

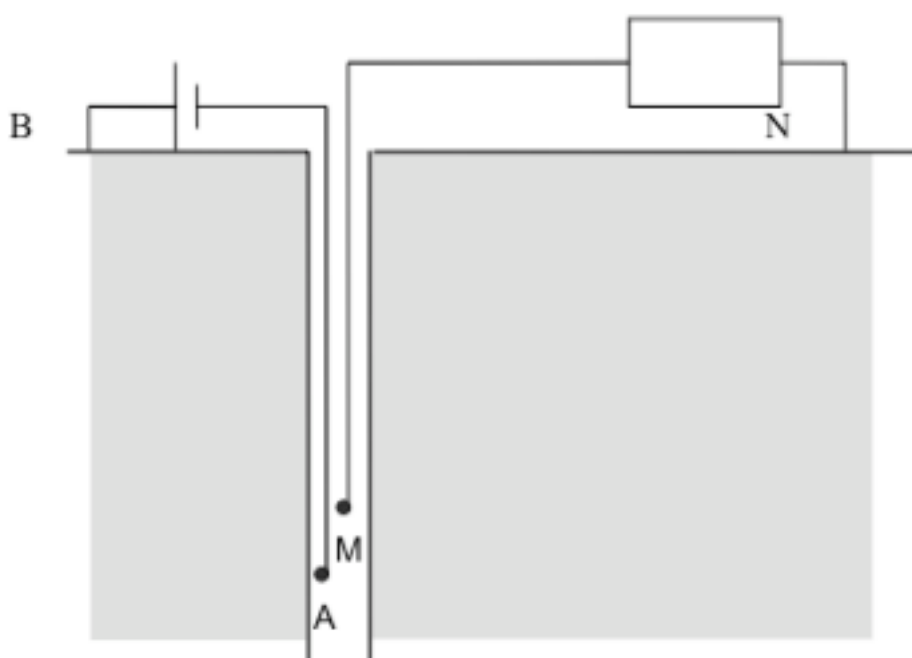


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Γεωηλεκτρομανητισμός

Κατακόρυφη Διάτρηση

(Βυθοσκόπηση)



Καράμπελας Σάββας

savnaska@ece.auth.gr

ΑΕΜ: 9005

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
ΜΟΝΤΕΛΑ	4
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ	4
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	6
<i>ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ.....</i>	<i>6</i>
<i>ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΛΙΣΗΣ.....</i>	<i>9</i>
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.....	10
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ:	23

Εισαγωγή

Η κατακόρυφη διάτρηση(ή βυθοσκόπηση) χρονολογείται από τις αρχές του εικοστού αιώνα και είναι από τις πιο διαδεδομένες και πληρέστερες γεωφυσικές μεθόδους για την λήψη στοιχείων που αφορούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες μιας περιοχής συναρτήσει του βάθους. Η μέθοδος αυτή συνίσταται πρακτικά στην δημιουργία μιας κυλινδρικής οπής σε μεγάλο βάθος και την εισαγωγή σ' αυτήν συστήματος ηλεκτροδίων. Συγκεκριμένα γίνεται μέτρηση της διαφοράς δυναμικού που προκαλείται από την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη και αυτή αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους.

Η βυθοσκόπηση επομένως, απεικονίζει την μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης κατά μία μόνο διάσταση, αυτή του βάθους. Μέσα στην οπή υπάρχει κατάλληλο υλικό, ώστε ενώ δεν εμποδίζεται η κίνηση του συστήματος μέτρησης, δεν διαταράσσεται ηλεκτρικά ο χώρος. Σημαντικό είναι να γίνει η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να υπάρχει εξασφαλισμένη αγωγή με το περιβάλλον τοίχωμα της οπής. Με τη μέθοδο αυτή, λοιπόν, έχουμε την δυνατότητα να προσδιορίζουμε τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους και έμμεσα να καθορίσουμε τις δομές ενδιαφέροντος του υπεδάφους. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι πρόκειται για μία σχετικά γρήγορη και μικρού κόστους γεωηλεκτρική διασκόπηση η οποία επιτρέπει την εξαγωγή αξιόλογων συμπερασμάτων.

Δύο από τις πιο συνηθέστερες διατάξεις για την υλοποίηση αυτών των μετρήσεων είναι οι εξής:

- ❖ Διατάξεις οι οποίες μετρούν τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων μέτρησης που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους.
- ❖ Διατάξεις οι οποίες μετρούν την ένταση του Ηλεκτρικού πεδίου (την κλίση του δυναμικού), μεταξύ δύο κοντά τοποθετημένων ηλεκτροδίων.

ΜΟΝΤΕΛΑ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή ένα απλό ηλεκτρόδιο μέτρησης εισέρχεται στην κυλινδρική οπή που ανοίχτηκε στην επιφάνεια της γης. Ένα άλλο ηλεκτρόδιο συνδέεται με την επιφάνεια του εδάφους, ενώ η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης καταγράφεται σε κατάλληλη συσκευή για τις διαφορετικές θέσεις του ηλεκτροδίου μέτρησης. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η αντίσταση που μετράει το όργανο, είναι συνάρτηση της αγωγιμότητας του εδάφους και της μορφής του ηλεκτροδίου. Η απλούστερη περίπτωση είναι αυτή ενός σφαιρικού ηλεκτροδίου μέσα σε ομογενή χώρο, με την προϋπόθεση ότι η οπή δεν διαταράσσει πολύ την ηλεκτρική ομοιογένεια του χώρου. Σ' αυτή τη περίπτωση η συνολική αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί σχετικά απλά, θεωρώντας μια ομοιόμορφη σφαιρική κατανομή του πεδίου και ολοκληρώνοντας από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου μέχρι το άπειρο, όπως φαίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$dR = \frac{\rho l}{S} = \rho \frac{dr}{4\pi r^2}$$

$$R = \int_0^\infty \frac{\rho}{4\pi r^2} dr = \frac{\rho}{4\pi r}$$

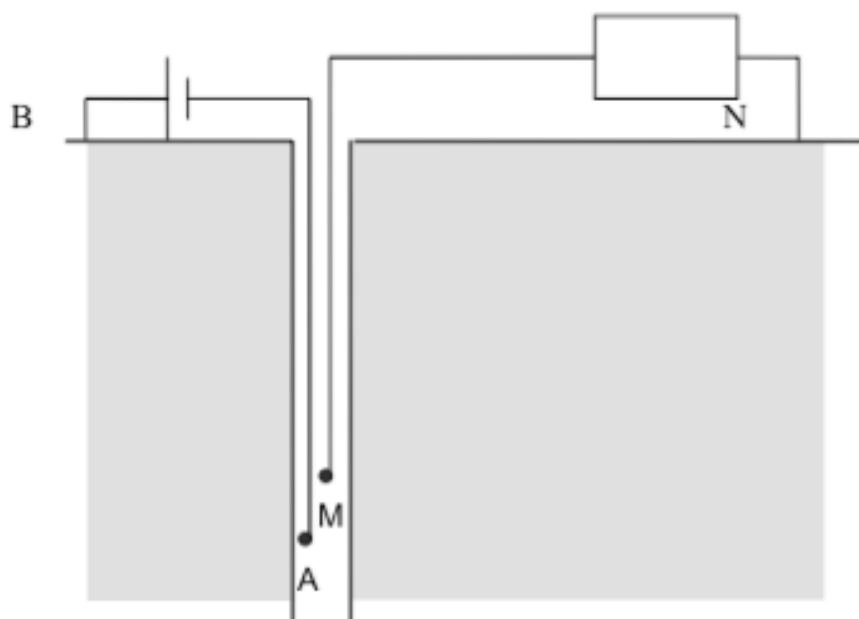
Από την παραπάνω εξίσωση ορίζεται ένας συντελεστής K τέτοιος ώστε, όταν πολλαπλασιαστεί με την αντίσταση που καταγράφεται, να δώσει την ειδική αντίσταση του μέσου. Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται γεωμετρικός παράγοντας της διάταξης των ηλεκτροδίων (geometric factor) και για την παραπάνω περίπτωση είναι προφανώς $K=4\pi a$.

Σημειώνεται ότι η αντίσταση που έχει μετρηθεί με την παραπάνω μέθοδο παρουσιάζει ένα βασικό μειονέκτημα. Περιλαμβάνει στο σύνολό της δύο επιπλέον ανεπιθύμητους όρους. Ο ένας προέρχεται από την αντίσταση του αγωγού σύνδεσης του ηλεκτροδίου μέτρησης με την πηγή και ο άλλος από την αντίσταση διάβασης του ηλεκτροδίου στην επιφάνεια της γης. Ωστόσο, και οι δύο αυτοί παράγοντες μπορούν να βρεθούν με σχετική ευκολία και επομένως να τους «αφαιρέσουμε» κατά το στάδιο που εξάγουμε τις πληροφορίες της μέτρησης. Ακόμα, υπάρχει δυνατότητα για σημαντική βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων αν χρησιμοποιήσουμε κυλινδρικό ηλεκτρόδιο με άξονα μεγάλου μήκους σε σχέση με τη διάμετρο, τόσο τη δική του όσο και της οπής. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες σ' αυτή την περίπτωση είναι ελλειψοειδή εκ περιστροφής.

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος μέτρησης φαινόμενης αντίστασης με κατακόρυφη διάτρηση είναι αυτός που χρησιμοποιεί τέσσερα ηλεκτρόδια μέτρησης. Δύο ή τρία ηλεκτρόδια τοποθετημένα πάνω σε ένα φορέα μεταφέρονται μέσα στην οπή, ενώ τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στην επιφάνεια. Με αυτή τη μέθοδο μέτρησης δεν υπολογίζεται η συνολική αντίσταση μεταξύ των σημείων A και B, αλλά μόνο το τμήμα της αντίστασης μεταξύ του A και ενός επιπλέον ηλεκτροδίου μέτρησης M που εισάγεται για αυτό το σκοπό. Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι διατάξεις αυτές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Αυτές είναι οι διατάξεις οι οποίες μετρούν τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων μέτρησης που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και οι διατάξεις που μετρούν την ένταση του Ηλεκτρικού πεδίου (την κλίση του δυναμικού), μεταξύ δύο κοντά τοποθετημένων ηλεκτροδίων. Παρακάτω αναλύεται η κάθε διάταξη ξεχωριστά και παρουσιάζεται και ένα σχήμα για λόγους οπτικοποίησης.

ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ



ΣΧΗΜΑ 1: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Η διάταξη αυτή, η οποία φαίνεται και στο Σχήμα 1, ονομάζεται συστοιχία δυναμικού, γιατί μετρά το δυναμικό στο σημείο που βρίσκεται το Μ. Στη περίπτωση που το έδαφος είναι ηλεκτρικά ομογενές, είναι εύκολο να βρεθεί η σχέση μεταξύ της μετρούμενης αντίστασης και της ειδικής αγωγιμότητας του εδάφους. Σε μια τέτοια περίπτωση οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ομόκεντρες σφαίρες με κέντρο το ηλεκτρόδιο Α, από το οποίο διαχέεται ομοιόμορφα το ρεύμα. Σύμφωνα με όσα έχουν λεχθεί η αντίσταση που παρουσιάζει ένας σφαιρικός όγκος ακτίνας r γύρω από το σημείο Α είναι :

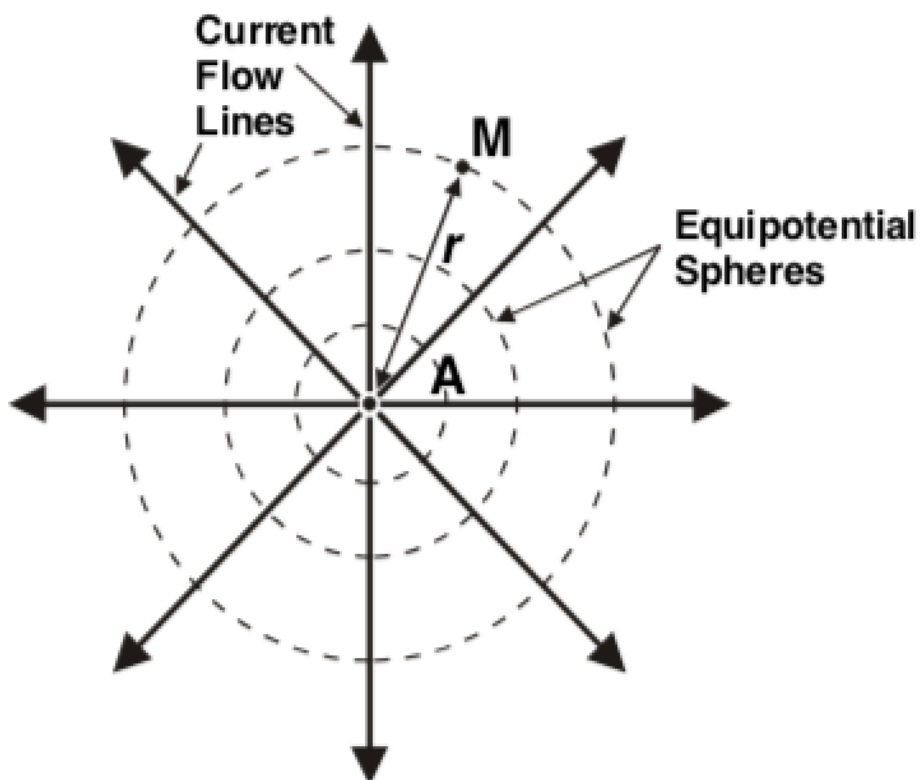
$$R = \frac{\rho}{4\pi r}$$

από την οποία με τη χρήση του νόμου του Ohm, προκύπτει για το δυναμικό στην επιφάνεια της σφαίρας αυτής, η εξής σχέση μέσα από την οποία καταλήγουμε στην σχέση με την οποία υπολογίζεται η ειδική αντίσταση του μέσου:

$$V = \frac{\rho I}{4\pi r} \rightarrow \rho = 4\pi r \frac{V}{I} \quad (1)$$

όπου I είναι το ρεύμα που διαχέει το σφαιρικό ηλεκτρόδιο Α και ο γεωμετρικός παράγοντας της διάταξης είναι προφανώς $K = 4\pi(AM)$.

Γενικότερα όταν έχουμε ένα μέσο το οποίο είναι ομογενές και έστω ότι εκτείνεται στο άπειρο προς όλες τις κατευθύνσεις ισχύει το εξής: Το ρεύμα που διαχέεται από ένα ηλεκτρόδιο Α του μέσου με δυναμικό $V_A = V$, προς ένα άλλο ηλεκτρόδιο Β, το οποίο απέχει άπειρη απόσταση και επομένως έχει δυναμικό $V_B = 0$, θα διαχέεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 και θα παράγει σφαιρικές ισοδυναμικές επιφάνειες με κέντρο το ηλεκτρόδιο Α.



ΣΧΗΜΑ 2: ΣΦΑΡΙΚΕΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

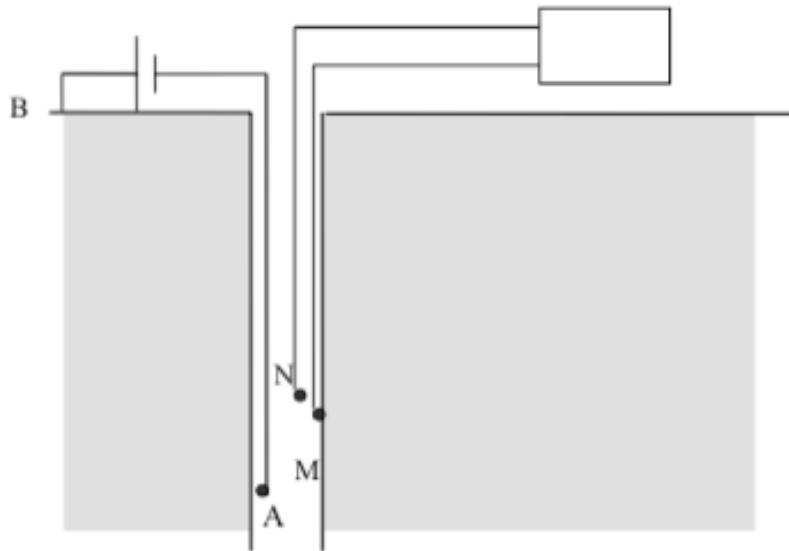
Εάν λοιπόν πάρουμε ένα τρίτο ηλεκτρόδιο Μ κοντά στο Α, τότε αυτό θα βρίσκεται πάνω σε μία από τις ισοδυναμικές επιφάνειες η οποία θα έχει ακτίνα r . Συνδέοντας το Μ με το Β μέσω μιας διάταξης μέτρησης δυναμικού (πχ βολτόμετρο) μπορούμε να μετρήσουμε το δυναμικό της επιφάνειας πάνω στην οποία βρίσκεται το Μ, V_M . Η ειδική αντίσταση του μέσου τότε μεταξύ των ηλεκτροδίων Α και Μ υπολογίζεται με τη παρακάτω σχέση:

$$R = 4\pi r \frac{V_A - V_M}{I} = 4\pi r \frac{\Delta V}{I}$$

Αναφέρεται ότι τα Α και Μ βρίσκονται σε αρκούντως κοντινή απόσταση ώστε να θεωρείται το ρεύμα σταθερό, παρά το ότι διαχέεται σε απόσταση. Η απόσταση των Α,Μ ονομάζεται «spacing»

και οι περισσότερες διατάξεις το προσαρμόζουν είτε σε 16 ίντσες (short normal spacing) είτε σε 64 ίντσες (long normal spacing).

ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΛΙΣΗΣ



ΣΧΗΜΑ 3: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΛΙΣΗΣ

Η δεύτερη διάταξη που θα εξετάσουμε, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3, ονομάζεται συστοιχία κλίσης (gradient array), γιατί ενώ μεν μετρά τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των M και N, αν η απόσταση αυτή επιλεγεί να είναι μικρή μπορούν να γίνουν υπολογισμοί για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στα σημεία αυτά, αφού το ηλεκτρικό πεδίο προέρχεται από την κλίση του δυναμικού. Εκτελώντας παρόμοια ανάλυση με προηγουμένως καταλήγουμε για τη συστοιχία κλίσης ότι η ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση :

$$\rho = 4\pi \frac{r_M r_N}{r_N - r_M} \frac{\Delta V}{I}$$

όπου ΔV είναι η μετρούμενη διαφορά δυναμικού και r_M , r_N οι αποστάσεις των σημείων M και N από το σημείο A. Στην περίπτωση αυτή ο παράγοντας διάταξης είναι $K=4\pi r_M r_N / (r_N - r_M)$. Για τη συστοιχία

αυτή το μέσο της απόστασης MN έστω O, είναι χαρακτηριστικό σημείο της διάταξης. Αν r_0 ονομάσουμε την απόσταση του A από το O τότε η σχέση γράφεται προσεγγιστικά :

$$\rho \cong 4\pi \frac{rO^2}{rN - rM} \frac{\Delta V}{I}$$

Στη περίπτωση τώρα που ο χώρος δεν είναι ομογενής, αντί της πραγματικής ειδικής αντίστασης, υπολογίζεται μια φαινόμενη ειδική αντίσταση. Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται είναι οι εξής:

- ❖ Οι διαστάσεις της οπής εξόρυξης
- ❖ Η διαφορά των ειδικών αντιστάσεων των υλικών πλήρωσης της οπής
- ❖ Η διάμετρος της οπής εξόρυξης σε σχέση με τη διάμετρο της διάταξης πάνω στην οποία είναι τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια

Αναλυτικότερα, όσο μεγαλύτερες είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, τόσο πιο κοντά στην πραγματική τιμή είναι η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Αυτό όμως δημιουργεί προβλήματα σε στρώματα πάχους συγκρίσιμα με τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Η παραπάνω ανάλυση η οποία έχει βασιστεί στην προϋπόθεση ότι το μέσο είναι ομογενές αποτελεί μια ιδανική περίπτωση. Η γη στη πραγματικότητα χαρακτηρίζεται από έντονη ανομοιογένεια. Ωστόσο, μπορούμε να αντλήσουμε αξιόλογες πληροφορίες διεξάγοντας μετρήσεις και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα αυτών σαν δεδομένα για περαιτέρω προσομοιώσεις. Όταν ο χώρος δεν είναι

ομογενής, αντί της πραγματικής ειδικής αντίστασης, υπολογίζεται μια φαινόμενη ειδική αντίσταση, που εξαρτάται από τις διαστάσεις της οπής εξόρυξης και από τη διαφορά των ειδικών αντιστάσεων των υλικών πλήρωσης της οπής. Όσο μεγαλύτερες είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, τόσο πιο κοντά στην πραγματική τιμή είναι η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Αυτό όμως δημιουργεί προβλήματα σε στρώματα πάχους συγκρίσιμα με τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Μια άλλη παράμετρος που παίζει ρόλο στις μετρήσεις, είναι η διάμετρος της οπής εξόρυξης σε σχέση με τη διάμετρο της διάταξης πάνω στην οποία είναι τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια. Χρησιμοποιώντας στη συνέχεια τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης που προέκυψαν από τις μετρήσεις μας, μπορούμε να εξάγουμε τις τιμές των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των υλικών καθώς επίσης και των ορίων τους, κάτω από την επιφάνεια της γης.

Καθώς, λοιπόν, δεν υπήρχε η δυνατότητα διεξαγωγής εξωτερικών μετρήσεων για να λάβουμε πληροφορίες για τη φαινόμενη ειδική αντίσταση ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

Ξεκινώντας, σχεδιάστηκε ένα μοντέλο που αποτελείται από έναν συγκεκριμένο αριθμό στρωμάτων κάτω από την επιφάνεια της γης. Επιλέχθηκε το υλικό από το οποίο αποτελείται κάθε στρώμα καθώς και το πάχος κάθε επιπέδου. Θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει πρόσμιξη των υλικών και κάθε επίπεδο αποτελείται μόνο από ένα υλικό. Στη συνέχεια ερευνήθηκε η βιβλιογραφία με σκοπό την εύρεση τιμών της πραγματικής ειδικής αντίστασης του κάθε υλικού. Έχοντας τις ειδικές πραγματικές αντιστάσεις και το συνολικό βάθος της διάτρησης μπορούμε να υπολογίσουμε το δυναμικό ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια αν ξέρουμε την απόστασή τους. Για τις προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν δύο συστοιχίες δυναμικού και μία συστοιχία κλίσης, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω:

Συστοιχίες Δυναμικού:

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις αυτές είναι τα εξής:

Μοντέλο 1

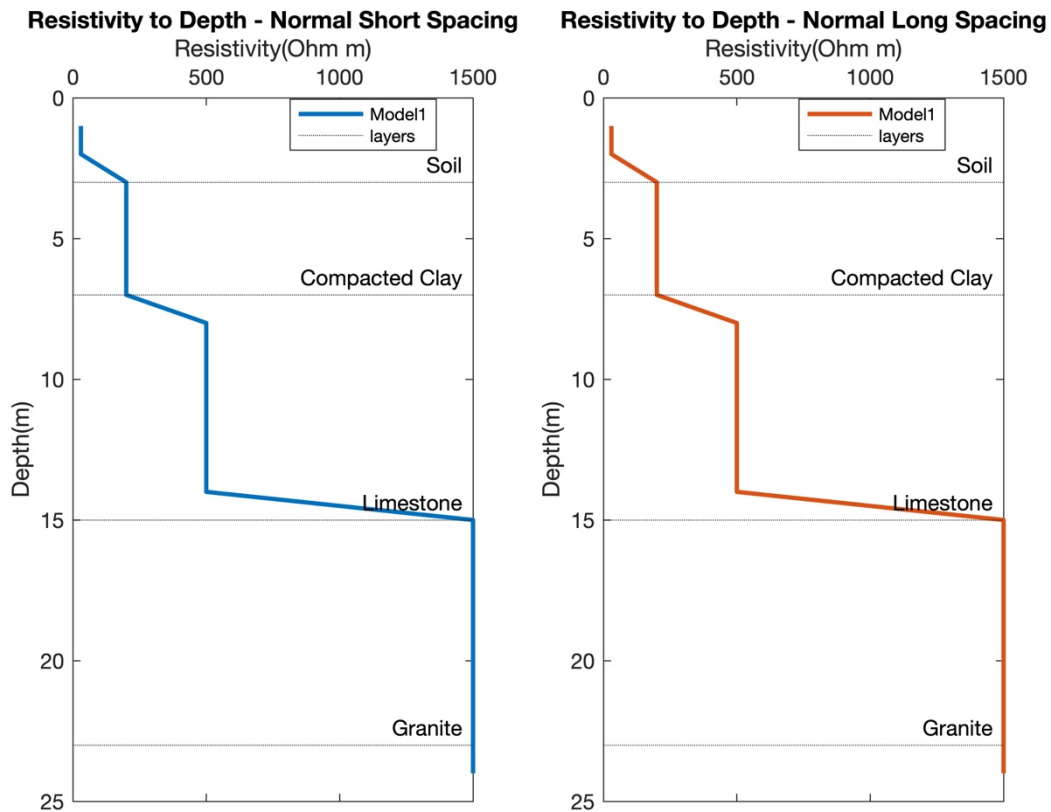
Επίπεδο	Υλικό	Αντίσταση(Ohm m)	Πάχος(m)
1	Soil	30	2
2	Compacted Clay	200	5
3	Limestone	500	8
4	Granite	1500	9

Μοντέλο 2

Επίπεδο	Υλικό	Αντίσταση(Ohm m)	Πάχος(m)
1	Soil	30	2
2	Shale	50	1
3	Compacted Clay	200	4
4	Shale	50	1
5	Limestone	500	6
6	Shale	50	1
7	Granite	1500	8
8	Shale	50	1

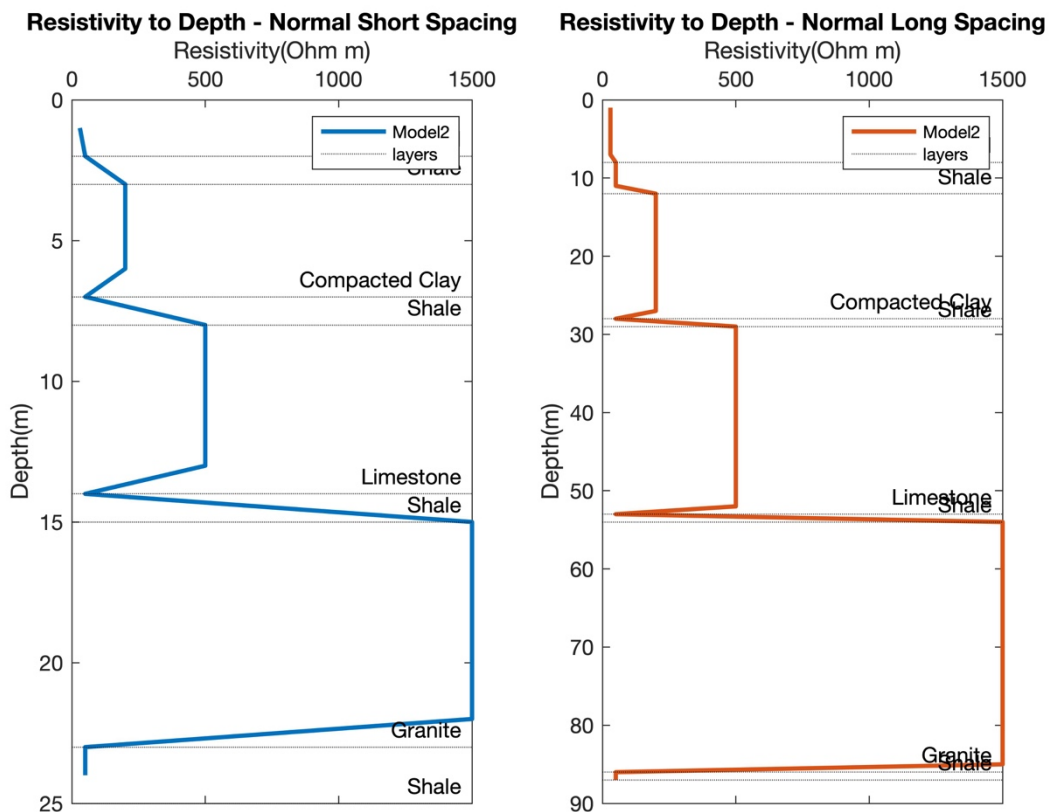
Για την παράμετρο της απόστασης του ηλεκτροδίου A από το M στη συστοιχία δυναμικού επιλέχθηκαν οι συνήθεις τιμές των 16 και 64 ιντσών. Έχοντας όλα τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζουμε το δυναμικό με βάση τη σχέση (1). Γνωρίζοντας όλα τα παραπάνω μπορούμε να προχωρήσουμε στην προσομοίωση για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, θεωρώντας ότι έχουμε σταθερό ρεύμα και ίσο με 5mA. Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

- i. Διαγράμματα που απεικονίζουν τη μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος και με οπτικοποίηση των στρωμάτων:



Για τη συστοιχία δυναμικού είναι προφανές, ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του στρώματος σε σχέση με την απόσταση των ηλεκτροδίων, τόσο πιο κοντά στις πραγματικές τιμές βρίσκονται οι μετρήσεις που γίνονται. Παρατηρούμε για το μοντέλο 1 ότι καθώς αυξάνεται το βάθος αυξάνεται και η φαινόμενη ειδική αντίσταση. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού σε αυτό το μοντέλο τα στρώματα έχουν επιλεγεί με αύξουσα τιμή ειδικής αντίστασης. Επίσης, λόγω της επιλογής αυτής δεν εμφανίζεται κάποια συμμετρία στο διάγραμμα όπως θα περιμέναμε, ως προς το μέσο της απόστασης του στρώματος. Εάν είχαμε έναν κοινό περιβάλλοντα χώρο ανάμεσα στα

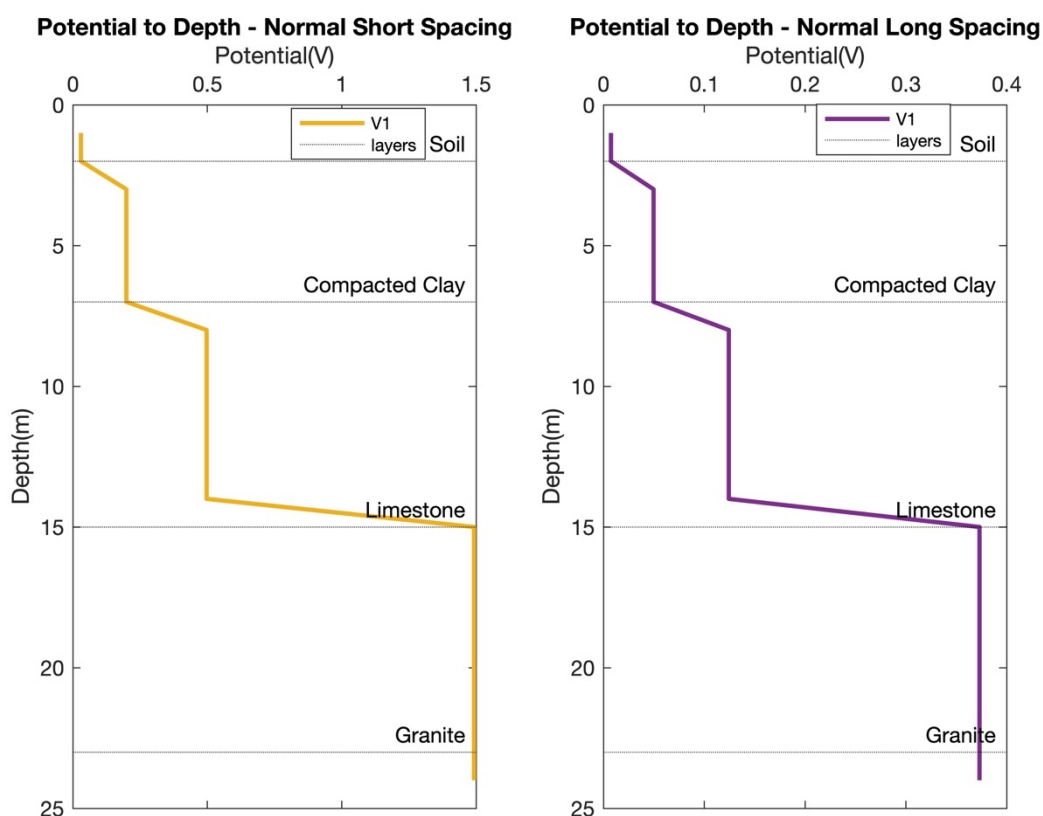
διάφορα στρώματα, τότε θα ήταν ορατή αυτή η συμμετρία. Τέλος, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα για τις δύο διαφορετικές τιμές της απόστασης των ηλεκτροδίων, δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές.



Για το μοντέλο 2 το οποίο περιέχει ανάμεσα στα βασικά στρώματα και στρώματα πολύ μικρής ειδικής αντίστασης (50 Ohm m) παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το βάθος αυξάνεται και η ειδική αντίσταση, με μειώσεις όταν βρισκόμαστε στα στρώματα αυτά. Επίσης, σε αυτήν την περίπτωση είναι αρκετά ευδιάκριτη η συμμετρία ως προς το μέσο της απόστασης των στρωμάτων. Καθώς τα ηλεκτρόδια πλησιάζουν την ανομοιογένεια, υπάρχει μία απότομη αύξηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης η οποία στη συνέχεια σταθεροποιείται. Μόλις φτάνουμε στο τέλος του κάθε στρώματος αρχίζει να μειώνεται. Όσο τώρα μειώνεται το πάχος του στρώματος

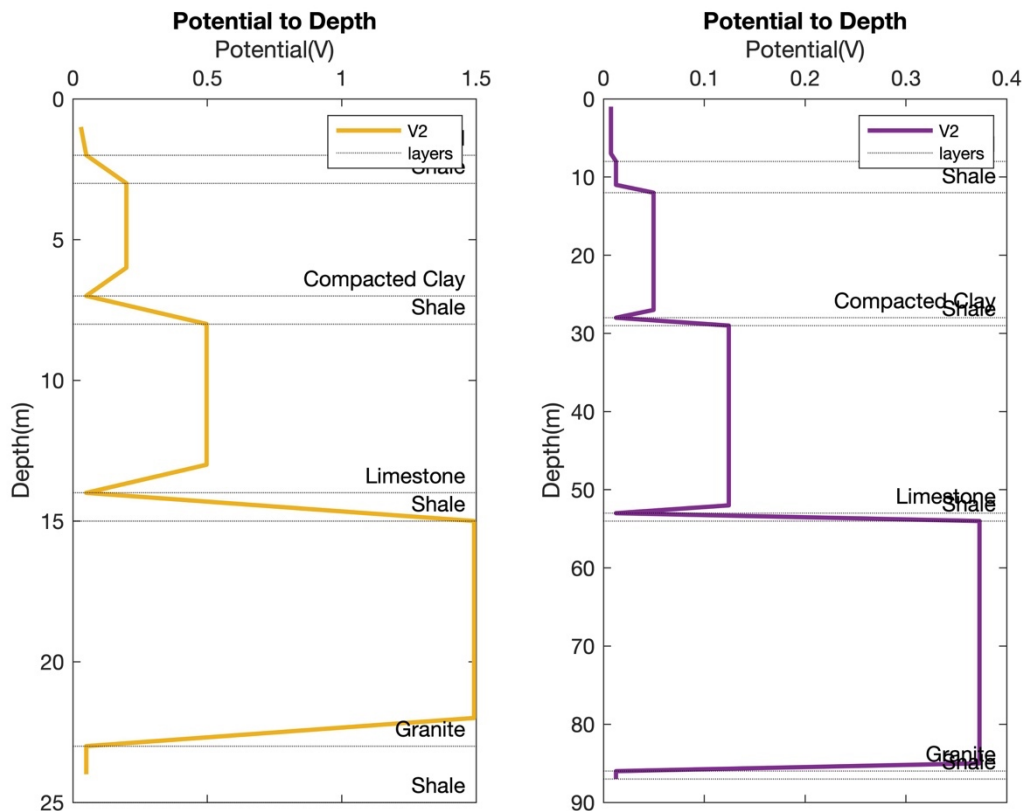
,σε σχέση πάντα με την απόσταση των ηλεκτροδίων, βλέπουμε ότι ενώ τα όρια του στρώματος μπορούν να καθοριστούν με μεγάλη ακρίβεια, για μικρά πάχη στρώματος καμία πληροφορία δεν μπορεί να υπάρξει σχετικά με την τιμή της ειδικής αντίστασης. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται έντονα στη περίπτωση του long spacing όπου τα στρώματα “Shale” διακρίνονται με μεγάλη δυσκολία. Τέλος, βλέπουμε στο διάγραμμα του long spacing ότι καθώς μεγαλώνει το πάχος των στρωμάτων, οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης τείνουν προς τις πραγματικές τιμές.

- ii. Διαγράμματα που απεικονίζουν τη μεταβολή του δυναμικού σε συνάρτηση με το βάθος και με οπτικοποίηση των στρωμάτων:



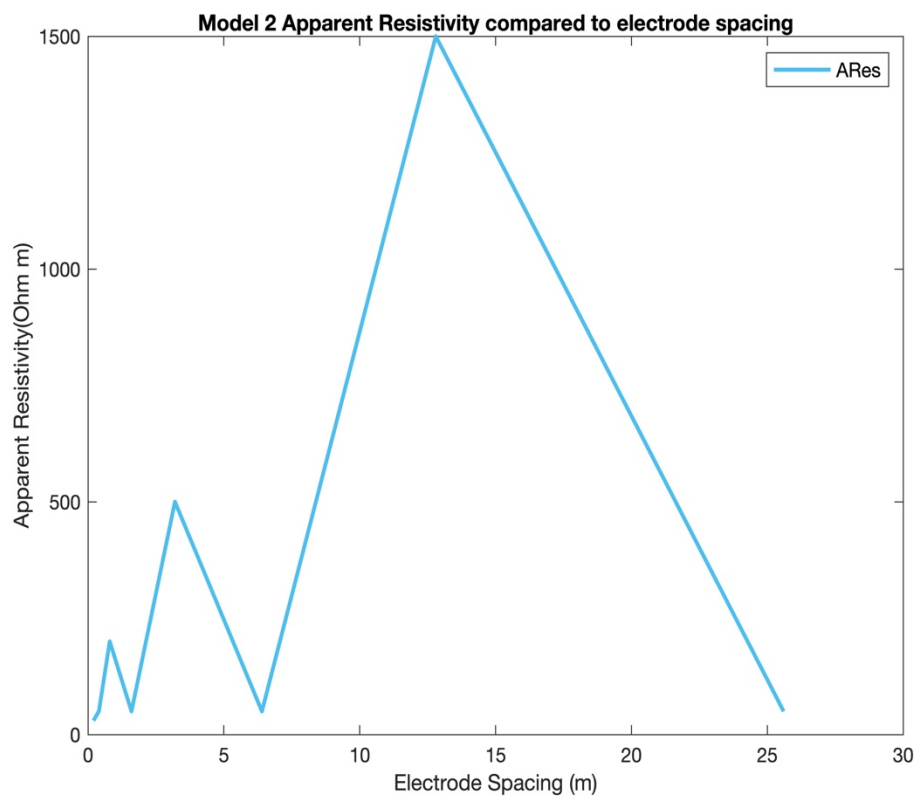
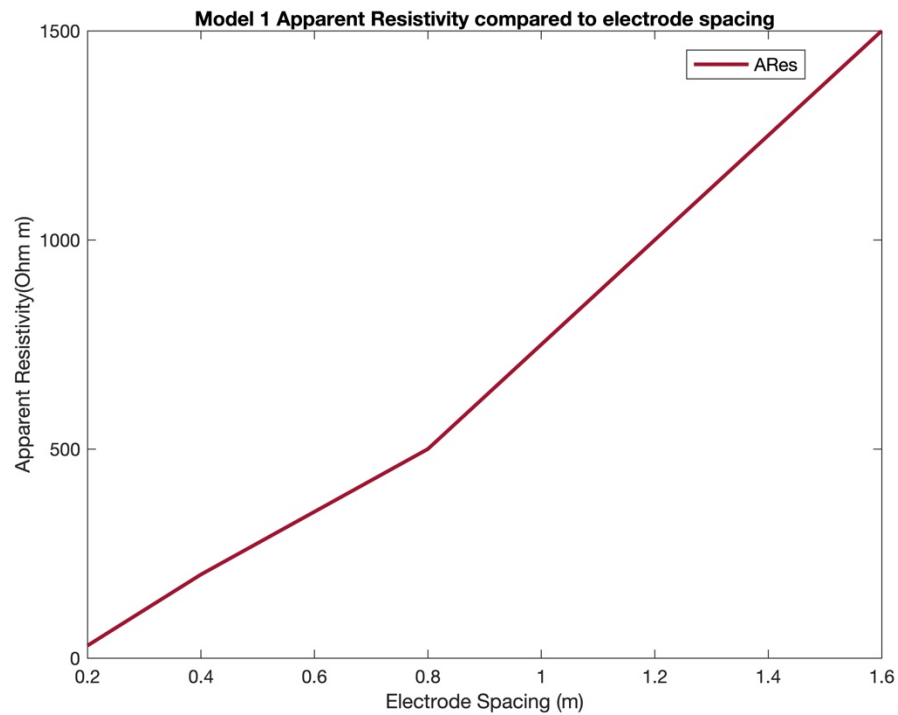
Για το μοντέλο 1 παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται το βάθος αυξάνεται και το δυναμικό και για τις δύο τιμές της απόστασης των ηλεκτροδίων. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν αρκετή

ομοιότητα με αυτά της φαινόμενης ειδικής αντίστασης όπως είναι αναμενόμενο. Παρατηρούμε ότι στη περίπτωση της μικρότερης απόστασης ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, το δυναμικό έχει μεγαλύτερο εύρος τιμών.



Για το μοντέλο 2 καθώς αυξάνεται το βάθος αυξάνεται και το δυναμικό, σε αντιστοιχία με τα τμήματα που αυξάνεται και η φαινόμενη ειδική αντίσταση. Στα τμήματα που έχουμε μείωση της αντίστασης, μειώνεται και το δυναμικό. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν αρκετή ομοιότητα με αυτά της φαινόμενης ειδικής αντίστασης όπως είναι αναμενόμενο. Παρατηρούμε ότι στη περίπτωση της μικρότερης απόστασης ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, το δυναμικό έχει μεγαλύτερο εύρος τιμών.

- iii. Διαγράμματα που απεικονίζουν την φαινόμενη ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με την απόσταση των ηλεκτροδίων για τα δύο μοντέλα της προσομοίωσης:



Όπως είναι αναμενόμενο, το πρώτο μοντέλο, στο οποίο κινούμαστε συνεχώς από στρώματα χαμηλότερης φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε στρώματα υψηλότερης τιμής, θα περιγράφεται από μία διαρκώς αυξανόμενη ευθεία. Από την άλλη, το δεύτερο μοντέλο που εμπεριέχει στρώματα χαμηλής φαινόμενης ειδικής αντίστασης μετά από κάθε στρώμα, θα περιγράφεται από μια ευθεία με απότομες αυξήσεις και μειώσεις, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα.

Συστοιχία Κλίσης:

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις αυτές είναι τα εξής:

Μοντέλο 1

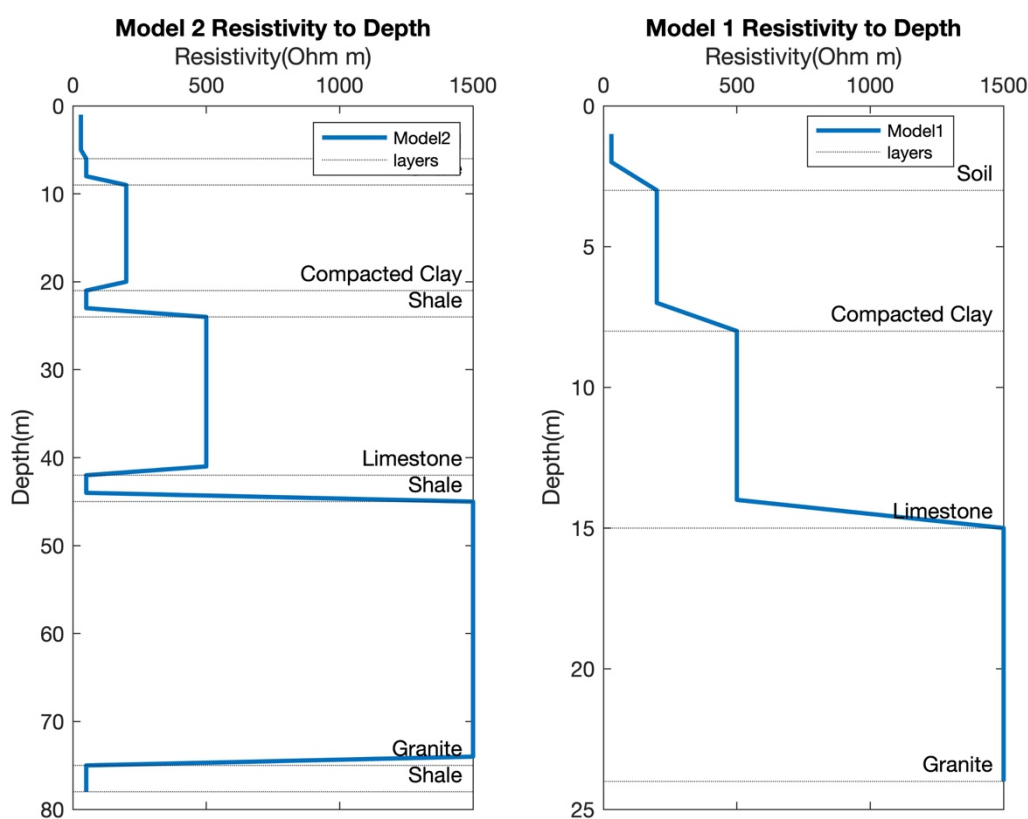
Επίπεδο	Υλικό	Αντίσταση(Ohm m)	Πάχος(m)
1	Soil	30	2
2	Compacted Clay	200	5
3	Limestone	500	8
4	Granite	1500	9

Μοντέλο 2

Επίπεδο	Υλικό	Αντίσταση(Ohm m)	Πάχος(m)
1	Soil	30	2
2	Shale	50	1
3	Compacted Clay	200	4
4	Shale	50	1
5	Limestone	500	6
6	Shale	50	1
7	Granite	1500	8
8	Shale	50	1

Για τη παράμετρο της απόστασης του ηλεκτροδίου Α από το Ο, που είναι το μέσο των σημείων Μ και Ν, στη συστοιχία κλίσης επιλέχθηκε η τιμή 5,94m (18 feet & 8 inches). Έχοντας όλα τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζουμε το δυναμικό. Γνωρίζοντας τα μεγέθη αυτά μπορούμε να τα αξιοποιήσουμε στην προσομοίωση μας για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, θεωρώντας ότι έχουμε σταθερό ρεύμα και ίσο με 5mA. Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

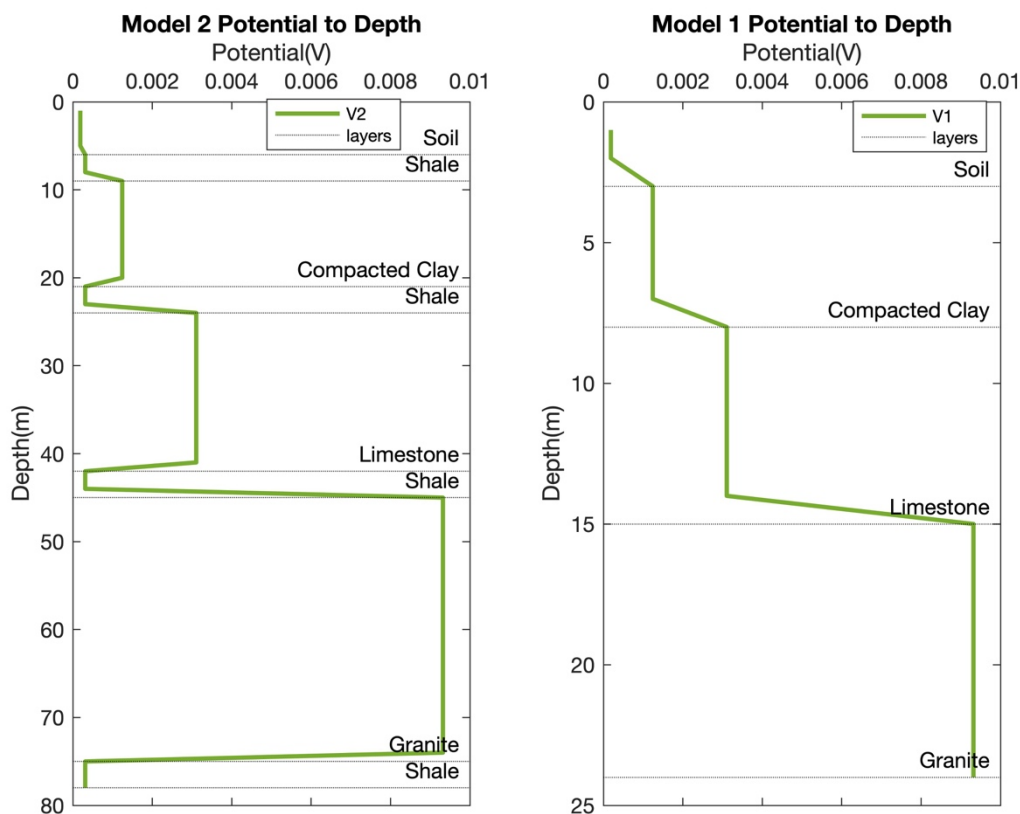
- i. Διαγράμματα που απεικονίζουν τη μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος και με οπτικοποίηση των στρωμάτων:



Το μοντέλο 2 περιέχει ανάμεσα στα βασικά στρώματα και στρώματα πολύ μικρής ειδικής αντίστασης (50 Ohm m). Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το βάθος αυξάνεται και η ειδική αντίσταση με μειώσεις όταν

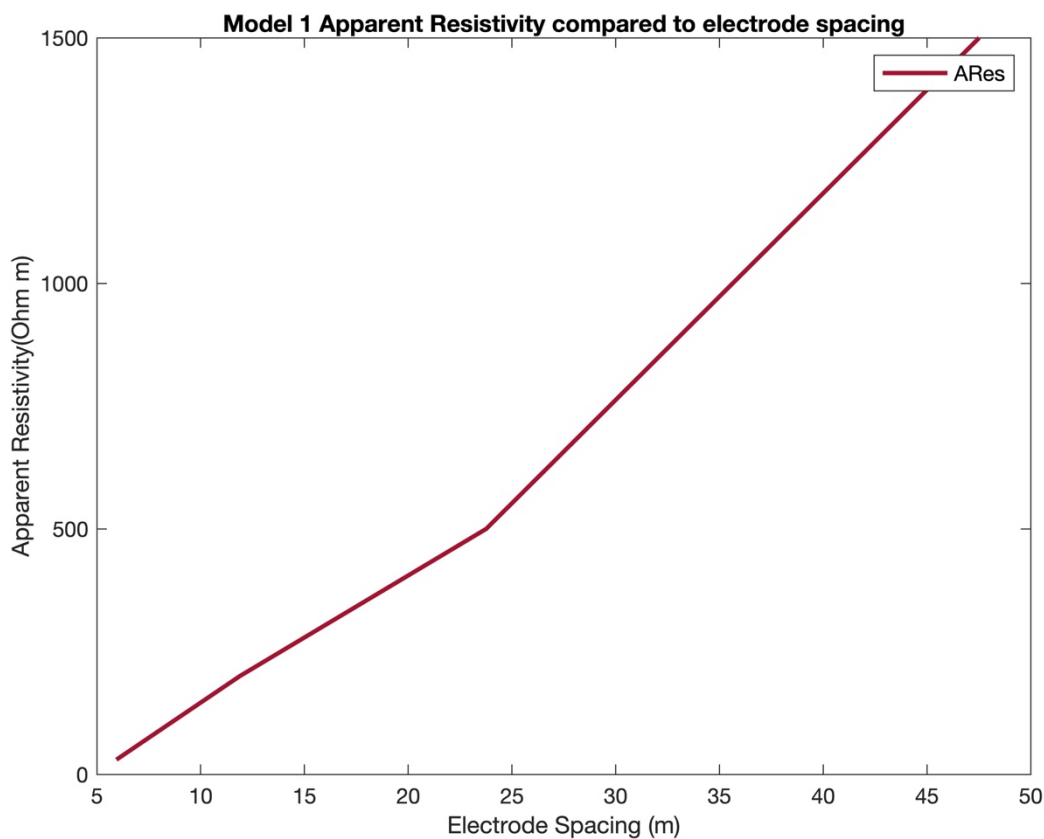
βρισκόμαστε στα στρώματα αυτά. Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι η συστοιχία κλίσης συνήθως δεν παρουσιάζει συμμετρία ως προς το μέσο του στρώματος. Ωστόσο, η σχεδίαση του μοντέλου της προσομοίωσης επιφέρει μια σχετική συμμετρία. Το σημαντικό είναι ότι σε αυτή τη διάταξη υπάρχει μια μεγάλη διαφορά σε σχέση με τη συστοιχία δυναμικού. Τα όρια των στρωμάτων τα οποία έχουν συγκρίσιμό ή και μικρότερο πάχος από την απόσταση των ηλεκτροδίων καθορίζονται με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Αυτό φαίνεται και από το αριστερό σχήμα. Υπενθυμίζεται ότι στη συστοιχία δυναμικού τέτοια στρώματα ήταν πολύ δύσκολο να ανιχνευτούν οπτικά στο διάγραμμα. Το πρώτο μοντέλο δεν παρουσιάζει συμμετρία, καθορίζει με αρκετή ακρίβεια τα όρια των στρωμάτων και έχει αυξανόμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση σε σχέση με το βάθος.

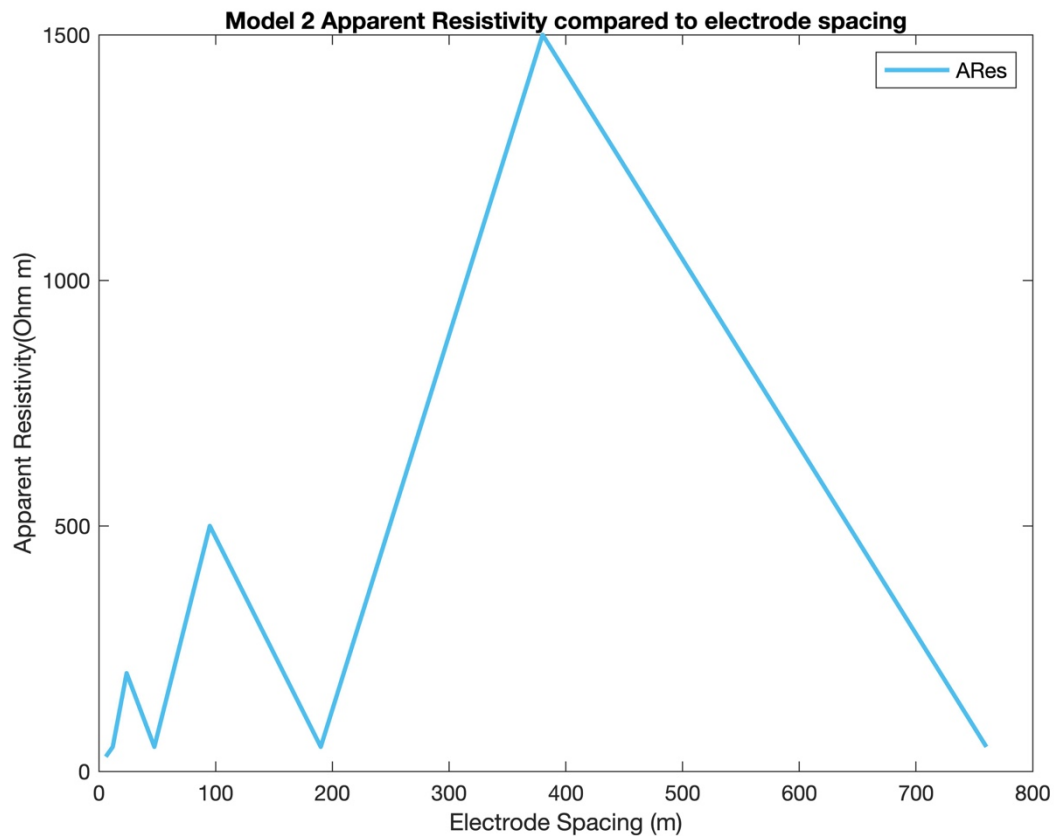
- ii. Διαγράμματα που απεικονίζουν τη μεταβολή του δυναμικού σε συνάρτηση με το βάθος και με οπτικοποίηση των στρωμάτων:



Παρατηρούμε και για τα δύο μοντέλα, ότι καθώς αυξάνεται το βάθος αυξάνεται και το δυναμικό, σε αντιστοιχία με η φαινόμενη ειδική αντίσταση. Στο μοντέλο 2 στα τμήματα που έχουμε μείωση της αντίστασης, μειώνεται και το δυναμικό. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν αρκετή ομοιότητα με αυτά της φαινόμενης ειδικής αντίστασης όπως είναι αναμενόμενο.

- iii. Διαγράμματα που απεικονίζουν την φαινόμενη ειδική αντίσταση σε συνάρτηση με την απόσταση των ηλεκτροδίων για τα δύο μοντέλα της προσομοίωσης:





Και στη περίπτωση της συστοιχίας κλίσης όπως είναι αναμενόμενο, το πρώτο μοντέλο, στο οποίο κινούμαστε συνεχώς από στρώματα χαμηλότερης φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε στρώματα υψηλότερης τιμής, θα περιγράφεται από μία διαρκώς αυξανόμενη ευθεία. Από την άλλη, το δεύτερο μοντέλο που εμπεριέχει στρώματα χαμηλής φαινόμενης ειδικής αντίστασης μετά από κάθε στρώμα, θα περιγράφεται από μια ευθεία με απότομες αυξήσεις και μειώσεις, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ:

1. **ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ-Χ.ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ**
2. **Vertical Electrical Sounding**
[https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_electrical_sounding]
3. **Environmental Geophysics – Resistivity Methods** [https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/resistivity_methods.html#:~:text=profiling%2C%20per%20se%2C%20means,the%20points%20of%20Horizontal%20p0a%20g%20rid]
4. **Abraham Bairu,” Application of vertical electrical sounding and horizontal profiling methods to decipher the existing subsurface stratification at river Segen dam site, Tigray, Northern Ethiopia”**
[https://www.researchgate.net/publication/269635686_Application_of_vertical_electrical_sounding_and_horizontal_profiling_methods_to_decipher_the_existing_subsurface_stratification_at_river_Segen_dam_site_Tigray_Northern_Ethiopia]
5. **Vertical electrical sounding (VES) and multi-electrode resistivity in environmental impact assessment studies over some selected lakes.**
[https://www.researchgate.net/publication/251307794_Vertical_electrical_sounding_VES_and_multi-electrode_resistivity_in_environmental_impact_assessment_studies_over_some_selected_lakes_A_case_study]
6. **Ratnakar Dhakate, “Correlation of vertical electrical sounding and borehole-log data for delineation of saltwater and freshwater aquifers”**
[https://www.researchgate.net/publication/240737643_Correlation_of_vertical_electrical_sounding_and_borehole-log_data_for_delineation_of_saltwater_and_freshwater_aquifers]
7. **Karla Tiensuu, Eero Heikkinen,” Geophysical logging of borehole K08028F01”**
[<http://www.skf.com/publication/2487738/P-15-15.pdf>]
8. **Dr. Paul Glover, “Petrophysics MSc Course Notes”**
[http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earpwjg/PG_EN/CD%20Contents/GGL66565%20Petrophysics%20English/Chapter%2019.PDF]
9. **Geo-Tech – Borehole Resistivity System**
[http://www.geotechenv.com/Manuals/Geotech_Resistivity_System.pdf]