροφών. Στον χάρτη αυτό φαίνονται πολλές ανωμαλίες που οφείλονται σε κενούς αγωγούς και χώρους διαφόρων υλικών, μεγεθών και βάθους. Τα υλικά αυτά είναι μεταλλικά, αλουμίνια, πλαστικά κλπ.. Ανάλογη με τις παραπάνω παραμέτρους είναι και η ένταση των ανωμαλιών.

4. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΕΝΩΝ ΜΕΣΩ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής έρευνας για την ανίχνευση κενών, γίνεται συνήθως με γεωτρήσεις. Πολλές φορές όμως η γεώτρηση χάνει τον στόχο και τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιπλέον έρευνα ώστε ο στόχος να εντοπιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Όλες οι γεωφυσικές μέθοδοι που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε γεωτρήσεις.

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις μπορούν να γίνουν από την γεώτρηση στην επιφάνεια, από την επιφάνεια στην γεώτρηση, από γεώτρηση σε γεώτρηση και τέλος μέσα στην ίδια γεώτρηση.

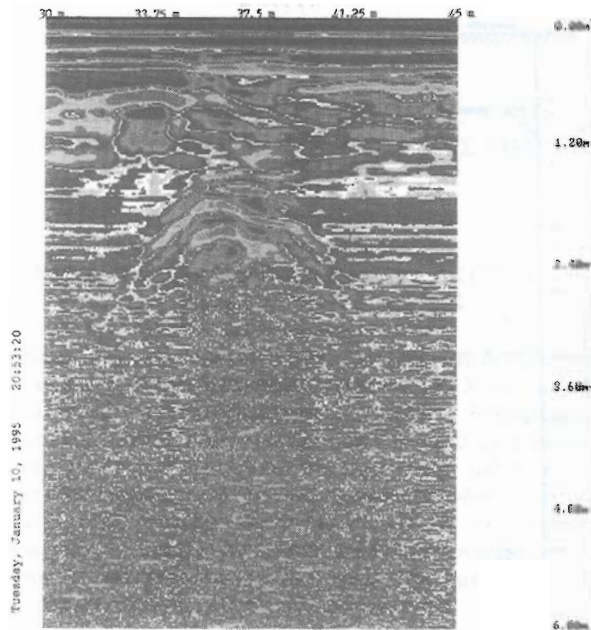
Οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις γίνονται ανάμεσα σε δύο γεωτρήσεις. Ένα κενό πληρωμένο με αέρα, νερό ή λάσπη που βρίσκεται ανάμεσα στις γεωτρήσεις παρουσιάζει πολύ μεγάλη διαφορά στις ηλεκτρικές ιδιότητές του οι οποίες κυμαίνονται από 25:16 σε 80:9.

Στις σεισμικές μεθόδους η εκπομπή γίνεται είτε από γεώτρηση σε γεώτρηση είτε από γεώτρηση στην επιφάνεια. Όταν χρησιμοποιούνται πολλές γεωτρήσεις σε διαφορετικούς προσανατολισμένα επίπεδα, τότε μπορεί να γίνει προσδιορισμός του μεγέθους και του σχήματος του κενού.

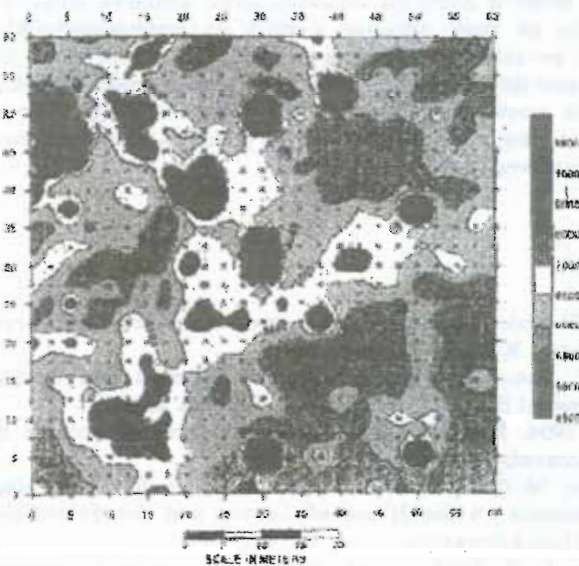
Στις περιπτώσεις ορυχείων δημιουργείται μια ζώνη θρυμματισμού γύρω από τις στοές, η οποία αυξάνει την δυνατότητα ανίχνευσης των κενών γιατί ουσιαστικά μεγαλώνει το μέγεθός τους.

Τέλος οι βαρυτικές μετρήσεις μπορούν να γίνουν μέσα σε γεώτρηση χρησιμοποιώντας το ειδικό βαρυτόμετρο Lacoste & Romberg το οποίο μπορεί να πάρει μετρήσεις σε γεωτρήσεις με σφάλμα μικρότερο από $\pm 5 \mu\text{gals}$. Οι βαρυτικές μετρήσεις σε γεωτρήσεις επηρεάζονται από τοπογραφικό και επιφανειακό θόρυβο και περισσότερο από αμφιβολίες για το ακριβές βάθος του οργάνου και την τυχόν απόκλιση της γεώτρησης από την κατακόρυφο.

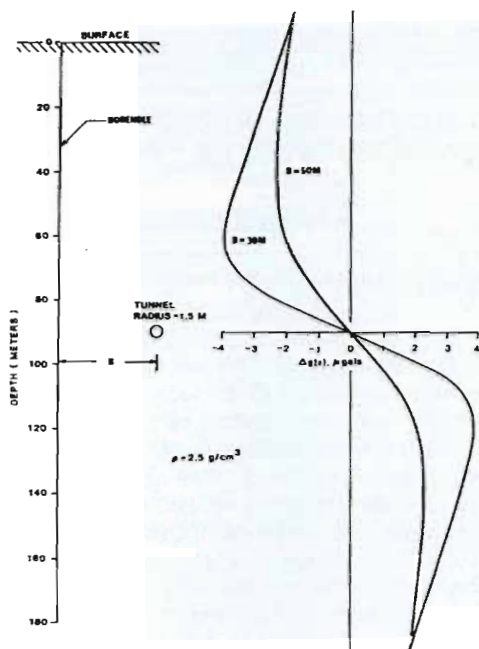
Στην εικόνα 6. παρουσιάζεται μία βαρυτική ανωμαλία από μετρήσεις μέσα σε γεώτρηση που οφείλεται σε τούνελ ακτίνας 1.5 μέτρων, σε βάθος 90 μέτρων περίπου (Owen,1983).



Εικόνα 4. Κατακόρυφη τομή γεωραντάρ με την ηλεκτρομαγνητική ταυτότητα ενός κενού αγωγού.



Εικόνα 5. Ηλεκτρομαγνητικός χάρτης που δημιουργήθηκε με SIROTEM και έχει καταγράψει ανωμαλίες που οφείλονται σε κενά.



Εικόνα 6. Βαρυτική ανωμαλία σε γεώτρηση λόγω τούνελ σε βάθος 90 μ.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η γεωφυσική είναι η μόνη μη καταστροφική επιλογή στην ανίχνευση υπογείων κενών. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι πολλοί και εξαρτώνται από το είδος του κενού και τις ιδιότητές του. Πολλές γεωφυσικές μεθοδολογίες έχουν ήδη υπάρξει επιτυχημένες στο πρόβλημα αυτό. Από την άλλη μεριά η επιτυχία αυτή οδηγεί σε μεγαλύτερη ανάπτυξη του κλάδου αυτού της επιστήμης ώστε να οδηγηθεί σε εξειδίκευση μεθοδολογιών για την αντιμετώπιση του προβλήματος ανίχνευσης υπογείων κενών.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cook, J.C., 1965, Seismic mapping of underground cavities using reflection amplitudes. *Geophysics* 30(4), p. 527-538.
- Owen, T.E., 1983, Detection and mapping of Tunnels and Caves, *Developments in Geophysical Exploration Methods-5*. Fitch publ.
- GeoInstruments, 1994, Sirotem detects non magnetic objects at Stanford University Environmental test site.
- Papamarinopoulos, St. P., Tsokas, G. N. & Williams, H., 1985, Magnetic and Electric Measurements on the Island of Lesbos and the detection of Buried ancient relics, *Geoexploration*, 23 p. 483-490
- Papamarinopoulos, St. P., Papaioannou, M.G., Kappopoulos, C., Balatsas, J., 1995, Multiple Geophysical Studies at the Urban Environment of Athens and their Contribution to the Construction of the Metro of the City, *SAGEEP '95*, Orlando Florida, Under publication.