



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ, ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ, ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τρισδιάστατη γεωλογική μοντελοποίηση της λεκάνης του
Τυμπακίου με υποστήριξη γεωτρητικών και γεωφυσικών δεδομένων

Γιαννακάκος Εμμανουήλ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Καθηγητής (επιβλέπων)

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής

Στειακάκης Εμμανουήλ, Επίκουρος Καθηγητής

ΜΑΡΤΙΟΣ 2013 ΧΑΝΙΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ	4
1.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΔΩΝ ΟΡΟΣΕΙΡΩΝ	4
1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΚΡΗΤΗΣ	6
1.2.1 ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ	8
1.3 ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΝΗΣΟΥ ΚΡΗΤΗΣ	11
1.4 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕΣΣΑΡΑΣ	14
1.4.1 ΛΕΚΑΝΗ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ	20
2.1 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΝΗΣΟΥ ΚΡΗΤΗΣ	20
2.2 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕΣΣΑΡΑΣ	24
2.2.1 ΥΠΟΔΙΑΙΡΕΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕΣΣΑΡΑΣ	27
2.2.2 ΛΕΚΑΝΗ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ	28
2.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ	28
2.3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ	30
2.3.2 Η ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ	33
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	33
3.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	34
3.2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	34
3.2.1.1 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	35
3.2.1.2 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	35
3.2.1.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ	38
3.2.1.4 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	41
3.2.1.5 ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	41
3.3 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ	42
3.3.1 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ	43
3.3.2 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ	44
3.3.2.1 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗΣ	44
3.3.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ	45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	46
4.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	46
4.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	49
4.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	52
4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	54
4.5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΑΚΕΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	59
5.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	59
5.2 ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	64
5.3 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	70
5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	87
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ROCKWORKS	93
Π.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	93
Π.2 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ - PROJECT DIMENSIONS	93
Π.3 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	97
Π.4 ΚΥΡΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	99
Π.4.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ #1: ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	100
Π.4.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ #2: ΕΡΓΑΛΕΙΑ - UTILITIES	107
Π.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	109
Π.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗ ΒΑΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	111
Π.5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ UTILITIES	114
Π.6 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ	116
Π.7 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΝΤΟΛΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ UTILITIES	120
Π.8 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΝΤΟΛΩΝ ΒΑΣΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	125
Π.8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	125
Π.8.2 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	127
Π.8.3 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	129
Π.8.4 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	132
Π.8.5 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	134
Π.8.6 ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ	137
Π.8.7 ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΙΣΟΒΑΘΩΝ ΚΑΙ ΙΣΟΠΑΧΩΝ	140
Π.8.8 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	143
Π.8.9 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ	145

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει μεταξύ άλλων στην ανάπτυξη λογισμικών πακέτων προσομοίωσης, που χρησιμοποιούνται σε πληθώρα γεωπεριβαλλοντικών εφαρμογών. Η χρήση αυτών βασίζεται στη δημιουργία βάσεων δεδομένων που εμπλουτίζονται με το σύνολο των διαθέσιμων χωρικών στοιχείων, ενώ για την επεξεργασία τους καθορίζονται οι παράμετροι που προσομοιάζουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις πραγματικές συνθήκες. Η επεξεργασία αυτών των δεδομένων γίνεται πλέον σε περιβάλλον εργασίας που είναι φιλικό στο χρήστη, στον οποίον παρέχονται ποικίλες δυνατότητες και ευελιξία. Τα λογισμικά αυτά πακέτα επιδέχονται αλγοριθμικές τροποποιήσεις και χρησιμοποιούνται για ερευνητικούς σκοπούς, δεν παύουν όμως με τους ίδιους αλγορίθμους να αποτελούν εύχρηστα εργαλεία εποπτείας.

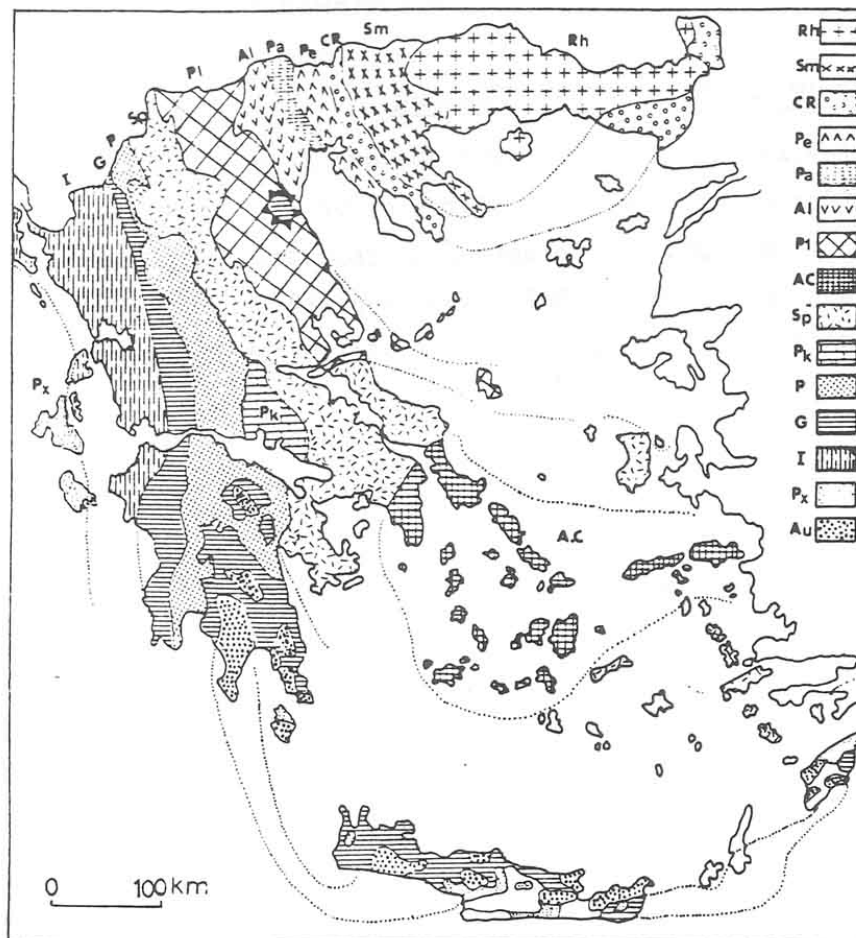
Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία γίνεται χρήση ενός παρόμοιου λογισμικού (Rockworks15) αρχικά για την προσομοίωση της γεωλογικής δομής της λεκάνης Τυμπακίου στο νομό Ηρακλείου και στην συνέχεια για την εξαγωγή εποπτικών συμπερασμάτων σχετικά με την υφαλμύριση που παρατηρήθηκε τα τελευταία χρόνια στην περιοχή. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, η υφαλμύριση παρατηρείται στον ανώτερο προσχωματικό υδροφορέα του Πλειο-Τεταρτογενούς. Ο υδροφορέας αυτός περιορίζεται στο κατώτερο τμήμα του από τις πρακτικώς αδιαπέρατες αποθέσεις του Νεογενούς.

Η προσομοίωση βασίστηκε στην ανάπτυξη μίας βάσης δεδομένων από τοπογραφικά, γεωλογικά, γεωτρητικά και γεωφυσικά στοιχεία. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν πέραν του ψηφιακού τοπογραφικού ανάγλυφου και των μεγάλων ρηγμάτων που διατρέχουν την περιοχή, οι λιθολογικές και στρωματογραφικές ερμηνείες 33 γεωτρήσεων και οι τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 70 ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια παλαιότερων ερευνητικών προγραμμάτων εντός της λεκάνης του Τυμπακίου. Σκοπός της προσομοίωσης ήταν η αποτύπωση της χωρικής κατανομής των Πλειο – Τεταρτογενών και των Νεογενών αποθέσεων που δομούν την περιοχή μελέτης. Οι διαφοροποιήσεις και οι έντονες μεταβολές της επιφάνειας που διαχωρίζει τις δύο προαναφερθείσες λιθοστρωματογραφικές ενότητες δίνουν σημαντικές χωρικές πληροφορίες για τη γεωλογική δομή της λεκάνης του Τυμπακίου. Επιπλέον, ο υδρογεωλογικός χαρακτήρας των παραπάνω αποθέσεων συνδυάστηκε με τη χωρική κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την χωρική κατανομή της ζώνης υφαλμύρισης στην παράκτια περιοχή της ιζηματογενούς λεκάνης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

1.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΔΩΝ ΟΡΟΣΕΙΡΩΝ

Οι ερευνητές σήμερα στηριζόμενοι στις νέες απόψεις της Θεωρίας των Λιθοσφαιρικών Πλακών δέχονται σχεδόν ομόφωνα την άποψη ότι η πλειονότητα των Αλπικών σχηματισμών της νήσου Κρήτης ανήκουν σε έναν ευρύτερο χώρο, τον χώρο των Εξωτερικών Ελληνίδων αλλά στην δομή της συμμετέχουν και γεωτεκτονικές ζώνες των Εσωτερικών Ελληνίδων. Οι γεωτεκτονικές ζώνες του Ελλαδικού χώρου (Σχήμα 1.1) διακρίθηκαν ήδη από τον Brunn (1956) σε Εξωτερικές και Εσωτερικές με βάση κυρίως τον ορογενετικό τεκτονισμό που οι σχηματισμοί των ζωνών αυτών έχουν υποστεί. Πιο ειδικά, οι σχηματισμοί των Εξωτερικών ζωνών έχουν υποστεί κατά το Τριτογενές ένα μόνο ορογενετικό τεκτονισμό και κατέχουν το δυτικό και νότιο τμήμα του ελλαδικού χώρου, ενώ οι σχηματισμοί των Εσωτερικών, εκτός από τον τεκτονισμό του Τριτογενούς, έχουν υποστεί επιπλέον και έναν πρώιμο ορογενετικό τεκτονισμό, που έλαβε χώρα κατά το Ανώτερο Ιουρασικό - Κατώτερο Κρητιδικό, και κατέχουν το ανατολικό (εσωτερικό) τμήμα του ελλαδικού χώρου.



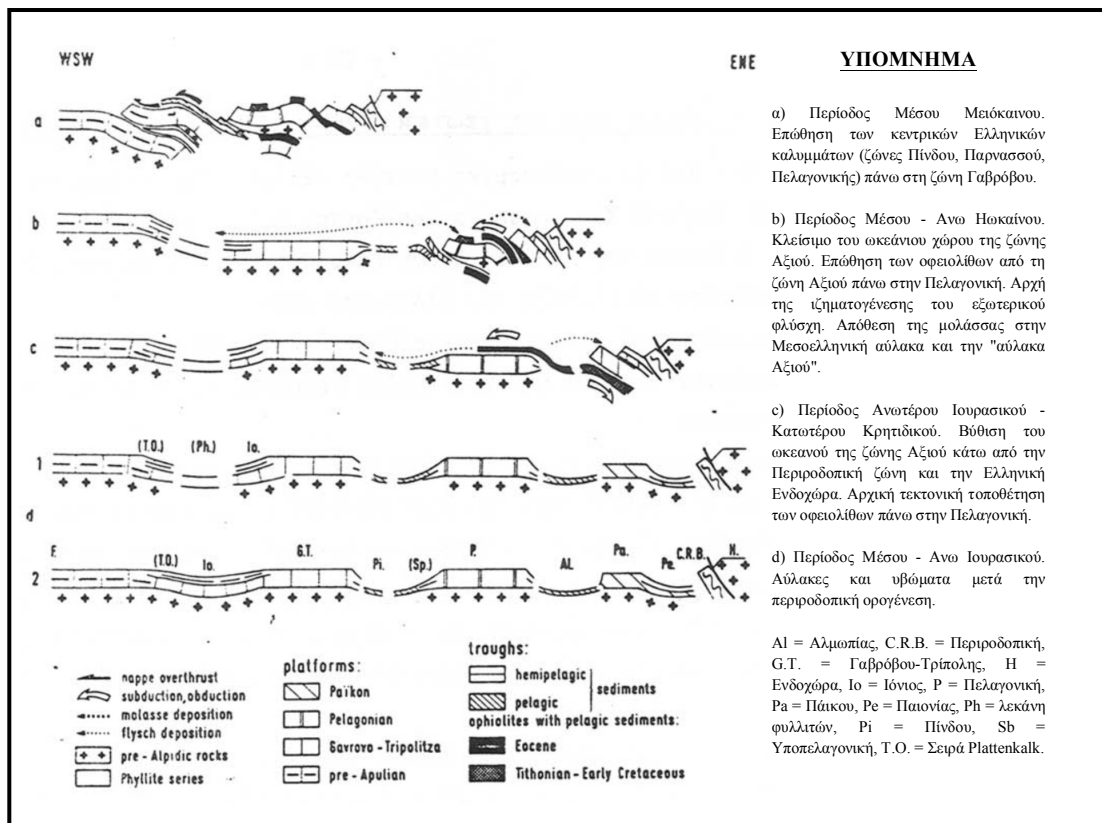
Σχήμα 1.1 Χάρτης των Γεωτεκτονικών ζωνών του Ελλαδικού χώρου (Mountrakis et al. 1983, από J. Mercier, J. Brunn, J. Aubouin et al. 1971)

Υπόμνημα χάρτη (Σχήμα 1.2): Px: Προαπούλια ζώνη (ζώνη Παξών), I: ζώνη Ιονίου, G: ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης, P: ζώνη Πίνδου, Pk: ζώνη Παρνασσού, Sp: ζώνη Υποπελαγονική, Ac: ζώνη Αττικοκυκλαδική, Pl: ζώνη Πελαγονική, ζώνη Αξιού (Pe: ζώνη Παιονίας, Pa: ζώνη Πάικου, Al: ζώνη Αλμωπίας), Cr: ζώνη Περιροδοπική, Sm: Σερβομακεδονική μάζα, Rh: μάζα Ροδόπης

Οι ζώνες Rh, Sm αποτελούν την Ελληνική Ενδοχώρα, οι ζώνες CR, Pe, Pa, Al, Pl, Ac, Sp αποτελούν τις Εσωτερικές Ελληνίδες και οι ζώνες Pk, P, G, I, Px είναι οι Εξωτερικές Ελληνίδες.

Οι γεωτεκτονικές ζώνες των Ελληνίδων αποτελούν παλαιογεωγραφικούς χώρους του «Παλιοωκεανού» της Τηθύος, μίας ωκεάνιας περιοχής στον ευρύτερο χώρο της ηπειρωτικής της Παγγαίας, ενός ηπειρωτικού τεμάχους που δημιουργήθηκε κατά την Βαρίσκια Ορογένεση. Μέσα στον ωκεάνιο χώρο της Τηθύος η ανάπτυξη μεσοωκεάνιας ράχης που λειτούργησε στο Λιάσιο - Δογγέριο του Ιουρασικού οδήγησε στη διάσπαση της Παγγαίας, στη δημιουργία δύο νέων ηπειρωτικών τεμαχών, της Λαυρασίας και της Γκοτβάνας και ταυτόχρονα στην υποβύθιση του ωκεάνιου φλοιού της Τηθύος κάτω από τον ηπειρωτικό φλοιό της Λαυρασίας. Το τελευταίο γεγονός που ξεκίνησε το Μέσο Ιουρασικό και ολοκληρώθηκε το Ανώτερο Ιουρασικό – Κατώτερο Κρητιδικό οριοθετεί την απαρχή του τελευταίου Ορογενετικού κύκλου του Αλπικού και ταυτόχρονα για τον Ελληνικό χώρο, τη διαφοροποίηση και την τεκτονική εξέλιξη των γεωτεκτονικών Ζωνών των Ελληνίδων οροσειρών.

Από τα πρωταρχικά και σημαντικά ερωτήματα με τα οποία απασχολήθηκε η παγκόσμια γεωεπιστημονική κοινότητα ήταν και παραμένει η ακριβής θέση και τα όρια του «μητρικού» αυτού ωκεανού της Τηθύος. Ειδικότερα για τον ευρύτερο χώρο της Ελλάδας το πρόβλημα εντοπίστηκε από την αρχή της διάδοσης και εφαρμογής της νέας θεωρίας των λιθοσφαιρικών πλακών στο θέμα, με ποια από τις γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας ταυτίζεται ο ωκεανός της Τηθύος ή καλύτερα ποια ζώνη έχει τους σχηματισμούς που αντιπροσωπεύουν τον κατεστραμμένο ωκεάνιο φλοιό της Τηθύος. Η πρώτη τάση που αναπτύχθηκε στους γεωεπιστήμονες τη δεκαετία του 1970, στο ξεκίνημα της νέας θεωρίας, ήταν ότι ο ωκεάνιος χώρος της Τηθύος ταυτίζονταν με τη ζώνη Ωλονού - Πίνδου που είχε θεωρηθεί από την παλαιότερα ισχύουσα «Θεωρία των συζυγών Γεωσυγκλίνων» ως ο τυπικός ωκεάνιος χώρος, το "Ελληνικό γεωσύγκλινο". Σε αντίθεση με τη γενικευμένη αυτήν αντίληψη, το πρώτο γεωδυναμικό μοντέλο που προτάθηκε για την εξέλιξη των Ελληνίδων είναι των Jacobshagen et al. (1978) και το οποίο προβλέπει την ύπαρξη των ωκεάνιων λεκανών Παιονίας, Αλμωπίας, Υποπελαγονικής - Πίνδου και της φυλλιτικής σειράς μεταξύ Ιονίου ζώνης και «Πλακωδών Ασβεστολίθων» (Plattenkalk) (Σχήμα 1.2). Οι ωκεάνιες αυτές λεκάνες λειτούργησαν σταδιακά και έκλεισαν διαδοχικά από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά από το Μάλμιο μέχρι το Μειόκαινο προκαλώντας την μετακίνηση της τεκτογένεσης προς τα Δυτικά επηρεάζοντας διαδοχικά τις Εσωτερικές και Εξωτερικές γεωτεκτονικές Ζώνες.



Σχήμα 1.2 Σχηματικές τομές που αναπαριστούν την ορογενετική εξέλιξη των Ελληνίδων (κατά Jacobshagen et al. 1978)

1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

Κατά τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, οι γνώσεις μας για τη γεωλογική δομή της Κρήτης έχουν αυξηθεί σημαντικά. Τα αποτελέσματα των ερευνών στα πλαίσια μεγάλου αριθμού προγραμμάτων ευρωπαϊκών και εθνικών ερευνητικών ινστιτούτων αλλά και μεμονωμένων ερευνητών, οδήγησε στην έκδοση του πρώτου συνοπτικού γεωλογικού χάρτη της Κρήτης το 1977 σε κλίμακα 1:200.000. Όπως φαίνεται στο χάρτη αυτόν αλλά και στους επόμενους που εκδόθηκαν από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας κλίμακας 1:500.000, (Σχήμα 1.3), το μεγαλύτερο ποσοστό προνεογενούς ηλικίας πετρωμάτων που δομούν και εμφανίζονται στην Κρήτη, ανήκουν σε μία ακολουθία μεταμορφωμένων πετρωμάτων που για δεκαετίες ήταν γνωστή στη βιβλιογραφία σαν «Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι», η παλαιογεωγραφική τοποθέτηση των οποίων παραμένει ένα ανοικτό γεωλογικό κεφάλαιο.

Η Κρήτη έχει και αυτή σαν τμήμα των Ελληνίδων Οροσειρών μία πολύπλοκη γεωλογική δομή αντιπροσωπευτική των πολύπλοκων τεκτονομεταμορφικών διαδικασιών του Αλπικού Ορογενετικού Κύκλου στο χώρο της Ανατολικής Μεσογείου. Χαρακτηριστικό της δομής της είναι η καλυμματική τοποθέτηση τεκτονικών ενοτήτων που αποτελούν λιθοστρωματογραφικές ομάδες πετρωμάτων, που διαφέρουν όχι μόνο στην αρχική τους παλαιογεωγραφική προέλευση και εξάπλωση, αλλά και στη σύσταση και το βαθμό μεταμόρφωσης.

Στην πάροδο των ετών οι διάφορες ερευνητικές ομάδες αλλά και μεμονωμένοι ερευνητές, στην προσπάθεια τους να καταγράψουν και να περιγράψουν συστηματικά τις ιδιομορφίες των διαφόρων αυτών ενοτήτων που δομούν την νήσο, εισήγαγαν έναν πολύ μεγάλο αριθμό ονοματολογιών που μόνο οι απόλυτα ειδικοί μπορούν να διακρίνουν τις ιδιομορφίες και τις διακριτές διαφορές. Μόνο για την τεκτονικά κατώτερη ενότητα, που δομεί το μεγαλύτερο ποσοστό της νήσου, έχουν χρησιμοποιηθεί οι όροι: Talea Ori-Serie (Epting et al. 1972), Ida Zone (Bonneau 1973), Talea Ori-Gruppe (Kuss & Thorbecke 1974), Plattenkalk - Serie (Creutzburg & Seidel 1975), ενότητα/ζώνη Κρήτης - Μάνης (Φυτρολάκης 1978, 1980). Για την αντιμετώπιση του προβλήματος προτάθηκε ο όρος Ομάδα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων (Plattenkalk-Gruppe), μετά από τη συρραφή εργασιών όπου τεκμηριώθηκε η αναγκαιότητα της εισαγωγής μίας ενιαίας ονοματολογίας βασισμένης σε λιθοστρωματογραφικά κριτήρια (Manutsoglu et al. 1995b).



Σχήμα 1.3 Τμήμα του Γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος (χαρτογράφηση ΙΓΜΕ, κλίμακα 1:500000). Με κίτρινες και πράσινες αποχρώσεις οι λεκάνες του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς.

Η Ομάδα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων κατατάσσεται στην προχώρα των Ελληνίδων. Τα πετρώματα της εμφανίζονται στην Πελοπόννησο δομώντας τους ορεινούς όγκους του Πάρνωνα, του Ταΰγετου και ολόκληρης της χερσονήσου της Μάνης. Μέσω της Κρήτης όπου και δομούν πάνω από το 70% της νήσου, συνεχίζουν την εμφάνιση τους στην Κάσο, Κάρπαθο και Ρόδο. Ολόκληρη η ακολουθία χαρακτηρίζεται κυρίως από τεκτονική συμπίεση με έντονη πτύχωση, λεπίωση, επιπτεύσεις και συγκινηματική μεταμόρφωση.

Στην Κρήτη παλαιότερα σε ηλικία πετρώματα της Ομάδας αυτής βρίσκονται, σε ανάστροφη στρωματογραφικά θέση, στα Ταλλαία Όρη της κεντρικής Κρήτης, αποτελούμενα από τους ανθρακικούς - κλαστικούς σχηματισμούς των Φόδελε και Σίσσες, που με τη βοήθεια απολιθωμάτων (τρηματοφόρα, βρυόζωα, φύκη και κωνόδοντα) χρονολογήθηκαν ηλικίας Ανωτέρου Πέρμιου. Σαν το παλαιότερο τμήμα των σχηματισμών αυτών περιγράφηκαν οι σχιστόλιθοι του Γαληνού που εξ' αιτίας μίας πολύ πλούσιας απολιθωμένης πανίδας και χλωρίδας τοποθετήθηκαν χρονικά στο όριο Ανωτέρου Λιθανθρακοφόρου και Πέρμιου (Epting et al. 1972, Koenig & Kuss 1980). Προς το υπερκείμενο, μετά από ένα στρωματογραφικό κενό από το Ανίσιο μέχρι το Κάρνιο ακολουθεί μία μεγάλου πάχους ακολουθία στρωματολιθικών δολομιτών που τα κατώτερα τμήματα της χρονολογήθηκαν Λιασίου ηλικίας.

Στη συνέχεια βρίσκεται η γνωστή ανθρακική ακολουθία των εναλλασσόμενων πλακωδών ασβεστόλιθων με κερατολίθους, από όπου και προήλθε και η ονοματολογία της ομάδας των πετρωμάτων αυτών και τέλος η ακολουθία του Καλαβρού, ένας κλαστικός σχηματισμός που διαφέρει εντελώς από το φλύσχη των δυτικών Ελληνίδων. Στην βάση του βρέθηκαν τρηματοφόρα ηλικίας Κάτω Ολιγόκαινου (Φυτρολάκης 1972, Bonneau 1973).

Τεκτονικά επωημένη στην ενότητα Πλακωδών Ασβεστόλιθων βρίσκεται η ενότητα του Τρυπαλίου, που αποτελείται από μεταμορφωμένους δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, λατυποπαγείς ασβεστόλιθους έως γραουβάκες, σκούρους κυψελώδεις δολομίτες, άσπρα ζαχαρόκοκκα μάρμαρα και εμφανίσεις γύψου στη βάση. Η ηλικία τους καθορίστηκε με τη βοήθεια απολιθωμάτων μεταξύ Άνω Τριαδικού - Κάτω Ιουρασικού.

Πάνω από την ενότητα του Τρυπαλίου βρίσκεται η ενότητα των Φυλλιτών - Χαλαζιτών, η οποία περιλαμβάνει φυλλίτες, χαλαζίτες, μετά-ψαμμίτες, μετά-κροκαλοπαγή, φακοειδείς ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, μετά-ανδεσίτες, μεταβασίτες. Η ηλικία της είναι μεταξύ Περμίου - Τριαδικού. Στην ενότητα αυτή συμπεριλαμβάνεται από τους περισσότερους ερευνητές και το ημιμεταμορφωμένο σύστημα των Ραβδούχων που αποτελεί και το υπόβαθρο της ανθρακικής ακολουθίας της ζώνης της Τρίπολης, που ακολουθεί επίσης με τεκτονική επαφή και αποτελείται από το υποκείμενο και του μεγάλου πάχους νηριτικούς ασβεστόλιθους. Σε ανώτερη τεκτονική θέση βρίσκεται απωθημένο το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου.

Πάνω από τις παραπάνω αναφερόμενες εξωτερικές ζώνες υπάρχουν σε ανώτερη τεκτονική θέση αλλόχθονα τεκτονικά λείπια των εσωτερικών ζωνών, όπως είναι η ενότητα της Άρβης που περιλαμβάνει τμήματα οφιολιθικού συμπλέγματος, η ενότητα των Αστερουσίων που περιέχει γενέσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες.

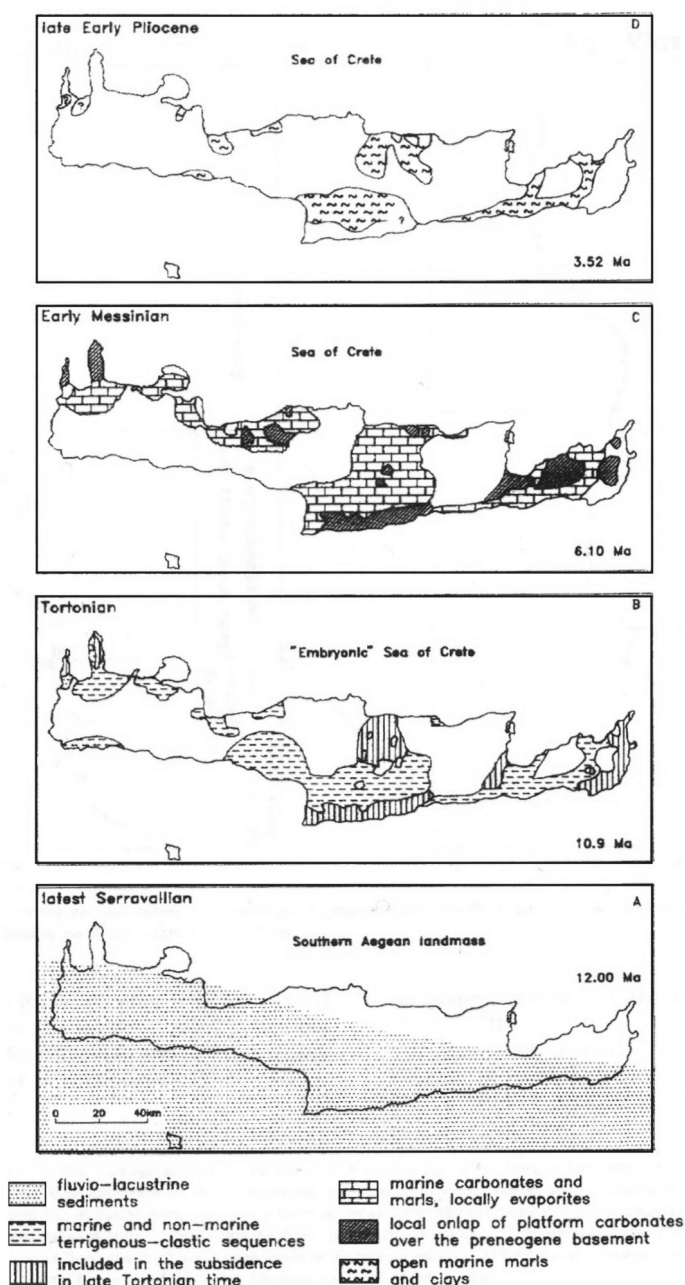
Τέλος, πάνω από τους αλπικούς σχηματισμούς βρίσκονται ιζήματα του Νεογενούς και Τεταρτογενούς, τα οποία συνήθως έχουν κυμαινόμενο πάχος και εξάπλωση στις διάφορες περιοχές της Κρήτης.

1.2.1 ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

Για την κατανόηση της στρωματογραφικής εξέλιξης και της στρωματογραφικής θέσης των σχηματισμών του Νεογενούς, δηλαδή των ιζηματολογικών ακολουθιών που αποτέθηκαν τα τελευταία δεκατρία περίπου εκατομμύρια χρόνια, δίνεται μία σύνοψη των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από τις έρευνες που έχουν γίνει μέχρι τώρα για την Κρήτη.

Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται μία σειρά από απλοποιημένους παλαιογεωγραφικούς χάρτες. Οι διαδοχικές παλαιογεωγραφικές διατάξεις αντικατοπτρίζουν τέσσερα κύρια επεισόδια κατά την εξέλιξη του ανάγλυφου κατά μήκος της διατομής στην κεντρική Κρήτη. Κατά τη διάρκεια του πρώτου επεισοδίου (Άνω Σερραβάλιο) στην περιοχή λάμβανε χώρα λιμναία ιζηματογένεση και οριοθετούσε την ξηρά του νοτίου Αιγαίου (Southern Aegean landmass).

Το δεύτερο και τρίτο επεισόδιο (Ανώτατο Σερραβάλιο - Μεσσήνιο) δημιούργησαν ένα παλαιογεωγραφικό καθεστώς, όπου οι σημερινές κορυφογραμμές που οριοθετούν και διατέμνουν τη λεκάνη του Ηρακλείου, άρχισαν να παίζουν ενεργό ρόλο στην παλαιογεωγραφία και την τοπογραφία του πυθμένα. Κατά τη διάρκεια του Άνω Μειοκαίνου αναπτύχθηκε η λεκάνη του Ηρακλείου ενώ οι κορυφογραμμές της κεντρικής Κρήτης με διεύθυνση Α - Δ άρχισαν να διαχωρίζουν τη λεκάνη στο βόρειο και νότιο τμήμα της. Το τέταρτο επεισόδιο χαρακτηρίζεται από την έντονη άνοδο όλης της περιοχής κατά το Πλείο-Πλειστόκαινο.



Σχήμα 1.4 Παλαιογεωγραφική εξέλιξη των Νεογενών ιζημάτων στην Κρήτη (κατά Meulenkamp et al. 1979)

Μία διαφορετική άποψη εκφράσθηκε για την εξέλιξη της περιοχής από τον J. H. Ten Veen (1998). Οι λιθοστρωματογραφικές ακολουθίες που σχηματίσθηκαν μπορούν να περιγραφούν ως ακολούθως:

1. Μετά την ολοκλήρωση της τεκτονικής ορογενετικής φάσης που οδήγησε στο σχηματισμό του προνεογενούς ηλικίας πακέτου καλυμμάτων των Εξωτερικών Ελληνίδων και κατά συνέπεια και της Κρήτης, η ιζηματογένεση στις λεκάνες του Νεογενούς ξεκίνησε με την απόθεση χερσαίων κλαστικών κατά τη διάρκεια του Μέσο Μειόκαινου. Οι αμμώδεις και ιλυώδεις αποθέσεις με μικρές παρενστρώσεις από κροκαλοπαγή πλήρωσης καναλιού ανήκουν στο σχηματισμό του Βιάννου.

2. Περίπου κατά την Μέσο-Άνω Μειόκαινου μετάβαση, έλαβε χώρα επαναπόθεση ασβεστολιθικών λατυποπαγών και μαζική τοποθέτηση ασυνήθιστων τεμαχών από παλαιότερους ασβεστόλιθους της ζώνης της Τρίπολης.

3. Στο Κατώτερο Τορτόνιο αποτέθηκαν τα κλαστικά του κατώτερου μέρους του σχηματισμού Αμπελούζου. Στρωματογραφικά, αυτός ο σχηματισμός υπέρκειται του σχηματισμού Σκοινιά. Το κατώτερο μέρος του σχηματισμού Αμπελούζου χαρακτηρίζεται από ιζηματογενείς φάσεις που κυμαίνονται από αδρομερή κροκαλοπαγή αλλουβιακού ριπιδίου ως τους ομοιογενείς ψαμμίτες υφαλοκρηπίδας. Μία τάση εμβάθυνσης που αρχίζει να εμφανίζεται μπορεί να τεκμηριωθεί από τους υψηλότερης τάξης κύκλους απόσυρσης/επίκλησης, όπως απεικονίζεται από τις εναλλαγές αδρόκοκκων με λεπτόκοκκων δελταϊκών αποθέσεων. Το ηπειρωτικό έως ρηχής θάλασσας μέρος του σχηματισμού Αμπελούζου έχει χρονολογηθεί ως Κάτω Τορτόνιο.

4. Κατά τη διάρκεια του Τορτονίου πραγματοποιήθηκε μία μετάβαση από αποθέσεις παράκτιας άμμου σε συσσώρευση μπλε-γκρι μαργών ανοιχτής θάλασσας. Στη στρωματογραφική καταγραφή αυτό εκφράζεται από τη μετάβαση από το χαμηλότερο στο ανώτερο μέρος του σχηματισμού Αμπελούζου. Η λεπτομερής στρωματογραφία δείχνει ηλικία Άνω Τορτονίου για τις αποθέσεις βαθιάς θάλασσας του σχηματισμού Αμπελούζου.

5. Την απόθεση χερσαίων κλαστικών ακολούθησε η συσσώρευση των ασβεστόλιθων και μαργών του Μεσσηνίου. Αυτή η αλλαγή είναι φανερή στα ιζήματα του σχηματισμού Αγ. Βαρβάρα του Μεσσηνίου. Στα βορειότερα και νοτιότερα μέρη της περιοχής, το χαμηλότερο μέρος του σχηματισμού Αγ. Βαρβάρα αποτελείται από τις μικτές χερσαίες κλαστικές/ασβεστιτικές αποθέσεις. Ρηχής θάλασσας αποθέσεις υπέρκεινται ασύμφωνα του σχηματισμού Αμπελούζου. Στη γύρω περιοχή το μέλος σχηματισμού Πύργος υπέρκειται ασύμφωνα των κεκλιμένων αποθέσεων των σχηματισμών Βιάννου και Αμπελούζου και αποτελείται από ψαμμίτες. Στη βάση της ακολουθίας βρίσκονται κάποιες αδρομερείς χερσαίες αποθέσεις. Στο νότιο μέρος της περιοχής, μέλος σχηματισμού Πύργος υπέρκειται του σχηματισμού Αμπελούζου, στην κορυφή του οποίου υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι είχε χερσαίψει. Το ανώτερο όριο του μέλος σχηματισμού Πύργος χαρακτηρίζεται από τα χερσογενή κλαστικά και από την αλλαγή προς τους βιογενείς ασβεστόλιθους και μάργες. Στο κεντρικό μέρος της λεκάνης ο σχηματισμός Αγ. Βαρβάρας χαρακτηρίζεται από ομοιογενείς λαμινοειδείς μάργες, που συσσωρεύονται σε μία βαθιά θαλάσσια λεκάνη.

Οι αποθέσεις στη βάση της κατωφέρειας που είναι πλευρικά ισοδύναμες με το μέλος σχηματισμού Πύργος, εναλλάσσονται με μάργες βαθιάς θάλασσας που ανήκουν στην κορυφή του σχηματισμού Αμπελούζου. Το όριο μεταξύ του σχηματισμού Αμπελούζου βαθιάς θάλασσας και του υπερκείμενου σχηματισμού Αγ. Βαρβάρα χαρακτηρίζεται από την ξαφνική αλλαγή από μπλε-γκρίζες μάργες στις υπόλευκες λαμινοειδείς μάργες. Το μέλος σχηματισμού Πύργος δεν είναι παρόν, παρόλο που εμφανίζονται κροκαλοπαγή πλήρωσης καναλιού στο μεταβατικό τμήμα μεταξύ των δύο σχηματισμών.

6. Στο νότιο μέρος της λεκάνης του Ηρακλείου τα ιζήματα του Κατώτατου Πλειοκαίνου υπέρκεινται των ασβεστόλιθων Κάτω Μεσσηνίου. Το κατώτερο Πλειόκαινο αποτελείται από υπόλευκες μάργες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους βαθιάς θάλασσας που αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα της Πλειοκαινικής επίκλυσης που τερμάτισε την κρίση αλμυρότητας του Μεσσηνίου. Αυτές οι βαθιάς θάλασσας αποθέσεις περνούν προς τα πάνω σε περισσότερο αμμώδεις και κροκαλοπαγείς αποθέσεις. Η ακολουθία απεικονίζει ρήγευση, ως και χέρσευση ως αποτέλεσμα στην κλίση των στρωμάτων προς το Βορρά. Στο νότιο τμήμα, η ανύψωση κατά το ανώτερο Κάτω Πλειόκαινο ακολουθήθηκε από την καινούρια ταπείνωση στο κατώτερο Άνω Πλειόκαινο, την οποία ακολούθησε μία δεύτερη ανύψωση κατά το Άνω Πλειόκαινο ως σήμερα. Στο βόρειο τμήμα, τα ιζήματα του Κατώτερου Πλειοκαίνου είναι ενσωματωμένα με τα μαργαϊκά λατυποπαγή, τα οποία απεικονίζουν ένα επεισόδιο τεκτονικής αστάθειας που ακολούθησε την επίκλυση του Κάτω Πλειοκαίνου (Από Μανούτσογλου 2007).

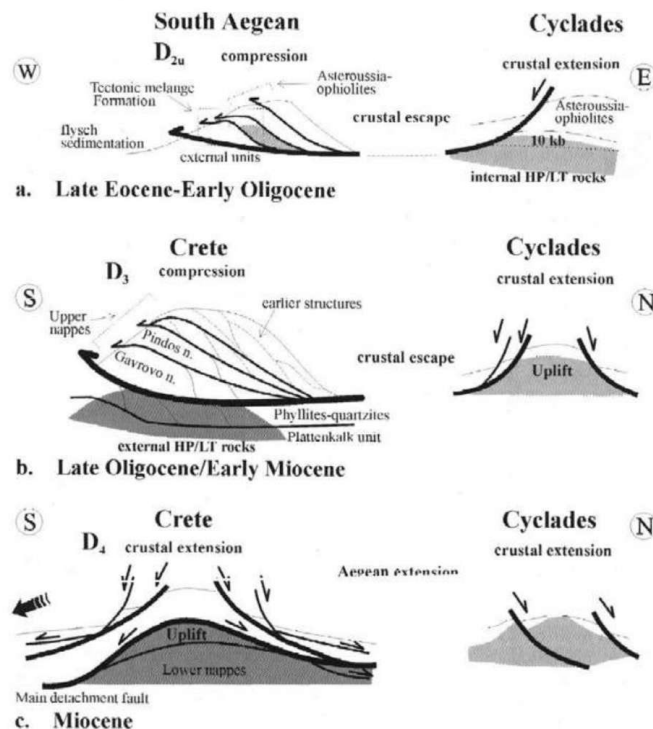
1.3 ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΝΗΣΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

Για πολλά χρόνια η τεκτονική εξέλιξη της Κρήτης και του νοτίου Αιγαίου, θεωρούνταν ως το αποτέλεσμα της τελικής αλπικής, συμπίεστικής τεκτονικής και του μεταγενέστερου νεοτεκτονικού εφελκυσμού (Φυτρολάκης 1980, Angelier et al. 1982, Bonneau 1984, Hall et al. 1984). Το πιο αποδεκτό μοντέλο πρότεινε τη διαδοχική ανάπτυξη ζωνών υποβύθισης, οι οποίες συνεχώς μετατοπίζονταν προς τις εξωτερικότερες περιοχές του ελληνικού χώρου. Όμως η αναγνώριση της διαδικασίας έκτασης (εφελκυσμού) του ηπειρωτικού φλοιού ως κύριας συνιστώσας κατά την τεκτονική εξέλιξη των Κυκλάδων και της Κρήτης, τροποποίησε τις μέχρι τότε απόψεις για τη γεωλογική εξέλιξη του νοτίου Αιγαίου (Φασουλάς 2000).

Αλπική τεκτονική

Στο Άνω Κρητιδικό παρατηρείται στα ανώτερα καλύμματα της Κρήτης η παλαιότερη παραμόρφωση. Τα πετρώματα του καλύμματος των Αστερουσίων δέχθηκαν μεταμόρφωση υψηλής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μίας λέπτυνσης του φλοιού (Φυτρολάκης 1980, Φασουλάς 2000). Ανάλογα πετρώματα δέχθηκαν ίδια μεταμόρφωση στην περιοχή των Κυκλάδων, γεγονός που οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το κάλυμμα των Αστερουσίων μπορεί να αποτελούσε τμήμα ενός μεγάλου ηπειρωτικού τεμάχους, που εκτάθηκε και λεπτύνθηκε.

Στο τέλος *Ηωκαίνου* – αρχές *Ολιγοκαίνου*, ένα κύριο τεκτονικό γεγονός επηρέασε όλα τα ανώτερα καλύμματα, προκαλώντας την επώθησή τους προς τα δυτικά και το σχηματισμό τεκτονικού ‘melange’, διαδικασία που πιθανόν σχετίζεται με μία απόσπαση και διαφυγή της ενότητας της Πρέβελης, κρυσταλλοσχιστωδών και οφιολίθων από τις Κυκλάδες προς την Κρήτη (Σχήμα 1.5). Στο *Άνω Ολιγόκαινο*, παρατηρήσεις υπαίθρου έδειξαν απότομη αλλαγή της φοράς τοποθέτησης των καλυμμάτων προς τα νότια, αλλαγή που προκάλεσε την υποβύθιση και μεταμόρφωση των κατωτέρων καλυμμάτων και την επανατοποθέτηση των ανωτέρων. Στις αρχές *Μειοκαίνου*, ηπειρωτική έκταση (ως αντιστάθμισμα στην προηγούμενη πάχυνση) προκαλεί την κατάρρευση των καλυμμάτων της Κρήτης και το σχηματισμό των πρώτων συντεκτονικών λεκανών, ενώ δημιουργήσε προς το βορρά και νότο, ρήγματα απόσπασης, τα οποία διευκόλυναν την απομάκρυνση τουλάχιστον 10 km φλοιού ανάμεσα στα ανώτερα και κατώτερα καλύμματα, προκαλώντας ταυτόχρονα την τεκτονική ανύψωσή τους. Η έκταση του Μειοκαίνου συνεπώς, οδήγησε στην επανατοποθέτηση όλων των καλυμμάτων της Κρήτης και την απολέπυνση όλων των πετρωμάτων που βρίσκονται πάνω από το κάλυμμα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων, χωρίς όμως να επηρεάσει τα ανώτερα μεταμορφωμένα καλύμματα (Φασουλάς 2000).



Σχήμα 1.5 Γεωλογική εξέλιξη Κρήτης (Φασουλάς 2000)

Μετα - αλπική τεκτονική

Κατά τη διάρκεια του *Νεογενούς* η Κρήτη επηρεάστηκε κυρίως από εφελκυστική - εκτατική τεκτονική με πιθανά διαλείμματα συμπιεστικών φάσεων. Από το τέλος του Μειόκαινου, η τεκτονική ανύψωση ολόκληρης (σχεδόν) της Κρήτης ενίσχυσε την καρστική αποσάθρωση των ανθρακικών πετρωμάτων σχηματίζοντας καρστικές δομές (φαράγγια, σπηλιές, οροπέδια κτλ.).

Πρόσφατες τεκτονικές μελέτες (Fassoulas 2001, Ten Veen et al. 1999) έδειξαν ότι από το Μέσο Μειόκαινο μέχρι σήμερα, η τεκτονική εξέλιξη της Κρήτης ήταν αποτέλεσμα διαδοχικών εφελκυστικών περιόδων που δημιούργησαν τουλάχιστον τρεις γενεές ρηγμάτων.

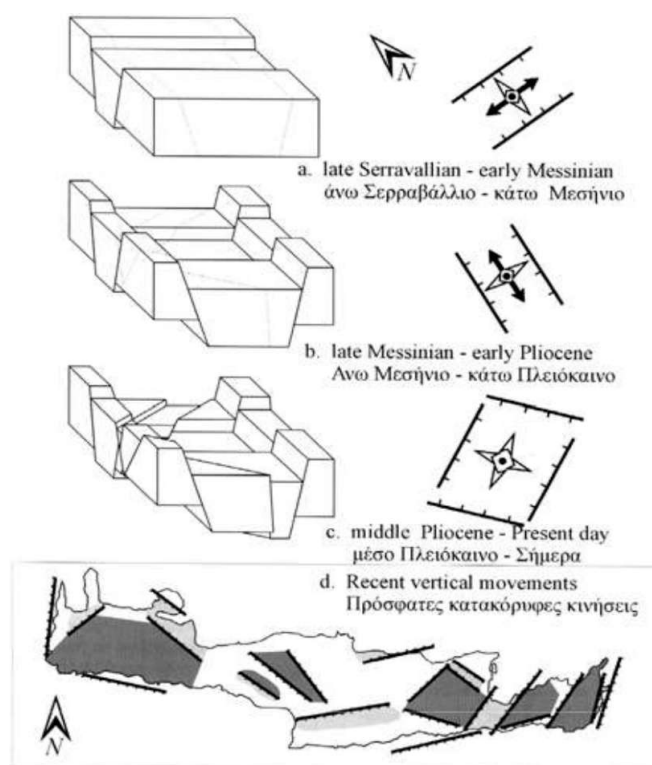
Η **πρώτη** γενεά ρηγμάτων διεύθυνσης Α – Δ συνέβει κατά το *Μέσο/Άνω Μειόκαινο – αρχές Μεσηνίου*, ως αποτέλεσμα του Β - Ν εφελκυστικού πεδίου τάσεων, το οποίο δημιούργησε και τις πρώτες λεκάνες της Κρήτης (Σχήμα 1.6a).

Η **δεύτερη** γενεά ρηγμάτων διεύθυνσης Β - Ν, συνέβει κατά το *τέλος Μεσηνίου – Μέσο Πλειόκαινο*, ως αποτέλεσμα σημαντικών διαφοροποιήσεων στο πεδίο τάσεων. Προκλήθηκε η ανύψωση ορισμένων περιοχών και ταυτόχρονα η δημιουργία των λεκανών του ν. Ηρακλείου - Μεσσαράς, της Ιεράπετρας και του ν. Χανίων - Καστέλι (Σχήμα 1.6b).

Η **τρίτη** γενεά ρηγμάτων διεύθυνσης ΒΑ - ΝΔ και ΒΔ - ΝΑ, δηλ. κάθετα μεταξύ τους καθώς οι εφελκυστικοί άξονες των τάσεων βρίσκονται οριζόντιοι και ίδιου μεγέθους (Σχήμα 1.6c). Η διαδικασία συνέβει κατά το *τέλος Πλειόκαινου*, ως αποτέλεσμα της σταθεροποίησης του πεδίου των τάσεων.

Εξ' αιτίας αυτών των ρηγμάτων δημιουργήθηκαν μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες και βυθίσματα (νέες λεκάνες) διαφόρων υψομέτρων, όπου αποτέθηκαν τα μετέπειτα ιζήματα του Νεογενούς, ενώ συνεχίστηκε με μεγάλους ρυθμούς η τεκτονική ανύψωση ορισμένων περιοχών.

Το σημερινό ανάγλυφο και τοπογραφία της Κρήτης διαμορφώθηκε από τη δράση πολλών και μεγάλης κλίμακας ρηγμάτων της τρίτης γενεάς (Εικόνα 1.6d), με ορισμένα από αυτά να είναι ακόμα ενεργά.

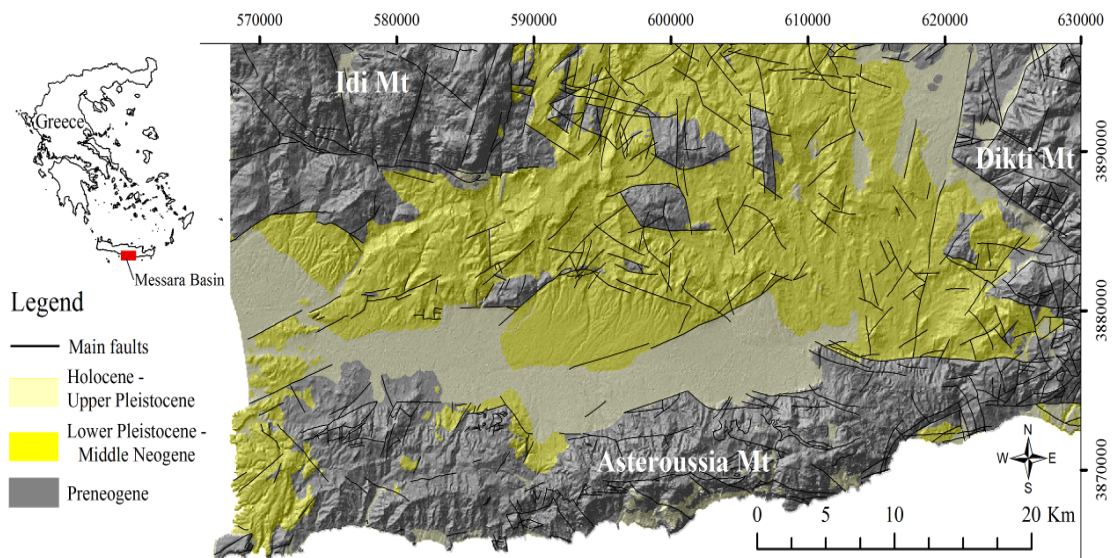


Σχήμα 1.6 Τεκτονική εξέλιξη λεκάνης Ηρακλείου (a. - c.) και πρόσφατες τεκτονικές κινήσεις Κρήτης (d.), (καταβυθίσεις με ανοικτό γκρι και ανυψώσεις με σκούρο γκρι) (Φασουλάς 2000)

1.4 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕΣΣΑΡΑΣ

Η λεκάνη της Μεσσαράς (Σχήμα 1.7) εκτείνεται κατά διεύθυνση Α - Δ και αποτελεί το νότιο τμήμα της λεκάνης του Ηρακλείου. Αποτελεί μία τεκτονική τάφρο που ορίζεται από τις ρηξιγενείς ζώνες Μαλεβυζίου, Καμαρών, Γέργερης (δυτικά) από τα ρήγματα Καστελίου, Χερσονήσου, Ξενιάκου (ανατολικά) και των Αστερουσίων ορέων (νότια).

Η λεκάνη διακρίνεται σε δυο (2) επιμέρους τεκτονικές ενότητες: Στην πρώτη περιλαμβάνονται οι τεταρτογενείς και οι νεογενείς σχηματισμοί και στη δεύτερη ανήκουν οι προνεογενείς σχηματισμοί των οροσειρών του Ψηλορείτη, της Δίκτης και των Αστερουσίων ορέων, οι οποίες καταλαμβάνουν τα όρια της λεκάνης.



Σχήμα 1.7 Τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης λεκάνης Μεσσαράς (χαρτογράφηση ΙΓΜΕ κλίμακας 1:50.000)

Στο υπόμνημα: με ανοικτό κίτρινο χρώμα οι αποθέσεις του Ολόκαινου – Ανώτερου Πλειστόκαινου, με κίτρινο οι αποθέσεις του Κατώτερου Πλειστόκαινου – Μέσο Νεογενούς και με γκρι οι προνεογενείς αποθέσεις.

Στη γεωλογική δομή της λεκάνης της Μεσσαράς συμμετέχουν από τις νεότερες προς τις παλαιότερες οι παρακάτω στρωματογραφικές και τεκτονικές ενότητες σχηματισμών (βλ. παράγραφο 1.2.1):

Ολόκαινο: αλλουβιακές αποθέσεις, που αποτελούν προϊόντα αποσάθρωσης και καλύπτουν μικρές εσωτερικές λεκάνες καθώς και τις κοίτες των υδρορεμάτων (χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά, ερυθρογή με κροκαλολατύπες) και *κάνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα*, που αναπτύσσονται κυρίως στις παρυφές των Αστερουσίων (κυρίως ανθρακικής σύστασης λατύπες, αναμειγμένες με ερυθρογή).

Πλειστόκαινο - Ολόκαινο: ποταμολιμναία κροκαλοπαγή, άμμοι, ιλύολιθοι και αργιλικά στρώματα αποτελούμενα κυρίως από μεταφερμένα υλικά του σχηματισμού Αγ. Γαλήνη. Καλύπτουν το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης.

Ανώτερο Πλειόκαινο - Πλειστόκαινο: σχηματισμός Αγ. Γαλήνη (ποτάμια και λιμναία ερυθρά κροκαλοπαγή, ερυθρές και κίτρινες άμμοι, ιλυόλιθοι, άργιλοι, με παρεμβολές λιμναίων μαργαϊκών ασβεστόλιθων)

Νεογενές

Κατώτερο πλειόκαινο: σχηματισμός Φοινικιάς (κυρίως λευκές μάργες, με παρεμβολές αργίλων και άμμων, άργιλοι, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και κροκαλοπαγή).

Ανώτερο Τορτόνιο – Μεσσήνιο: σχηματισμός Αγ. Βαρβάρας (βιοκλαστικοί, τοπικά κροκαλοπαγείς ή λατυποπαγείς, ασβεστόλιθοι, ολισθημένοι, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και εναλλαγές ασβεστιτικών μαργών ή μαργαϊκών ασβεστολίθων με παρεμβολές γύψων. Στο ανώτερο τμήμα του σχηματισμού απαντούν ασβεστολιθικοί ψαμμίτες και κροκαλοπαγή).

Τορτόνιο: σχηματισμός Αμπελούζου (ακανόνιστες εναλλαγές από θαλάσσια υφάλμυρα και ποτάμια κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ιλυόλιθους, μάργες, ιλυώδεις άργιλους και λιγνίτες).

Ανώτερο Σερραβάλλιο: σχηματισμός Σκοινιά (καλά στρωμένες θαλάσσιες άργιλοι και ιλυώδεις άργιλοι με παρεμβολές ψαμμιτών).

Μέσο Μειόκαινο: σχηματισμός Βιάννου (ποταμολιμναίες σκούρες στρωματώδεις άργιλοι και ιλυώδεις άργιλοι, με ενδιαστρώσεις ασβεστόλιθων και ψαμμιτών. Παρεμβολές κροκαλοπαγών κυρίως στα κατώτερα τμήματα του σχηματισμού).

Προνεογενείς σχηματισμοί

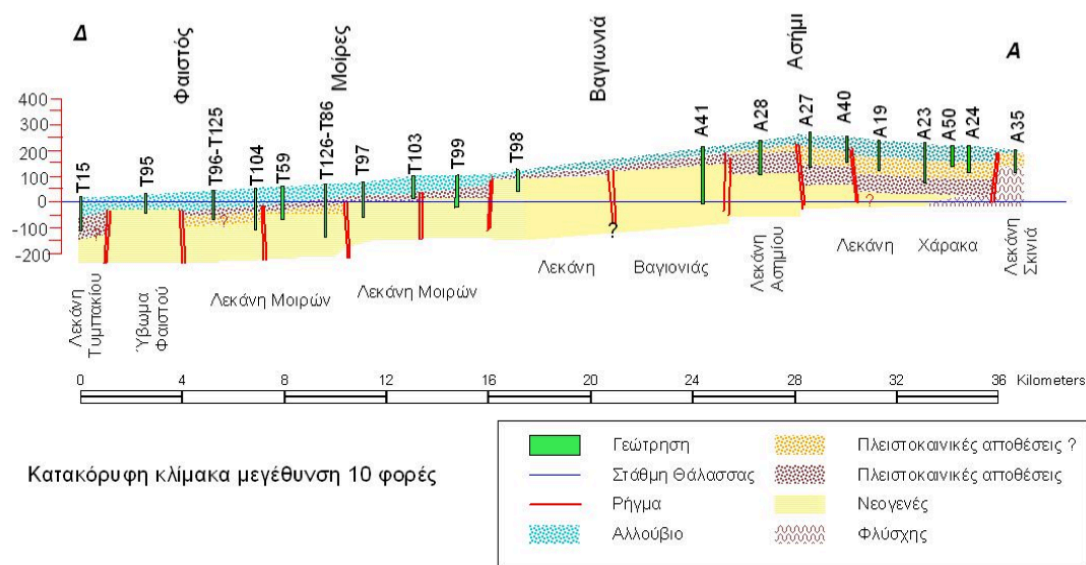
Νότιο τμήμα: τα Αστερούσια όρη συνίσταται από Μεσοζωικά πετρώματα με βασικούς σχηματισμούς το φλύσχη και τα ανθρακικά της ζώνης Τρίπολης. Επιπλέον υπάρχουν μερικές επιφανειακές εμφανίσεις έντονα ρηγματωμένων και ελαφρώς καρστικοποιημένων ασβεστόλιθων της ζώνης Πίνδου. Στα μεγαλύτερα υψόμετρα απαντώνται πετρώματα των εσωτερικών ζωνών.

ΒΔ τμήμα: το όρος Ψηλορείτης συνίσταται από μεσοζωικά πετρώματα της ενότητας της Τρίπολης (ασβεστόλιθοι, φλύσχη), πετρώματα της ενότητας Φυλλιτών – χαλαζιτών και πετρώματα του αυτόχθονου συστήματος (πλακώδεις ασβεστόλιθοι, ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι ζώνης Ιονίου). Στα χαμηλότερα υψόμετρα απαντούν πλευρικά κορήματα (λατύπες).

Ακολουθεί περιγραφή της νοητής επιμήκης οριζόντιας τομής του πεδινού τμήματος της λεκάνης της Μεσσαράς, διεύθυνσης Α – Δ (Σχήμα 1.8) ώστε να αποσαφηνιστεί η τοποθεσία της περιοχής μελέτης (λεκάνη Τυμπακίου).

Τομή πεδινού τμήματος (Α – Δ)

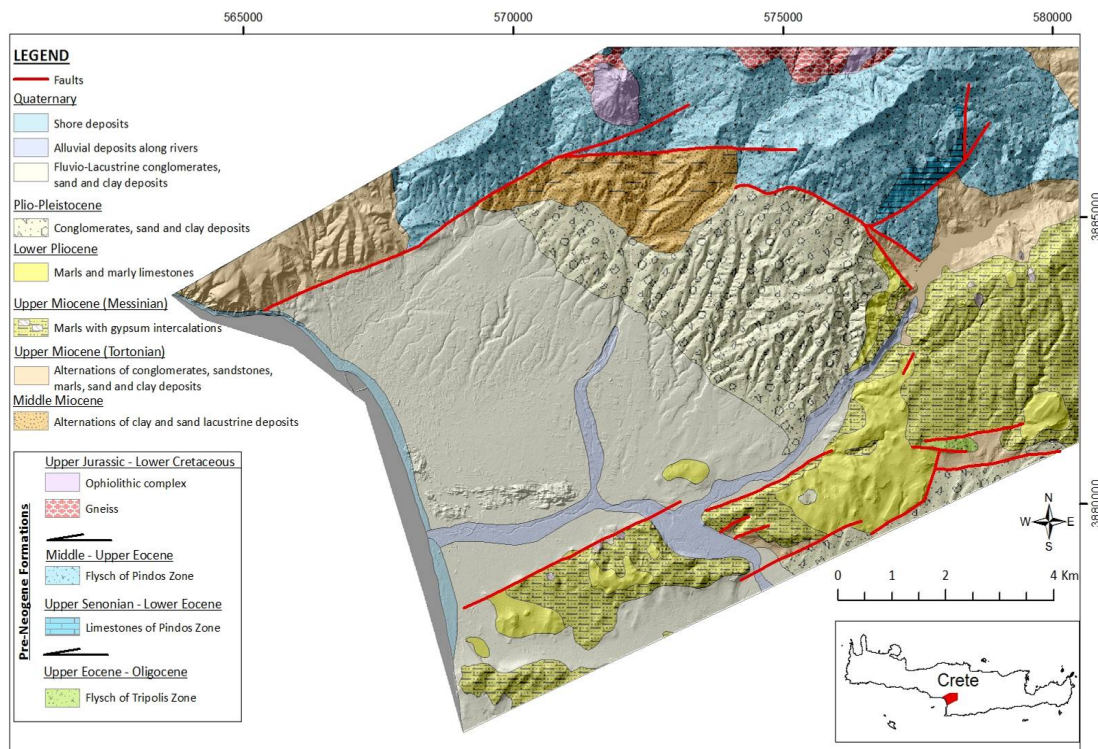
Από την τομή που ακολουθεί την κατεύθυνση των κύριων υδρορευμάτων του Γεροπόταμου και του Αναποδάρη, και τη γεωτεκτονική εξέλιξη της κεντρικής Κρήτης συνάγεται ότι η λεκάνη είναι μία σύνθετη αλληλουχία από ρηξιτεμάχη (blockfaults) Νεογενούς / Μεσοζωϊκού υποβάθρου. Στα ρηξιτεμάχη δόθηκαν οι ονομασίες (ανατολικά προς δυτικά): λεκάνη Τυμπακίου, Μοιρών, Βαγιονιάς, Ασημίου, Χάρακα και Σκινιά. Παρατηρούμε μία βύθιση από το ρηξιτέμαχος της λεκάνης της Βαγιονιάς που βαθμιαία αυξάνει προς τα δυτικά και τα ανατολικά στις λεκάνες Μοιρών και Ασημίου - Χάρακα αντίστοιχα. Προς τα δυτικά η ανύψωση του υβώματος της Φαιστού απομονώνει την αλλουβιακή / πλειο - πλειστοκαινική λεκάνη του πεδινού τμήματος της Μεσσαράς από την παράκτια λεκάνη του Τυμπακίου. Η μόνη υδραυλική επικοινωνία τους γίνεται διαμέσου των αλλουβιακών και πλειστοκαινικών σχηματισμών στο στένεμα της Φαιστού. Ανάλογα προς τα δυτικά η ανύψωση του προνεογενούς (φλύσχης) και νεογενούς υποβάθρου της λεκάνης του Σκινιά σχηματίζει την αλλουβιακή / πλειστοκαινική λεκάνη του Ασημίου - Χάρακα.



Σχήμα 1.8 Γεωλογική τομή (Α – Δ) (Κριτσωτάκης 2009)

1.4.1 ΛΕΚΑΝΗ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ

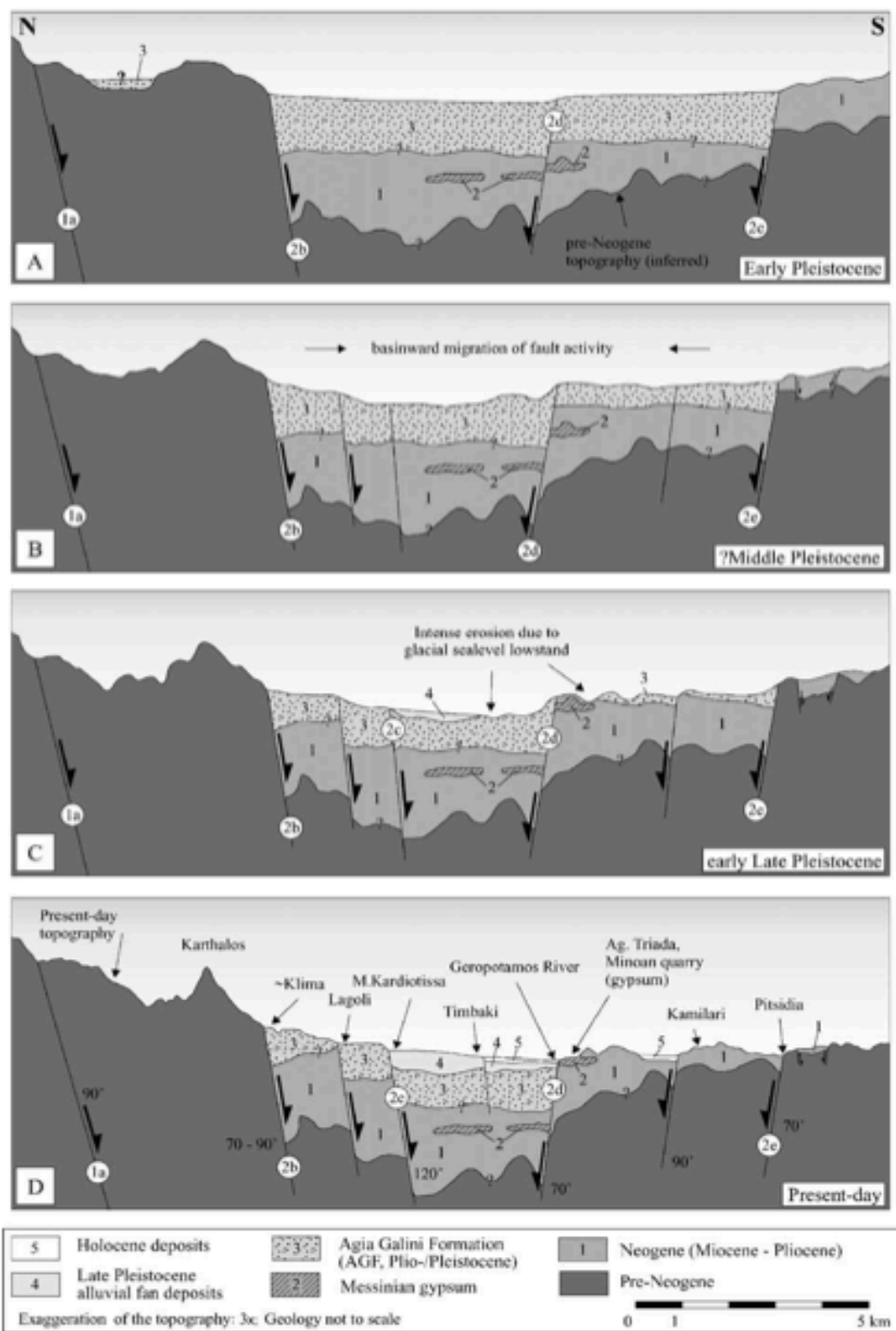
Οι γεωλογικές συνθήκες, η τεκτονική εξέλιξη και η τοπογραφία της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στα Σχήματα 1.9, 1.10 και 1.11 αντίστοιχα. Η λεκάνη οριοθετείται από το ρήγμα Αγ. Τριάδας (ΝΔ), από το ρήγμα Βόρης (ΝΑ), από το ρήγμα Κλίμα (Β), από το ρήγμα Κισσού (Α) και από την ακτογραμμή (Δ).



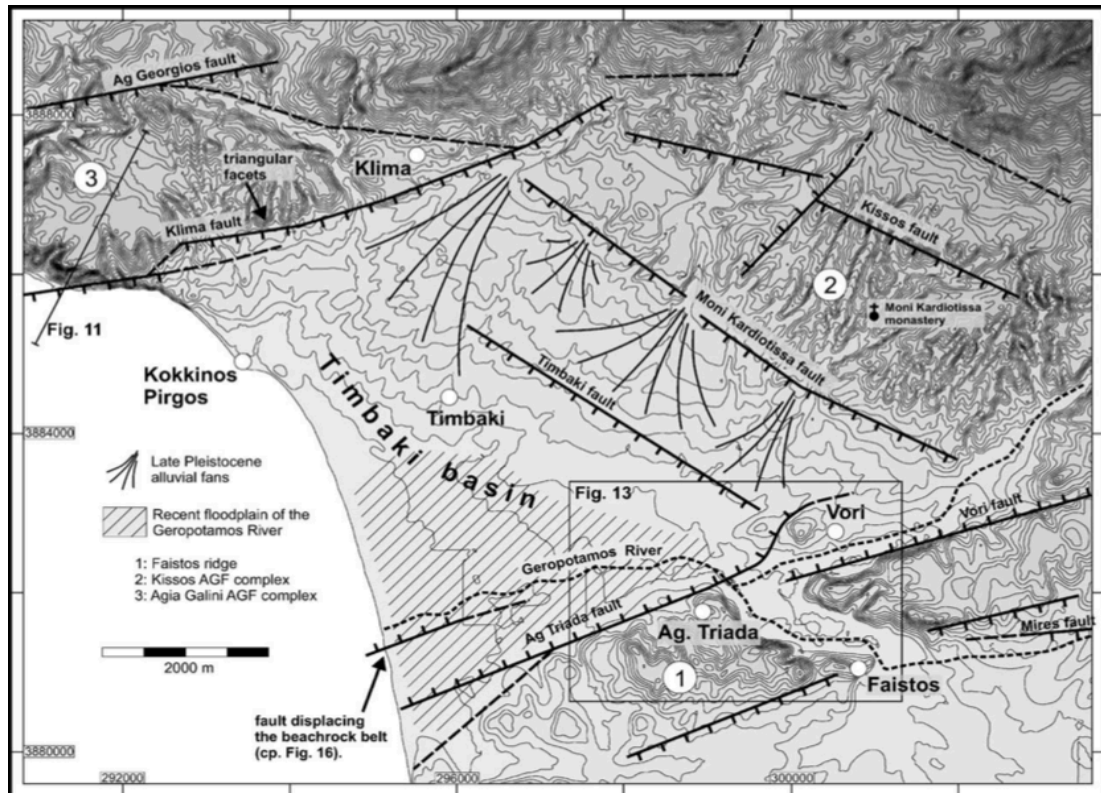
Σχήμα 1.9 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Τυπακίου κλίμακας 1:50000, βασιζόμενος στη γεωλογική χαρτογράφηση του ΙΓΜΕ.

Στην περιοχή εμφανίζονται οι παρακάτω γεωλογικοί σχηματισμοί από τα ανώτερα προς τα κατώτερα βάση:

- Παράκτιες αποθέσεις του Τεταρτογενούς (Ολόκαινο), που αποτελούνται από άμμους συγκολλημένες με κροκάλες και ψαμμίτες.
- Κροκαλοπαγή, άμμοι και άργιλοι του Πλειο - Πλειστόκαινου.
- Θαλάσσιες αποθέσεις του Κατώτερου Πλειόκαινου, που περιλαμβάνουν λευκές μάργες και λευκούς μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, καστανωπές φυλλώδεις μάργες, άμμους, κροκαλοπαγή και στα ανώτερα μέρη κλαστικούς ασβεστόλιθους.
- Σχηματισμός Αποστόλων του Μεσσηνίου (Ανώτερο Μειόκαινο). Αποτελείται από κυανές, τεφρές και θαλάσσιες μάργες, με βάση συνήθως από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και άμμους πλούσιους σε ασβεστόλιθους.
- Ακανόνιστες εναλλαγές από αποθέσεις υφάλμυρων και γλυκών νερών, με ενδιαστρώσεις υφαλογενών ασβεστόλιθων. Ειδικότερα εμφανίζονται κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι, άργιλοι, λιγνίτες και ασβεστόλιθοι, με μαλάκια γλυκού νερού και υπολείμματα φυτών. Σχηματισμοί που ανήκουν στο Ανώτερο Μειόκαινο (Τορτόνιο).
- Λατυποπαγή, λιμναίες και θαλάσσιες αποθέσεις του Μέσο και Ανώτερου Μειόκαινου.



Σχήμα 1.10 Τεκτονική εξέλιξη της λεκάνης Τυρρακίου (Πλειστόκαινο – σήμερα) (Peterek & Schwarze 2004)



Σχήμα 1.11 Τοπογραφικός χάρτης λεκάνης Τυμπακίου (ισοϋψείς: 10 m) (ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας DEM) (Peterek & Schwarze 2004)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

2.1 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΝΗΣΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες μίας περιοχής εξαρτώνται άμεσα από τις αντίστοιχες γεωλογικές, τεκτονικές και μορφολογικές συνθήκες. Η τεκτονική δομή και η στρωματογραφία (εναλλαγές διαπερατών και αδιαπέρατων σχηματισμών) συμμετέχουν στη διαμόρφωση και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υδρογεωλογικών λεκανών.

Με βάση την υδρολιθολογική ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών και σε συνδυασμό με τους προαναφερθέντες παράγοντες η νήσος Κρήτη διαχωρίζεται σε τρεις κύριες υδρογεωλογικές ενότητες: α. καρστικά (ανθρακικά) συστήματα β. πορώδεις σχηματισμοί και γ. αδιαπέρατα πετρώματα (Περλέρους κα 2003).

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από υδρογεωλογική άποψη παρουσιάζουν οι τρεις μεγάλες σε έκταση ανθρακικές ενότητες που αναπτύσσονται στους ορεινούς όγκους των Λευκών Ορέων, του Ψηλορείτη και της Δίκτης – Σελένας και δευτερευόντως οι καρστικές ενότητες Σητείας. Οι ασβεστολιθικοί αυτοί όγκοι τροφοδοτούν μεγάλο αριθμό αξιόλογων πηγών στην περίμετρο τους.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στην Κρήτη είναι η ύπαρξη μεγάλων παράκτιων και υποθαλάσσιων υφάλμυρων καρστικών πηγών αλλά και μεγάλες καρστικές πηγές με καλής ποιότητας υπόγειο νερό. Η ανυπαρξία γεωλογικών φραγμών στις εκτεταμένες ανθρακικές εμφανίσεις προς τη θάλασσα σε συνδυασμό με παλαιογεωγραφικά αίτια έχουν συντελέσει στην υφαλμύριση σημαντικών καρστικών υδροφορέων.

Σημειώνεται ότι στην εμφάνιση των πηγών ιδιαίτερο ρόλο διαδραματίζει η ύπαρξη των ρηξιγενών ζωνών, καθώς οι φυσικές πηγές τόσο των καρστικών συστημάτων όσο και των προσχωματικών υδροφορέων κείνται πάνω σε ρήγματα.

Η ταξινόμηση των διαφόρων σχηματισμών γίνεται με κριτήριο την υδροπερατότητα (τιμές K) και τη γεωλογία (τύπο πετρώματος). Σημειώνεται ότι οι τιμές υδροπερατότητας κυμαίνονται ευρέως ακόμη και σε υποτιθέμενες ομοιόμορφες περιοχές.

Ανάλογα με τις τιμές K τα πετρώματα ταξινομούνται ως (Castany 1963):

- Υψηλής υδροπερατότητας όταν $K > 1 \cdot 10^{-2}$ m/s
- Μέτριας υδροπερατότητας όταν $1 \cdot 10^{-2} > K > 1 \cdot 10^{-6}$ m/s
- Μικρής υδροπερατότητας όταν $1 \cdot 10^{-6} > K > 1 \cdot 10^{-9}$ m/s
- Πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί όταν $K < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s

Στον Πίνακα 2.1 δίνονται συνοπτικά οι συχνότερες μέσες τιμές και το εύρος διακύμανσης των τιμών K και στον Πίνακα 2.2 δίνεται η κατάταξη των διάφορων σχηματισμών και το εύρος των συντελεστών κατείσδυσης. Η συγκεκριμένη ταξινόμηση χρησιμοποιήθηκε και από τη διαχειριστική μελέτη της Κρήτης (Παπαγρηγορίου κα 2001, Περλέρους κα 2003).

ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ Hydraulic conductivity [m · s ⁻¹]	Rocktype ΠΕΤΡΩΜΑ		
	ΜΗ ΣΥΜΠΛΗΓΗ - ΧΑΛΑΡΑ unconsolidated rocks	ΣΚΛΗΡΑ ΣΥΜΠΛΗΓΗ ΙΣΤΗΜΑΤΟΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ hard sedimentary rocks	ΠΥΡΙΝΗ - ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ igneous and metamorphic rocks
1		<i>karstified</i> ΚΑΡΣΤΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ	
10 ⁻¹	gravel ΧΑΛΙΚΕΣ		lava ΛΑΒΑ
10 ⁻²	<i>coarse</i> ΧΟΝΤΡΟΚΟΚΚΟ		
10 ⁻³	sand ΑΜΜΟΣ	limestone ΛΙΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ	
10 ⁻⁴			
10 ⁻⁵	<i>fine</i> ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ		<i>fissured</i> ΡΩΓΜΩΔΗ
10 ⁻⁶	loess	<i>fissured</i> ΡΩΓΜΩΔΗ	
10 ⁻⁷	silt ΙΛΥΣ		sandstone ΨΑΜΜΙΤΗΣ
10 ⁻⁸	moraine,	<i>compact</i> ΣΥΜΠΛΗΓΗ	
10 ⁻⁹	clayey drift deposits		basalt ΒΑΣΑΛΤΗΣ
10 ⁻¹⁰			granite, gneiss, metamorphic rocks ΓΡΑΝΙΤΗΣ, ΓΝΕΙΣ, ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ
10 ⁻¹¹	clay ΑΡΤΩΔΗΣ	slate	
10 ⁻¹²		shale ΣΚΙΣΤΟΛΙΘΟΣ	
10 ⁻¹³			<i>compact</i> ΣΥΜΠΛΗΓΗ

Πίνακας 2.1 Εύρος τιμών υδροπερατότητας διαφόρων πετρωμάτων (Struckmeir & Margat 1995)

ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ
ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	
Καρστικοί σχηματισμοί υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (K1)	50% - 55%
Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας (K3)	55%
Καρστικοί σχηματισμοί μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (K2)	40% - 45%
ΠΟΡΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	
Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (P1)	20%
Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (P2)	25%
Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (P3)	10%
ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	
Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (A1)	5%
Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας (A2)	5% - 8%
ΓΥΨΟΙ (g)	50% - 55%

Πίνακας 2.2 Συντελεστές κατείσδυσης υδρογεωλογικών ενοτήτων Ν. Κρήτης (Περλέρος κα 2003)

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται στην νήσο Κρήτη ταξινομούνται με βάση την υδρολιθολογική τους συμπεριφορά όπως παρακάτω:

Καρστικοί σχηματισμοί

Η κυκλοφορία του νερού γίνεται μέσω του δευτερογενούς πορώδους (ρωγμές, καρστικά κενά).

Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (K1): ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι έντονα καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης, τα ανθρακικά Τρυπαλίου (μάρμαρα Τριαδικού - Ιουρασικού) και οι Τριαδικοί κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες της Ιονίου ζώνης. Σε αυτά τα συστήματα αναπτύσσονται υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.

Μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (K2): ασβεστόλιθοι μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Κατατάσσονται οι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Ιουρασικής - Ηωκαινικής ηλικίας της Ιονίου ζώνης και οι μικρότερες ανθρακικές εμφανίσεις των εσωτερικών καλυμμάτων. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις παρεμβολές πυριτολίθων, κερατολίθων και αργιλικών σχιστολίθων. Σε αυτά τα πετρώματα αναπτύσσονται μέσου έως μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες. Εξαιτίας του έντονου τεκτονισμού τους συμμετέχουν στην τροφοδοσία σημαντικών καρστικών πηγών, σε περιπτώσεις που παρουσιάζουν σημαντική επιφανειακή ανάπτυξη. Κατά θέσεις οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούν το υδρογεωλογικό υπόβαθρο των υψηλής υδροπερατότητας ανθρακικών σχηματισμών (όταν έχουν μικρή υδροπερατότητα και η τεκτονική θέση τους το επιτρέπει).

Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή (Τοπολίων), μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας (K3): παρουσιάζουν πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες. (Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή). Αναπτύσσονται σημαντικές υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω αξιόλογων πηγών.

Πορώδεις σχηματισμοί

Η κυκλοφορία του νερού γίνεται μέσω του πρωτογενούς πορώδους (πορώδες κόκκων).

Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (P1): Κατατάσσονται οι σχηματισμοί του Τεταρτογενούς, όπως αλλουβιακές αποθέσεις, ποτάμιας και θαλάσσιας αναβαθμίδες, κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων, ενώ στις περιπτώσεις που καλύπτουν μικρή έκταση και έχουν μικρό πάχος δεν έχουν ιδιαίτερη υδρογεωλογική σημασία. Σε αυτούς τους σχηματισμούς και ιδιαίτερα στις σύγχρονες αποθέσεις των ποταμών και χειμάρρων, αναπτύσσονται αξιόλογες φρεατίες υδροφορίες. Κοντά στη θάλασσα οι υδροφορίες αυτές έχουν υποστεί κατά θέσεις υποβάθμιση, λόγω διείσδυσης του θαλασσινού νερού.

Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (P2): Κατατάσσονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών (Πλειο - πλειστοκαινικοί σχηματισμοί), που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού. Καταλαμβάνουν τις παρυφές των ορεινών ασβεστολιθικών όγκων και μερικές φορές τροφοδοτούνται πλευρικά από τους ασβεστόλιθους.

Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (P3): Κατατάσσονται οι πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες και ο αδιαίρετος σχηματισμός του Νεογενούς, όπου αναμένεται τοπικά η ανάπτυξη υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Στις νεογενείς αποθέσεις, κατά θέσεις αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία έντονα όμως υποβαθμισμένη εξαιτίας των θειικών ιόντων.

Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (A1): Περιλαμβάνονται οι σχηματισμοί του φλύσχη και τα ελαφρώς μεταμορφωμένα αργιλικά ιζήματα των διαφόρων ζωνών (φλύσχη Παλαιοκαίνου – Ηωκαίνου και σχιστοκερατόλιθοι Ιουρασικού ζώνης Πίνδου, φλύσχη Ηωκαίνου - Ολιγοκαίνου και εναλλαγές σχιστόλιθων – ασβεστόλιθων ζώνης Τρίπολης, ασβεστοϊκοί σχιστόλιθοι Ηωκαίνου ζώνης Ιονίου). Κατά θέσεις εντός των στρωμάτων του φλύσχη αναπτύσσονται τοπικού χαρακτήρα υδροφορίες μικρού έως μέσου δυναμικού.

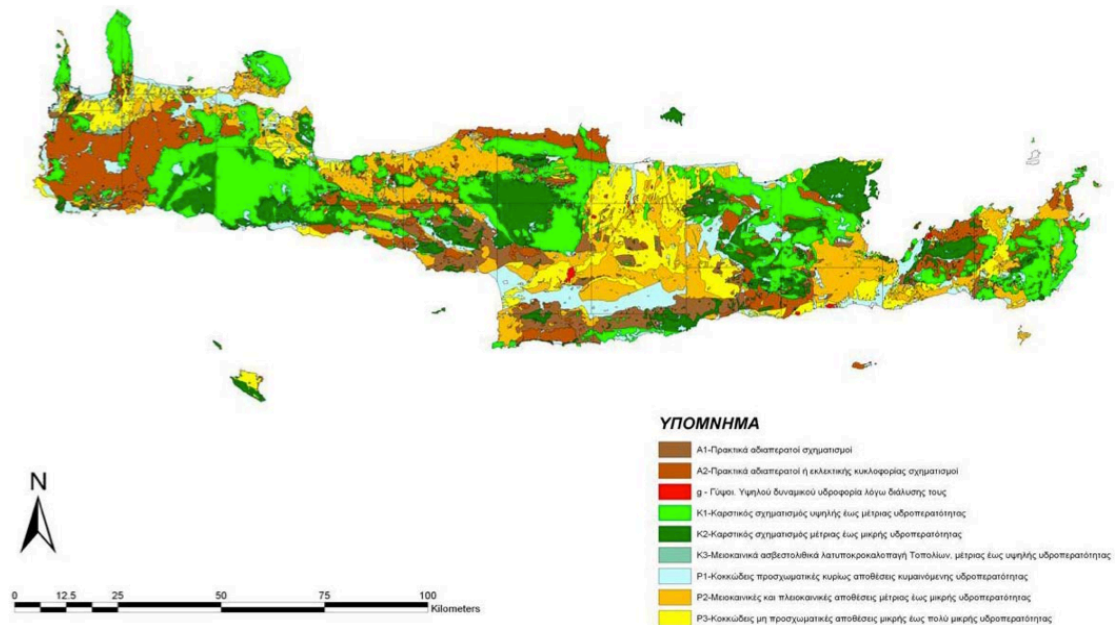
Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας (A2): Κατατάσσονται τα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα των διαφόρων ζωνών και καλυμμάτων (φυλλίτες – χαλαζίτες, γρανιτικές διεισδύσεις και σχιστόλιθοι ζώνης Ιονίου). Κατά θέσεις εξαιτίας του έντονου κερματισμού και της πετρολογικής σύνθεσης των σχηματισμών (π.χ. εναλλαγές χαλαζιτών / μαρμάρων) αναπτύσσονται επιμέρους τοπικές υδροφορίες.

Γύψοι (g)

Στο σχηματισμό των γύψων αναπτύσσεται υψηλού δυναμικού υπόγεια υδροφορία εξ' αιτίας της διάλυσής τους ('ψευδοκαρστ') με υψηλή περιεκτικότητα σε θειικά ιόντα.

Στο σύνολο της Κρήτης οι καρστικοί σχηματισμοί καταλαμβάνουν το 37.6% της συνολικής έκτασης της νήσου, οι κοκκώδεις υδροπερατοί σχηματισμοί το 39.6% και οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί το 22.58%. Μικρό ποσοστό καταλαμβάνουν οι γύψοι 0.21%.

Στο Σχήμα 2.1 παρατίθεται ο υδρολιθολογικός χάρτης της Κρήτης, ο οποίος έχει συνταχθεί με την παραπάνω υδρογεωλογική ταξινόμηση. Στο υπόμνημα (χρωματική διαβάθμιση από πάνω προς κάτω): A1, A2, g, K1, K2, K3, P1, P2, P3.

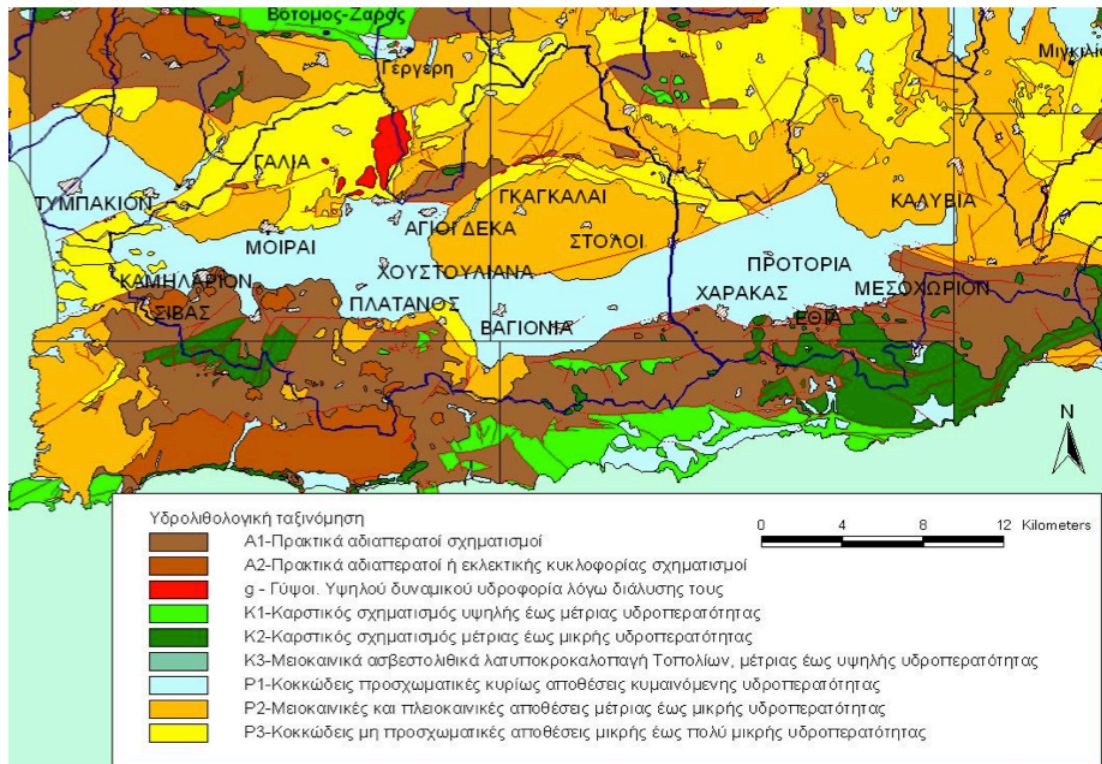


Σχήμα 2.1 Υδρολιθολογικός χάρτης νήσου Κρήτης (Περίφερεια Κρήτης 2009)

2.2 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕΣΣΑΡΑΣ

Στην περιοχή της λεκάνης Μεσσαράς διακρίνονται οι παρακάτω υδρολιθολογικές ενότητες (Σχήμα 2.2):

- Καρστικοί σχηματισμοί οι οποίοι συνίστανται από τα ανθρακικά πετρώματα των ενοτήτων της Πίνδου, της Τρίπολης και της Αυτόχθονου σειράς και καταλαμβάνουν τα όρια της λεκάνης της Μεσσαράς. Βόρεια δομούν την οροσειρά της Ίδης και νότια την οροσειρά των Αστερουσίων ορέων όπου εκεί έχουμε μικρότερες εμφανίσεις. Μικρό ποσοστό του υπόγειου δυναμικού του καρστικού υδροφορέα της Ίδης απορρέει από τις πηγές Γέργερης με αποδέκτη την υδρολογική λεκάνη του Ληθαίου - Γεροποτάμου και από τις πηγές Ζαρού με αποδέκτη την υδρολογική λεκάνη του Τυμπακίου. Το μεγαλύτερο ποσοστό του υπόγειου δυναμικού του καρστικού συστήματος της Ίδης απορρέει βόρεια στην υφάλμυρη πηγή του Αλμυρού Ηρακλείου. Οι καρστικές εμφανίσεις των Αστερουσίων φιλοξενούν περιορισμένους υδροφόρους ορίζοντες με μικρό δυναμικό και το νερό τους χρησιμοποιείται κυρίως για την ύδρευση των οικισμών.
- Προσχωματικές αποθέσεις που καταλαμβάνουν το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς και αποτελούν το σημαντικότερο υδροφορέα της περιοχής. Συνίστανται από ποταμολιμναίες αλλουβιακές αποθέσεις. Επίσης συναντώνται μικρού πάχους και έκτασης αποθέσεις κατά μήκος των υδρορευμάτων.
- Πλειστοκαινικές αποθέσεις που καταλαμβάνουν σημαντική έκταση στο βόρειο τμήμα της πεδινής περιοχής.
- Νεογενείς σχηματισμοί που καταλαμβάνουν ένα μεγάλο τμήμα της περιοχής βόρεια των προσχωματικών - πλειστοκαινικών αποθέσεων και σχηματίζουν το λοφώδες ανάγλυφο.



Σχήμα 2.2 Υδρολιθολογικός χάρτης λεκάνης Μεσσαράς (Περιφέρεια Κρήτης 2009)

Οι σημαντικότεροι υδροφορείς της λεκάνης κατά σειρά δυναμικότητας είναι ο αλλουβιακός, ο πλειστοκαινικός και ο νεογενής, ενώ στα περιθώρια της λεκάνης απαντούν ανθρακικοί σχηματισμοί που φιλοξενούν καρστικές υδροφορίες. Οι καρστικοί υδροφορείς των Αστερουσίων σχηματίζουν μικρές αποκομμένες λεκάνες λόγω έντονου τεκτονισμού. Ακολουθεί περιγραφή των υδροφορέων της λεκάνης (Κριτσωτάκης 2009):

Νεογενής υδροφορέας

Οι νεογενείς σχηματισμοί της λεκάνης της Μεσσαράς αποτελούν το υπόβαθρο των τεταρτογενών αποθέσεων και χαρακτηρίζονται από πετρώματα διαφορετικής σύστασης και στρωματογραφίας. Χαρακτηριστικό του Νεογενούς αποτελούν οι ρηξιγενείς ζώνες οι οποίες μετακίνησαν κατακόρυφα τα ρηξιτεμάχη και σχημάτισαν διάφορες λεκάνες μέσα στις οποίες εναποτέθηκαν οι σύγχρονες αποθέσεις. Το μεγαλύτερο μέρος των νεογενών σχηματισμών συνίσταται από εναλλαγές στρώσεων μεγάλου πάχους ιλυόλιθων, αργίλων και μαργών. Επίσης απαντούν και ενστρώσεις μικρότερου πάχους αποτελούμενες από άμμο, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και μαργαϊκούς ασβεστολίθους, που εμφανίζουν μικρό υδρογεωλογικό ενδιαφέρον καθώς φιλοξενούν ασθενείς υδροφορίες υπό πίεση. Κατά θέσεις απαντούν μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι (περιοχή βόρεια των Μοιρών), πετρώματα που χαρακτηρίζονται από την εμφάνιση μικρής υδροφορίας. Κατά το τέλος του Τριτογενούς έλαβαν χώρα κατακόρυφες κινήσεις ανυψώνοντας τα διάφορα ρηξιτεμάχη, τα οποία στη συνέχεια υπέστησαν έντονη διάβρωση σχηματίζοντας τάφρους μέσα στις οποίες εναποτέθηκαν τα ποταμολιμναία στρώματα του Πλειστοκαίνου.

Πλειστοκαινικός υδροφορέας (σχηματισμός Αγ. Γαλήνη)

Τα πλειστοκαινικά ιζήματα εναποτέθηκαν στα ρηξιτεμάχη των νεογενών σχηματισμών κάτω από ηπειρωτικές συνθήκες (ποταμολιμναία φάση). Το πλειστόκαινο στα κατώτερα (υψομετρικά) ρηξιτεμάχη (λεκάνη Μοιρών και Χάρακα), διατηρείται σε σχετικά καλή κατάσταση σε αντίθεση με των ανώτερων υψομέτρων που σχεδόν διαβρώθηκε και διατηρείται μόνο μία στρώση πολύ μικρού πάχους (λεκάνη Βαγιονιάς). Επιφανειακά απαντούν στην περιοχή Καλυβιανής και των Γκαγκαλών. Το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας μετά την εναπόθεση των πλειστοκαινικών σχηματισμών ήταν σε κατώτερο υψόμετρο από ότι σήμερα και νέες τάφροι σχηματίστηκαν από τη διάβρωση των κυρίων υδρορευμάτων του Γεροπόταμου, του Λιθαίου και του Αναποδάρη. Το μέγιστο βάθος των τάφρων αυτών καταγράφηκε στα 75 m κάτω από τη στάθμη της θάλασσας στην περιοχή των Μοιρών και το μέγιστο που έχει καταγραφεί στην ευρύτερη περιοχή είναι 80 m στην περιοχή του Πλατύ (όμορη λεκάνη δυτικότερα του Τυμπακίου). Στην έξοδο του Γεροποτάμου στη θάλασσα (περιοχή Τυμπακίου) το βάθος της τάφρου είναι της τάξης των 100 m από την επιφάνεια του εδάφους που ελαττώνεται προς τα ανάντη και στο ύψωμα της Φαιστού είναι 60 m από την επιφάνεια του εδάφους. Στις τάφρους αυτές εναποτέθηκαν οι τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις.

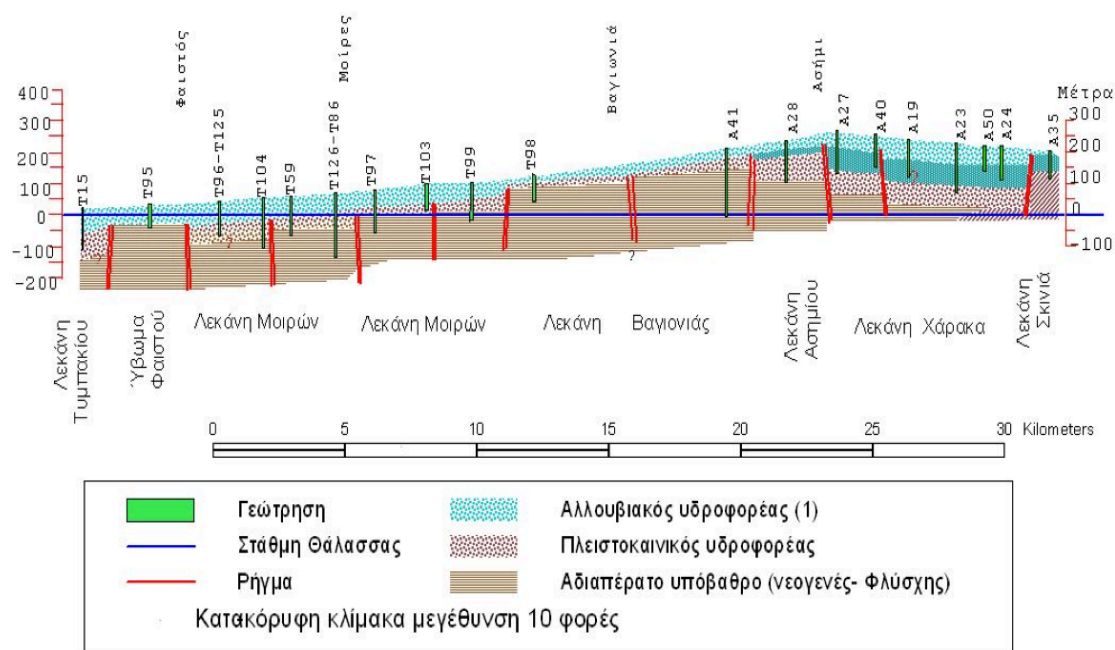
Αλλουβιακός υδροφορέας

Ο αλλουβιακός υδροφορέας έχει επιμήκες σχήμα και συνίσταται από σύγχρονες ποταμολιμναίες αποθέσεις κροκαλοπαγών, άμμων, ιλυολίθων και αργίλων. Οι αποθέσεις είναι διαφορετικής στρωματογραφικής ηλικίας και σύστασης και επομένως διαφορετικών υδρογεωλογικών ιδιοτήτων. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες: **(1)** Αποθέσεις στις τάφρους διάβρωσης που καταλαμβάνουν μία ζώνη γύρω από τα κύρια υδρορέματα (Γεροπόταμος, Αναποδάρης, Λιθαίος). Αποτελούνται από εναλλαγές στρώσεων χαλίκων, αργίλου και ιλύος. Στρώσεις άμμων είναι σπάνιες και συνήθως η άμμος είναι αναμεμιγμένη με τα άλλα υλικά. **(2)** Κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα που καταλαμβάνουν κύρια τις νότιες περιοχές. Ποικίλουν ανάλογα με την προέλευση και τη θέση τους. Τα υλικά είναι περισσότερο χονδρόκοκκα και λατυποπαγή κοντά στις νότιες περιοχές. Κατά θέσεις τα κενά των χονδρόκοκκων πληρώνονται από λεπτόκοκκα υλικά με αποτέλεσμα να ελαττώνουν τις ιδιότητες του υδροφορέα (υδροπερατότητα, αποθηκευτικότητα). Οι κώνοι κορημάτων, που προέρχονται από παλαιότερα πετρώματα των ορεινών όγκων, έχουν συνήθως κοκκινωπό χρώμα και γενικά χαρακτηρίζονται με μεγάλο πορώδες. Τα πλευρικά κορήματα που προέρχονται από νεογενή πετρώματα συνίστανται από λεπτόκοκκα υλικά και γενικά περικλείουν ασθενείς υδροφορίες. **(3)** Αποθέσεις που καλύπτουν την υπόλοιπη λεκάνη. Κυμαίνονται σε σύσταση και χαρακτηριστικά ανάλογα με τον τύπο πετρώματος που επικρατεί στα περιθώρια της. Στις περιοχές που επικρατούν Πλειστοκαινικές αποθέσεις (σχηματισμός Αγ. Γαλήνης) υπάρχει ένα λεπτό κάλυμμα από αποσαθρωμένα πλειστόκαινα υλικά. Στις περιοχές που επικρατούν οι νεογενείς σχηματισμοί, το αλλουβιακό κάλυμμα συνίσταται από μάργες, ιλύ και άργιλο, ενώ είναι δύσκολο να διακριθεί από το διαβρωμένο Νεογενές.

2.2.1 ΥΠΟΔΙΑΙΡΕΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕΣΣΑΡΑΣ

Η λεκάνη της Μεσσαράς δεν αποτελεί μία «ομοιόμορφη» υδρογεωλογική ενότητα αλλά κάτω από τον αλλουβιακό μανδύα κρύβει ρηξιτεμάχη με διαφορετικές υδρογεωλογικές ιδιότητες. Σε αντιστοιχία με τις ρηξιγενείς ζώνες (block-faults), η λεκάνη υποδιαιρείται σε επιμέρους υπολεκάνες κατά την επιμήκη διάστασή της, οι οποίες υδραυλικά επικοινωνούν μεταξύ τους. Οι ρηξιγενείς ζώνες διαμόρφωσαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τη σύσταση και τη στρωματογραφία του προσχωματικού - τεταρτογενή υδροφορέα (αλλουβιακός - πλειστοκαινικός). Διακρίνονται σε διεύθυνση Α - Δ οι (υπο)λεκάνες του Χάρακα, του Ασημίου, της Βαγιονιάς, των Μοιρών και του Τυμπακίου που αποτελεί και την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας. Οι υδροφορείς στο σύνολο της λεκάνης (Σχήμα 2.3) συνίστανται από αλλουβιακούς σχηματισμούς με «πολύ καλές» υδρογεωλογικές ιδιότητες και από πλειστοκαινικούς σχηματισμούς με σχετικά «μέτριες» ιδιότητες (τοπικά εμφανίζουν «καλές»). Ο κατώτερος (πρακτικώς αδιαπέρατος) ορίζοντας του νεογενούς έχει μικρή υδρογεωλογική σημαντικότητα ως υδροφορέας και κατά θέσεις εμφανίζει «μέτριες» υδρογεωλογικές ιδιότητες (Κριτσωτάκης 2009).

Η μόνη υπόγεια διαφυγή του νερού των υδροφορέων εκτός του πεδινού τμήματος της λεκάνης είναι δυτικά από τη στενή και μικρού πάχους ζώνη της Φαιστού προς τη λεκάνη του Τυμπακίου και τελικά εκβάλει στον κόλπο του Τυμπακίου. Το ρηξιτέμαχος της Φαιστού συνίσταται από νεογενή πετρώματα, ιλύολιθους, μάργες και μικρού πάχους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους που απαντούν στις κορυφές των λόφων. Λόγω της σχετικής ανύψωσής του, οι όμορες λεκάνες του Τυμπακίου και των Μοιρών διαχωρίζονται μεταξύ τους και απομονώνονται υδρογεωλογικά, ενώ το στένεμα της Φαιστού (μοιάζει με φαράγγι) είναι η μόνη διασύνδεση των επιφανειακών και υπόγειων νερών μεταξύ των δύο υπολεκανών.



2.2.2 ΛΕΚΑΝΗ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ

Η λεκάνη του Τυμπακίου αποτελεί μία από τις σημαντικότερες αγροτικές περιοχές της Κρήτης με την καλλιέργεια πρώιμων κηπευτικών σε θερμοκήπια καθώς και ελαιοδέντρων. Η αρδευόμενη έκταση είναι 40.000 στρέμματα και το σύνολο του αρδευτικού νερού που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα προέρχεται από το υπόγειο δυναμικό. Επομένως η ποιότητα των υπόγειων υδατικών πόρων θα έπρεπε να αποτελεί προτεραιότητα για την περιοχή.

Ο αλουβιακός - πλειστοκαινικός υδροφορέας που χαρακτηρίζει την περιοχή (βλ. παράγραφο 2.2 και Σχήμα 2.3), καταλαμβάνει το παράκτιο και κεντρικό τμήμα της λεκάνης, έχει έκταση περίπου 50 Km² και δέχεται μέσο ύψος βροχής λιγότερο από 500 mm. Λόγω της σπουδαιότητας του υδροφορέα λειτουργούν τρεις σταθμοί παρακολούθησης των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, οι δύο κοντά στην ακτή (Αεροδρόμιο - Γεροπόταμος και Κόκκινος Πύργος) και ένας στο κέντρο περίπου της λεκάνης. Σημειώνεται ότι ο φυσικός εμπλουτισμός του υδροφορέα του Τυμπακίου έχει ελαττωθεί λόγω της παρακράτησης των απορροών του Κουτσουλίδη στο φράγμα της Φανερωμένης (Κατάσταση υπογείων υδροφορέων Κρήτης 2009).

2.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

Το υπόγειο νερό είναι ένας ανανεώσιμος φυσικός πόρος με την προϋπόθεση της ύπαρξης ισορροπίας μεταξύ εμπλουτισμού και εκφόρτισης σε έναν υδροφορέα μίας λεκάνης. Όταν οι απολήψιμες ποσότητες υπογείου νερού υπερβούν την ικανότητα της ασφαλούς απόδοσης ενός παράκτιου υδροφορέα παρατηρούνται φαινόμενα θαλάσσιας διείσδυσης, που είναι ένα από τα πλέον σημαντικά προβλήματα ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων νερών.

Στην Ελλάδα, η κύρια πηγή κάλυψης των αναγκών σε γλυκό νερό είναι τα υπόγεια νερά. Η χρήση του νερού γίνεται κυρίως για πόση και άρδευση καθώς επίσης και για κάλυψη των τουριστικών και βιομηχανικών αναγκών. Στις περισσότερες παράκτιες περιοχές η οικονομία βασίζεται κυρίως στον τουρισμό και τη γεωργία. Ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες οι απαιτήσεις σε νερό είναι ιδιαίτερα υψηλές με αποτέλεσμα την υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την υφαλμύρινη των υδροφόρων στρωμάτων και την υποβάθμιση της ποιότητας του γλυκού νερού, με αποτέλεσμα να είναι ακατάλληλο για κάθε χρήση. Προκύπτει ότι η μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρινης των παράκτιων υδροφορέων είναι πολύ σημαντική για την Ελλάδα (Σχήμα 2.4), λόγω της μεγάλης ακτογραμμής και των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων στις παράκτιες περιοχές.

Η Κρήτη εξαιτίας της μορφολογίας και της μεγάλης ανάπτυξης των καρστικών ορεινών όγκων, διαθέτει καλής ποιότητας και ποσότητας γλυκών νερών, εκτός από ορισμένες περιοχές στο βόρειο τμήμα (π.χ. Χερσόνησος, Γούβες, Μάλια) και στο νότιο (π.χ. Ιεράπετρα, Τυμπάκι), όπου παρατηρούνται φαινόμενα υφαλμύρινης.



Σχήμα 2.4 Περιοχές με επικινδυνότητα θαλάσσιας διείσδυσης στους υδροφορείς λόγω υπεράντλησης
(πηγή: <http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm>)

Η διείσδυση του αλμυρού νερού στους παράκτιους υδροφορείς, αποτελεί την κύρια αιτία εμφάνισης του φαινομένου της υφαλμύρινσης. Στους παράκτιους υδροφορείς η υδραυλική κλίση του υπόγειου νερού έχει συνήθως κατεύθυνση προς τη θάλασσα. Λόγω της παρουσίας του αλμυρού νερού, στο τμήμα του υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας σχηματίζεται μία ζώνη επαφής (Σχήμα 2.5) μεταξύ του ελαφρύτερου γλυκού νερού του υδροφορέα και του υποκείμενου βαρύτερου αλμυρού νερού (διαφορά πυκνότητας). Ο όγκος του αλμυρού νερού κάτω από το γλυκό λόγω της χαρακτηριστικής του μορφής ονομάζεται σφήνα. Το αλμυρό και το γλυκό νερό είναι αναμίξιμα με αποτέλεσμα η μεταξύ τους ζώνη επαφής να παίρνει τη μορφή μίας μεταβατικής ζώνης λόγω του φαινομένου της διάχυσης ή της διασποράς. Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης εμφανίζεται όταν η υδραυλική κλίση του παράκτιου υδροφορέα προς τη θάλασσα είναι μικρή και ακόμα περισσότερο όταν αλλάζει διεύθυνση εξαιτίας των έντονων αντλήσεων. Στην περίπτωση αυτή δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για τη μετακίνηση της αλμυρής σφήνας προς το εσωτερικό του υδροφορέα με αποτέλεσμα την υφαλμύρινσή του, την αύξηση δηλαδή της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου, μαγνησίου και ασβεστίου στα υπόγεια νερά (Καλλέργης 1986, Λατινόπουλος 2004).

Από υδρογεωχημική άποψη η υφαλμύριση των υδροφόρων συνίσταται από ένα υψηλής αλατότητας διάλυμα (θαλασσινό νερό) αναμειγμένο με ένα αραιωμένο διάλυμα (γλυκό νερό) σε ένα πορώδες μέσο, που περιέχει πολλά δραστικά στερεά (ορυκτά), (Martinez & Bocanegra 2002).

Γενικά μία συγκέντρωση των χλωριόντων (Cl^-) της τάξεως των 100 mg / L στα υπόγεια νερά θεωρείται σαν δείκτης θαλάσσιας διείσδυσης. Για την πιστοποίηση της προέλευσης των χλωριόντων έχουν προταθεί διάφοροι δείκτες (Revelle, ιοντική ισχύς κ.α.), οι οποίοι προσδιορίζουν τη συνεισφορά της διείσδυσης της θάλασσας στην αύξηση της συγκέντρωσης χλωριόντων στο υπόγειο νερό (Βουδούρης κα 2004).

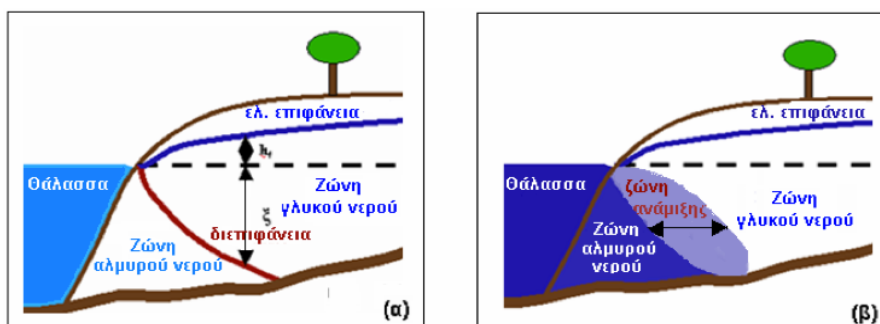
Το πρόβλημα της υφαλμύρισης των παράκτιων υδροφόρων στρωμάτων είναι σοβαρό και δύσκολα αναστρέφεται. Οι δυσκολίες εντοπίζονται στο να αποτραπεί η εξάπλωση της υφαλμύρισης και στην μη αποτελεσματική εφαρμογή μεθόδων απορρύπανσης, οι οποίες κυρίως αφορούν γεωτρήσεις (π.χ. στεγανοποιητικά διαφράγματα, γεωτρήσεις εισπίεσης κ.α.) και επομένως υψηλό κόστος. Η γνώση της εξέλιξης του μετώπου υφαλμύρισης μπορεί να συμβάλλει στην καλύτερη διαχείριση των υδροφόρων της περιοχής και στη λήψη κατάλληλων μέτρων (π.χ. σωστή επιλογή θέσης υδρογεωτρήσεων κ.α.) για τον περιορισμό των αρνητικών συνεπειών της. Η πρόβλεψη απαιτεί συνεχή καταγραφή της ποιότητας των υπόγειων νερών στις ευάλωτες περιοχές από θαλάσσια διείσδυση, όπως είναι η περιοχή έρευνας, σε επιλεγμένες θέσεις.

Στην παρούσα εργασία η διερεύνηση της περιοχής μελέτης (λεκάνη Τυμπακίου) σχετικά με το φαινόμενο, έγινε με το συνδυασμό γεωηλεκτρικής μεθόδου (βλ. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ) και τρισδιάστατης γεωλογικής μοντελοποίησης της περιοχής με εξειδικευμένο λογισμικό (βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ROCKWORKS).

2.3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

Για τη μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης σε παράκτιους υδροφορείς έχουν καταγεγραφεί στη βιβλιογραφία δύο (2) βασικές προσεγγίσεις:

- Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (Σχήμα 2.5α)
- Θεώρηση επιφάνειας πεπερασμένου πάχους (Σχήμα 2.5β)



Σχήμα 2.5 (α) Διεπιφάνεια γλυκού - αλμυρού νερού (β) Ζώνη ανάμιξης γλυκού – αλμυρού νερού (Papadopoulou et al 2005).

Για την πρώτη προσέγγιση, γίνεται η παραδοχή ότι συνυπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά και ισχύει ο νόμος Ghyden – Herzberg (το γλυκό νερό επιπλέει πάνω στο θαλασσίνο λόγω διαφοράς πυκνότητας):

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \approx 40h_f$$

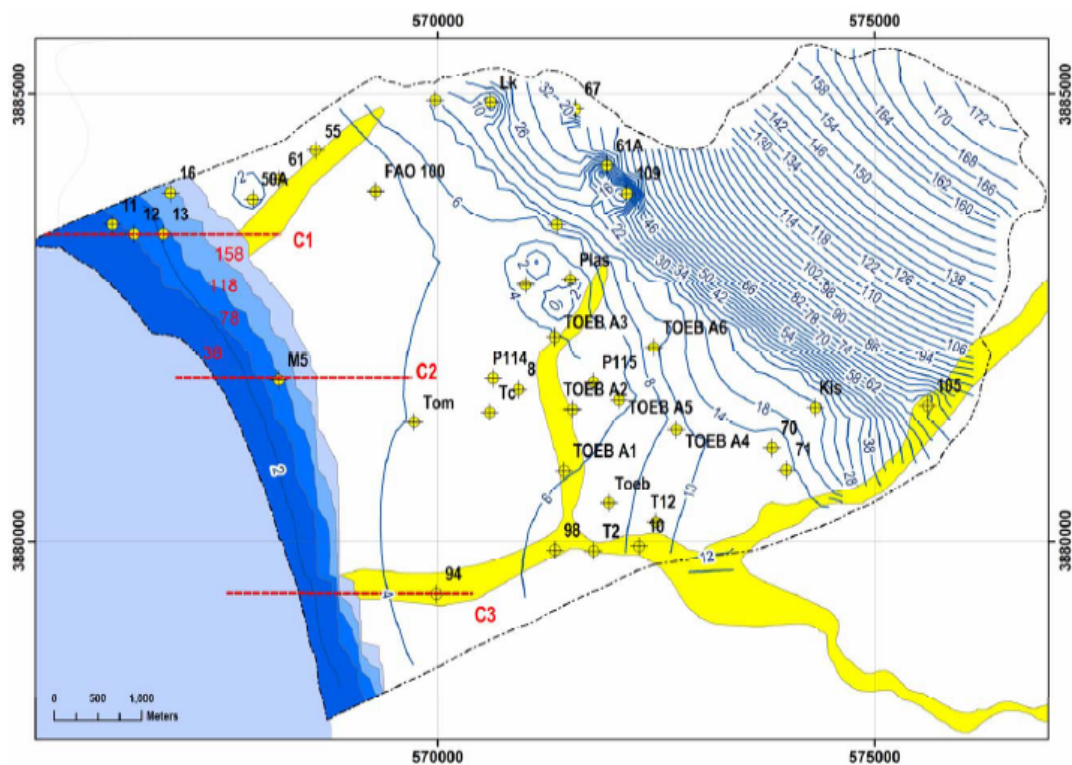
όπου, ξ το βάθος της διεπιφάνειας κάτω από το επίπεδο της θάλασσας (m), h_f το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (m), ρ_f η πυκνότητα του γλυκού νερού (gr cm^{-3}), ρ_s η πυκνότητα του αλμυρού νερού (gr cm^{-3}).

Με την παραπάνω παραδοχή οι εξισώσεις απλοποιούνται με αποτέλεσμα σημαντική οικονομία χρόνου, αλλά μικρότερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Σε περιπτώσεις περιοχών όπου το πραγματικό πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα, η προσέγγιση της απότομης διεπιφάνειας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Για τη δεύτερη προσέγγιση, θεωρείται ότι υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά, το αλμυρό νερό της θάλασσας και το καθαρό νερό του υδροφορέα. Σε αυτήν την κατηγορία οι διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι πολύπλοκες και η επίλυσή τους είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Επίσης απαιτούνται παράμετροι διασποράς του άλατος που λόγω της πολυπλοκότητας των υδροφορέων είναι συχνά δύσκολο να εκτιμηθούν.

2.3.2 Η ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ

Στη λεκάνη του Τυμπακίου έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα υφαλμύρινσης. Μάλιστα, ο εντοπισμός του μετώπου της υφαλμύρινσης αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MEDIS το 2005. Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη η επέκταση του μετώπου της υφαλμύρινσης προς την ενδοχώρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Σε αυτό το σχήμα γίνεται σαφές ότι η βάση του μετώπου στο νότιο άκρο βρίσκεται 550 με 600 μέτρα σε οριζόντια απόσταση από την ακτογραμμή. Αντίστοιχα, στο βόρειο τμήμα η βάση του μετώπου βρίσκεται σε οριζόντια απόσταση 1500 μέτρων από την ακτογραμμή. Στη συγκεκριμένη μελέτη, η διαφοροποίηση αυτή αποδίδεται στην παροχή γλυκού νερού από το Γεροπόταμο, του οποίου η εκβολή βρίσκεται στο νότιο τμήμα της λεκάνης του Τυμπακίου.



Σχήμα 2.6 Η έκταση του μετώπου της υφαλμύρισης όπως προέκυψε από την προσομοίωση (MEDIS, 2005). Στο βόρειο παράκτιο τμήμα το μέτωπο της υφαλμύρισης φαίνεται περισσότερο προωθημένο συγκριτικά με το νότιο τμήμα. Οι ισοκαμπύλες αντιπροσωπεύουν το βάθος στο οποίο βρίσκεται το μέτωπο της υφαλμύρισης (στα 38, 78, 118 και 158 m κάτω από τη στάθμη της θάλασσας).

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι γεωφυσικές τεχνικές τα τελευταία χρόνια (δεκαετία 1990) παρουσίασαν σημαντική τεχνολογική άνθιση με αποτέλεσμα να συμβάλλουν στη μελέτη απρόσιτων γεωλογικών δομών του φλοιού της Γης, εφαρμόζοντας τους νόμους της φυσικής. Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις γεωεπιστήμες, το μειωμένο κόστος που τις χαρακτηρίζει και η εφαρμογή τους χωρίς καμμία μηχανική παρέμβαση επί του εδάφους, κατέστησαν τις γεωφυσικές μεθόδους αναπόσπαστο κομμάτι μεγάλων ερευνητικών προγραμμάτων.

Οι βασικές μετρούμενες φυσικές ποσότητες: ένταση του πεδίου βαρύτητας, ένταση του μαγνητικού πεδίου, ηλεκτρική τάση, ιδιότητες ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, διαχωρίζουν τις μεθόδους σε: βαρυτικές, μαγνητικές, ηλεκτρικές, ηλεκτρομαγνητικές και σεισμικές αντίστοιχα. Επιπλέον αναφέρεται και η θερμική, όπως και η ραδιομετρική μέθοδος.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι δύναται να χρησιμοποιηθούν, μεμονωμένα ή συνδυαστικά, σε τομείς όπως είναι: η ανίχνευση δομών που ευνοούν το σχηματισμό κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, η μεταλλευτική έρευνα, η εφαρμοσμένη μηχανική για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους, σε γεωπεριβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν την ανίχνευση και τον προσδιορισμό της ρύπανσης σε εδάφη και υπόγεια νερά κ.α.

Ιδιαίτερα για τον εντοπισμό ζωνών υφαλμύρινσης χρησιμοποιείται η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η μέθοδος στηρίζεται στην μετρησιμότητα των μεταβολών της αγωγιμότητας (ή της αντίστασης) των γεωλογικών σχηματισμών, που προκαλούνται από τη διαφοροποίηση του χημικού χαρακτήρα του νερού και συγκεκριμένα από την αύξηση των ιδιαίτερα ηλεκτρικών ιόντων χλωρίου, λόγω διείσδυσης αλμυρού νερού.

Με τις μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια του εδάφους στην εκάστοτε περιοχή μελέτης, καθορίζεται η ηλεκτρική τάση και κατ' επέκταση η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Πρέπει να σημειωθεί ότι σημαντική είναι η ύπαρξη σημειακών δεδομένων του υπεδάφους (κυρίως δεδομένων γεωτρήσεων) για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και την ερμηνεία των γεωφυσικών μετρήσεων. Τελικά χαρτογραφείται η οριζόντια και κάθετη εξάπλωση του γλυκού και του θαλασσινού νερού και εντοπίζεται το μέτωπο της υφαλμύρινσης, δεδομένου ότι το μέγεθος της *ηλεκτρικής αγωγιμότητας* (ικανότητα ενός υλικού - π.χ. ορυκτού - να διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα) είναι ανάλογο της *αλατότητας* (*gr* στερεών που περιέχονται σε 1 Kg θαλασσινού νερού) και αντιστρόφως ανάλογο με το μέγεθος της *ηλεκτρικής αντίστασης* (δυσχέρεια στην έλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ένα υλικό - π.χ. ορυκτό). Επομένως, καταγραφές απότομης μείωσης των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης των γεωλογικών σχηματισμών συνεπάγονται διείσδυση θαλασσινού νερού.

Η συστηματική γεωφυσική έρευνα συμβάλλει στον εντοπισμό και τον προσδιορισμό της εξάπλωσης της ρύπανσης των υπογείων υδάτων και χρησιμοποιείται σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο από τις αρχές της δεκαετίας του '80 με υψηλή απόδοση.

Στην προκειμένη έγινε συλλογή γεωηλεκτρικών δεδομένων από προϋπάρχουσες γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις και εξέταση της χωρικής κατανομής των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, σύμφωνα με τον υδρογεωλογικό χαρακτήρα της υφιστάμενης λιθοστρωματογραφίας της περιοχής έρευνας, με απώτερο σκοπό τον εντοπισμό ζωνών υφαλμύρινσης. Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των ηλεκτρικών μεθόδων.

3.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης εμφανίστηκαν στις αρχές του εικοστού αιώνα και διαδόθηκαν εξ' αιτίας της σημαντικής συμβολής των *Wenner*, *Schlumberger* και της εξέλιξης των ηλεκτρονικών υπολογιστικών συστημάτων. Έχουν σαν στόχο τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού. Η μετρούμενη φυσική ποσότητα είναι η ηλεκτρική τάση, από την οποία επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των γεωλογικών σχηματισμών. Διακρίνονται δύο (2) κατηγορίες:

Η πρώτη βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων και περιλαμβάνει:

- Μέθοδος του φυσικού δυναμικού
- Μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων

Η δεύτερη βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών τα οποία εξαρτώνται από παραγόμενα τεχνητά ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία, και περιλαμβάνει:

- Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης
- Μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας
- Μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών

3.2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και αποβλέπει στον καθορισμό της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος (γεωηλεκτρική δομή). Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων. Το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από τη δομή του υπεδάφους και από τις μετρήσεις του ηλεκτρικού δυναμικού με συγκεκριμένες διατάξεις σε καθορισμένες θέσεις προσδιορίζεται η δομή.

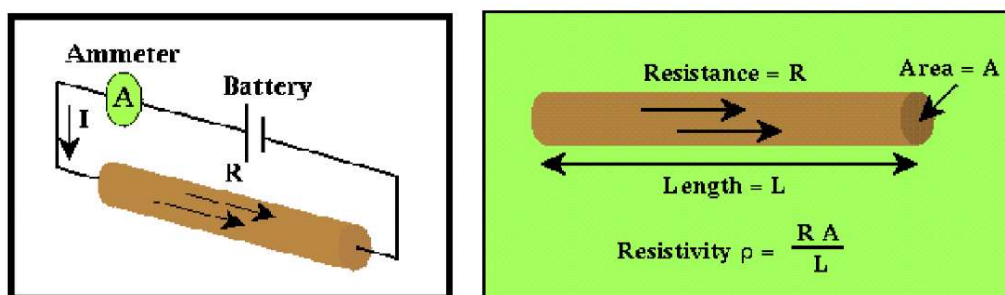
3.2.1.1 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ (Ohm.m) είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ηλεκτρική διασκόπηση. Ο υπολογισμός της στηρίζεται στο νόμο του G. S. Ohm (Σχήμα 3.1). Αν μία ορθογώνιος ράβδος διατομής A (m²) και μήκους L (m) διαρρέεται από ρεύμα έντασης I (Ampere), η τάση V (Volt) ανάμεσα στις άκρες της ράβδου θα είναι:

$$V = IR \quad \text{όπου } R: \text{ηλεκτρική αντίσταση (Ohm)}$$

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ υπολογίζεται από την σχέση: $\rho = \frac{RA}{L}$

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων, SI, είναι το Ohm.m, ενώ μερικές φορές χρησιμοποιείται και η μονάδα Ohm.cm, όπου 1 Ohm.m = 100 Ohm.cm. Το αντίστροφο, δηλ. $\sigma = 1/\rho$, ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος, με μονάδα μέτρησης στο SI: (siemens / m).



Σχήμα 3.1 Σχηματική απεικόνιση του νόμου του Ohm

3.2.1.2 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των ορυκτών και πετρωμάτων αποτελεί μία από τις πιο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητές τους. Οι τιμές της κυμαίνονται από 10^{-6} Ωm (γραφίτης), μέχρι 10^{15} Ωm (ξηρά χαλαζιακά πετρώματα). Τυπικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εμφανίζονται στον Πίνακα 3.1. Τα πετρώματα και τα ορυκτά με ειδικές αντιστάσεις $10^{-6} - 10^{-1}$ Ωm χαρακτηρίζονται ως καλοί αγωγοί, ενώ κακοί αγωγοί θεωρούνται αυτά με ειδικές αντιστάσεις $10^8 - 10^{15}$ Ωm.

Το εύρος τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των γεωλογικών σχηματισμών αποτελεί τη βάση για τις μεθόδους των ηλεκτρικών διασκοπήσεων, καθώς π.χ. ο γραφίτης, ο πυρίτης ή ο σιδερίτης εντοπίζονται λόγω της μεγάλης ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν σε αντιστοιχία με τις αντιστάσεις των πετρωμάτων που τα περιβάλλουν.

EARTH MATERIAL	RESISTIVITY, AVERAGE OR RANGE (ohm-m)	EARTH MATERIAL	RESISTIVITY, AVERAGE OR RANGE (ohm-m)
<i>Metals</i>	<i>Average R</i>	<i>Other Minerals</i>	<i>Range of R</i>
Copper	1.7×10^{-8}	Calcite	$10^{12}-10^{13}$
Gold	2.4×10^{-8}	Anhydrite	10^9-10^{10}
Silver	1.6×10^6	Halite	$10-10^{13}$
Graphite	10^{-3}	Coal	$10-10^{11}$
Iron	10^{-7}	<i>Crystalline Rocks</i>	<i>Range of R</i>
Lead	2.2×10^{-7}	Granite	10^2-10^6
Nickel	7.8×10^{-8}	Diorite	10^4-10^5
Tin	1.1×10^{-7}	Gabbro	10^3-10^6
Zinc	5.8×10^{-8}	Andesite	10^2-10^4
<i>Sulfide Ore Minerals</i>	<i>Average R</i>	Basalt	$10-10^7$
Chalcocite	10^{-4}	Peridotite	10^2-10^3
Chalcopyrite	4×10^{-3}	Schist	$10-10^4$
Pyrite	3×10^{-1}	Gneiss	10^4-10^6
Pyrrhotite	10^4	Slate	10^2-10^7
Molybdenite	10	Marble	10^2-10^6
Galena	2×10^{-3}	Quartzite	$10-10^6$
Sphalerite	10^2	<i>Sedimentary Rocks</i>	<i>Range of R</i>
<i>Oxide Ore Minerals</i>	<i>Range of R</i>	Shale	$10-10^3$
Bauxite	10^2-10^4	Sandstone	$1-10^3$
Chromite	$1-10^6$	Limestone	$50-10^7$
Cuprite	$10^{-3}-300$	Dolomite	10^2-10^4
Hematite	$10^{-3}-10^7$	<i>Unconsolidated Sediment</i>	<i>Range of R</i>
Magnetite	$10^{-3}-10^4$	Sand	$1-10^3$
Ilmenite	$10^{-3}-10^2$	Clay	$1-10^2$
Rutile	$10-10^3$	Marl	$1-10^2$
<i>Silicate Minerals</i>	<i>Range of R</i>	<i>Groundwater</i>	<i>Range of R</i>
Quartz	$10^{10}-10^{15}$	Portable well water	$0.1-10^2$
Muscovite	10^2-10^{14}	Brackish water	0.3-1
Biotite	10^2-10^6	Seawater	0.2
Hornblende	10^2-10^6	Supersaline brine	0.05-0.2
Feldspar	10^2-10^4		
Olivine	10^3-10^4		

Πίνακας 3.1 Πεδίο τιμών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων ορυκτών (Robinson, Coruh 1988)

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση:

- Λιθολογία πετρωμάτων: Γενικά τα πλουτώνια και τα μεταμορφωμένα πετρώματα έχουν μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση ($10^3 - 10^5 \Omega m$) από τα ιζηματογενή ($1 - 10^5 \Omega m$), που οφείλεται στο πορώδες και στην περιεκτικότητά τους σε διαλυμένα άλατα (ηλεκτρολυτική αγωγή).
- Πορώδες πετρωμάτων: Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη του πορώδους (π.χ. τα πυριγενή και τα μεταμορφωμένα πετρώματα εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές αντίστασης από τα ιζηματογενή).

Εμπειρική σχέση (Ward 1980):

$$p = \alpha \rho_u \varphi^{-m}$$

όπου p : ειδική αντίσταση πετρώματος, ρ_u : ειδική αντίσταση νερού πόρων, φ : πορώδες (ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος), α : σταθερά με τιμές 0.5 - 2.5, m : συντελεστής τσιμέντωσης που εκφράζει πόσο συμπαγές είναι το πέτρωμα με τιμές 1.3 - 2.5 (Παπαζάχος 1986).

Ο λόγος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του σχηματισμού προς την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του νερού των πόρων ονομάζεται συντελεστής σχηματισμού (formation factor) F και εξαρτάται από το είδος του πετρώματος.

- Γεωλογική ηλικία πετρωμάτων: Γενικά η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων αυξάνεται με τη γεωλογική ηλικία τους, λόγω αύξησης της συνοχής τους που οφείλεται στην αύξηση του πάχους των υπερκείμενων στρωμάτων και επομένως της πίεσης που ασκούν τα στρώματα αυτά στα υποκείμενα με την αύξηση του χρόνου. Επομένως τα μεγαλύτερης ηλικίας υποκείμενα στρώματα παρουσιάζουν αυξημένη συνοχή, μικρό πορώδες και μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Εξαιρέση στον γενικό αυτόν κανόνα αποτελούν τα ιζήματα του Τριτογενούς, τα οποία έχοντας σχηματιστεί κυρίως σε γλυκό νερό έχουν μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις από τα μεσοζωϊκά ιζήματα, που σχηματίστηκαν σε αλμυρό νερό, αφού η περιεκτικότητα σε ιόντα είναι καθοριστικός παράγοντας διέλευσης του ρεύματος.

Για τα πετρώματα που είναι διαποτισμένα με νερό υπάρχει έμμεση σχέση μεταξύ της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της λιθολογίας ή της γεωλογικής ηλικίας καθώς οι δύο παράγοντες καθορίζουν το πορώδες. Τα κρυσταλλικά πετρώματα έχουν εξαιρετικά μικρό πορώδες και η ηλεκτρική αγωγιμότητα οφείλεται αποκλειστικά στις ρωγμές τους.

- Θερμοκρασία των πετρωμάτων: Η μεταβολή της θερμοκρασίας προκαλεί αλλαγές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων σε τέτοιο βαθμό ώστε να επηρεάζουν την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα. Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του ιξώδους του νερού, και επομένως μείωση της ειδικής αντίστασης. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\theta} = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha_{18}(\theta - 18^{\circ})}$$

όπου, ρ_{θ} : ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε $T = \theta^{\circ} \text{C}$, ρ_{18} : ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε $T = 18^{\circ} \text{C}$, α_{18} : θερμικός συντελεστής με τιμή $0.025 / ^{\circ}\text{C}$

Στις διασκοπήσεις μικρού βάθους, η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος επιτυγχάνεται κυρίως μέσω διαλυμένων αλάτων όπως το ανθρακικό ασβέστιο και το ανθρακικό νάτριο που υπάρχουν στο ίδιο το έδαφος (κυρίως στα αργιλώδη εδάφη), ή προέρχονται από τα υποκείμενα γεωλογικά στρώματα, τις βροχοπτώσεις, τα σύγχρονα γεωργικά λιπάσματα ή από άλλες ανθρωπογενείς διαδικασίες. Επίσης συγκεντρώσεις ριζών και κολλοειδών στο νερό επηρεάζουν την αγωγιμότητα.

Διευκρινίζεται ότι σε περίπτωση κορεσμού του εδάφους σε νερό, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση επηρεάζεται από τη σύνδεση μεταξύ των πόρων. Όταν πρόκειται για ξηρά εδάφη ακόμα και οι ελάχιστες ποσότητες νερού που συγκρατούνται σε πολύ μικρούς πόρους είναι σημαντική.

Συνήθως το μέγεθος των ανωμαλιών είναι μεγαλύτερο μετά από μία μακρά περίοδο ξηρού και θερμού καιρού, με την παρατήρηση ότι σημαντικό ρόλο παίζει η εκάστοτε περιοχή μελέτης (Al Chalabi, Rees 1962). Διακρίνοντας τα εδάφη σε κοκκώδη και συμπαγή (Carr 1982) παρατηρήθηκε διαφορετική μεταβολή στις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ περιόδων διαφορετικής υγρασίας. Κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου, το επίπεδο της υγρασίας είναι μέγιστο και γι' αυτό η ειδική ηλεκτρική αντίσταση γίνεται ελάχιστη στα κοκκώδη εδάφη, ενώ στα συμπαγή εδάφη η υγρασία παραμένει μικρή και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεγάλη. Αντίθετα τη ξηρή περίοδο μόνο οι μικροί πόροι είναι πληρωμένοι με νερό με αποτέλεσμα τα αργιλώδη να είναι πιο αγωγίμα από τα κοκκώδη εδάφη.

Εκ των ανωτέρω γίνεται φανερό ότι συμπαγή πετρώματα όπως ο γρανίτης είναι ελάχιστα αγωγίμα, οι πιο πορώδεις δολομίτες είναι πολύ περισσότερο, ενώ ακόμη καλύτεροι αγωγοί είναι η άμμος και η άργιλος.

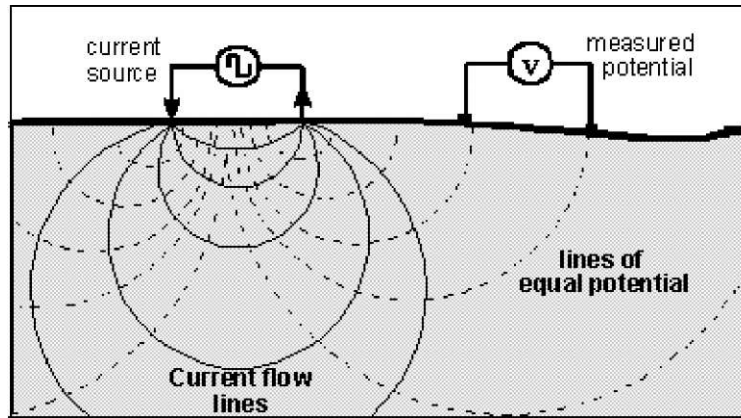
3.2.1.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στην τεχνητή εισαγωγή ρεύματος στο υπέδαφος μέσω πηγής ηλεκτρικού ρεύματος, της οποίας ο θετικός και ο αρνητικός πόλος συνδέονται με την επιφάνεια της Γης, χρησιμοποιώντας δύο ηλεκτροδία ρεύματος. Για την καλύτερη κατανόηση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος θεωρείται ότι η Γη είναι ομογενής και ισότροπη της ειδικής αντίστασης. Τότε το έδαφος θα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα λόγω της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων και συνυπολογίζοντας ότι ο αέρας της ατμόσφαιρας είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, θεωρείται ότι όλο το ρεύμα από την πηγή μπαίνει στην Γη (Σχήμα 3.2).

Το ηλεκτρικό ρεύμα έχοντας διεύθυνση από τον θετικό πόλο προς τον αρνητικό, θα ρέει ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις (η Γη είναι ομογενής) και επομένως θα έχει σταθερή ηλεκτρική αντίσταση. Σε απόσταση d από το θετικό ηλεκτρόδιο, το ρεύμα διαρρέει ημικύκλιο ακτίνας d και εμβαδού $2\pi d^2$ (επιφάνεια του ημισφαιρίου). Η πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού), λόγω της ροής του ρεύματος διαμέσου της αντίστασης της ημισφαιρικής περιοχής, σύμφωνα με τον νόμο του Ohm είναι:

$$V = IR = V_e - V_d \quad (1)$$

όπου, V_e : η ηλεκτρική τάση στον θετικό πόλο, V_d : η ηλεκτρική τάση σε οποιοδήποτε σημείο του εδάφους και σε απόσταση d από τον πόλο



Σχήμα 3.2 Ισοδυναμικές γραμμές (διακεκομμένες καμπύλες) και γραμμές ρεύματος (συνεχείς καμπύλες) στην περίπτωση που εισάγονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος μίας ηλεκτρικής πηγής σε ομογενές έδαφος.

Όμως η αντίσταση R στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{\rho d}{2\pi d^2} = \frac{\rho}{2\pi d} \quad (2)$$

Επομένως από (1) και (2):

$$V_c - V_d = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{2d} \right)$$

Η τάση αυτή θα έχει την ίδια τιμή σε οποιοδήποτε σημείο του ημικυκλίου και ονομάζεται ισοδυναμική γραμμή ή επιφάνεια.

Το ίδιο ισχύει και σε απόσταση d από τον αρνητικό πόλο (εμφανίζει δυναμικό $-V_e$):

$$V = IR = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{2d} \right) = V_d - V_e$$

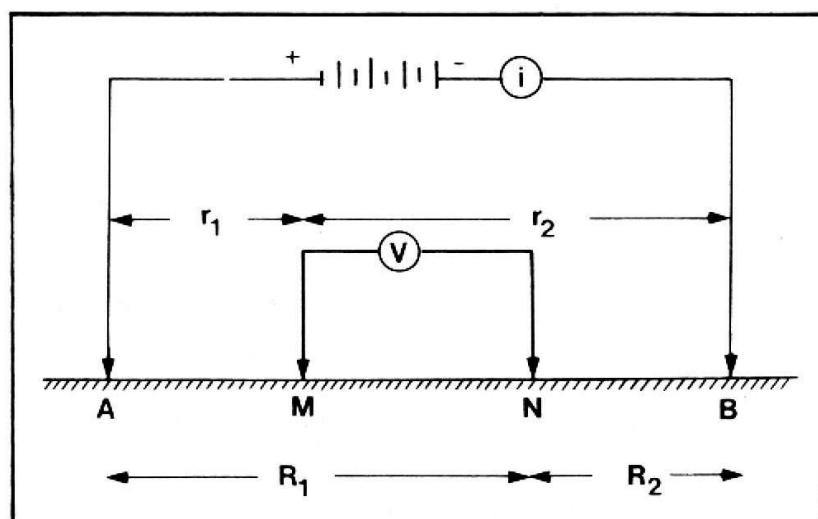
Σε τυχαίο σημείο του υπεδάφους, το δυναμικό σαν μονόμετρο μέγεθος, ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των δυναμικών που δημιουργούν οι δύο πόλοι, οπότε:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad (3)$$

όπου, d_1 και d_2 οι αποστάσεις του τυχαίου σημείου από το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο.

Αυτή η σχέση δίνει το δυναμικό για κάθε σημείο του υπεδάφους. Αν ενωθούν τα σημεία που έχουν το ίδιο δυναμικό θα προκύψουν οι ισοδυναμικές επιφάνειες (Σχήμα 3.2). Παρατηρείται ότι οι γραμμές του ρεύματος και στους δύο πόλους τέμνουν κάθετα τις ισοδυναμικές γραμμές.

Το Σχήμα 3.3 αντιπροσωπεύει μία τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Υπάρχουν τα ηλεκτρόδια ρεύματος AB που είναι συνδεδεμένα με ένα αμπερόμετρο για τον υπολογισμό της έντασης του ρεύματος που εισάγεται στο έδαφος, ενώ τα ηλεκτρόδια MN είναι τα ηλεκτρόδια τάσης, που συνδέονται με βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης.



Σχήμα 3.3 Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροδίων ρεύματος (AB) και ηλεκτροδίων δυναμικού (MN) (Παπαζάχος 1986)

Εφαρμόζοντας τη σχέση (3) στην παραπάνω διάταξη προκύπτει ότι:

Στο ηλεκτρόδιο M το δυναμικό είναι:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right)$$

Στο ηλεκτρόδιο N το δυναμικό είναι:

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

Η διαφορά δυναμικού V_{MN} (μετράται από το βολτόμετρο) είναι:

$$V_{MN} = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (4)$$

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση από την (4) είναι:

$$\rho = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (5)$$

Θέτοντας $AM = r_1$, $BM = r_2$, $AN = R_1$ και $BN = R_2$, η σχέση (5) γίνεται:

$$\rho = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad (6)$$

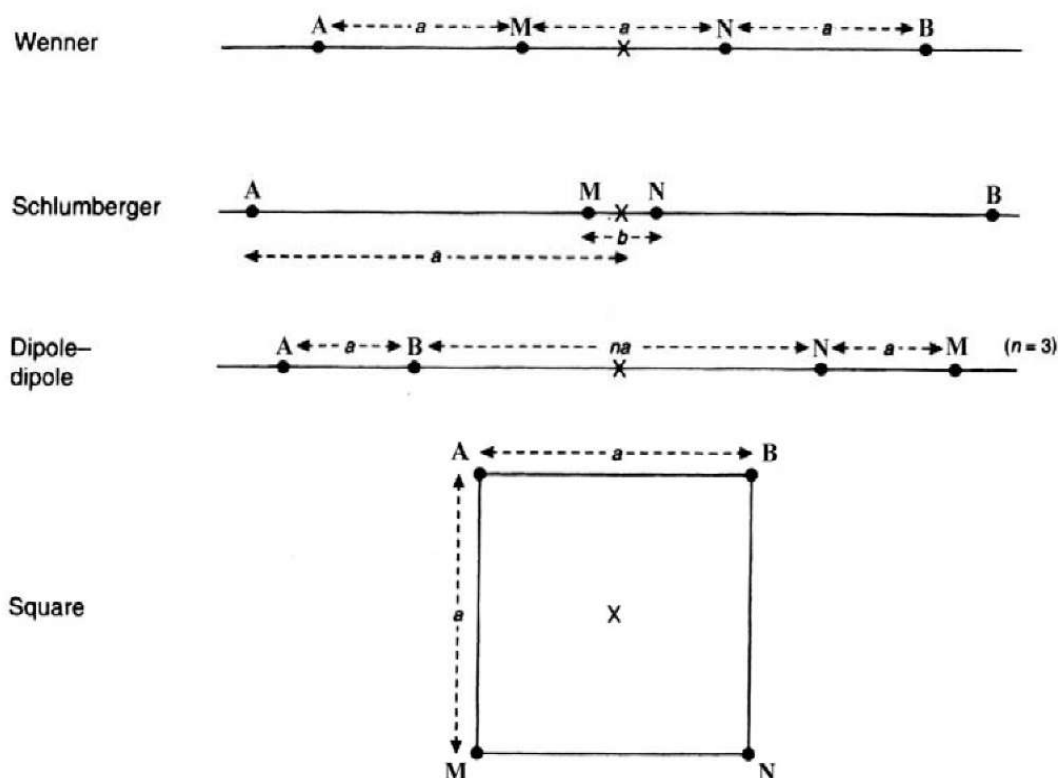
3.2.1.4 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Η σχέση (6) προέκυψε θεωρώντας ότι τα επιφανειακά στρώματα της Γης είναι ομογενή, αυτό όμως δεν ισχύει και συνεπώς η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δεν είναι σταθερή σε αυτά. Η αντίσταση που υπολογίζεται από την προηγούμενη σχέση εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα και ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a).

Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από την κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος και από τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων. Ο υπολογισμός της είναι πολύ σημαντικός και οδηγεί στον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται πλήθος διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων.

3.2.1.5 ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Πολλές διατάξεις ηλεκτροδίων εφαρμόζονται στην ύπαιθρο, ανάλογα με την περιοχή, το μέγεθος των δομών που αναμένονται και τον διαθέσιμο εξοπλισμό. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται οι πιο συνηθισμένοι τύποι. Οι διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές επειδή ελαχιστοποιούν τα αποτελέσματα της αντίστασης επαφής, δηλ. της ηλεκτρικής αντίστασης στη θέση του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 3.4 Διατάξεις ηλεκτροδίων (Reynolds 1997)

Κατά τη διάταξη *Schlumberger*, η οποία χρησιμοποιήθηκε στις περισσότερες βυθοσκοπήσεις προέλευσης των δεδομένων που συλλέχθηκαν, τα ηλεκτρόδια ρεύματος Α και Β βρίσκονται σε απόσταση a και σε συμμετρικές θέσεις ως προς το κέντρο της διάταξης. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού Μ και Ν είναι ανάμεσα στα Α και Β και σε απόσταση $b/2$ από το κέντρο της διάταξης. Προκύπτει ότι: $AB = 2a$ και $MN = b$ (σχήμα 5.4). Η απόσταση b μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση $2a$ μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a) από τη σχέση (6) θα είναι:

$$\rho_a = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left(\frac{1}{a-b/2} - \frac{1}{a+b/2} - \frac{1}{a+b/2} + \frac{1}{a-b/2} \right)^{-1}$$

Η ποσότητα:

$$2\pi \left(\frac{1}{a-b/2} - \frac{1}{a+b/2} - \frac{1}{a+b/2} + \frac{1}{a-b/2} \right)^{-1} = \left[a^2 - (b/2)^2 \right] \frac{\pi}{b}$$

ονομάζεται *γεωμετρικός συντελεστής* και συμβολίζεται με K .

Επειδή όμως ($a \gg b/2$) τότε $[a^2 - (b/2)^2] \sim a^2$ και η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{V_{MN}}{I} \frac{\pi a^2}{b}$$

Κατά την εφαρμογή της διάταξης *Schlumberger* για *ηλεκτρική βυθοσκόπηση*, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά και η απόσταση για τα ηλεκτρόδια ρεύματος αυξάνεται σταδιακά και συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης. Στην *ηλεκτρική χαρτογράφηση* τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται κατά μήκος ορισμένης τομής, ενώ η απόστασή τους παραμένει σταθερή όπως και στη διάταξη *Wenner*. Η διάταξη *Schlumberger* είναι η πιο διαδεδομένη διάταξη, που οφείλεται κυρίως στο μικρό χρόνο πραγματοποίησης των μετρήσεων, επειδή αντίθετα με τις άλλες διατάξεις απαιτεί μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος. Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά, παράγοντας που βοηθάει στον περιορισμό των πιθανοτήτων ανεπιθύμητων επιδράσεων που μπορεί να οφείλονται σε τοπικές γεωλογικές ασυνέχειες.

3.3 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ

Οι μέθοδοι της γεωηλεκτρικής διασκόπησης βασίζονται στη μελέτη του τρόπου διάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος, με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια. Σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους, όπου το αντικείμενο μελέτης είναι ένα φυσικό πεδίο (βαρυτομετρική μέθοδος) ή ένα τεχνητό πεδίο (σεισμική μέθοδος), οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούν μετρήσεις διαφόρων μεγεθών σε ηλεκτρικά ή ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα οποία υπάρχουν στη φύση ή δημιουργούνται τεχνητά τη στιγμή που γίνεται η διασκόπηση. Σε αυτό το γεγονός οφείλεται η μεγάλη ποικιλία των μεθόδων της γεωηλεκτρικής διασκόπησης.

Οι περισσότερες ηλεκτρικές μέθοδοι στηρίζονται στη διαφορετική ηλεκτρική αγωγιμότητα που εμφανίζουν τα πετρώματα της ανώτερης λιθόσφαιρας, ανάλογα με τη λιθολογία και τη φυσική τους κατάσταση. Σε συνάρτηση με τη λιθολογία, τα μεταλλοφόρα κοιτάσματα παρουσιάζουν μεγάλη αγωγιμότητα, ενώ τα εκρηξιγενή πετρώματα ή τα μάρμαρα παρουσιάζουν μικρή αγωγιμότητα. Επίσης τα συμπαγή πετρώματα και τα ξηρά εδάφη παρουσιάζουν μικρή αγωγιμότητα, ενώ τα πορώδη πετρώματα και τα υγρά εδάφη δείχνουν μεγάλη αγωγιμότητα. Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ή αντίστροφα της ηλεκτρικής αντίστασης, σε συνδυασμό και με άλλα στοιχεία, δίνει την δυνατότητα καθορισμού των γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους.

Η γεωηλεκτρική διασκόπηση πραγματοποιείται με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- ηλεκτρική χαρτογράφηση
- ηλεκτρική βυθοσκόπηση

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών. Συχνότερα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις αναζήτησης μετάλλων και ορυκτών και λιγότερο για την ανίχνευση πετρελαίου. Αυτό συμβαίνει γιατί η διακριτική ικανότητα των γεωηλεκτρικών μεθόδων περιορίζεται σημαντικά καθώς αυξάνει το βάθος. Επιπλέον χρησιμοποιούνται στην Υδρογεωλογία (π.χ. εντοπισμός ταμιευτήρων νερού κ.α.) και στην Τεχνική Γεωλογία (π.χ. αναζήτηση γεωθερμικών πεδίων κ.α.). Πρόσφατα άρχισε να επεκτείνεται και στην αρχαιολογία για την ανεύρεση θαμμένων αρχαιοτήτων.

3.3.1 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ

Στη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση, η περιγραφή της γεωλογικής δομής του υπεδάφους βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια διεύθυνση. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να εντοπιστούν ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών, όπως π.χ. μεταπτώσεις. Η ιδιότητα αυτή της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης την κάνει ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση αναζήτησης μεταλλευμάτων.

Κατά τη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση, πολύ σημαντικός είναι ο καθορισμός της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, καθώς από αυτήν την απόσταση εξαρτάται το βάθος μέχρι το οποίο οι σχηματισμοί στο υπέδαφος επιδρούν στη διαμόρφωση της τιμής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ_a .

Μία σειρά από μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης πραγματοποιείται μετακινώντας τη διάταξη των ηλεκτροδίων από θέση σε θέση κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Οι τιμές αυτές, κατά μήκος αρκετών παράλληλων γραμμών, τοποθετούνται σε γραφήματα φαινόμενων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.

3.3.2 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ

Η περιγραφή της γεωλογικής δομής του υπεδάφους κατά την εφαρμογή της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης, βασίζεται στις κατακόρυφες μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, με αποτέλεσμα τον υπολογισμό του πάχους και του βάθους των γεωλογικών στρωμάτων.

Με τη γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση προσδιορίζεται η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_a σε σταθερό σημείο της επιφάνειας και για διαδοχικά αυξανόμενες τιμές του γεωμετρικού συντελεστή K (αυξάνοντας σταδιακά την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων του ρεύματος). Καθώς η διάταξη των ηλεκτροδίων απλώνεται, η ίδια ποσότητα ρεύματος διανέμεται διαμέσου παχύτερης ζώνης. Επομένως, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις των βαθύτερων γεωλογικών στρωμάτων επηρεάζουν τη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Υψηλής και χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης στρώματα μπορούν να διακριθούν από γραφήματα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της απόστασης των ηλεκτροδίων του ρεύματος.

3.3.2.1 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗΣ

Το πρώτο βήμα είναι ο έλεγχος της μορφολογίας της περιοχής μελέτης, δεδομένου ότι η ανάπτυξη των ηλεκτροδίων γίνεται σε ευθεία γραμμή και σε συγκεκριμένη διεύθυνση. Η ύπαρξη οικημάτων, χειμάρρων, λόφων, έντονης βλάστησης και άλλων εμποδίων δυσχεραίνουν ή απαγορεύουν την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Κατά το χερίστο σενάριο αναζητούνται γειτονικά, προσβάσιμα σημεία ώστε να περατωθεί η διασκόπηση.

Για γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση με τη διάταξη *Schlumberger*, αρχικά γίνεται η σύνδεση των καλωδίων με την συσκευή, κατόπιν επιλέγεται το σημείο που θα αποτελέσει το κέντρο της βυθοσκόπησης και ορίζεται ο συμβολισμός του (π.χ Δ). Στη συνέχεια τοποθετούνται, εκατέρωθεν του σημείου Δ, τα ηλεκτρόδια τάσης σε απόσταση $(MN / 2)$ και τα ηλεκτρόδια ρεύματος σε απόσταση $(AB / 2)$, (μικρότερη δυνατή). Για να προκύψουν αξιόπιστες μετρήσεις τα ηλεκτρόδια, τα οποία έχουν την μορφή μεταλλικών πασσάλων με μήκος 50 cm, θα πρέπει να διεισδύσουν στο έδαφος σε βάθος τουλάχιστον 15 cm. Ακολουθεί η σύνδεση των ηλεκτροδίων Α και Β με τα καλώδια και διοχετεύεται ηλεκτρικό ρεύμα στο έδαφος, λόγω δημιουργίας κλειστού κυκλώματος. Σε κάθε θέση, ο χαρακτηριστικός ήχος του οργάνου δηλώνει την πραγματοποίηση της μέτρησης και από κάθε σημείο μέτρησης λαμβάνονται συγκεκριμένες τιμές ρεύματος i και δυναμικού V . Αφού γίνει η πρώτη μέτρηση, τα ηλεκτρόδια του ρεύματος τοποθετούνται σε μεγαλύτερη απόσταση $(AB / 2)$ και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Η διαφορά δυναμικού μειώνεται με την αύξηση της απόστασης, ενώ όταν η μέτρηση προσεγγίσει την τιμή 0,1 mV θεωρείται μη αξιόπιστη, αυξάνεται το μήκος της απόστασης $(MN / 2)$ και λαμβάνεται νέα μέτρηση για την ίδια απόσταση $(AB / 2)$. Οι αποστάσεις των ημιαναπτυγμάτων $(AB / 2)$ και οι ενδείξεις του ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού καταχωρούνται σε ειδικά διαμορφωμένα έντυπα.

Εξοπλισμός γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης:

Πηγή ρεύματος [διαβίβαση ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος με πηγή συνεχούς (DC – για μεγάλα βάθη) ή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC)], Αμπερόμετρο [μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που διοχετεύεται στο έδαφος], Βολτόμετρο [μέτρηση του δυναμικού], (συνήθως η πηγή ρεύματος, το αμπερόμετρο και το βολτόμετρο, περιέχονται σε μια συσκευή όπως είναι η Megger, η Tellohm, η ABEM Terrameter κ.α.), Ηλεκτρόδια [μεταλλικά πασσαλάκια συνήθως από αλουμίνιο, χαλκό ή ατσάλι, με μήκος περίπου 50 - 70 cm, που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του ρεύματος από την πηγή στο έδαφος], Μονωμένα καλώδια [μονωμένα ηλεκτρικά καλώδια χαμηλής αντίστασης μεταφερόμενα σε κυλίνδρους. Χρησιμοποιούνται για την σύνδεση των ηλεκτροδίων με το κύκλωμα του ρεύματος και του δυναμικού, με μήκος που εξαρτάται από το βάθος της βυθοσκόπησης].

3.3.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Από τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται στο ύπαιθρο, υπολογίζονται οι τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και προσδιορίζεται η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους. Για την αντιστροφή των αρχικών μετρήσεων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα RES2DINV. Το συγκεκριμένο λογισμικό χωρίζει το υπέδαφος σε ένα πλήθος παραλληλογράμμων και σε κάθε ένα από αυτά, θεωρεί σταθερή την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Αρχικά θέτεται μία ορισμένη τιμή για την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση και προκύπτει το αρχικό μοντέλο. Στη συνέχεια το λογισμικό υπολογίζει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που αντιστοιχούν στο αρχικό μοντέλο και τις συγκρίνει με τις τιμές των μετρήσεων στο πεδίο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά με αντίστοιχη μείωση του σφάλματος ανάμεσα στις τιμές που υπολογίζει το λογισμικό και στις τιμές του πεδίου. Τελικά επιλέγεται το μοντέλο με το μικρότερο δυνατό σφάλμα, δηλ. όταν η προαναφερθείσα επαναληπτική διαδικασία παρουσιάσει σύγκλιση. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι το τελικό μοντέλο, το οποίο παρουσιάζει την κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

4.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η γεωλογική χαρτογράφηση αποτελεί θεμελιώδη δραστηριότητα από τις αρχές του 1800, όταν οι κυβερνήσεις ξεκίνησαν μία συστηματική αναζήτηση ορυκτών πόρων για να τροφοδοτήσουν την οικονομική ανάπτυξη και την εκβιομηχάνιση. Η αρχή έγινε με το χάρτη του William Smith (1815), (γεωλογικός χάρτης της Αγγλίας, της Ουαλίας και μέρους της Σκωτίας, που περιελάμβανε και τομές). Με αυτόν τον χάρτη επιδιώχθηκαν νέοι τρόποι χαρτογράφησης του υπεδάφους, χωρίς όμως να απεικονίζεται επιτυχώς η τρισδιάστατη υπόσταση της γεωλογίας.

Η αποτύπωση της κατακόρυφης διαδοχής των γεωλογικών στρωμάτων βελτιώθηκε με τους χάρτες στοιβάδων (stack – unit maps). Ολλανδοί ερευνητές (π.χ. Rijks Geologische Dienst 1925) πρωτοστάτησαν στη συγκεκριμένη μέθοδο χαρτογράφησης ξεκινώντας από την δεκαετία του 1920. Οι τεχνικές τους ενισχύθηκαν σημαντικά από τη δεκαετία του 1970 μέχρι τα μέσα του 1990 (π.χ. Berg et al. 1984), με αποτέλεσμα την επέκταση των απεικονίσεων από τα 1 - 2 μέτρα σε βάθη 6, 15 και 30 μέτρων σε χάρτες μεγαλύτερης κλίμακας (1:24000 - 1:100000). Αυτή η ανάπτυξη, που επιτεύχθηκε πριν την ραγδαία συμμετοχή των υπολογιστών, ήταν μία πρώιμη απάντηση στις απαιτήσεις για λεπτομερέστερη χαρτογράφηση (Mathers et al. 2011).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, ενώ κανένα διαθέσιμο λογισμικό προϊόν δεν παρείχε τα κατάλληλα εργαλεία για την αποτελεσματική ανάλυση χωρικών δεδομένων (Rhind 1971), (δηλ. των δεδομένων που προσδιορίζουν τη θέση αντικειμένων ή φαινομένων στο χώρο), ξεκίνησε η ανάπτυξη της τεχνολογίας των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), (Geographical Information Systems – GIS). ΣΓΠ είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απεικόνισης γεωγραφικής φύσης πληροφοριών (Goodchild 1987), ενώ έχουν δοθεί πολλοί ακόμα ορισμοί. Η ανάπτυξη της πληροφορικής, η βελτίωση των μαθηματικών μεθόδων ανάλυσης των συνθηκών του περιβάλλοντος, η αδυναμία επεξεργασίας του μεγάλου όγκου πληροφοριών με τις παραδοσιακές μεθόδους κ.α., συνετέλεσαν στη γρήγορη εξέλιξη των ΣΓΠ.

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 η αξιοσημείωτη άνθηση στις εφαρμογές μοντελοποίησης με υπολογιστή οδήγησε στην ευρεία υιοθέτηση των ΣΓΠ (Burroughs 1986, Maguire et al. 1991). Κατέστη δυνατή η χρήση ψηφιακών βάσεων δεδομένων, η οπτικοποίηση και ο χειρισμός γεωλογικών μοντέλων σε τρεις διαστάσεις με έναν κοινό υπολογιστή γραφείου (De Donatis et al. 2009). Αυτό έδωσε τη δυνατότητα στις εφαρμογές μοντελοποίησης να επεκταθούν από την μοναδική, έως τότε, χρήση τους στη βιομηχανία των υδρογονανθράκων και να γίνουν ένα πρότυπο γεωλογικό εργαλείο για όλους (Kessler et al. 2009, Rosenbaum & Turner 2003, Royse et al. 2009, Xue et al. 2004).

Ωστόσο, η γεωλογική μοντελοποίηση σταδιακά απαιτούσε την εξέλιξη των μεθόδων ΣΓΠ (Turner 2000, 2006), καθώς τα γεωλογικά ζητήματα επιζητούσαν ογκομετρική αναπαράσταση σε τρεις ορθογώνιους άξονες και περισσότερο ρεαλιστικά γεωμετρικά μοντέλα, για να επιλυθούν. Τότε επιχειρήθηκε η κατασκευή μοντέλων με εργαλεία CAD - Computer Aided Design, (Kelk & Challen 1992) και τα αποτελέσματα ήταν πολύ ενθαρρυντικά.

Με την πάροδο των ετών το διαλογικό περιβάλλον ψηφιακής σχεδίασης, CAD, αποτέλεσε τη βάση για ολοκληρωμένα συστήματα γεωμετρικής μοντελοποίησης, μεταλλευτικού σχεδιασμού και υδρογεωλογικής προσομοίωσης.

Τα εργαλεία CAD, ενώ μπορούν να καλύψουν καλύτερα τις ανάγκες της 3D προσομοίωσης, αδυνατούν να χρησιμοποιηθούν ως αυτόνομο περιβάλλον γιατί δεν υποστηρίζουν τοπογραφική ανάλυση (topological analysis). Αντιστοίχως, τα εργαλεία GIS υστερούν ως προς την ογκομετρική διαχείριση και ανάλυση τρισδιάστατων αντικειμένων (Pouliot et al. 2003). Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζεται μία συγκριτική αξιολόγηση των δύο συστημάτων, που προήλθε από σχετική μελέτη του GEOIDE (canadian Network of Centres of Excellence in Geomatics), στην περιοχή Moose Mountain του Καναδά το 2003.

Functionalities available to work in a 3D universe Διαθέσιμες λειτουργίες σε τρισδιάστατο περιβάλλον		GIS	CAD
Spatial Data Acquisition Λήψη Χωρικών Δεδομένων	Importation Εισαγωγή Δεδομένων με Βοηθητικά Αρχεία	-	+
	Data Entry Καταχώρηση Δεδομένων	Ø	+
Spatial Data Handling Χειρισμός Χωρικών Δεδομένων	0D – 1D – 2D Objects	-	+
	3D Objects (OXI αρχεία TIN – Triangulated Irregular Network)	Ø	+
Spatial Data Analysis Ανάλυση Χωρικών Δεδομένων	Metric (Buffer, Visibility, Distance) Μετρική ανάλυση (ζωνών επιρροής, προβολής, απόστασης)	+	+
	Topological (Touch, Intersect, Overlap) Τοπογραφία (επαφές, τομές, επικαλύψεις)	Ø	Ø
Spatial Data Visualization Οπτικοποίηση Χωρικών Δεδομένων	Graphical Editing Επεξεργασία Γραφικών Απεικονίσεων	-	+
	Navigation (pan, zoom, fly through) Πλοήγηση	+	+

Πίνακας 4.1 Συγκριτική αξιολόγηση GIS & CAD, όπου (+) περισσότερο αποτελεσματικό σύστημα, (-) λιγότερο επαρκές σύστημα και (Ø) λειτουργία δεν διατίθεται (Pouliot et al. 2003).

Επομένως, ως προσωρινή λύση για τις αυξανόμενες ανάγκες της μοντελοποίησης των γεωλογικών περιβαλλόντων επικράτησε ο συνδυασμός των δύο συστημάτων (CAD - GIS), που όμως προϋπέθεται τη χρήση πολλαπλών πακέτων λογισμικών και τελικά απαγόρευε την εφαρμογή μίας ενιαίας ροής εργασίας (Kessler et al. 2008).

Το πρόβλημα άρχισε να λύνεται με τις προσπάθειες πολλών γεωλογικών οργανισμών ανά τον κόσμο να συνδυάσουν διαφορετικά συστήματα λογισμικών και μεθοδολογίες σε ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον παροχής γεωεπιστημονικών πληροφοριών (Jackson 2005). Οι προσπάθειες κατέληξαν στη δημιουργία πολλών πακέτων λογισμικών, που αποτελούν ολοκληρωμένα συστήματα τρισδιάστατης γεωμετρικής προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι σε περίπλοκα γεωλογικά ζητήματα (π.χ. προσομοίωση ρηγμάτων), προτείνεται ως βέλτιστη λύση μία μεθοδολογία που συνδυάζει περισσότερα του ενός λογισμικών (Royse 2009).

Στο πρώτο διεθνές συνέδριο για τη γεωλογική προσομοίωση (1989), καθορίστηκε ότι οι γεωλογικοί σχηματισμοί αποτελούν γεωαντικείμενα και πλαισιώθηκαν οι απαιτήσεις της μοντελοποίησης του υπεδάφους:

- ρεαλιστική αναπαράσταση της γεωμετρίας των στρωματογραφικών ενοτήτων
- προσομοίωση των χωρο - χρονικών σχέσεων μεταξύ των γεωαντικειμένων
- πρόβλεψη της φυσικής μεταβλητότητας των γεωλογικών σχηματισμών
- αποτύπωση των μετατοπίσεων των γεωαντικειμένων λόγω τεκτονικών δυνάμεων
- μοντελοποίηση της ροής των ρευστών μέσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς (Kelk 1991).

Η παραπάνω περιγραφή, που εξακολουθεί να ισχύει, περικλείει συνοπτικά τα ζητήματα που αντιμετωπίζονται κατά την προσομοίωση του υπεδάφους.

Σημείο αναφοράς αποτελεί και το συνέδριο στην πόλη Σπα του Βελγίου το 2001 (European Science Foundation), όπου προσδιόριστηκαν τέσσερα (4) εμπόδια για την εξέλιξη της χρήσης των 3Δ γεωλογικών μοντέλων (Rosenbaum, Turner 2003):

- έλλειψη 3Δ / 4Δ μαθηματικών και στατιστικών εργαλείων χωρικής ανάλυσης
- ανεπάρκεια φθηνών εργαλείων μοντελοποίησης του υπεδάφους που να χρησιμοποιούνται και από μη εξειδικευμένο προσωπικό
- αδυναμία των μοντέλων να απεικονίσουν τη φυσική μεταβλητότητα των γεωλογικών σχηματισμών
- έλλειψη ιστορικού παραδειγμάτων μελετών προσομοίωσης

Σήμερα οι παραπάνω περιορισμοί έχουν σχεδόν ξεπεραστεί με τη χρήση νέων πακέτων λογισμικών και τεχνικών μοντελοποίησης (Kessler et al. 2008).

4.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στη γεωλογική μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται μέθοδοι αριθμητικής ανάλυσης για την αναπαράσταση των γεωλογικών σχηματισμών (γεωλογικές ενότητες ή στρώματα, συστήματα ρηγμάτων κ.α.), ενσωματώνοντας με ενιαίο τρόπο την τοπογραφία, τη γεωμετρία και τις φυσικές ιδιότητές τους, εξετάζοντας παράλληλα και επιμέρους δεδομένα που συνδέονται με τους σχηματισμούς (Mallet 2002).

Τα τρέχοντα λογισμικά πακέτα τρισδιάστατης γεωλογικής μοντελοποίησης λειτουργούν με έναν από τους παρακάτω δύο τρόπους:

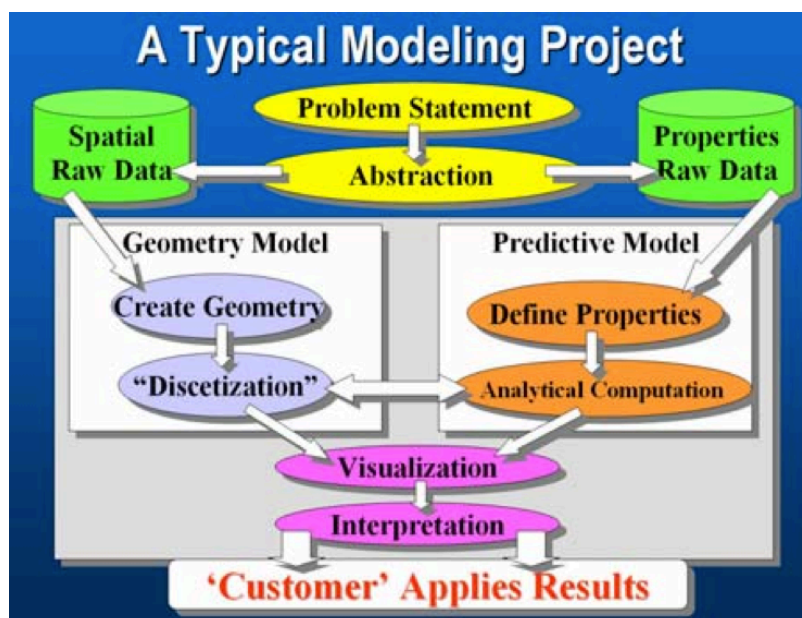
1. Με τη χρήση αριθμητικών αλγορίθμων (numerical approach), για την παρεμβολή μεταξύ σημειακών δεδομένων, όπως π.χ. δεδομένα γεωτρήσεων (Mallet 1992, Wycisk et al. 2009) ή
2. Χρησιμοποιώντας μία πιο γνωστική και ερμηνευτική προσέγγιση (cognitive approach), η οποία δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης εξειδικευμένης γεωλογικής γνώσης από τον μελετητή κατά τη σύνδεση των δεδομένων (Hinze et al. 1999, Kessler et al 2009).

Πλεονεκτήματα έχουν και οι δύο μέθοδοι, όμως έχει διαπιστωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις ο καλύτερος τρόπος είναι ο συνδυασμός των δύο προσεγγίσεων. Ειδικότερα σε περιοχές μελέτης όπου τα δεδομένα είναι αραιά ή αμφίβολης ορθότητας, η ενσωμάτωση των πληροφοριών που προέρχονται από τις παραδοσιακές παρατηρήσεις πεδίου αποτελεί βασική συνιστώσα για πιο ρεαλιστική προσομοίωση (Royce 2009).

Τα τρισδιάστατα γεωλογικά μοντέλα ή χάρτες διακρίνονται σε δύο (2) κύριες κατηγορίες (Keefer et al. 2011):

1. Μοντέλα που απεικονίζουν μόνο την οριοθέτηση των κατανομών των γεωλογικών ενοτήτων της περιοχής μελέτης, ως προς τη λιθολογία ή τη στρωματογραφία που τις χαρακτηρίζει (γεωμετρικό μοντέλο). Δεν ορίζουν κάποια από τις ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών που τα δομούν, εκτός από περιπτώσεις που οι οριοθετημένες αποθέσεις διακρίνονται σε ζώνες κάποιας συγκεκριμένης ιδιότητας (π.χ. ηλεκτρική αγωγιμότητα κ.α.)
2. Μοντέλα που απεικονίζουν τα όρια των αποθέσεων και ορίζουν σαφώς τις ιδιότητες (π.χ. πορώδες, διαπερατότητα, χημική σύσταση κ.α) των γεωλογικών σχηματισμών που περιλαμβάνουν (μοντέλο ιδιοτήτων). Η κατασκευή τους απαιτεί υψηλότερη εξειδίκευση και ενεργή συμμετοχή από τον μελετητή ιδίως κατά το στάδιο της παρεμβολής και εμπεριέχουν μεγαλύτερο ποσοστό αβεβαιότητας από τα μοντέλα της πρώτης κατηγορίας.

Μία τυπική διαδικασία μοντελοποίησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Τα πρωτογενή δεδομένα, που συλλέγονται από διάφορες πηγές, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: χωρικά δεδομένα και δεδομένα ιδιοτήτων. Τα χωρικά δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία γεωμετρικών μοντέλων και με τα δεδομένα ιδιοτήτων κατασκευάζονται μοντέλα ιδιοτήτων (ή μοντέλα πρόβλεψης).



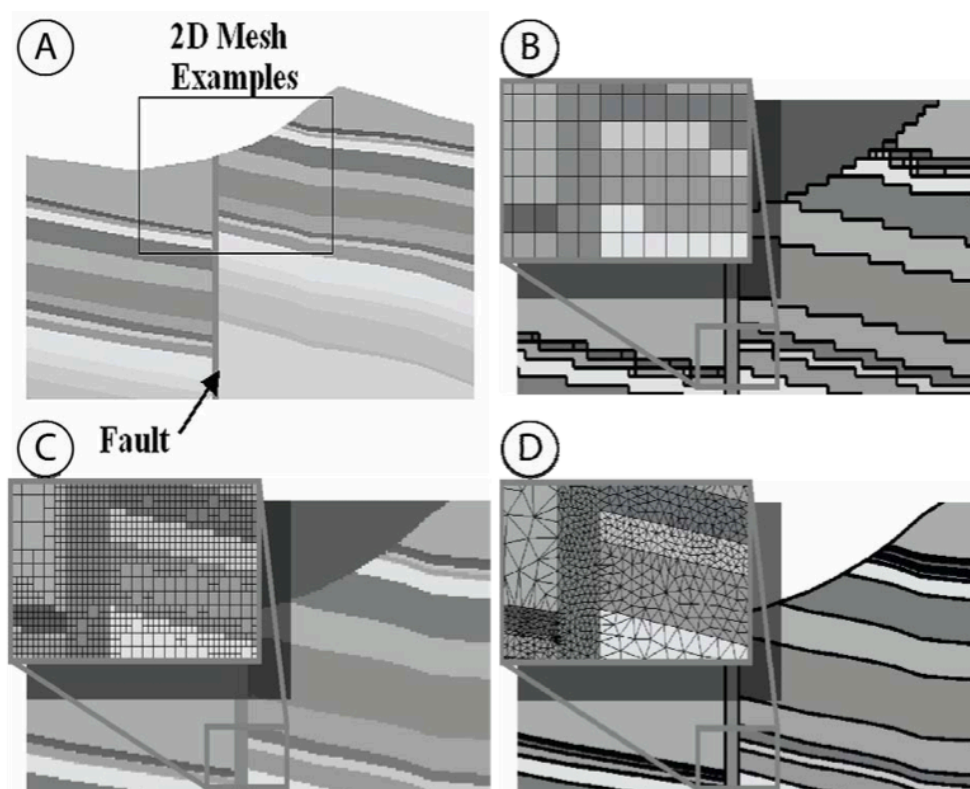
Σχήμα 4.1 Γενική διαδικασία γεωλογικής προσομοίωσης (Turner & Gable 2007, Turner & D’Agnese 2009)

Για την κατασκευή γεωμετρικών μοντέλων διακρίνονται δύο (2) στάδια: 1. ανάπτυξη του γεωμετρικού μοντέλου πλαισίου (*framework*) και 2. υποδιαίρεση του βασικού γεωμετρικού πλαισίου ως προς τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας (λιθολογία, στρωματογραφία, τεκτονική κ.α.), ώστε να υποστηριχθούν οι αναλυτικοί υπολογισμοί που αφορούν τα μοντέλα ιδιοτήτων και τελικά να αποδοθούν σωστά οι χωρικές μεταβολές, οι ερμηνείες και τα συμπεράσματα σχετικά με τις ιδιότητες των σχηματισμών (οριζόντιο βέλος στο κέντρο του Σχήματος 4.1).

Η υποδιαίρεση του γεωμετρικού μοντέλου περιλαμβάνει την κατασκευή επιφανειών που ορίζουν τη δομή και τις διεπαφές των γεωλογικών σχηματισμών. Στη συνέχεια οι επιφάνειες στοιβάζονται με λιθολογική ή στρωματογραφική διαδοχή και ορίζονται οι σχηματισμοί ή οι ενότητες σχηματισμών που περικλείουν. Οι επιφάνειες κατασκευάζονται με αλγόριθμους παρεμβολής σύμφωνα με τις περιγραφές των γεωτρήσεων, συνήθως συσχετίζοντας τα αντίστοιχα δεδομένα κάθε γεώτρησης, ενώ υπάρχουν και άλλοι τρόποι ανάλογα με το λογισμικό που χρησιμοποιείται. Η διαδικασία απαιτεί προσεκτική εξέταση κάθε επιφάνειας, καθώς η παρατηρούμενη πολύπλοκη αλληλουχία των γεωλογικών σχηματισμών δεν εναρμονίζεται πάντα με τη φιλοσοφία των διαθέσιμων αλγόριθμων παρεμβολής. Σε πολλές περιπτώσεις οι επιφάνειες τέμνονται μεταξύ τους, δημιουργώντας μη ρεαλιστικές απεικονίσεις.

Η κατανομή των δεδομένων ιδιοτήτων προκύπτει από την εφαρμογή μεθόδων καναβοποίησης και μοντελοποίησης (*Gridding - Modeling methods*), δηλ. τη διακριτοποίηση του στερεού μοντέλου (*solid model*) σε μικρότερα ογκομετρικά στοιχεία (*volume elements* ή *voxels*). Υπάρχει μεγάλο θεωρητικό υπόβαθρο που αναφέρεται στη σχεδίαση και στην κατασκευή πλεγμάτων και μοντέλων κατάλληλα για προσομοίωση διαφορετικών απαιτήσεων (Knupp & Steinberg 1994).

Παρατηρούνται δύο (2) γενικές κατηγορίες ογκομετρικών πλεγμάτων: τα δομημένα (*structured meshes*) και τα αδόμητα (*unstructured meshes*). Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο τύπων πλεγμάτων επεξηγείται καλύτερα με τις δισδιάστατες απεικονίσεις του Σχήματος 4.2.



Σχήμα 4.2 Α. Τυπική γεωλογική τομή Β. Ορθογωνικό δομημένο πλέγμα (*orthogonal cellular mesh*) C. *Quadtrees* (ή *Q – Tree*) (after Raphael Finkel & J. L. Bentley 1974) δομημένο πλέγμα (κάθε κύβος του πλέγματος διαχωρίζεται σε τέσσερις κύβους όταν επιτευχθεί η μέγιστη χωρητικότητα δεδομένων) D. Αδόμητο πλέγμα (Turner 2006, Turner & Gable 2007).

Ο πιο διαδεδομένος τύπος πλέγματος είναι το ορθογωνικό (Σχήμα 4.2B.), που διαιρεί το τρισδιάστατο ογκομετρικό μοντέλο σε μικρούς κύβους (*voxels*). Το μέγεθος των *voxels* καθορίζει τη γεωμετρία του μοντέλου, καθώς η γεωμετρική λεπτομέρεια είναι μικρότερη σε μεγαλύτερα ογκομετρικά στοιχεία, ενώ τα πολύ μικρά αυξάνουν το χρόνο επεξεργασίας. Τα τετραεδρικά δένδρα (*quadtrees*) προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία για την απόδοση της ανάλυσης του πλέγματος όπου χρειάζεται (π.χ. κατά την μοντελοποίηση ιζηματογενών στρωμάτων, τα οποία κατανέμονται οριζοντίως παρά με κατακόρυφη διεύθυνση), ενώ δεν υπάρχει διαφοροποίηση στην τρισδιάστατη απεικόνιση (Σχήμα 4.2C.).

Τα αδόμητα πλέγματα (Σχήμα 4.2D.) δεν περιορίζονται από σταθερή δομή, βασίζονται σε τετράεδρα, εξάεδρα κτλ. ογκομετρικά στοιχεία και είναι πλέον κατάλληλα για την προσομοίωση ρηξιγενών δομών (π.χ. ρήγματα). Η κατασκευή τους προϋποθέτει αυξημένες απαιτήσεις αναλυτικών υπολογισμών, χρόνου επεξεργασίας και εξειδικευμένων λογισμικών (Gable et al. 1996).

Το βασικό αντικείμενο του γεωμετρικού μοντέλου του υπεδάφους είναι η βέλτιστη απόδοση της ρεαλιστικής γεωμετρίας των λιθοστρωματογραφικών ενοτήτων και της κατανομής των ιδιοτήτων των σχηματισμών, με στόχο την πρόβλεψη των φαινομένων ή των διεργασιών που εξετάζονται σε κάθε μελέτη ή έρευνα (τμήμα δεξιά στο Σχήμα 4.1). Τα μοντέλα ιδιοτήτων ή πρόβλεψης έχουν προεκτατικό (παρά ερμηνευτικό) χαρακτήρα και συνεπώς εμπεριέχουν περισσότερη αβεβαιότητα. Τελικά, και οι δύο κατηγορίες μοντέλων διέρχονται μέσω εκτενών οπτικοποιήσεων (*visualization*) και ερμηνειών (*interpretation*) για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης (κατώτερο τμήμα Σχήματος 4.1).

4.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Οι *πραγματικές* γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στις περιοχές που ερευνούνται συνήθως απέχουν από την προσομοίωση που επιχειρείται με τα γεωλογικά μοντέλα. Οι περιορισμοί που θέτουν τα μοντέλα ή οι χάρτες, όσον αφορά την εγκυρότητα των συμπερασμάτων για τα γεωλογικά ζητήματα που εξετάζονται, προσδιορίζονται με το μέγεθος της αβεβαιότητας.

Οι *αιτίες* αβεβαιότητας που επηρεάζουν τα μοντέλα κυρίως οφείλονται (Fallara et al. 2005):

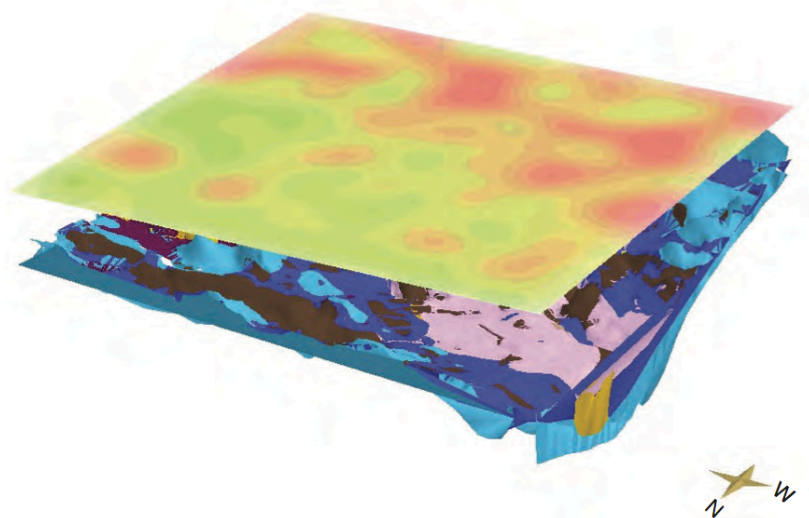
- στην αραιή πυκνότητα των δεδομένων, που οδηγεί σε αμφίβολες τιμές παρεμβολής, καθώς όσο πιο μακριά βρίσκονται τα *σημεία ελέγχου* (πραγματικές μετρήσεις – π.χ. δεδομένα γεωτρήσεων) τόσο λιγότερο ακριβής γίνεται η εκτίμηση των ενδιάμεσων τιμών,
- στις μεταβολές της εγκυρότητας των δεδομένων (εμπεριέχονται πιθανά λάθη, π.χ. στις συντεταγμένες των σημειακών δεδομένων κ.α.),
- στη διαφορετικότητα των αλγόριθμων παρεμβολής, οι οποίοι ανταποκρίνονται διαφορετικά ακόμα και αν πρόκειται για την ίδια βάση δεδομένων,
- στα υπολογιστικά σφάλματα κατά την εκτέλεση των ενδιάμεσων πράξεων των αλγορίθμων παρεμβολής και την αποθήκευση των αποτελεσμάτων (π.χ. σφάλματα αποκοπής, σφάλματα στρογγύλευσης κ.α.)
- στις μεθόδους αντιστροφής κατά την επεξεργασία των αρχικών γεωφυσικών μετρήσεων, καθώς το σφάλμα που περιέχουν τελικά μεταφέρεται στα τρισδιάστατα μοντέλα,
- στην υποκειμενικότητα κάθε μελετητή ως προς την κατανόηση του γεωλογικού υποβάθρου και κατ' επέκταση των αποφάσεων του κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης (επιλογή αλγορίθμου παρεμβολής, επιμέρους ρυθμίσεις, κρίσεις περί ρηγμάτων κ.α.).

Να τονιστεί σε αυτό το σημείο η αξία της προσεκτικής διαχείρισης των πρωτογενών γεωμορφολογικών (τοπογραφία κ.α.) και τεχνικογεωλογικών δεδομένων (γεωλογική δομή, στρωματογραφική διάρθρωση, τεκτονική εξέλιξη κ.α.). Η επεξεργασία τους (πύκνωση ή αραιώση, στατιστική ανάλυση, κατηγοριοποίηση – ομαδοποίηση, διόρθωση κ.α.) αποτελεί το αρχικό και πιο σημαντικό στάδιο σε μελέτες και γεωτεχνικά έργα που σχετίζονται με τη διερεύνηση των εδαφικών και υπεδαφικών συνθηκών (μελέτες εκτίμησης υδρογονανθράκων, υδροφόρων αποθεμάτων, ευστάθειας πρηνών, γεωτεχνικής συμπεριφοράς βραχώμαζας κ.α.).

Επομένως η χρήση αξιόπιστων (λεπτομερών και ακριβών) γεωλογικών δεδομένων αποτελεί το κλειδί για τη λήψη βέβαιων εκτιμήσεων. Σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας, των μέτρων εμπιστοσύνης και των πλήρως καθορισμένων παραδοχών που τυχόν να έγιναν, οδηγούν σε τελικά αξιοποιήσιμα συμπεράσματα και ορθολογικές αποφάσεις σε ότι αφορά κρίσιμα γεωεπιστημονικά ζητήματα (Wood & Curtis 2004).

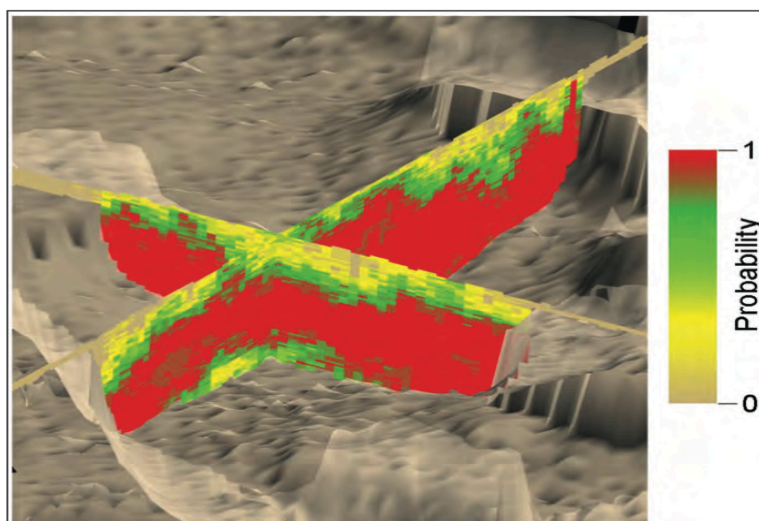
Οι κλασσικές μέθοδοι αξιολόγησης των μοντέλων και χαρτών στηρίζονται σε γεωστατιστικές τεχνικές, οι οποίες όμως συχνά ακυρώνονται από την πολυπλοκότητα της πραγματικής διαδοχής των ιζημάτων. Πλέον γίνονται προσπάθειες να εφαρμοστούν νέες μέθοδοι εκτίμησης της αβεβαιότητας, οι οποίες βασίζονται λιγότερο στη γεωστατιστική και περισσότερο στο γεωλογικό υπόβαθρο των δεδομένων και των ερμηνειών. Στα παραδείγματα που ακολουθούν διακρίνεται η διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων (Keefe et al. 2011).

Το πρώτο *παράδειγμα* αφορά τμήμα 5 x 5 km στο κέντρο της Γλασκώβης, UK. Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζεται η αβεβαιότητα του μοντέλου της περιοχής, που εκτιμήθηκε με κλασσική γεωστατιστική μέθοδο βασισμένη στη χωρική κατανομή των γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 4.3 Αξιολόγηση μοντέλου κεντρικής Γλασκώβης (με κόκκινες αποχρώσεις οι περιοχές με αραιή πυκνότητα δεδομένων – υψηλή αβεβαιότητα και με πράσινες οι περιοχές με υψηλή πυκνότητα δεδομένων – χαμηλή αβεβαιότητα) (Keefe et al. 2011).

Στο δεύτερο παράδειγμα, για την αξιολόγηση της μοντελοποίησης καναλιού στην περιοχή Zeeland της Ολλανδίας, χρησιμοποιήθηκαν στοχαστικές τεχνικές για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων κάθε κελιού (cell) του μοντέλου να ανήκει σε συγκεκριμένη λιθοστρωματογραφική ενότητα. Τα αποτελέσματα αποτελούν την εκτίμηση της αβεβαιότητας που περιέχει. Στο Σχήμα 4.4 τα χρώματα (υπόμνημα: 0 – 1) συμβολίζουν την *πιθανότητα* ένα κελί να περιέχει άμμο (sand). Στο κέντρο του καναλιού η πιθανότητα είναι 100% (κόκκινο χρώμα), στο άνω τμήμα του καναλιού αναμένονται αποθέσεις αργίλου (clay) και οι πιθανότητες είναι πιο μικρές (πράσινο και κίτρινο χρώμα) και στο κάτω τμήμα του καναλιού οι πιθανότητες είναι πάλι μικρές καθώς αναμένονται αποθέσεις ιλύος (silt).



Σχήμα 4.4 Τρισδιάστατο διάγραμμα συνδυαστικών τομών δύο διευθύνσεων καναλιού στην Ολλανδία (TNO-Netherlands Geological Survey GeoTOP model).

4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Τα γεωλογικά μοντέλα τριών (3) διαστάσεων αποτελούν επέκταση των παραδοσιακών δισδιάστατων γεωλογικών χαρτών στην τρίτη διάσταση (Z) και χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση των υπεδάφικων στρωμάτων, παρουσιάζοντας τα βάθη, τα πάχη και τις ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών σε τρισδιάστατο ογκομετρικό περιβάλλον. Τα ψηφιακά 3Δ (3 - Dimensional) μοντέλα προκύπτουν από την επεξεργασία πρωτογενών γεωλογικών δεδομένων με αριθμητικές μεθόδους. Παρουσιάζονται σε μεγάλα εύρη κλίμακας ή ανάλυσης και αφορούν σε πολλές χρήσεις και ομάδες ενδιαφερόντων, καθώς (Mathers et al. 2011):

- μπορούν να εξηγήσουν και να οπτικοποιήσουν την πολύπλοκη γεωλογία του εδάφους και του υπεδάφους μίας περιοχής με πολυάριθμες απεικονίσεις σε κατανοητή μορφή,
- τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα γίνεται να ενημερωθούν ή να αναβαθμιστούν, όταν προκύψουν νέα δεδομένα,
- μπορούν, αφού τροποποιηθούν καταλλήλως, να προσαρμοστούν στις ανάγκες τις εκάστοτε ζητούμενης εφαρμογής και

- η υψηλή προσαρμοστικότητα σε τοπικές και ευρύτερες περιοχές, ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών, μειώνει σημαντικά το κόστος των απαραίτητων γεωλογικών μελετών [40% κέρδος σε υδρογεωλογικές εφαρμογές στην Αμερική, έδειξε οικονομική μελέτη των Bhagwat και Ire το 2000, λόγω της διαθεσιμότητας των γεωλογικών μοντέλων και αναλογία 18:1 (κέρδος:δαπάνες) σε γεωτεχνικές και εξορυκτικές εφαρμογές, από οικονομική εκτίμηση του γεωλογικού και μεταλλευτικού ινστιτούτου της Ισπανίας, Geological and Mining Institute of Spain, Garcia Cortes et al. 2005].

Οι κύριοι τομείς που επωφελούνται από την τρισδιάστατη γεωλογική μοντελοποίηση αφορούν τα παρακάτω πρακτικά και θεωρητικά ζητήματα:

Διαχείριση υδάτινων πόρων:

- Οριοθέτηση της κατανομής και του πάχους των υδροφόρων οριζόντων με τα ερμηνευτικά μοντέλα υπόγειας ροής, για την υποστήριξη αποφάσεων που σχετίζονται με τη διαχείριση των υπογείων υδατικών αποθεμάτων, την προστασία (π.χ. από φαινόμενα υφαλμύρισης) και την ανατροφοδότησή τους.
- Διεξαγωγή μελετών για την αντιπλημμυρική προστασία των ποταμών, τη μεταφορά ρύπων και την κατασκευή, προστασία και συντήρηση υγροτόπων.

Διαχείριση αποβλήτων και μόλυνσης:

- Εκτίμηση των κινδύνων που συνδέονται με τη διάχυση και αποθήκευση επικίνδυνων αποβλήτων στα συστήματα υπόγειων υδάτων.
- Εκτίμηση της πιθανής μόλυνσης του περιβάλλοντος από τους χώρους απορριμμάτων των εργοταξίων, τις υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης βενζίνης και άλλων χημικών, την διαρροή χημικών ουσιών και αποβλήτων από τη χρήση λιπασμάτων και χημικών ουσιών στον γεωργικό τομέα.

Υδρογονάνθρακες και ενέργεια:

- Ανίχνευση και μοντελοποίηση των ταμιευτήρων πετρελαίου και φυσικού αερίου.
- Αξιολόγηση του πάχους και της ποιότητας των πόρων άνθρακα με μοντέλα προσομοίωσης.
- Αξιολόγηση γεωθερμικού δυναμικού.
- Προσομοίωση της χωρητικότητας και της καταλληλότητας των χώρων δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα.

Σχεδιασμός εκμετάλλευσης γης:

- Χαρακτηρισμός των εδαφικών και υπεδαφικών συνθηκών για τον σχεδιασμό των χρήσεων της γης σε αστικές, ημιαστικές και αγροτικές περιοχές, συμβάλλοντας στην εξισορρόπηση της οικονομικής ανάπτυξης με την ορθολογική χρήση του νερού και των ορυκτών πόρων, διασφαλίζοντας την προστασίας τους.
- Προστασία των υπόγειων υδάτων και των ευάλωτων ρηχών υδροφόρων οριζόντων θέτοντας περιορισμούς στην αγροτική καλλιέργεια και τη βιομηχανική παραγωγή.

Γεωτεχνικά έργα και υποδομές:

- Διεξαγωγή μελετών για την θεμελίωση γεωτεχνικών έργων (αυτοκινητόδρομοι, σήραγγες, αποχετεύσεις, φράγματα, εμπορικά κέντρα, χάραξη διαδρομών των επικοινωνιών και των μέσων μαζικής μεταφοράς κ.α.)
- Παροχή γεωλογικών πληροφοριών με μοντέλα πρόβλεψης των φυσικών κινδύνων (π.χ. κατολισθήσεις πρανών) και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από κατασκευαστικά έργα.

Αρχαιολογία:

- Επισκόπηση των γεωλογικών συνθηκών για την προστασία των αρχαιολογικών χώρων.

Ορυκτοί πόροι:

- Ανίχνευση των ορυκτών πόρων και εκτίμηση των αποθεμάτων τους, όπως και των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων στο περιβάλλον από την πιθανή εκμετάλλευσή τους.
- Μελέτες εκτίμησης της επιρροής των χρήσεων γης στην εξόρυξη ορυκτών αποθεμάτων.

Ερευνητικά προγράμματα:

- Διεξαγωγή γεωεπιστημονικών ερευνών (στρωματογραφία, τεκτονική κ.α.).
- Προσομοίωση των επιφανειών, των βαθών και των παχών των γεωλογικών σχηματισμών και διεργασιών σε περιοχές που δεν έχουν ακόμα μελετηθεί ή σε περιοχές με ελλειπή γεωλογικά δεδομένα.

4.5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΑΚΕΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για τις ανάγκες της τρισδιάστατης γεωλογικής προσομοίωσης έχουν δημιουργηθεί, κυρίως με την υποστήριξη των βιομηχανιών των υδρογονανθράκων, πολλά λογισμικά πακέτα με μεγάλες δυνατότητες. Τα εν λόγω εξειδικευμένα λογισμικά έχουν πυρήνα CAD εμπλουτισμένο με ειδικά εργαλεία και συναρτήσεις αριθμητικής, γεωμετρικής και χαρτογραφικής επεξεργασίας (τεκτονική ανάλυση, μοντελοποίηση ρηγμάτων και ροής υπόγειων υδάτων, χαρτογραφικά συστήματα συντεταγμένων κ.α.).

Τα πακέτα συμπληρώνονται από λειτουργίες (γεω)στατιστικής επεξεργασίας για την εκτίμηση των ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών (γεωχημική σύσταση, μηχανικές ιδιότητες, περατότητα κ.α.), από εξειδικευμένη βάση δεδομένων για γεωτρήσεις (τυποποιημένο format σε όλα τα συστήματα), από χαρτογραφικό τμήμα και από λογισμικό παρουσίασης δισδιάστατων και τρισδιάστατων γραφικών (2D / 3D visualization). Η παρεμβολή του χρήστη γίνεται ως επί το πλείστον με ποντίκι (mouse point) και πληκτρολόγιο (keyboard).

Τα περισσότερα πακέτα λογισμικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δισδιάστατων και τρισδιάστατων γεωλογικών μοντέλων και χαρτών είναι τα παρακάτω (Kessler et al. 2011):

- RockWorks, 1983-2012 by RockWare Incorporated
- Petrel by Schlumberger
- SKUA by Paradigm Geophysics
- GIM by Geocap AS
- Earth Modeling by Landmark Graphics Corporation
- IRAP RMS Suite by Roxar Software Solutions
- EarthVision by Dynamic Graphics
- Jewel Suite by JOA Oil & Gas
- Geomodeller3D by Intrepid Geophysics
- GM-SYS, VOXI by Geosoft
- GeoScene3D
- Multilayer-GDM by BRGM
- GeoVisionary by Virtualis
- Isatis by Geovariance
- Move by Midland Valley Software
- Surfer by Golden Software
- Vulcan by Maptek
- Gocad (Geological Object Computer Aided Design) by Paradigm Geophysics
- GSI3D (Geological Surveying and Investigation 3D) by Hans-Georg Sobisch
- FastTracker (Reservoir Modelling) by Landmark Graphics
- ArcGIS by ESRI
- Leapfrog by Aranz Geo Ltd
- Surpac, Minex (stratified deposits) by Gemcom Software International

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο ROCKWORKS15, 1983-2012, by RockWare Incorporated. Το λογισμικό, η γενική μεθοδολογία και τα επιμέρους στάδια μοντελοποίησης περιγράφονται αναλυτικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ROCKWORKS.

Ανακεφαλαιώνοντας, η τρισδιάστατη γεωλογική προσομοίωση και τα σύγχρονα εξειδικευμένα λογισμικά πακέτα αποτελούν χρήσιμα εργαλεία μελέτης πολλών εφαρμογών και μπορούν να αντικαταστήσουν παραδοσιακούς τρόπους εργασίας. Σε σύγκριση με την κλασσική, στατικού τύπου απεικόνιση, παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα (Μανούτσογλου κα 2001):

- Ο μελετητής υποστηρίζεται στην κατασκευή ενός λογικά ορθού προτύπου. Σφάλματα και αντινομίες γίνονται εμφανή κατά τη διαδικασία της γεωμετρικής προσομοίωσης και μπορούν να διορθωθούν.
- Στα πρώιμα στάδια της μελέτης υποστηρίζονται οι αποφάσεις για τη συλλογή επιπλέον στοιχείων, ενώ η διαδικασία για μετατροπή, ενημέρωση, και αναθεώρηση του γεωλογικού μοντέλου γίνεται γρήγορα και αξιοποιώντας όλα τα προϋπάρχοντα στοιχεία.
- Τα σφάλματα ερμηνείας, σε σχέση με τον κλασσικό γεωλογικό χάρτη περιορίζονται αισθητά, επειδή στο ψηφιακό ομοίωμα μεταφέρονται και συνδυάζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο τα συλλεγόμενα πρωτογενή στοιχεία, τα υπάρχοντα βιβλιογραφικά δεδομένα, όσο και οι εμπειρίες και απόψεις του ερευνητή.
- Το γεωλογικό μοντέλο δεν υποστηρίζεται μόνο από αντιπροσωπευτικές γεωλογικές τομές αλλά από την δυνατότητα κατασκευής οποιασδήποτε τομής ή τομών σε κάθε διεύθυνση.
- Οι πληροφορίες που περιέχονται στο πρότυπο μπορούν εύκολα να αναπαραχθούν και να παρουσιαστούν π.χ. με τη μορφή τομών σε διάφορες διευθύνσεις, υπεδαφικών χαρτών, τρισδιάστατων μπλοκ διαγραμμάτων.
- Γίνεται δυνατή η εύκολη και ακριβής ποσοτικοποίηση της γεωλογικής πληροφορίας (όγκοι, πάχη, άλμα ρηγμάτων, κλπ.) και η αντίστοιχη παρουσίαση (π.χ. χάρτες ισοπαχών, ομαδοποίηση, ή γενεές ρηγμάτων).
- Γίνεται εύκολη η ενσωμάτωση ψηφιακών εικόνων και στοιχείων από τηλεπισκοπικούς δορυφόρους, ψηφιακά φωτογραμμετρικά όργανα, μοντέρνα τοπογραφικά όργανα, και δορυφορικά συστήματα εντοπισμού (GPS).
- Το αποτέλεσμα όλων αυτών των εργασιών είναι το γεωμετρικό μοντέλο, που αποτελεί τη βάση για τις παραπέρα εργασίες της εκτίμησης ιδιοτήτων (μοντέλο ιδιοτήτων).

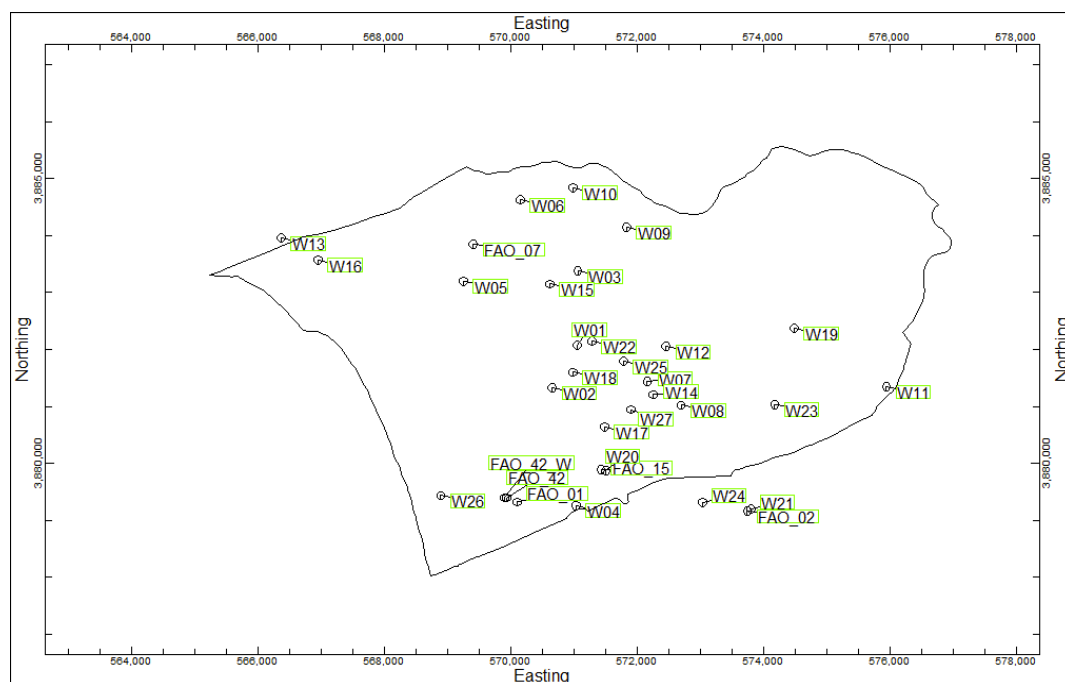
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το πρώτο βήμα για την προσέγγιση του αντικειμενικού σκοπού της παρούσας εργασίας ήταν η συλλογή και επεξεργασία των πρωτογενών χωρικών δεδομένων και των δεδομένων ιδιοτήτων.

Όσον αφορά τη συλλογή των χωρικών και ιδιαίτερα των σημειακών δεδομένων, διατέθηκαν και εξετάστηκαν συνολικά τριάντα τρεις (33) γεωτρήσεις. Οι δέκα έξι (16) αποτελούν μέρος του ερευνητικού προγράμματος F.A.O. (1969) και πιο συγκεκριμένα της έκθεσης «Survey N. 538: MESSARA PLAIN (Eastern Crete): Comparison Between Boreholes and Electrical Soundings Results», και οι υπόλοιπες δέκα επτά (17) προέρχονται από το αρχείο του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων.

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η κατανομή των γεωτρήσεων εντός και εκτός της περιμέτρου της περιοχής έρευνας (βλ. παράγραφο 1.4.1 και 2.2.2). Το περίγραμμα της χωρικής κατανομής κατασκευάστηκε με την εντολή *Map / Borehole Locations* της κεντρικής γραμμής εντολών του περιβάλλοντος Borehole Manager (βλ. παράγραφο Π.8.1).



Σχήμα 5.1 Περίγραμμα λεκάνης Τυμπακίου και κατανομή των γεωτρήσεων

Το σύνολο των γεωτρητικών δεδομένων βρίσκονταν σε έντυπη μορφή, οπότε η μετατροπή τους σε ψηφιακά δεδομένα ήταν προϋπόθεση για τον εμπλουτισμό της βάσης δεδομένων. Από τη συγκέντρωση και ερμηνεία των λιθολογικών περιγραφών των γεωτρητικών στηλών προέκυψε η ομαδοποίησή τους σε είκοσι τέσσερις (24) διαφορετικούς λιθολογικούς τύπους.

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται οι λιθολογικοί σχηματισμοί σε μορφή υπομνήματος. Το ποσοστό πλήρωσης του μοτίβου, όπως εμφανίζεται στη δεύτερη στήλη, εκφράζει κοκκομετρική διαβάθμιση.

clay	
silty clay	
sandy clay	
gravelly clay	
sand	
clayey sand	
silty sand	
gravelly sand	
silt	
clayey silt	
gravelly silt	
sandy silt	
gravel	
clayey gravel	
silty gravel	
sandy gravel	
marly gravel	
marl	
clayey marl	
sandy marl	
gravelly marl	
sandstone	
conglomerate	
limestone	

Σχήμα 5.2 Κατηγοριοποίηση των λιθολογικών περιγραφών όπως προέκυψαν από τις περιγραφές των γεωτρητικών στηλών

Οι λιθολογικοί σχηματισμοί που διακρίθηκαν:

[άργιλος – clay, ιλυώδης άργιλος – silty clay, αμμώδης άργιλος – sandy clay, χαλικώδης άργιλος – gravelly clay, άμμος – sand, αργιλώδης άμμος – clayey sand, ιλυώδης άμμος – silty sand, χαλικώδης άμμος – gravelly sand, ιλύς – silt, αργιλώδης ιλύς – clayey silt, χαλικώδης ιλύς – gravelly silt, αμμώδης ιλύς – sandy silt, χαλίκια – gravel, ιλυώδη χαλίκια – silty gravel, αργιλώδη χαλίκια – clayey gravel, αμμώδη χαλίκια – sandy gravel, μαργαϊκά χαλίκια – marly gravel, μάργα – marl, αργιλώδης μάργα, χαλικώδης μάργα – gravelly marl, αμμώδης μάργα – sandy marl, ψαμμίτης – sandstone, κροκαλοπαγές – conglomerate και ασβεστόλιθος – limestone]

Το δεύτερο σκέλος της μορφοποίησης των πρωτογενών γεωτρητικών δεδομένων αποτέλεσε η ομαδοποίηση – ταξινόμηση των λιθολογικών σχηματισμών σε ευρύτερες λιθοστρωματογραφικές ενότητες. Διακρίθηκε η υδροπερατή ενότητα των Πλειο-Τεταρτογενών αποθέσεων (~ 3 εκατ. χρόνια - Σήμερα) και η αδιαπέρατη ενότητα των Νεογενών αποθέσεων (~ 13 - 3 εκατ. χρόνια). Η ομαδοποίηση έγινε με κριτήριο τον υδρολιθολογικό χαρακτήρα των αποθέσεων και με την κύρια παραδοχή ότι οι εμφανίσεις μάργας με πάχος μεγαλύτερο της τάξεως των δέκα (10) μέτρων θεωρούνται αποθέσεις του Νεογενούς. Το υπόμνημα της ταξινόμησης φαίνεται στο Σχήμα 5.3.

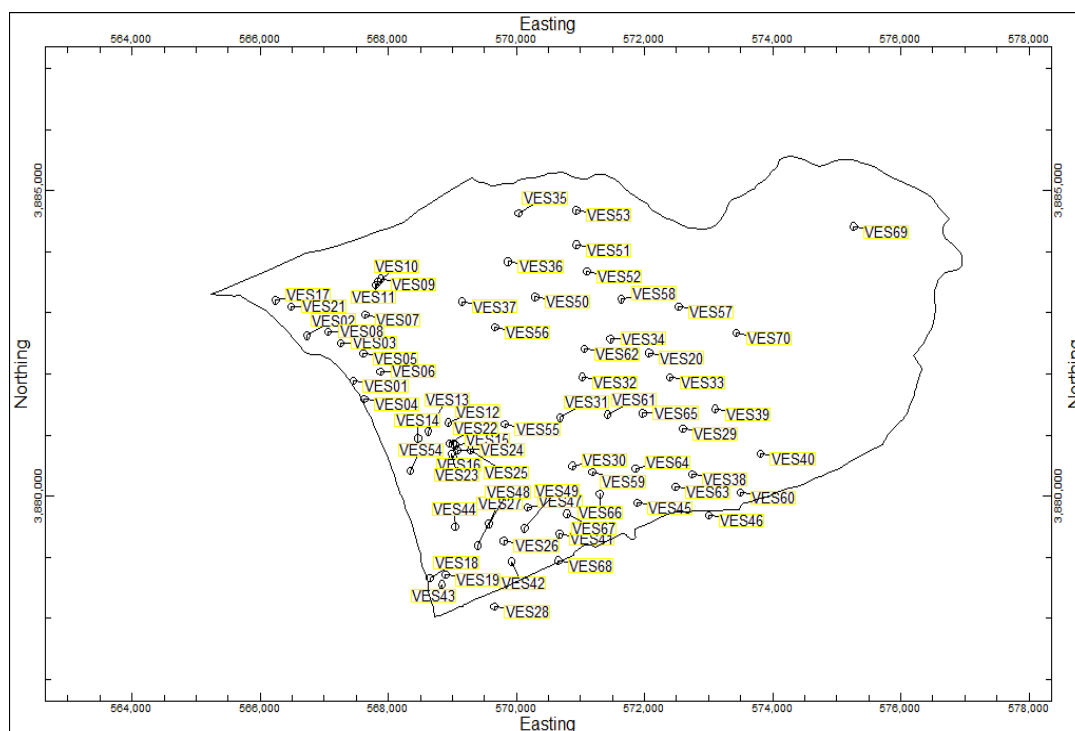
Με τον τρόπο αυτόν το σύνολο των γεωτρητικών στοιχείων εισήχθησαν στη ψηφιακή βάση δεδομένων ως λιθολογικά και λιθοστρωματογραφικά δεδομένα, η επεξεργασία των οποίων οδήγησε στην κατασκευή του τρισδιάστατου λιθοστρωματογραφικού μοντέλου.



Σχήμα 5.3 Λιθοστρωματογραφικές ενότητες (Πλειο-Τεταρτογενείς – Plio-Quaternary και Νεογενείς – Neogene αποθέσεις)

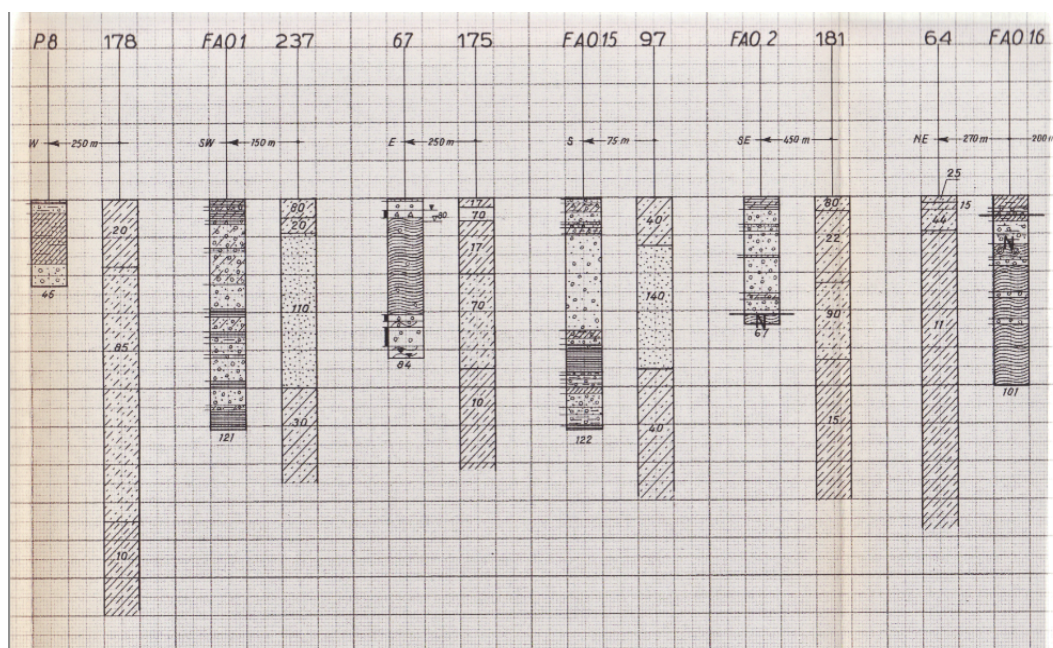
Εκτός από τα λιθοστρωματογραφικά δεδομένα, η ψηφιακή βάση δεδομένων εμπλουτίστηκε και με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προερχόμενα από μετρήσεις εβδομήντα (70) ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων (βλ. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3). Οι βυθοσκοπήσεις αφορούν την ευρύτερη περιοχή του Τυμπακίου με έμφαση στην παράκτια ζώνη (σχήμα 5.4) και προήλθαν από τα παρακάτω ερευνητικά προγράμματα:

- 2 βυθοσκοπήσεις από την έκθεση «Αποτελέσματα αναγνωριστικής γεωηλεκτρικής έρευνας στην περιοχή νότια του Ψηλορείτη (ΙΓΜΕ, 1994)»
- 41 βυθοσκοπήσεις από μελέτη του F.A.O. (1969) και συγκεκριμένα των εκθέσεων «Survey N. 538: MESSARA PLAIN (Eastern Crete): Comparison Between Boreholes and Electrical Soundings Results» και «Survey N. 538: MESSARA PLAIN (Eastern Crete): GEOELECTRICAL CROSS-SECTIONS 1 – 8».
- 27 βυθοσκοπήσεις από το ερευνητικό πρόγραμμα MEDIS (2005).



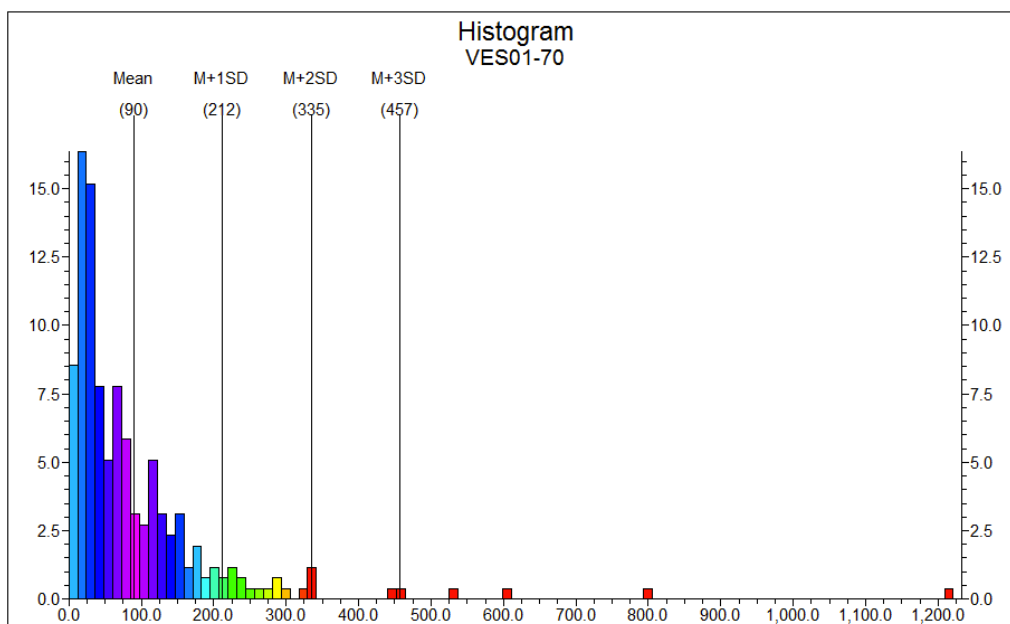
Σχήμα 5.4 Περίγραμμα λεκάνης Τυμπακίου και κατανομή των βυθοσκοπήσεων

Ειδικά για τις βυθοσκοπήσεις των εκθέσεων του F.A.O., τα δεδομένα είχαν παρατεθεί δίπλα στις εγγύτερες γεωτρήσεις (Σχήμα 5.5). Για κάθε μία από τις βυθοσκοπήσεις αυτές μετρήθηκε το πάχος του διαστήματος που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Κρατώντας μία συντηρητική θεώρηση κατά την ερμηνεία αυτών των δεδομένων, αποκλείστηκαν οι τιμές των ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων για βάθη μεγαλύτερα της αντίστοιχης γεώτρησης, ακριβώς επειδή δεν υπήρχε η ανάλογη λιθολογική περιγραφή για τα συγκεκριμένα διαστήματα.



Σχήμα 5.5 Απόσπασμα έκθεσης F.A.O.

Μετά την εισαγωγή των τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη βάση δεδομένων ακολούθησε η στατιστική επεξεργασία τους (Διάγραμμα 5.1) για να διαπιστωθεί η ύπαρξη ακραίων τιμών (outliers). Στο σύνολο των τιμών αυτών παρατηρήθηκαν και απομακρύνθηκαν ορισμένες ακραίες τιμές οι οποίες βρίσκονταν σε μικρά βάθη και θεωρήθηκαν ως λανθασμένες τιμές που οφείλονται σε προβληματικές μετρήσεις στο πεδίο (π.χ. κακή τοποθέτηση ηλεκτροδίων ρεύματος).



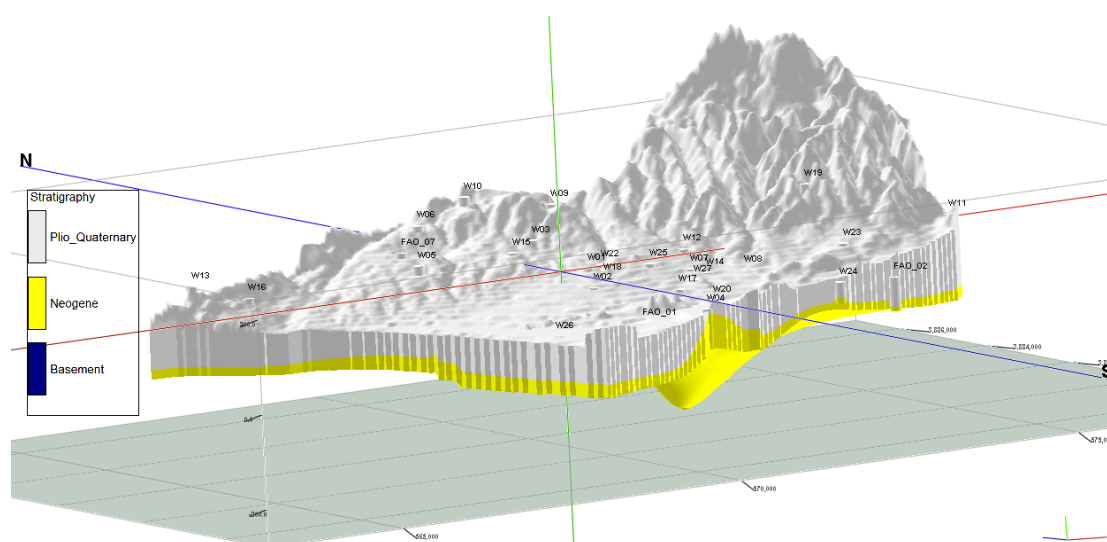
Διάγραμμα 5.1 Στατιστική επεξεργασία των τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Οι ακραίες τιμές αποκλείστηκαν από την περαιτέρω χωρική επεξεργασία τους.

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας επεξεργασίας και μορφοποίησης, οι λιθοστρωματογραφικές πληροφορίες των γεωτρήσεων και οι μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης των βυθοσκοπήσεων αποτελούν πλέον τη βάση δεδομένων στο περιβάλλον του λογισμικού ROCKWORKS στα αντίστοιχα πεδία (βλ. παράγραφο Π.5.1). Στο επόμενο βήμα επεξεργασίας, ακολούθησε η μοντελοποίηση των δεδομένων και η κατασκευή διαγραμμάτων απεικόνισης σε δύο και τρεις διαστάσεις, ώστε να αποτυπωθεί η λιθοστρωματογραφική δομή της λεκάνης του Τυμπακίου και να εντοπιστούν ζώνες που χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($\sim <10 \text{ Ohm.m}$) στην παράκτια περιοχή. Τέτοιες ζώνες μπορούν να χαρακτηριστούν ως περιοχές διείσδυσης αλμυρού νερού στον παράκτιο υδροφόρα.

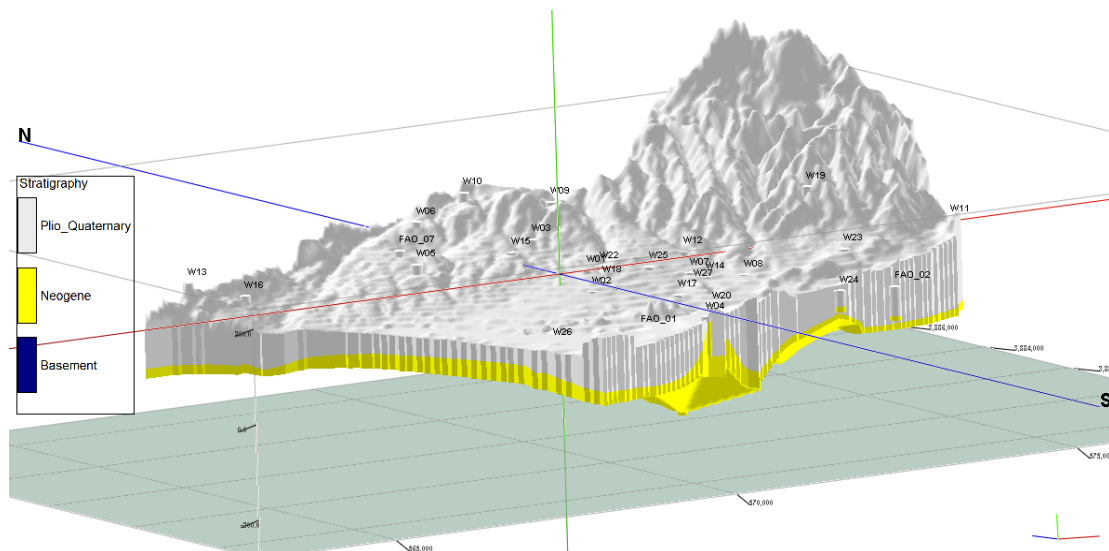
Για την παραγωγή των τρισδιάστατων μοντέλων χρησιμοποιήθηκε κάναβος (grid) τριών διαστάσεων μήκους στον άξονα του $X = 15000\text{m}$, στον άξονα του $Y = 10000\text{m}$ και στον άξονα του $Z = 520\text{m}$. Το μεσοδιάστημα ήταν 50m , 50m και 2m , αντιστοίχως. Με αυτές τις ρυθμίσεις το μοντέλο αποτελείται από $15.790.761$ κόμβους (nodes). Στη συνέχεια, η ανώτερη επιφάνεια του μοντέλου περιορίστηκε με βάση το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής (περιβάλλον Utilities και εντολή *Map / Grid-Based Map* - βλ. παράγραφο Π.7) και περιφερειακά από τα όρια της λεκάνης του Τυμπακίου με τη χρήση του πολυγωνικού φίλτρου (polygon filter) της περιμέτρου της περιοχής έρευνας, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την μοντελοποίηση μέσα στην έκταση της λεκάνης του Τυμπακίου και κάτω από την τοπογραφική επιφάνεια. Με καθορισμένες πλέον αυτές τις ρυθμίσεις ακολούθησε η λιθοστρωματογραφική και γεωφυσική μοντελοποίηση.

5.2 ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

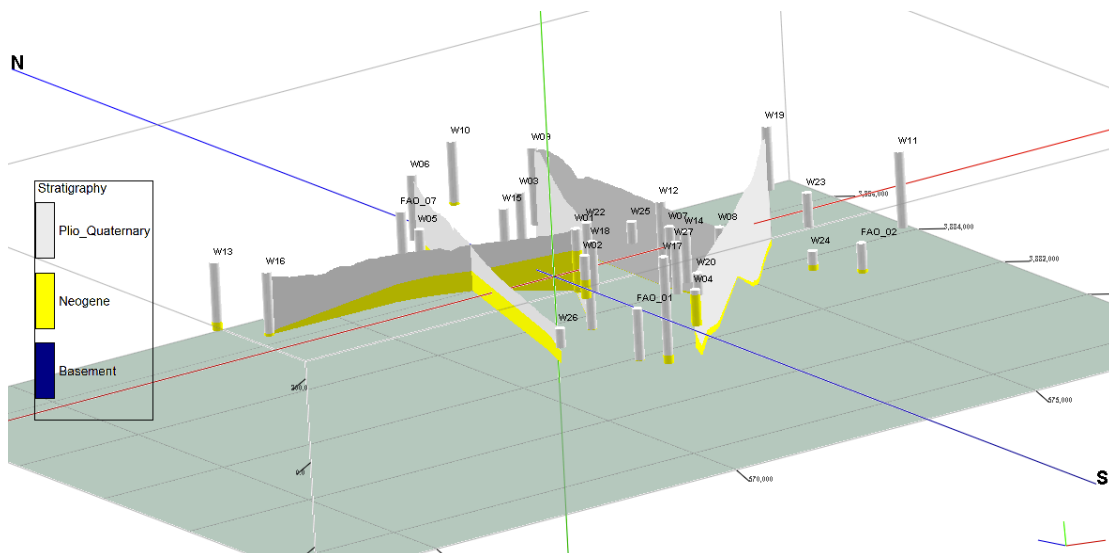
Το τρισδιάστατο λιθοστρωματογραφικό μοντέλο (εντολή *Stratigraphy / Model*) της λεκάνης του Τυμπακίου κατασκευάστηκε με δύο μαθηματικές μεθόδους (βλ. παράγραφο Π.6 και Π.8.5), ώστε να επιλεγθεί η βέλτιστη παρεμβολή των δεδομένων. Η μέθοδος τριγωνοποίησης φαίνεται ότι προσαρμόζεται καλύτερα στα εισαγμένα σημειακά δεδομένα των κατώτατων ορίων των γεωτρήσεων και τελικά αποδίδει περισσότερο ρεαλιστικά τη χωροθέτηση των επιμέρους επιφανειών των αποθέσεων (βλ. παράγραφο Π.8.5). Στα Σχήματα 5.6 και 5.7 δίνονται τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων παρεμβολής, συμπεριλαμβανομένων των γεωτρήσεων, ενώ στο σχήμα 5.8 η απεικόνιση πολλαπλών τομών στο χώρο. Σημειώνεται ότι σε καμία από τις γεωτρήσεις δεν παρατηρήθηκε διάτρηση του αλπικού υποβάθρου (Basement). Ως συνέπεια, η λιθοστρωματογραφική ενότητα «Basement» δεν εμφανίζεται στα αντίστοιχα τρισδιάστατα μοντέλα.



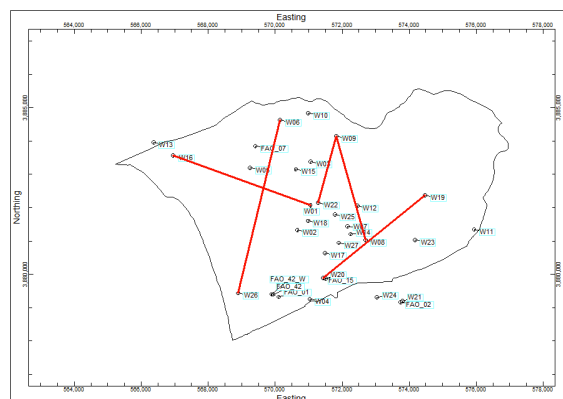
Σχήμα 5.6 3Δ Διάγραμμα μοντέλου με παρεμβολή τετραγωνικά σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων, 8 γειτονικών κόμβων, onlap, constrained on model surface, polygon filter, plot logs και με κατακόρυφη υπερύψωση x6 (vertical exaggeration).



Σχήμα 5.7 3Δ Διάγραμμα μοντέλου με παρεμβολή τριγωνοποίησης, συνωριακών κόμβων, onlap, constrained on model surface, polygon filter, plot logs και με κατακόρυφη υπερύψωση x6 (vertical exaggeration).

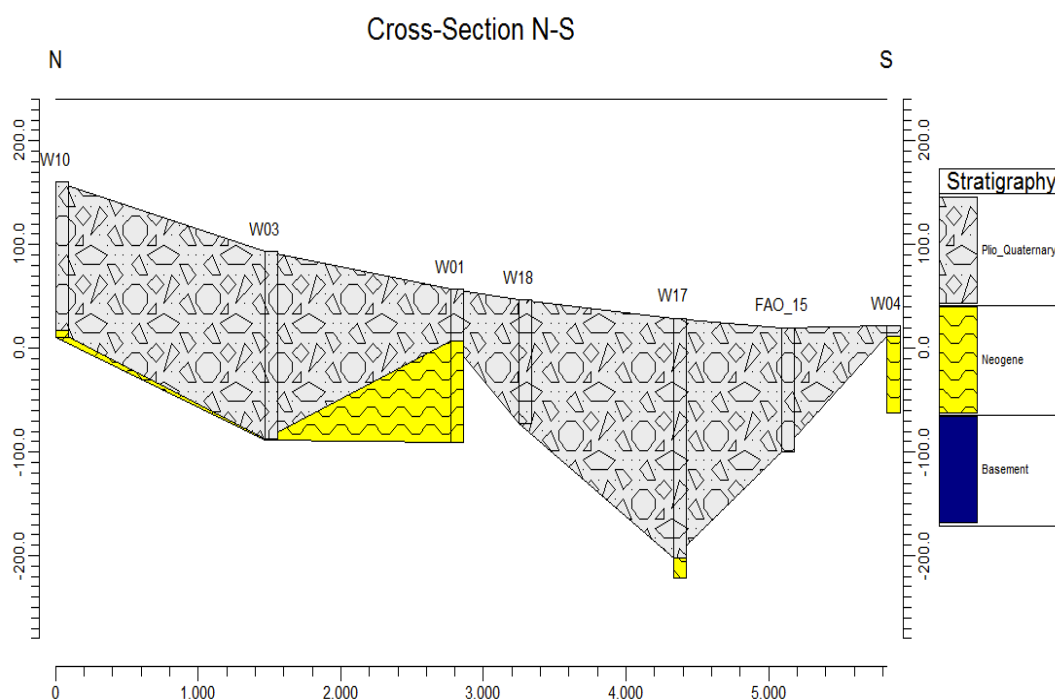


Σχήμα 5.8 3Δ Διάγραμμα συνδυαστικών λιθοστρωματογραφικών τομών πολλαπλών διευθύνσεων, με κατακόρυφη υπερύψωση x6 (vertical exaggeration).
[εντολή *Stratigraphy / Fence / Modeled (Interpolated Surface Models)* – βλ. παράγραφο Π.8.6]

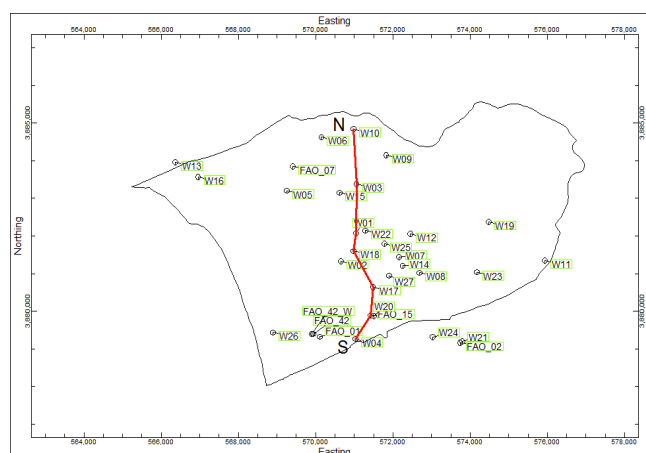


Σχήμα 5.9 Περίγραμμα περιοχής έρευνας και οι διευθύνσεις των τομών

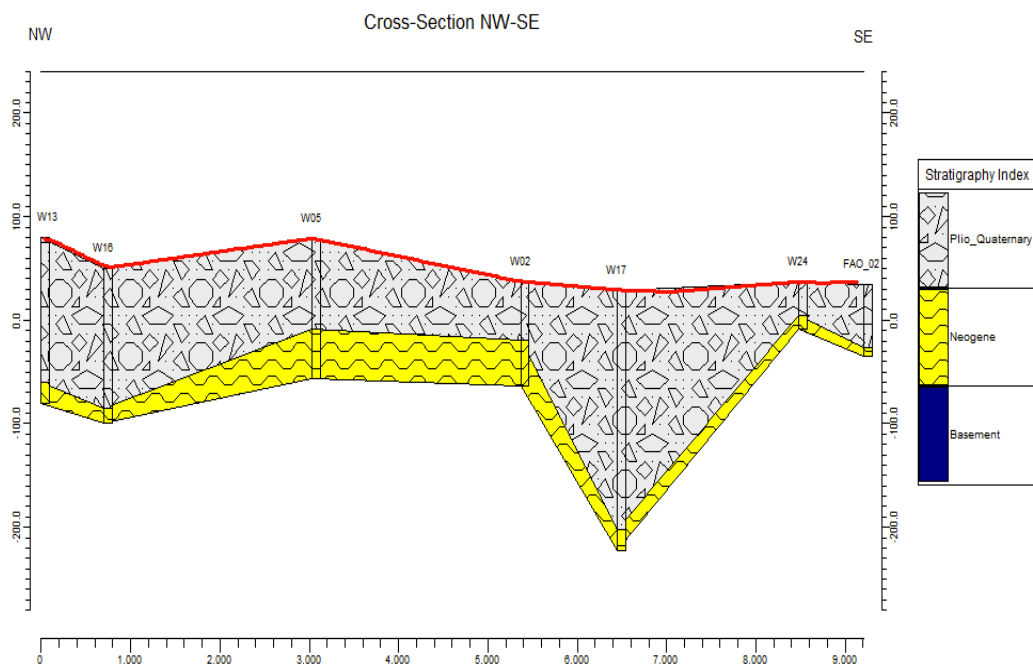
Στα Σχήματα 5.10 – 5.13 παρατίθενται λιθοστρωματογραφικές τομές του μοντέλου με διαγράμματα δύο διαστάσεων σε προκαθορισμένες διευθύνσεις, όπως και τα περιγράμματα της λεκάνης του Τυμπακίου με τις διευθύνσεις των τομών. Στα Σχήματα 5.14, 5.15 δίνεται ο βαθυμετρικός χάρτης, όπως προκύπτει σύμφωνα με τις μεταβολές των βαθών εμφάνισης της ανώτερης επιφάνειας της λιθοστρωματογραφικής ενότητας του Νεογενούς και στα Σχήματα 5.16, 5.17 ο χάρτης ισοπαχών της ενότητας των Πλειο – Τεταρτογενών αποθέσεων. Οι χάρτες κατασκευάστηκαν με δύο μεθόδους παρεμβολής (βλ. παράγραφο Π.6 και Π.8.7) και στα διαγράμματα απεικόνισης περιλαμβάνονται οι ταυτότητες των γεωτρήσεων και η περίμετρος της λεκάνης.



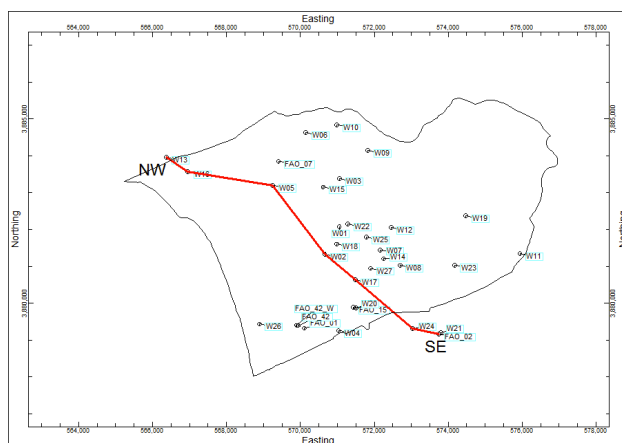
Σχήμα 5.10 Διάγραμμα λιθοστρωματογραφικής τομής διεύθυνσης Β – Ν
[εντολή *Stratigraphy / Section / Straight (Straight-Line Correlations)* – βλ παράγραφο Π.8.6]



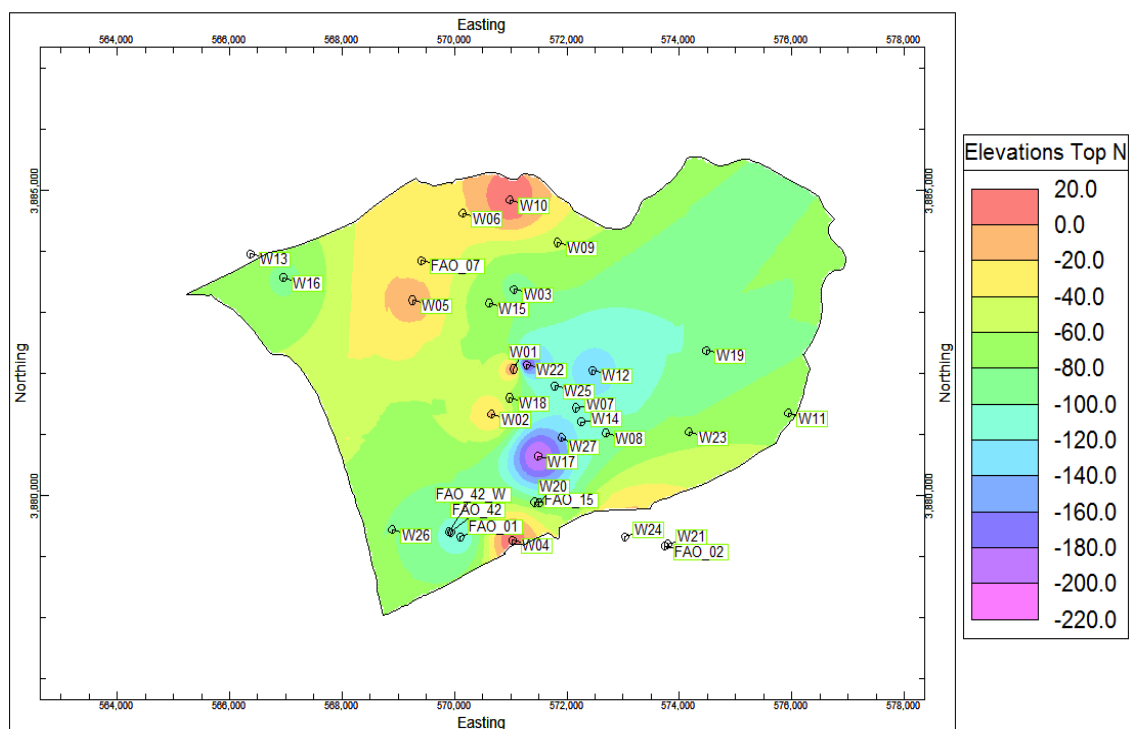
Σχήμα 5.11 Περίγραμμα λεκάνης Τυμπακίου και η διεύθυνση Β – Ν της τομής



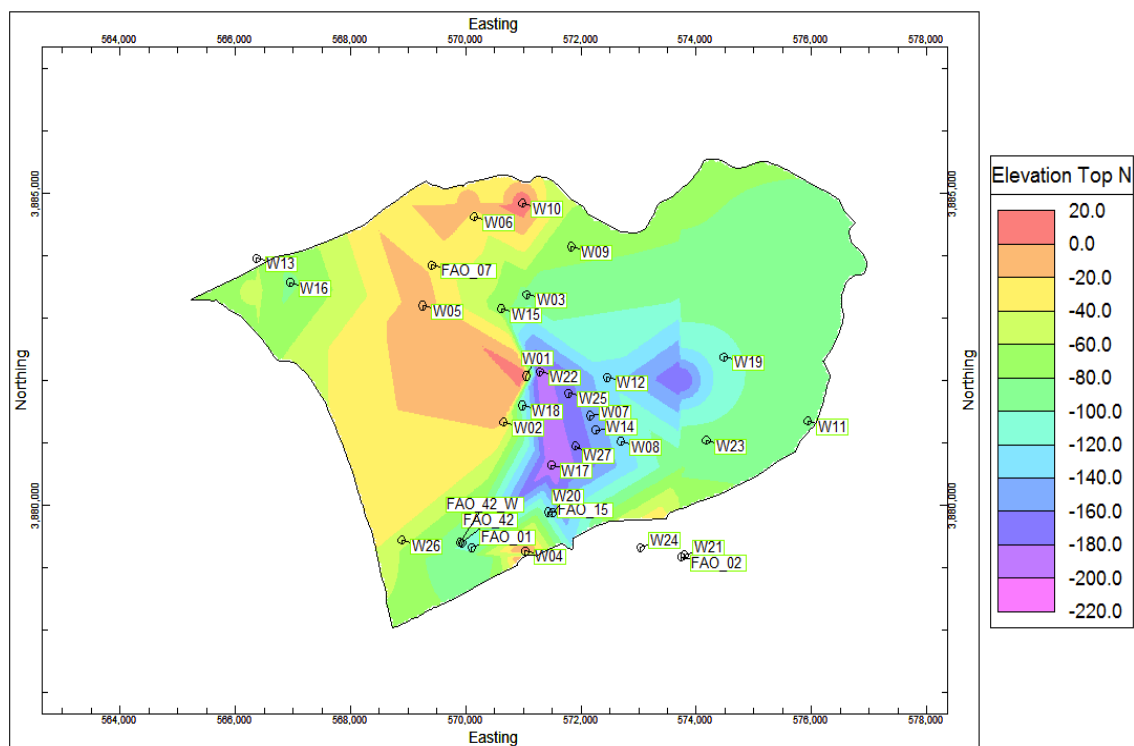
Σχήμα 5.12 Διάγραμμα λιθοστρωματογραφικής τομής διεύθυνσης ΒΔ – ΝΑ
[εντολή *Stratigraphy / Section / Straight (Straight-Line Correlations)* – βλ παράγραφο Π.8.6]



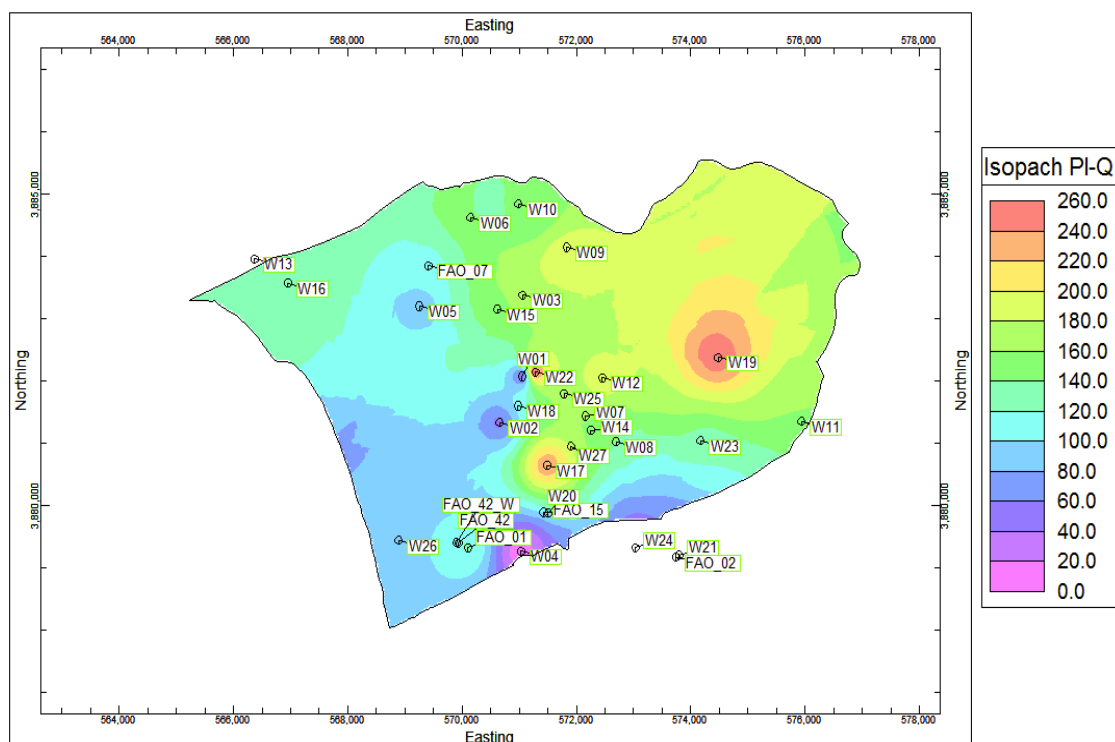
Σχήμα 5.13 Περίγραμμα λεκάνης Τυρπακίου και η διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ της τομής



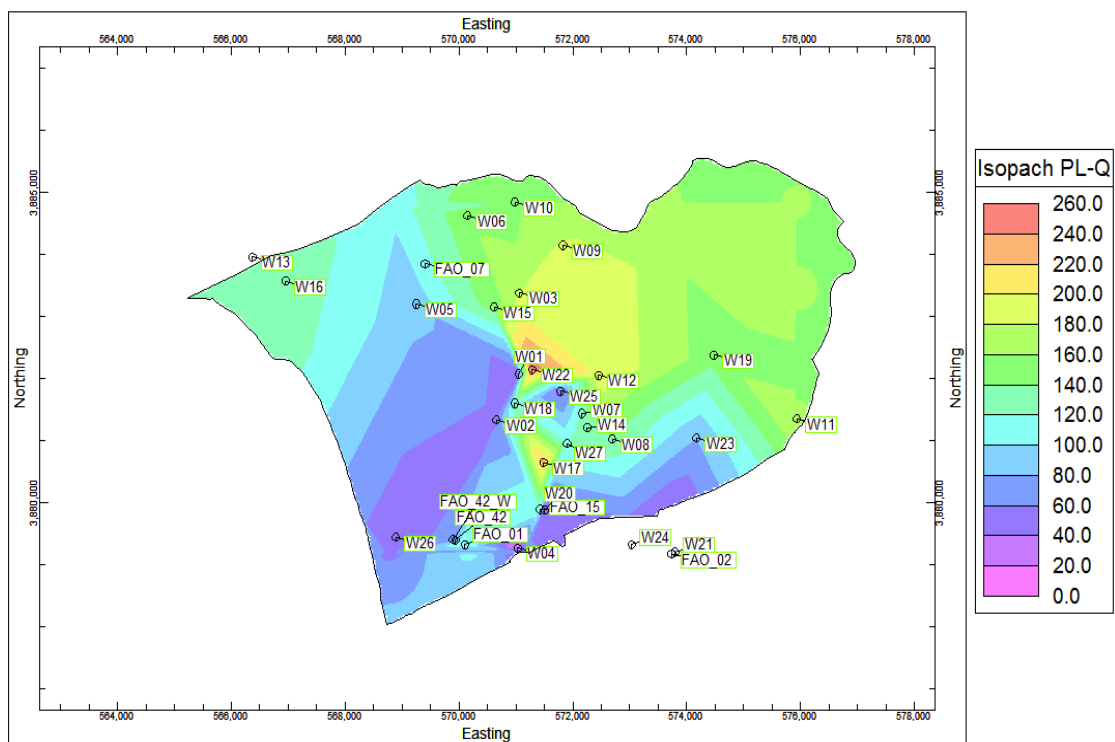
Σχήμα 5.14 Βαθυμετρικός χάρτης ανώτερης επιφάνειας Νεογενούς με παρεμβολή τετραγωνικά σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων (εντολή *Stratigraphy / Structural Elevations / 2-Dimensional* – βλ. παράγραφο Π.8.7)



Σχήμα 5.15 Βαθυμετρικός χάρτης ανώτερης επιφάνειας Νεογενούς με παρεμβολή τριγωνοποίησης



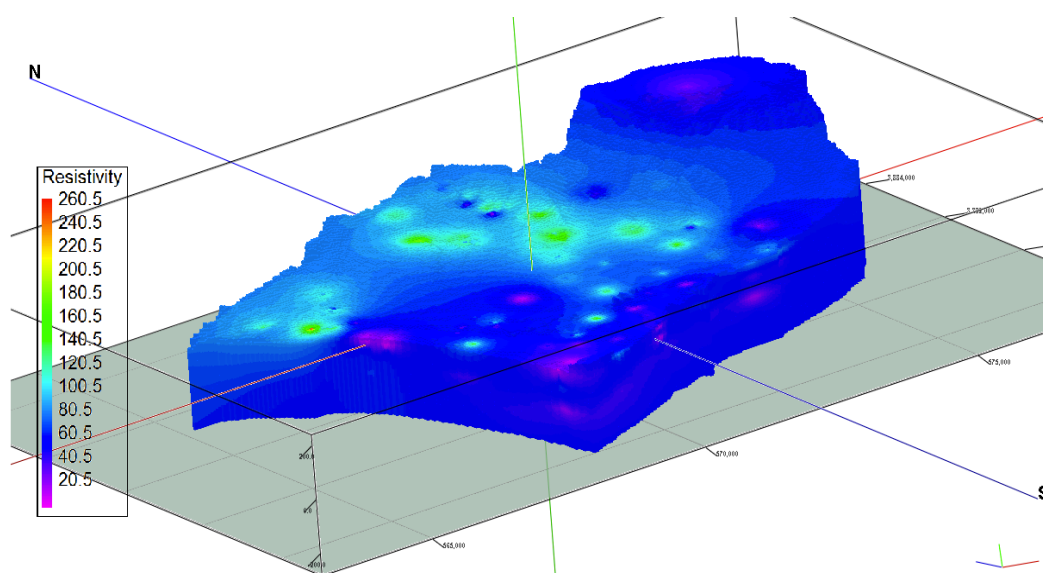
Σχήμα 5.16 Χάρτης ισοπαχών Πλειο – Τεταρτογενών αποθέσεων με παρεμβολή τετραγωνικά σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων [εντολή *Stratigraphy / Stratigraphic Thicknesses / 2-Dimensional (Isopach)*]



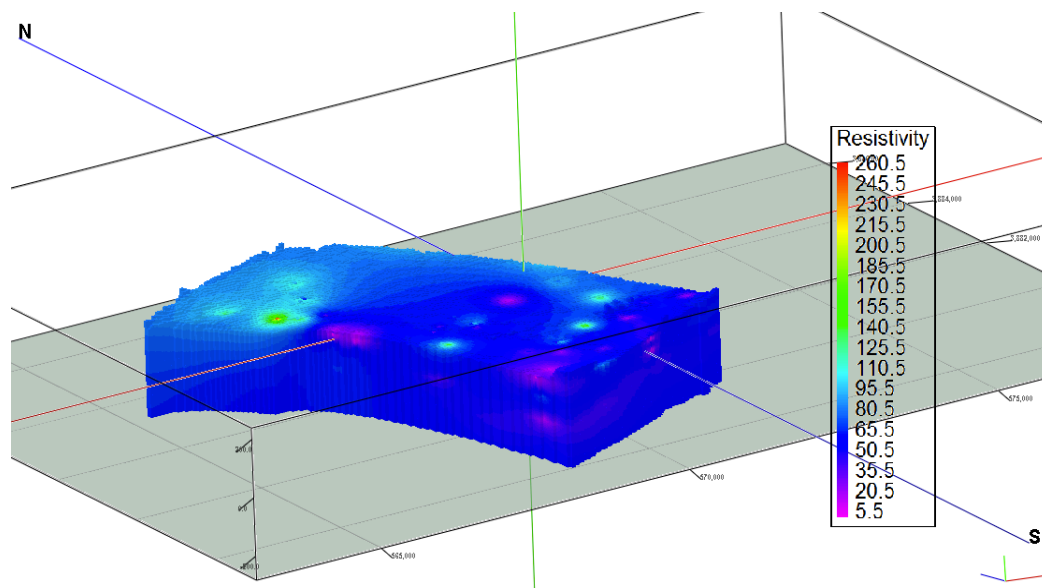
Σχήμα 5.17 Χάρτης ισοπαχών Πλειο – Τεταρτογενών αποθέσεων με παρεμβολή τριγωνοποίησης

5.3 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το τρισδιάστατο μοντέλο της ιδιότητας που εξετάζεται, δηλ. της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, κατασκευάστηκε με παραλλαγή της μεθόδου αντίστροφων αποστάσεων, κατά την οποία υποστηρίζεται η δυνατότητα ρύθμισης της διεύθυνσης της μοντελοποίησης. Για τη βέλτιστη συσχέτιση της αλληλουχίας των λιθοστρωματογραφικών ενοτήτων με τις μεταβολές της ηλεκτρικής αντίστασης, δώθηκε έμφαση στην οριζόντια διεύθυνση, θέτοντας στον κάθετο συντελεστή βάρους μεγαλύτερη τιμή σχετικά με τον οριζόντιο. Οι πολλοί συνδυασμοί που επιχειρήθηκαν (trial and error) ως προς την επιρροή της κλίσης οδήγησαν στις τελικές τιμές, με τιμή 2 ($n_h=2$) για τον οριζόντιο συντελεστή και τιμή 5 ($n_v=5$) για την κάθετη διεύθυνση (βλ. παράγραφο Π.6). Η απεικόνιση του μοντέλου γίνεται με το τρισδιάστατο διάγραμμα τύπου All Voxels και Full Voxel του Σχήματος 5.13 (βλ. παράγραφο Π.8.8).

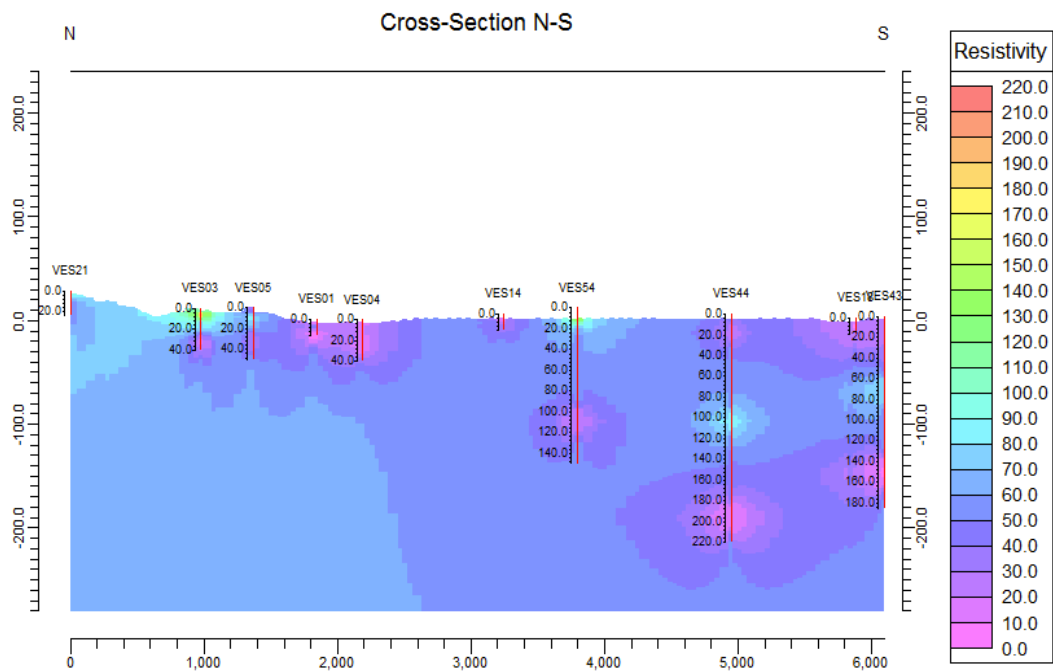


Σχήμα 5.18 3Δ Διάγραμμα απεικόνισης μοντέλου ηλεκτρικής αντίστασης λεκάνης Τυμπακίου, με κατακόρυφη υπερύψωση x4 (εντολή *I-Data / Model*).

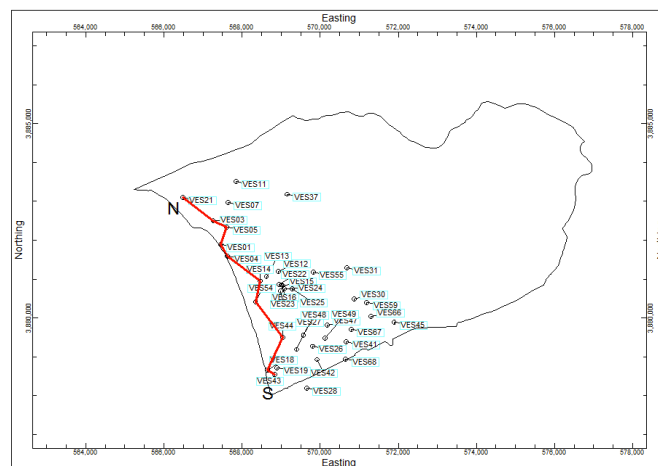


Σχήμα 5.19 3Δ Διάγραμμα απεικόνισης μοντέλου ηλεκτρικής αντίστασης παράκτια ζώνης λεκάνης Τυμπακίου

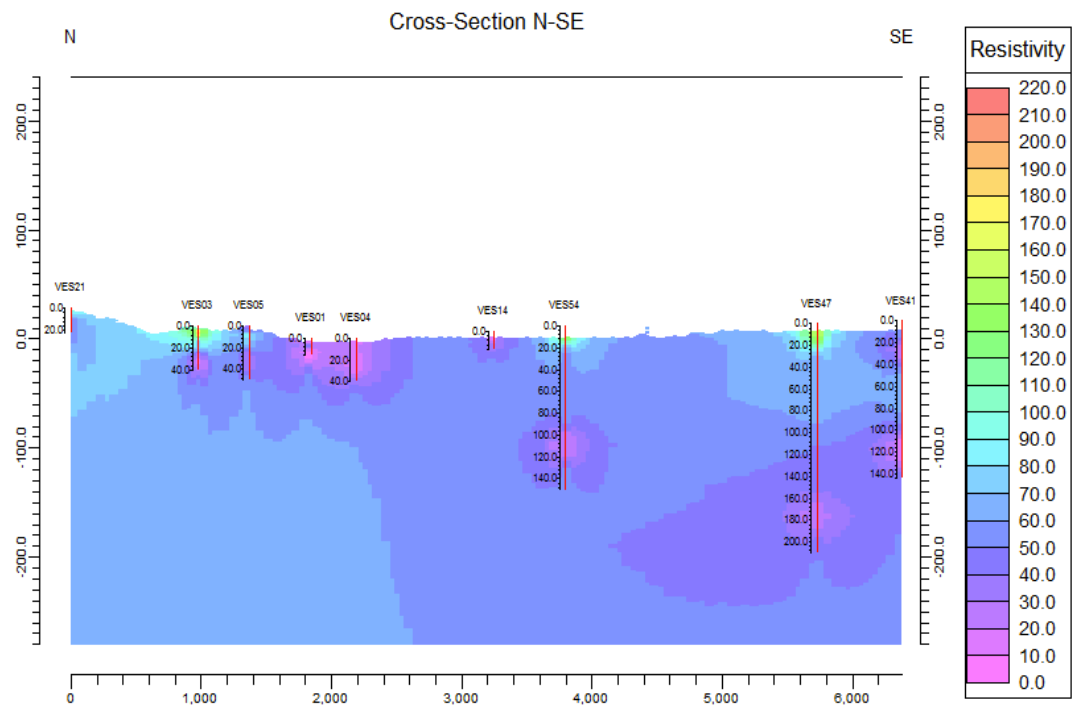
Στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο περιορισμένο στην παράκτια περιοχή δεδομένου ότι στην περιοχή αυτή εντοπίζεται η πιθανότητα ύπαρξης του φαινομένου της υφαλμύρινσης. Για την καλύτερη αντίληψη και κατανόηση των θέσεων εμφάνισης του φαινομένου της υφαλμύρινσης στην περιοχή της λεκάνης, στα επόμενα σχήματα δίνονται τομές επιλεκτικών γενικών διευθύνσεων σε θέσεις παράλληλα στη διεύθυνση της ακτογραμμής. Οι βυθοσκοπήσεις που εμπεριέχονται και η φορά των διευθύνσεων παραμένει σταθερή για το βόρειο τμήμα της πλησίον της ακτογραμμής και σταδιακά διαφοροποιείται από το μέσον της απόστασης και προς το νότιο και νοτιοδυτικό τμήμα. Η διάκριση της φοράς των τομών στηρίχθηκε στην ανεπάρκεια των δεδομένων στο βόρειο τμήμα, και αντίθετα στην επαρκή κάλυψη ικανού βάθους και στην ικανοποιητική πυκνότητα των δεδομένων στο νότιο τμήμα. Τα δισδιάστατα διαγράμματα προβολής των τομών των Σχημάτων 5.20 – 5.31 απεικονίζουν τις χωρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με εναλλαγές χρωματικών διαστημάτων, συμπληρώνονται με τους τίτλους και τα βάθη των βυθοσκοπήσεων που συμμετέχουν και συνοδεύονται από τα περιγράμματα της περιοχής έρευνας με τις διευθύνσεις των τομών (βλ. παράγραφο Π.8.9). Για την εξέταση της εξάπλωσης της υφαλμύρινσης προς την ενδοχώρα στα Σχήματα 5.32 – 5.39 παρατίθενται διαγράμματα τομών με διεύθυνση κάθετα στην ακτογραμμή.



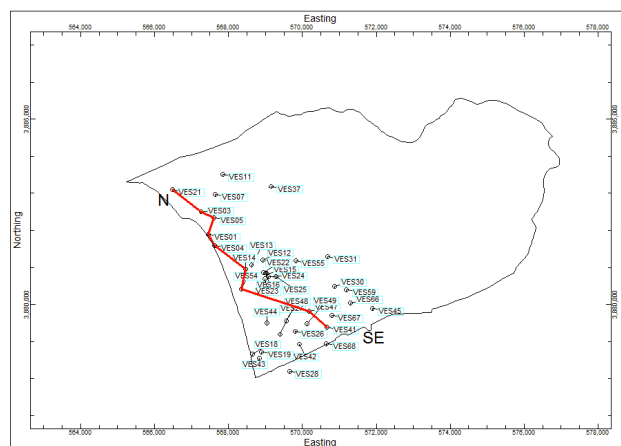
Σχήμα 5.20 Διάγραμμα τομής μοντέλου ηλεκτρικής αντίστασης διεύθυνσης Β – Ν
(εντολή *I-Data / Section*)



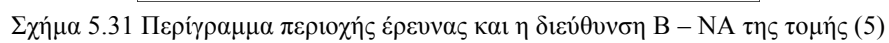
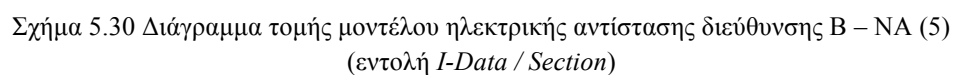
Σχήμα 5.21 Περίγραμμα περιοχής έρευνας και η διεύθυνση Β – Ν της τομής

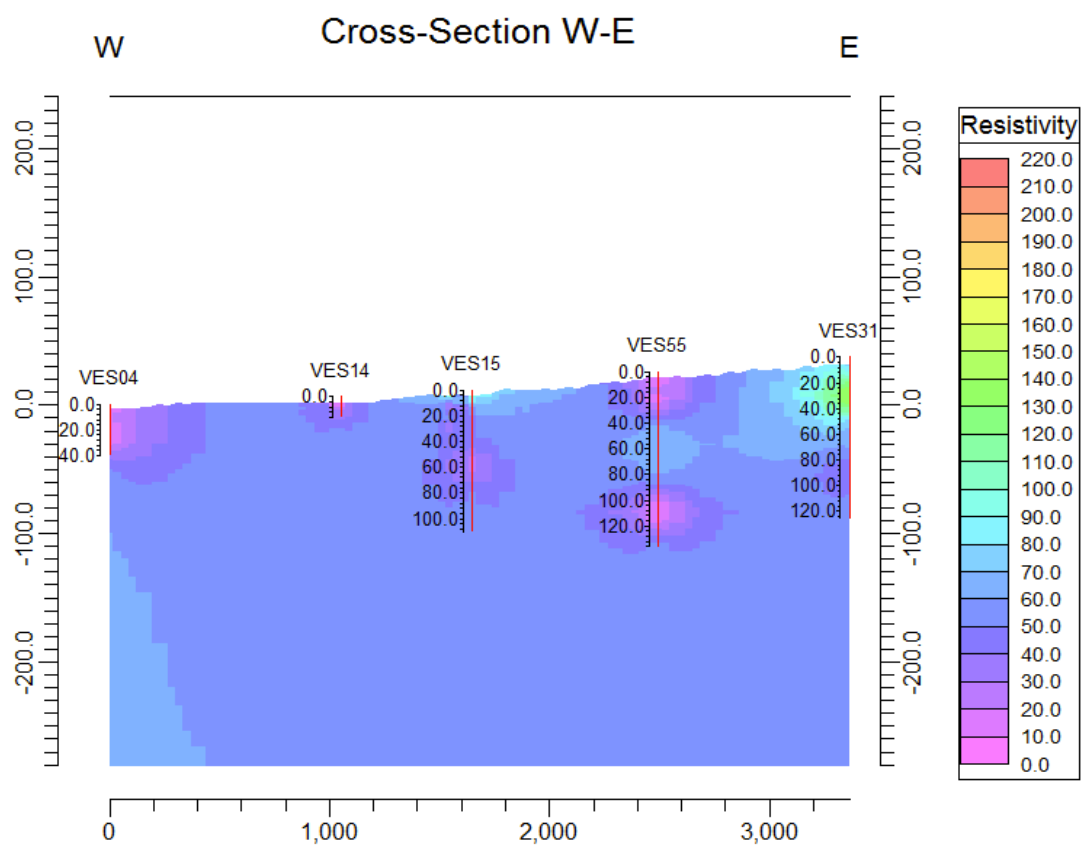


Σχήμα 5.28 Διάγραμμα τομής μοντέλου ηλεκτρικής αντίστασης διεύθυνσης B – NA (4)
(εντολή I-Data / Section)

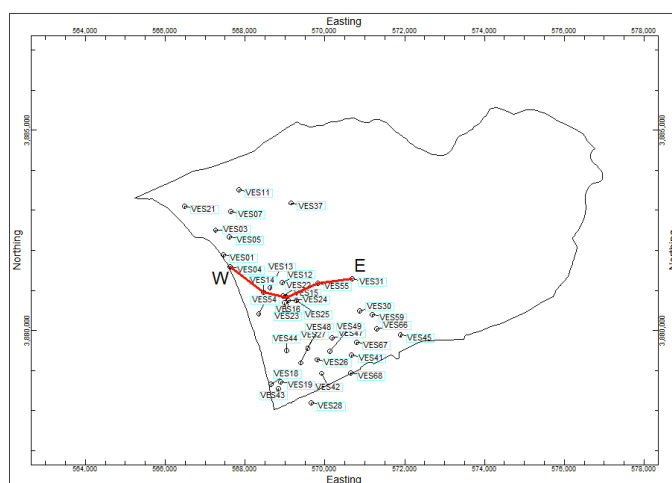


Σχήμα 5.29 Περίγραμμα περιοχής έρευνας και η διεύθυνση B – NA της τομής (4)

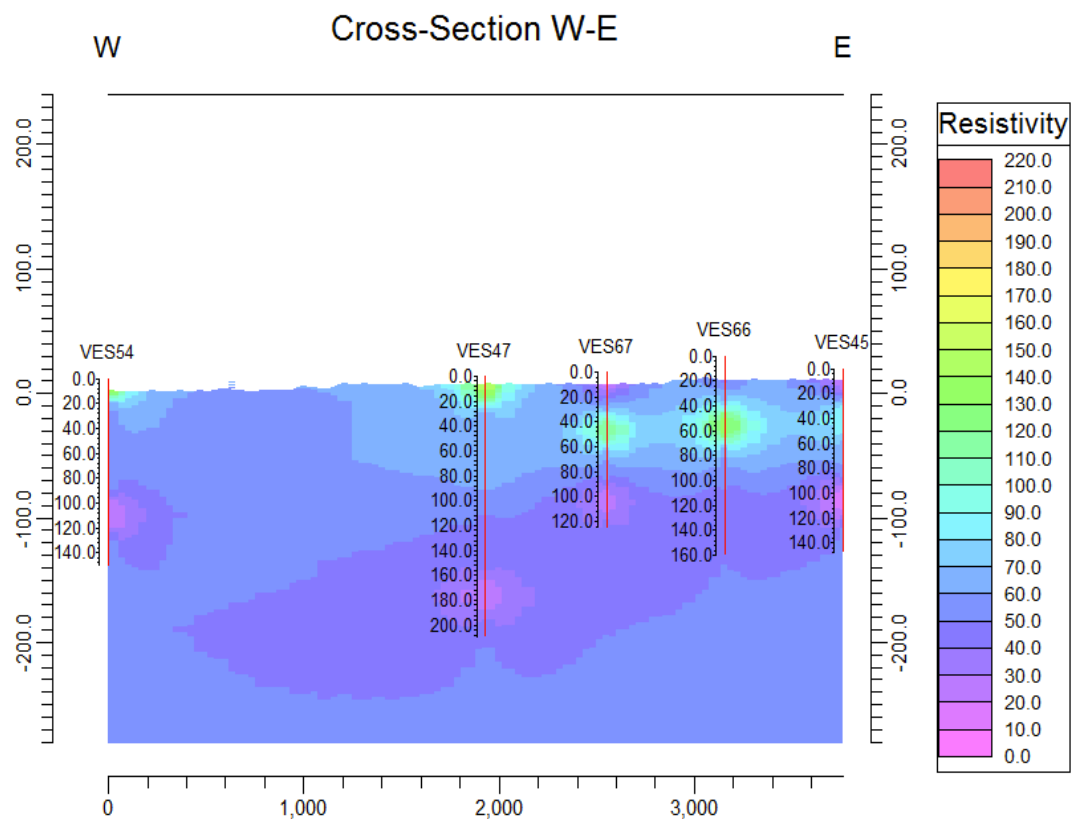




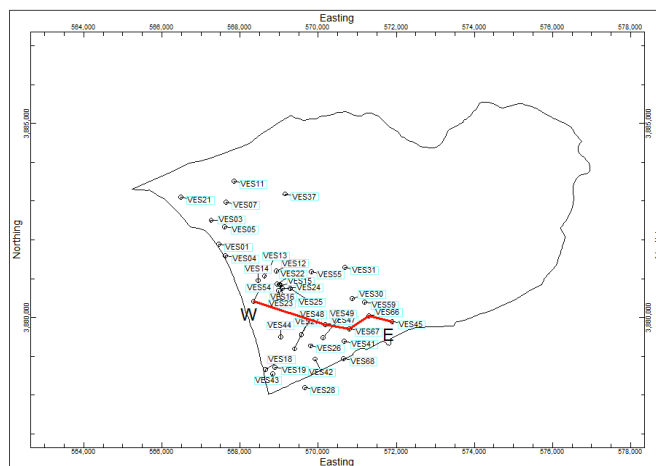
Σχήμα 5.32 Διάγραμμα τομής μοντέλου ηλεκτρικής αντίστασης διεύθυνσης Δ – Α (1)



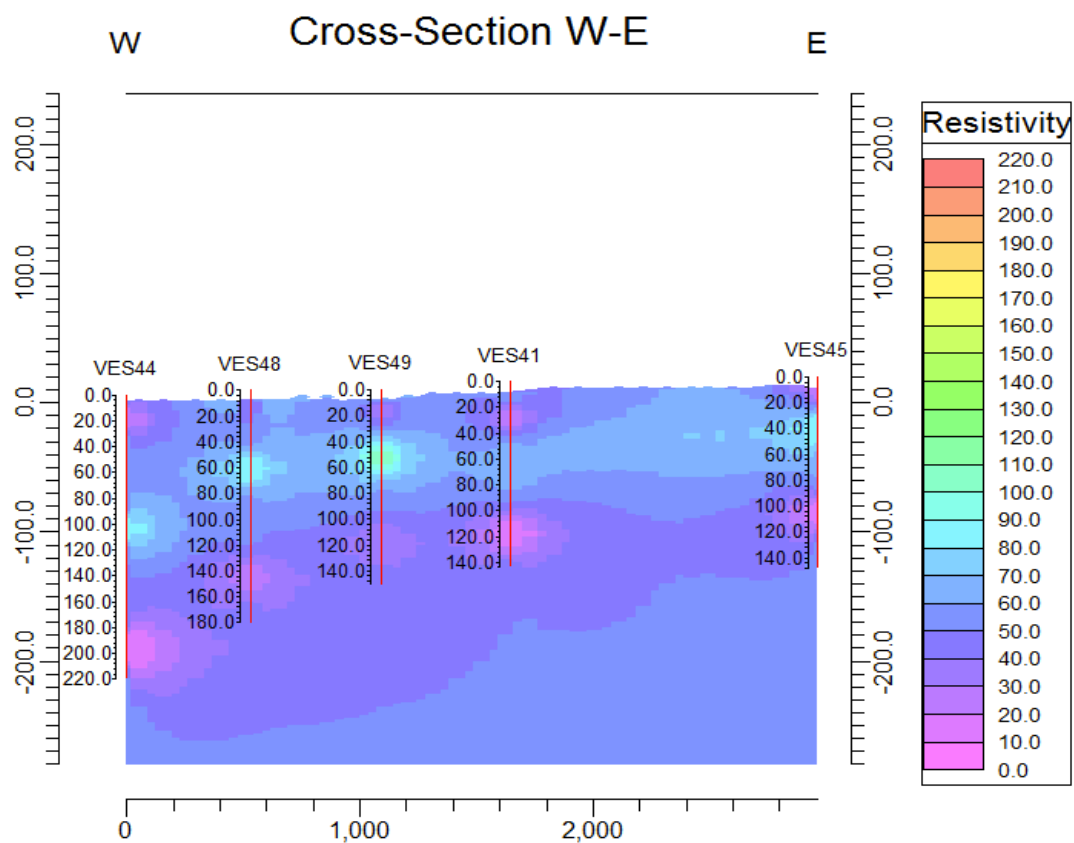
Σχήμα 5.33 Περίγραμμα περιοχής έρευνας και η διεύθυνση Δ – Α της τομής (1)



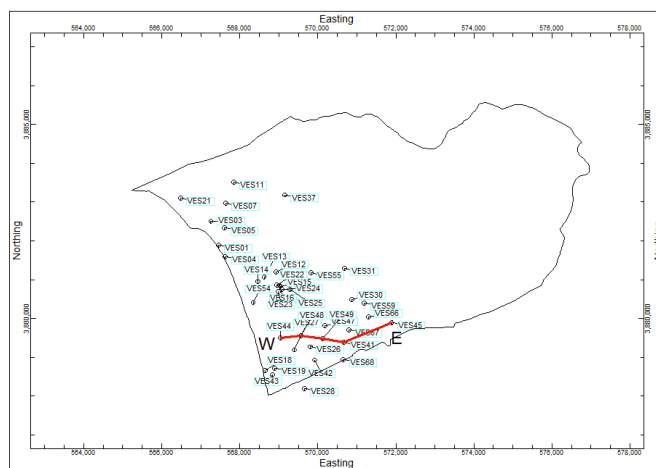
Σχήμα 5.34 Διάγραμμα τομής μοντέλου ηλεκτρικής αντίστασης διεύθυνσης Δ – Α (2)
(εντολή I-Data / Section)



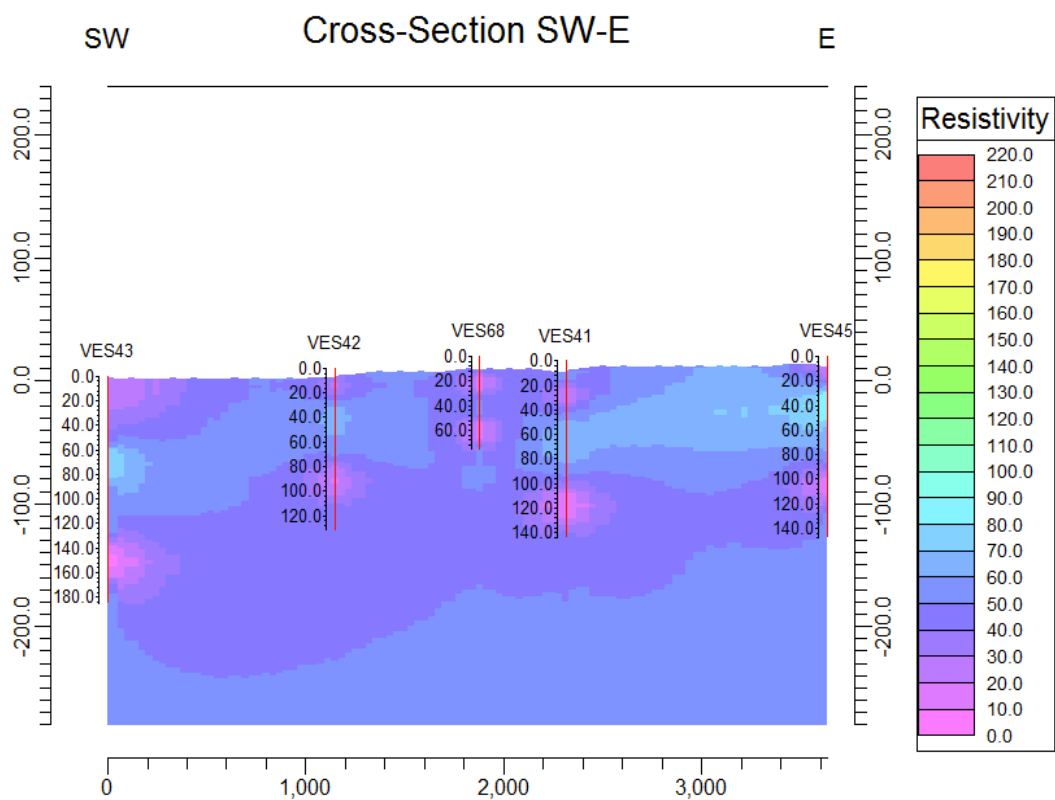
Σχήμα 5.35 Περίγραμμα περιοχής έρευνας και η διεύθυνση Δ – Α της τομής (2)



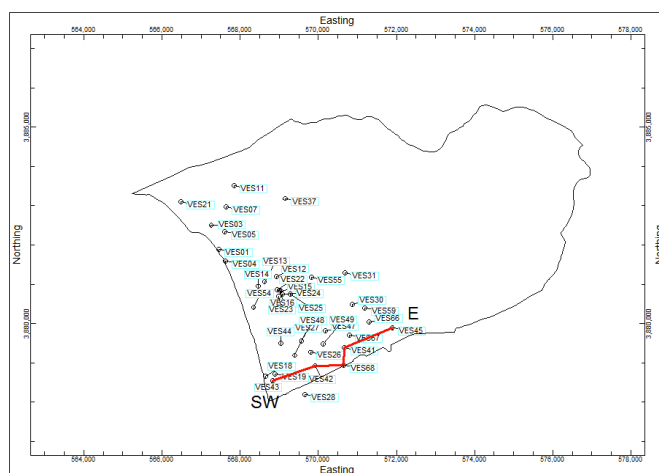
Σχήμα 5.36 Διάγραμμα τομής μοντέλου ηλεκτρικής αντίστασης διεύθυνσης Δ – Α (3)
(εντολή I-Data / Section)



Σχήμα 5.37 Περίγραμμα περιοχής έρευνας και η διεύθυνση Δ – Α της τομής (3)



Σχήμα 5.38 Διάγραμμα τομής μοντέλου ηλεκτρικής αντίστασης διεύθυνσης ΝΔ – Α
(εντολή I-Data / Section)



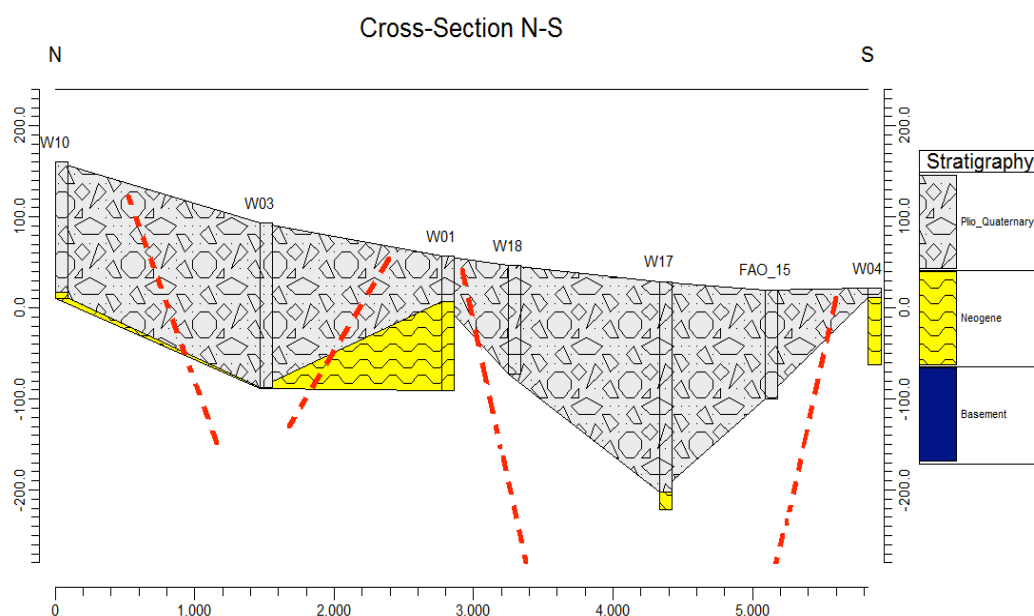
Σχήμα 5.39 Περίγραμμα περιοχής έρευνας και η διεύθυνση ΝΔ – Α της τομής

5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

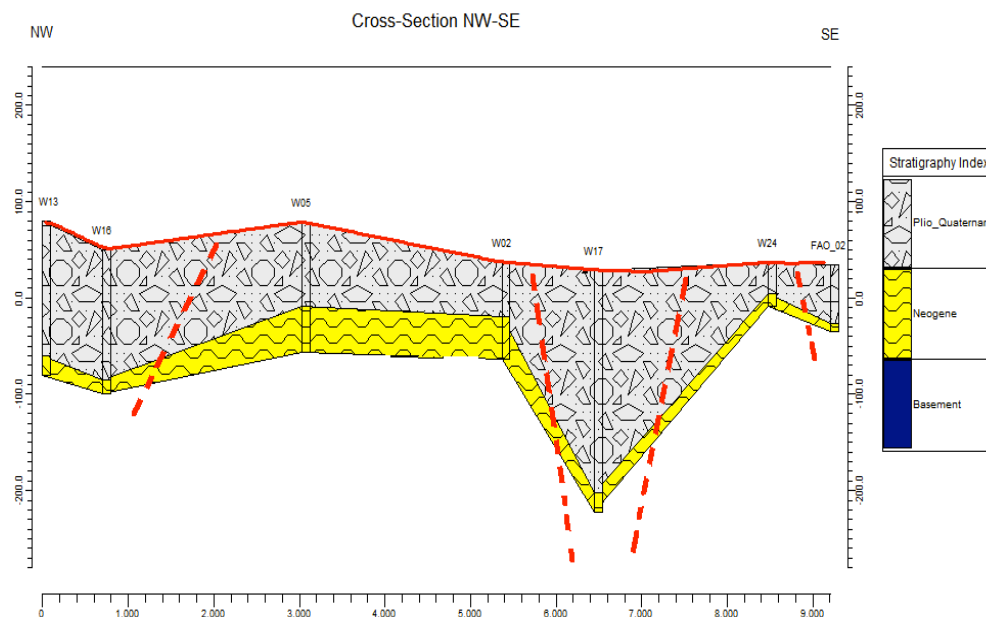
Τα συμπεράσματα που βγαίνουν από την παρούσα διπλωματική εργασία αφορούν στην τεκτονοστρωματογραφία της λεκάνης του Τυμπακίου καθώς και στο χωρικό καθορισμό του μετώπου υφαλμύρινσης με την αξιολόγηση των γεωηλεκτρικών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα:

Τεκτονοστρωματογραφία

Το λογισμικό παρείχε τη δυνατότητα κατασκευής τομών σε οποιοδήποτε επιθυμητή διεύθυνση. Σε συγκεκριμένες περιοχές οι τομές αυτές έδειξαν έντονες κατακόρυφες μεταπτώσεις της επιφάνειας που διαχωρίζει την ενότητα των Νεογενών αποθέσεων από την ενότητα των Πλειο-Τεταρτογενών αποθέσεων. Συγκεκριμένα, στα σχήματα 5.10 και 5.12 παρουσιάζονται ενδεικτικά λιθοστρωματογραφικές τομές από δύο διαφορετικές διευθύνσεις στις οποίες παρουσιάζεται η απότομη μετάπτωση του ορίζοντα των Νεογενών αποθέσεων. Από τα σχήματα αυτά εύκολα συμπεραίνεται ότι η μετάπτωση αυτή οφείλεται σε τεκτονικά αίτια και μπορούν να καθοριστούν τα ρήγματα αυτά. Με αυτόν τον τρόπο τα σχήματα 5.10 και 5.12 αποκτούν την μορφή των σχημάτων 5.40 και 5.41 αντίστοιχα.

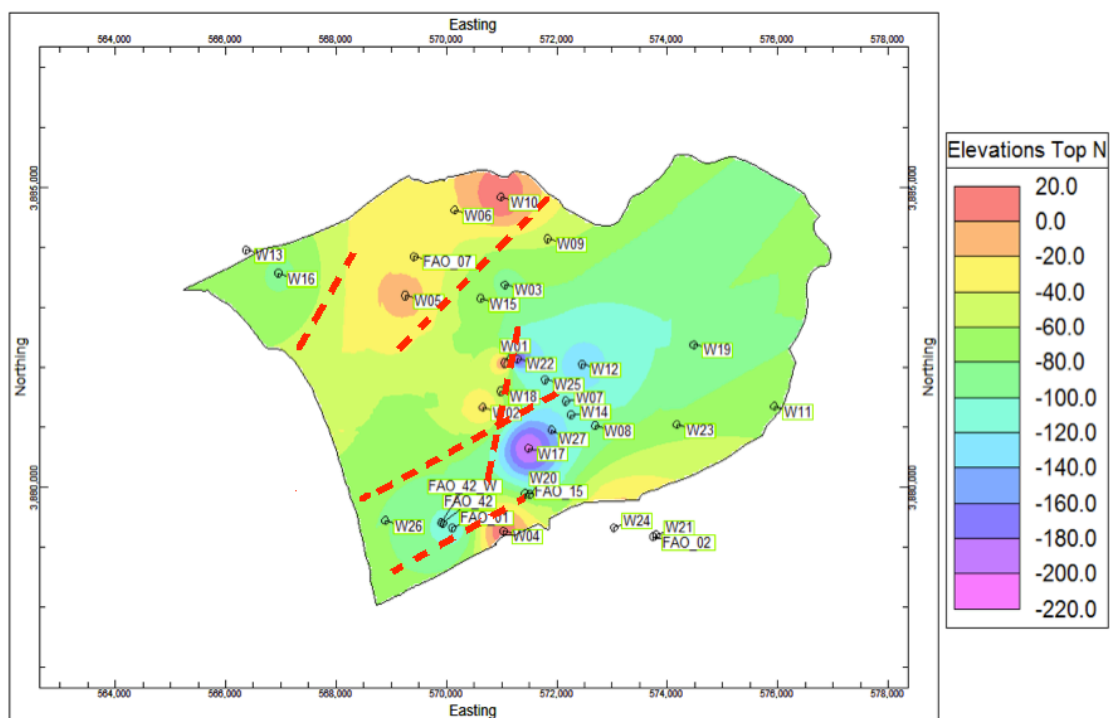


Σχήμα 5.40 Τεκτονική ερμηνεία της λιθοστρωματογραφικής τομής διεύθυνσης B - N με τον καθορισμό πιθανών ρηγμάτων.

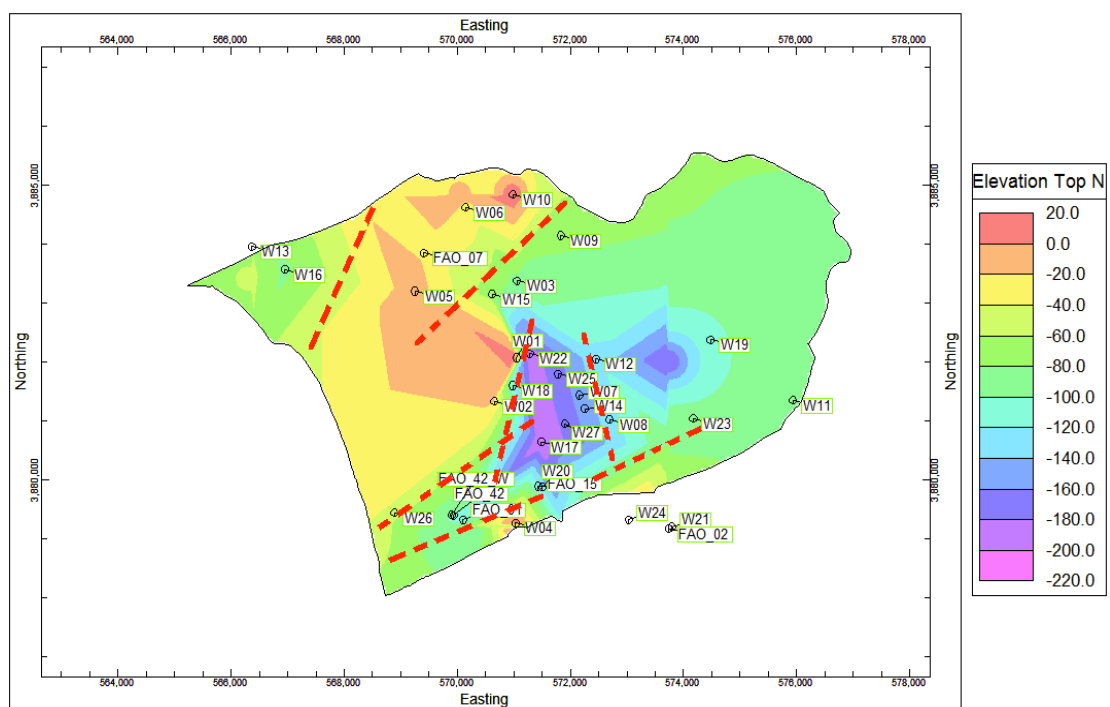


Σχήμα 5.41 Τεκτονική ερμηνεία της λιθοστρωματογραφικής τομής διεύθυνσης ΒΔ - ΝΑ με τον καθορισμό πιθανών ρηγμάτων.

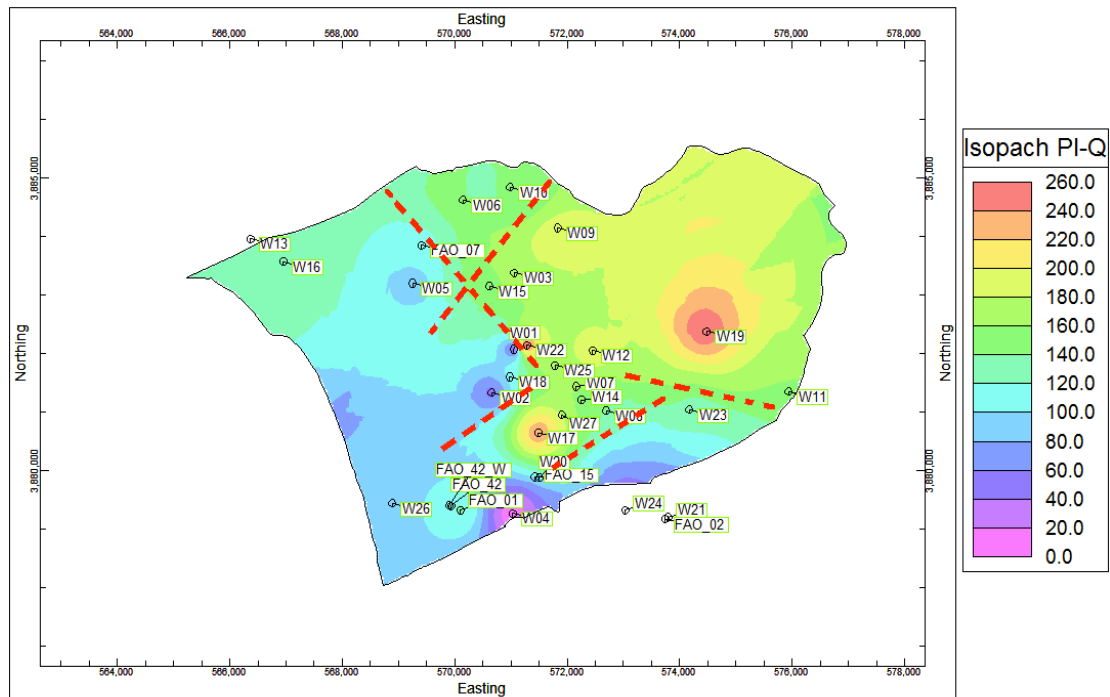
Η διαδικασία αυτή θα πρέπει να γίνεται για κάθε δυνατό συνδυασμό κατασκευής λιθοστρωματογραφικών τομών και να ακολουθεί η ερμηνεία τους. Στην περίπτωση μεγάλου αριθμού δεομένων κάτι τέτοιο θα μπορούσε να καταλήξει σε περίπλοκη διαδικασία που ενδεχομένως να οδηγούσε σε ασαφή αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε παρείχε τη δυνατότητα κατασκευής χαρτών που αποτυπώνουν τις ισοβαθείς του ανώτερου ορίζοντα των Νεογενών αποθέσεων και χαρτών ισοπαχών του ανώτερου Πλειο-Τεταρτογενούς ορίζοντα (Σχήματα 5.14 ως 5.17). Η συνδυασμένη ερμηνεία και των δύο ειδών χαρτών βοηθά στο γρήγορο και ταυτόχρονα εποπτικό καθορισμό πιθανών ρηγμάτων. Η ερμηνεία τέτοιων χαρτών βασίζεται στη θεώρηση ότι οι ζώνες που παρουσιάζουν έντονες και απότομες μεταβολές (του βάθους ή του πάχους κατά περίπτωση) μπορούν να χαρακτηριστούν ως ζώνες ρηγμάτων και να αποδοθεί στην ύπαρξή τους η απότομη κατακόρυφη μετάπτωση του ανώτερου ορίζοντα των Νεογενών αποθέσεων (χάρτη ισοβαθών) και ταυτοχρόνως η απότομη αύξηση του πάχους των υπερκείμενων Πλειο-Τεταρτογενών αποθέσεων (χάρτης ισοπαχών). Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να καθοριστούν πιθανά ρήγματα που προκαλούν τις μεταπτώσεις αυτές σε όλη την έκταση της λεκάνης. Στα σχήματα 5.42 ως 5.45 παρουσιάζονται οι ερμηνείες των χαρτών αυτών (οι κόκκινες γραμμές αντιπροσωπεύουν τα πιθανά ρήγματα).



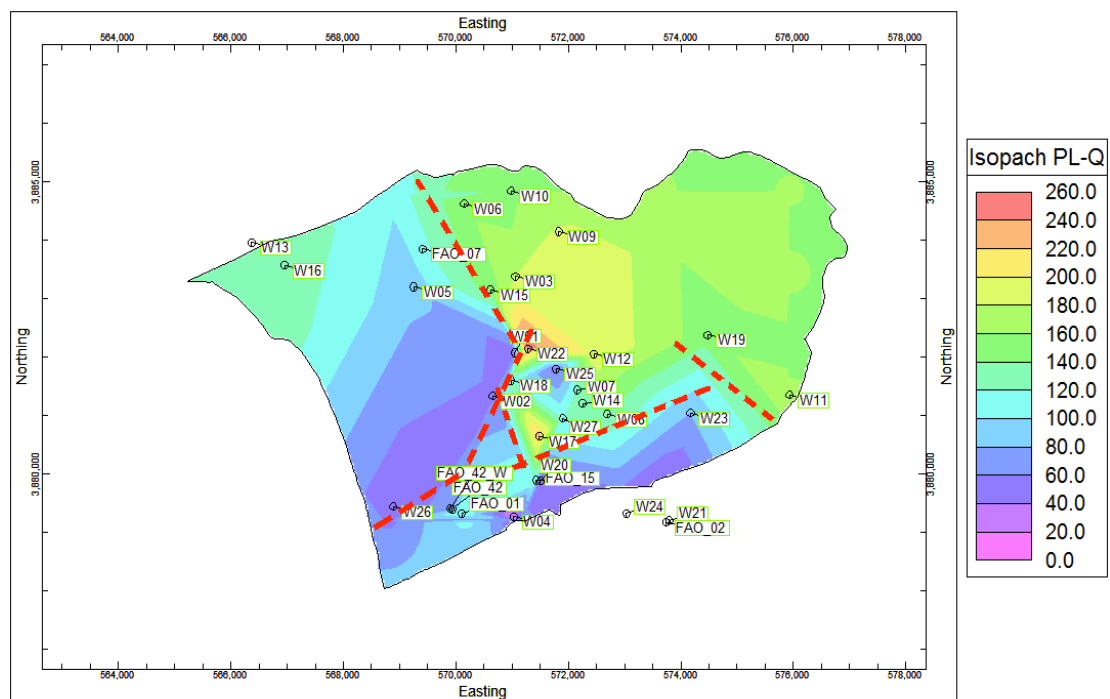
Σχήμα 5.42 Τεκτονική ερμηνεία βαθυμετρικού χάρτη ανώτερης επιφάνειας Νεογενών αποθέσεων, κατασκευασμένος με παρεμβολή αντίστροφων αποστάσεων



Σχήμα 5.43 Τεκτονική ερμηνεία βαθυμετρικού χάρτη ανώτερης επιφάνειας Νεογενών αποθέσεων, κατασκευασμένος με παρεμβολή τριγωνοποίησης



Σχήμα 5.44 Τεκτονική ερμηνεία χάρτη ισοπαχών της ενότητας των Πλειο-Τεταρτογενών αποθέσεων, κατασκευασμένος με παρεμβολή αντιστρώφων αποστάσεων



Σχήμα 5.45 Τεκτονική ερμηνεία χάρτη ισοπαχών της ενότητας των Πλειο-Τεταρτογενών αποθέσεων, κατασκευασμένος με παρεμβολή τριγωνοποίησης

Συμπερασματικά, στη λεκάνη του Τυμπακίου εντοπίστηκαν πιθανά ρήγματα στην παρουσία των οποίων οφείλεται η άνοδος και η ταπείνωση των Νεογενών αποθέσεων. Τα ρήγματα αυτά έχουν γενική διεύθυνση ΑΒΑ-ΔΝΔ ως και Β-Ν, ακολουθώντας τις γενικές διευθύνσεις των ρηγμάτων που οριοθετούν τη λεκάνη. Στους χάρτες των ισοπαχών εντοπίζεται πέραν των προαναφερθέντων διευθύνσεων και μία επιπλέον διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ που συμπίπτει με τις διευθύνσεις των ρηγμάτων έτσι όπως έχουν προταθεί από παλαιότερες έρευνες στην περιοχή (MEDIS 2005 και Peterek & Schwarze 2004).

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι ο καθορισμός πιθανών ρηγμάτων με αυτόν τον τρόπο είναι περισσότερο επισφαλής σε περιοχές όπου τα αρχικά δεδομένα είναι ελλιπή. Αντιθέτως, σε περιοχές όπου τα αρχικά δεδομένα θεωρούνται ικανοποιητικά ο καθορισμός πιθανών ρηγμάτων αποτελεί τον πλέον ενδεδειγμένο τρόπο αφού λαμβάνει υπόψη όλα τα στοιχεία που χρειάζονται και τα αποτυπώνει με εποπτικό τρόπο που γίνεται σχετικά εύκολη η αναγνώρισή τους. Η μέθοδος αυτή κρίνεται ιδιαιτέρως χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου κανένα γεωμορφολογικό στοιχείο δεν είναι ορατό όπως και στη συγκεκριμένη περίπτωση της λεκάνης του Τυμπακίου που το πεδινό τμήμα είναι καλυμμένο από τις Πλειο-Τεταρτογενείς αποθέσεις και στερείται γεωμορφολογικών στοιχείων.

Η μέχρι τώρα ερμηνεία της γενικής τεκτονικής δομής της ιζηματογενούς λεκάνης στην περιοχή του Τυμπακίου δέχεται την ύπαρξη κανονικών συνθετικών ρηγμάτων (βλ. Σχήμα 1.10). Από την ερμηνεία των χωρικών γεωτρητικών δεδομένων δε μπορεί να υποστηριχθεί η κρατούσα ερμηνεία. Υπάρχουν ουσιαστικές ενδείξεις ότι η επικρατούσα τεκτονική δομή είναι δομή τάφρων – κεράτων. Για την ισχυροποίηση αυτής της άποψης απαιτούνται γεωτρητικά ή/και γεωφυσικά δεδομένα σε περιοχές όπου αυτά απουσιάζουν. Η ύπαρξη δομών τεκτονικών κεράτων πλησίον της παράκτιας ζώνης επηρεάζει άμεσα τη χωρική κατανομή του μετώπου της υφαλμύρισης.

Καθορισμός του Μετώπου υφαλμύρισης με χρήση γεωηλεκτρικών δεδομένων.

Με ανάλογο τρόπο, κατασκευάστηκαν γεωηλεκτρικές τομές σε οποιαδήποτε επιθυμητή διεύθυνση προκειμένου να γίνει μία προσπάθεια περιχαράκωσης του μετώπου υφαλμύρισης. Οι τομές αυτές περιορίστηκαν στην παράκτια ζώνη και όχι σε όλη της έκταση της λεκάνης. Όπως φαίνεται στις τομές των σχημάτων 5.20 ως 5.39 οι βυθοσκοπήσεις από τις οποίες διέρχονται εμφανίζουν χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($<10 \text{ Ohm.m}$) κυρίως στο νότιο παράκτιο τμήμα. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να ερμηνευτεί ως το αποτέλεσμα διείσδυσης θαλασσινού νερού. Στις περιπτώσεις όπου οι περιοχές χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης παρουσιάζονται περιορισμένες χωρίς να ενώνονται μεταξύ τους οφείλεται στις έντονες λιθολογικές διαφοροποιήσεις του Πλειο-Τεταρτογενούς υδροφόρου μεταξύ υδροπερατών και αδιαπέρατων σχηματισμών. Για το βόρειο παράκτιο τμήμα δε μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την πιθανότητα υφαλμύρισης, καθώς τα διαστήματα τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των βυθοσκοπήσεων που βρίσκονται στην περιοχή εκείνη περιορίζονται σε μη ικανά βάθη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βουδούρης, Κ., Νίκας, Κ., Αντωνάκος, Α. 2004. Μελέτη της εξέλιξης του μετώπου υφαλμύρισης σε παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες. Η περίπτωση του παράκτιου τμήματος της ΒΔ Αχαΐας, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας τομ. XXXVI, 1952-1961, Θεσσαλονίκη.
- Ι.Γ.Μ.Ε. 1994. Αποτελέσματα αναγνωριστικής γεωηλεκτρικής έρευνας στην περιοχή Νότια του Ψηλορίτη, Αθήνα.
- Καλλέργης, Γ. Α. 1986. Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία, Έκδοση ΤΕΕ.
- Κριτσωτάκης, Μ. 2009. Διαχείριση υδατικών πόρων Μεσσαράς Κρήτης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Λατινόπουλος, Π. Δ. 2004. Προστασία και εξυγίανση των υπόγειων νερών, Σημειώσεις μαθήματος μεταπτυχιακού προγράμματος Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη ανάπτυξη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
- Μανούτσογλου, Ε. 2007. Γεωλογικός χαρακτηρισμός της λεκάνης Ηρακλείου. Δημοσίευτη έκθεση προόδου φυσικού αντικείμενου, 5 – 21, ΠΕΠ Κρήτης, ΠΕΠΕΡ 05, ΓΓΕΤ, Αθήνα.
- Μανούτσογλου, Ε., Σπυρίδωνος, Ε., Soujon A., Jacobshagen V. 2001. Αναθεώρηση του γεωλογικού χάρτη και τρισδιάστατη προσομοίωση της γεωλογικής δομής της ευρύτερης περιοχής του φαλαγγίου της Σαμαριάς, Δ. Κρήτη, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Τομ. XXXIV/1, 29-36, Αθήνα.
- Παπαρηγορίου, Σ., Καϊμάκη, Σ., Νιάδας, Ι., Γκουβάτσου, Ε., Περγέρης, Β. 2001. Μελέτη Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων Κρήτης, Αθήνα.
- Παπαζάχος, Β. 1986. Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.
- Περιφέρεια Κρήτης, Γενική Διεύθυνση Περιφέρειας, Διεύθυνση Υδάτων, Τμήμα Παρακολούθησης και ελέγχου της ποιότητας και ποσότητας των υδάτων, Κατάσταση υπογείων υδροφορέων Κρήτης, Νοέμβριος 2009.
- Περγέρης, Β., Παπαμαστοράκης, Δ., Κριτσωτάκης, Μ., Δρακοπούλου, Ε., Παναγόπουλος, Α. 2004. Υπόγειο υδατικό δυναμικό Κρήτης, Προβλήματα και προοπτικές, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας τομ. XXXVI, 2048-2056, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη.
- Φασουλός, Χ. 2000. Οδηγός υπαίθρου για τη γεωλογία της Κρήτης, Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης, Ηράκλειο.
- Φυτρολάκης, Ν. 1972. Η επίδραση ορογενετικών τινών κινήσεων και ο σχηματισμός της γύψου εις την Ανατολικήν Κρήτην (επαρχία Σητείας). Δελτ. Ελλην. Γεωλ. Εταιρ., 9/1, 81-100, Αθήνα.
- Φυτρολάκης, Ν. 1978. Συμβολή στη γεωλογική έρευνα της Κρήτης. Δελτ. Ελλην. Γεωλ. Εταιρ., XIII/2, 101-115, Αθήνα.

- Φυτρολάκης, Ν. 1980. Η γεωλογική δομή της Κρήτης. Προβλήματα, παρατηρήσεις και συμπεράσματα, Διατριβή επί υφηγεσία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Angelier, L., Lyberis, N., Le Pichon, X., Barrier, E., Huchon, P. 1982. The tectonic development of the Hellenic Arc and the Sea of Crete: a synthesis. In: Geodynamics of the Hellenic Arc and Trench, Le Pichon, X., Augoustithis, S. S., Mascle, J. (Editors), Tectonophysics, 86, p 159-196.
- Burrough, P. A. 1986. Principles of geographical information systems for land resources assessment, Oxford University Press, Oxford, 194, p 39-41.
- Bonneau, M. 1984. Correlation of the Hellenide nappes in the south-east Aegean and their tectonic reconstruction. In: The geological evolution of the eastern Mediterranean, Dixon, J. E. & Robertson, A. H. F. (Editors), Geological Society, Blackwell scientific publications ltd edit., Oxford, London, Edimbourg, Boston, Palo, Alto, Carlton, Sp. Publ., 17, p 517-527.
- Chiles, J. P., Aug, C., Guillen, A. and Lees, T. 2004. Modelling the geometry of geological units and its uncertainty in 3D from structural data: The potential-field method. Orebody modeling and strategic mine planning, p 313-320.
- Creutzburg, N. & Seidel, E. 1975. On the Present Knowledge of the Pre-Neogene Geology in Crete (Greece). N. Jb. Geol. Palaont. Abh, 149, 363-383, Stuttgart, Epting, M., Kudrass, H. R., Leppig, U. & Schaefer, A. (1972): Geologie der Talea Ori/Kreta. N. Jb. Geol. Palaeont. Abh, 141, p 259-285.
- De Donatis, M., Borraccini, F., Susini, S. 2009. Sheet 280 - Fosombrone 3D: A study project for a new geological map of Italy in three dimensions. Computers & Geosciences, 35, p. 19-32.
- Fallara, F., Legault, M., Rabeau, O. 2005. 3-D Intergrated geological modeling in the Abitibi Subprovince (Québec, Canada): Techniques and Applications, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Vol. 15, Nos. 1-2, p 27-41.
- F.A.O. 1969. Survey N. 538: MESSARA PLAIN (Eastern Crete): Comparison Between Boreholes and Electrical Soundings Results.
- F.A.O. 1969. Survey N. 538: MESSARA PLAIN (Eastern Crete): GEOELECTRICAL CROSS-SECTIONS 1 – 8.
- Goodchild, M. F. 1987. Application of a GIS benchmarking and workload estimation model, Papers and Proceedings of Applied Geography Conferences, 10, p 1-6.
- Fasoulas, C. 2001. The tectonic development of a Neogene basin at the leading edge of the active European margin: The Heraklion basin, Crete, Greece, J. Geodynamics, 31/1, p 49-84.
- Hall, R., Audley, C. G. and Carter, J. 1984. The significance of Crete for the evolution of eastern Mediterranean. In: The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean, Dixon, J. E. and Robertson, A. H. F. (Editors), Spec. Publ. Geol. Soc., London, 17, p 499-516.

- Gable, C. W., Trease, H., and Cherry, T. 1996. Geological Applications of Automatic Grid Generation Tools for Finite Elements Applied to Porous Flow Modeling. In Numerical Grid Generation in Computational Fluid Dynamics and Related Fields, Soni, B. K., Thompson, J. F., Hausser, H., Eiseman, P. R. (Editors), Engineering Research Center, Mississippi State Univ. Press.
- Hinze, C., Sobisch, H. G., H-H, V. 1999. Spatial modeling in geology and its practical use, *Mathematische Geologie*, 4, p 51-60.
- Jackson, I. 2005. Addressing the real needs of all the users of geological information: the opportunities, issues and problems, p. 59-68. In: The Current Role of Geological Mapping in Geosciences, Ostaficzuk, S. (Editor), Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Innovative Applications of GIS in Geological Cartography, Kazimierz Dolny, Poland, November 2003, Springer, Dordrecht. p 288.
- Jacobshagen, V., Durr, S., Kockel, F., Kopp, K., Kowalczyk, G. 1978. Structure and geodynamic evolution of the Aegean Region, Alps, Appennines, Hellenides, E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, p 537-564.
- Keefer, D. A., Kessler, H., Cave, M., Mathers, S. J. 2011. Chapter 2: Major Mapping and Modeling Issues, p 6-11. In: Synopsis of current three-dimensional geological mapping and modeling in Geological Survey Organizations, Berg, R. C., Mathers, S. J., Kessler, H., Keefer, D. A. (Editors), Circular 578, Illinois State Geological Survey.
- Kelk, B. 1991. 3D Modelling with Geoscientific Information Systems: The Problem. In: Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems, Turner, A. K. (Editor), NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, v. 354, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p 29-38.
- Kelk, B. & Challen, K. 1992. Experiments with a CAD system for spatial modeling og geoscientific data. In: Compiler from geoscientific map series to geo-information systems, Vinken, R. (Editor), Proceedings of the 2nd international colloquium, Wurzburg, Germany, September 1989.
- Kessler, H., Turner, A. K., Culshaw, M. G., Royce, K. R. 2008. Unlocking the potential of 3D geological subsurface models for geotechnical engineers, British Geological Survey (NERC), Proceedings, II European Conference of International Association for Engineering Geology, Madrid, p 8.
- Kessler, H., Mathers, S. J., Keefer, D. A., Berg, R. C. 2011. Chapter 4: Common 3-D Mapping and Modeling Software Packages, p 13-16. In: Synopsis of current three-dimensional geological mapping and modeling in Geological Survey Organizations, Berg, R. C., Mathers, S. J., Kessler, H., Keefer, D. A. (Editors), Circular 578, Illinois State Geological Survey.
- Kessler, H., Mathers, S., Sobisch, H. G. 2009. The Capture and dissemination of integrated 3D geospatial knowledge at the British Geological Survey using GSI3D software and methodology. *Computers & Geosciences* 35, p 1311-1321.

- Knupp, P. & Steinberg, S. 1994. Fundamentals of Grid Generation. CRC Press, Boca Raton, Florida, p 286.
- Maguire, D. J., Goodchild, M. F., Rhind, D. 1991. Geographical information systems: principles and applications (2 vol set), Longman Scientific and Technical Press, London, p 1096.
- Mallett, J. L. 1992. GOCAD: a computer aided design program for geological applications. In: Three-dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems, Turner, A. K. (Editor), Kluwer, London. p 123-141.
- Mallet, J. L. 2002. Geomodeling. Oxford University Press, New York. p 599.
- Manutsoglu, E., Mertmann, D., Soujon A., Dornsiepen, U. F. & Jacobshagen, V. 1995. Zur Nomenklatur der Metamorphite auf der Insel Kreta, Griechenland. Berliner geowiss. Abh, E 16, p 559-567, Berlin.
- Martinez, D. E. & Bocanegra, E. M. 2002. Hydrogeochemistry and cation exchange processes in the coastal aquifer of Mar Del Plata, Argentina. Hydrogeology Journal, Vol. 10, Number 3, 2002, p 393-408.
- Mathers S. M., Kessler H., Berg R. C., Keefer D. A., Turner K. A., 2011. Chapter 1: Background and Purpose, p 1-5. In: Synopsis of current three-dimensional geological mapping and modeling in Geological Survey Organizations, Berg, R. C., Mathers S. J., Kessler, H., Keefer, D. A. (Editors), Circular 578, Illinois State Geological Survey.
- MEDIS, 2005. Geophysical Saltwater-Intrusion Mapping in Timbaki/Crete. Selection and Application of Geophysical Methods for Aquifer Characterization and Detection of Saline Intrusions. MEDIS (Towards sustainable water use on Mediterranean islands: Addressing conflicting demands and varying hydrological, social and economical conditions) is being founded by the European Commission. Contract No: EVK1-CT-2001-00092. Responsible scientist: Sayan Pipatpan. Leader of subproject: Dr. Norbert Blindow.
- Meulenkamp, J.E., Jonkers, A., Spank, P. 1979. Late Miocene to Early Pliocene development of Crete, Proceedings of the VI colloquium on the Geology of the Aegean Region, Athens, p 137-149.
- Papadopoulou, M. P., Karatzas, G.P., Koukadaki, M.A., Trichakis, Y. 2005. Modeling the saltwater intrusion phenomenon in coastal aquifers – A case study in the industrial zone of Heraklio in Crete, Global NEST Journal, Vol. 7, No 2, p 197-203.
- Mountrakis, D., Sapountzis, E., Kiliyas, A., Eleftheriadis, G., Christofides, G. 1983. Paleogeographic conditions in the western pelagonian margin in Greece during the initial rifting of the continental area, Canadian Journal of Ear. Sc., 20, p 1673-1681.
- Peterek, A. & Schwarze, J. 2004. Architecture and Late Pliocene to recent evolution of outer-arc basins of the Hellenic subduction zone (south-central Crete, Greece), Department of Geomorphology, University of Bayreuth, 95440 Bayreuth, Germany.

- Pouliot, J., Lanchance, B., Brisebois, A., Rabaud, O., Kirkwood, D. 2003. 3D geological modeling: Are GIS or CAD appropriate?, Proceedings of ISPRS Workshop, WG II/5, II/6, IV/1 and IV/2 Joint Workshop on "Spatial, Temporal and Multi-Dimensional Data Modelling and Analysis", p 2-3, Quebec, Canada.
- Reynolds, J. 1997. An introduction to applied and environmental geophysics, John Willey and sons inc, England.
- Rhind, D. W. 1971. Geographical information systems in Britain. In: Quantitative geography, Wringley, N., Bennett, R. J. (Editors), Routledge and Kegan Paul, London, p 17-39.
- Robinson, E. S., Coruh, C. 1988. Basic exploration geophysics, New York.
- RockWare, Inc., RockWorks 15, 1983-2008. USA.
- Royce, K. R. 2009. Combining numerical and cognitive 3D modeling approaches in order to determine the structure of the Chalk in the London Basin, British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, UK.
- Royse, K. R., Rutter, H. K., Entwisle, D. C. 2009. Property attribution of 3D geological models in the thames gateway: new ways of visualising geoscientific information, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68, p 1-16.
- Rosenbaum, M. S. & Turner, A. K. 2003. New paradigms in subsurface prediction: characterization of the shallow subsurface implications for urban infrastructure and environmental assessment Springer, Number 99, p 397, Springer-Verlag, Berlin.
- Struckmeier, W. F., Margat, J. 1995. Hydrogeological Maps: A Guide and a Standard Legend. International Contributions to Hydrogeology, founded by Castany, G., Groba, E., Romijn, E., vol 17, p 193, Hannover.
- Ten Veen, J. H. 1998. Post-early Messinian counterclockwise rotations on Crete: implications for Late Miocene to Recent kinematics of the southern Hellenic arc, Tectonophysics Volume 298, Issues 1-3, 30 November 1998, p 177-189.
- Ten Veen, J. H., Postma, G. 1999. Neogene tectonics and basin fill patterns in the Hellenic outer-arc (Crete, Greece), Basin Research, 11, p 223-241.
- Turner, A. K. 2000. Geoscientific Modeling: Past, Present and Future. In: Geographic Information Systems in Petroleum Exploration and Development, Coburn, T. C. and Yarus, J. M. (Editors), AAPG Computer Applications in Geology, Vol. 4, American Association Petroleum Geologists, p 27-36.
- Turner, A. K. 2006. Challenges and Trends for Geological modeling and Visualisation, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Volume 65, Number 2, May 2006, p 109-127.
- Turner, A. K. & D' Agnese, F. A. 2009. The role of geological modeling in a web-based collaborative environment, p 58-62.
- Turner, A. K. & Gable, C. W. 2007. A review of geological modeling, Three-Dimensional Geologic Mapping for Groundwater Applications Workshop, Denver, Illinois State Geological Survey.

- Wood, R. & Curtis, A. 2004. Geological prior information and its applications to geoscientific problems, Geological Society, London, Special Publications, vol. 239, Illinois State Geological Survey, p 1-14.
- Wycisk, P., Hubert, T., Gossel, W., Neumann, C. 2009. High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites. Computers & Geosciences, 35, p 165-182.
- Xue, Y., Sun, M., Ma, A. 2004. On the reconstruction of three-dimensional complex geological objects using Delaunay triangulation, Future Generation Computer Systems, 20, p 89-104.

Ηλεκτρονικές αναφορές

- <http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm>
- <http://www.rockware.com/rockworks/revisions/index.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ROCKWORKS

Π.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το λογισμικό ROCKWORKS δημιουργήθηκε και εξελίσσεται από το 1983 έως και σήμερα από την εταιρεία *Rockware Incorporated* με σκοπό να συμβάλει στην μεταλλευτική και πετρελαϊκή βιομηχανία ή σε περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες. Ενοποιεί τη διαχείριση και την ανάλυση χωρικών δεδομένων με την κατασκευή γεωλογικών μοντέλων και την παρουσίασή τους με διαγράμματα δύο και τριών διαστάσεων.

Το πρόγραμμα αποτελεί μία ολοκληρωμένη συλλογή γεωλογικών εργαλείων. Διαθέτει βάση δεδομένων για τις γεωτρήσεις (*Borehole Manager*) με πεδία που περιλαμβάνουν χωρικά δεδομένα, γεωφυσικές και γεωχημικές μετρήσεις, δεδομένα λιθολογίας, στρωματογραφίας, στάθμης νερού κ.α. Επιπλέον διαθέτει μία σειρά από εργαλεία (*Utilities*) δημιουργίας επιφανειών, στερεών μοντέλων, τομών, υπολογισμών όγκων, υδραυλικών και υδροχημικών υπολογισμών, τοπογραφικών μετασχηματισμών κ.α. Μπορεί ακόμα να εκτελέσει υπολογισμούς κλίσεων, παρατάξεων, να εξάγει μορφολογικό χάρτη κλίσεων, μέχρι και να υπολογίσει τη διαδρομή των υδάτων.

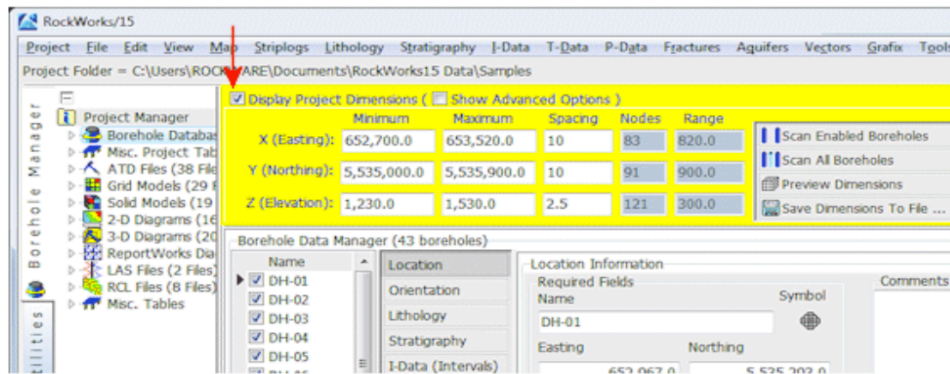
Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η πιο πρόσφατη έκδοση του λογισμικού, *ROCKWORKS15*. Πολλά από τα σχήματα του παρόντος κεφαλαίου ελήφθησαν από τον οδηγό εκμάθησης του λογισμικού.

Π.2 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ - PROJECT DIMENSIONS

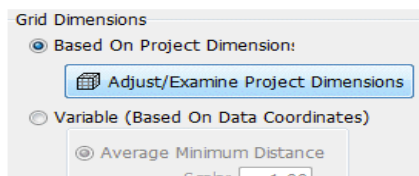
Αποτελεί πολύ σημαντική λειτουργία του λογισμικού, η οποία είναι ενεργή, άμεσα προσβάσιμη και ορίζει:

- τις συντεταγμένες των ορίων της περιοχής μελέτης, τις οποίες το λογισμικό χρησιμοποιεί ώστε να υπολογίσει την κλίμακα και την έκταση των πλεγματικών και στερεών μοντέλων που κατασκευάζονται
- την απόσταση των κόμβων και επομένως την πυκνότητα των απεικονίσεων που θα παραχθούν, η οποία επηρεάζει την ποιότητα της παρεμβολής και το χρόνο επεξεργασίας.

Οι τρέχουσες διαστάσεις εμφανίζονται στο πάνω μέρος και στα δύο κύρια περιβάλλοντα του λογισμικού (βλ. παράγραφο Π.4), ενώ υπάρχει επιλογή για την εμφάνιση και ρύθμισή τους (*Adjust Project Dimensions*) σε πολλά επιμέρους μενού του λογισμικού, π.χ. κατά την κατασκευή μοντέλων (Σχήμα Π.1 και Π.2). Προτείνεται όλα τα πλεγματικά και στερεά μοντέλα να έχουν τις ίδιες διαστάσεις και πυκνότητα κόμβων ώστε οι αριθμητικές μέθοδοι παρεμβολής να εφαρμόζονται χωρίς προβλήματα συμβατότητας.



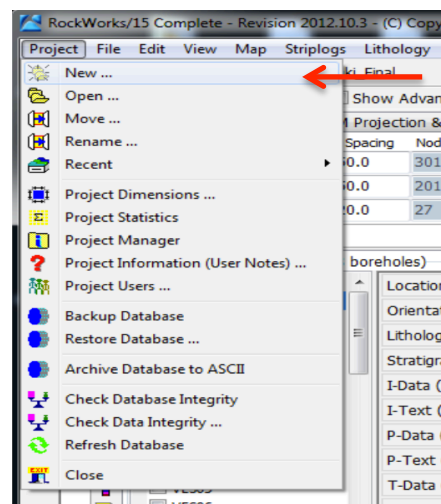
Σχήμα Π.1 Project Dimensions (κίτρινο πλαίσιο)



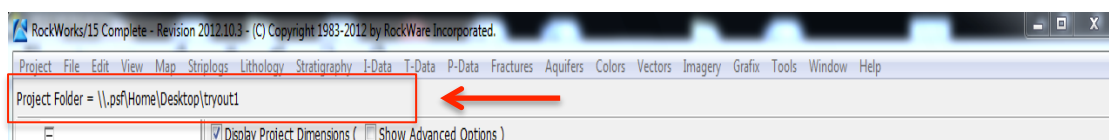
Σχήμα Π.2 Επιλογή Adjust/Examine Project Dimensions

Οι τρέχουσες διαστάσεις αντιστοιχούν στην τρέχουσα βάση δεδομένων, που ορίζεται από τον χρήστη συνήθως κατά την εκκίνηση του λογισμικού. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει περισσότερες της μίας βάσης δεδομένων (αν π.χ. επιθυμεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικά δεδομένα σε κάθε βάση) και με την εντολή *Project / Open*, να επιλέξει με ποια θα εργαστεί.

Η δημιουργία νέας βάσης δεδομένων γίνεται με την εντολή: *Project / New* (Σχήμα Π.3) από την κεντρική γραμμή εντολών και περιλαμβάνει το φάκελο αποθήκευσης των εργασιών (Project Folder) και το όνομά της. Ο φάκελος της τρέχουσας βάσης δεδομένων, δηλ. ο φάκελος αποθήκευσης των εργασιών ή επιλογών που θα γίνουν, φαίνεται ακριβώς κάτω από την κεντρική γραμμή εντολών (Σχήμα Π.4).

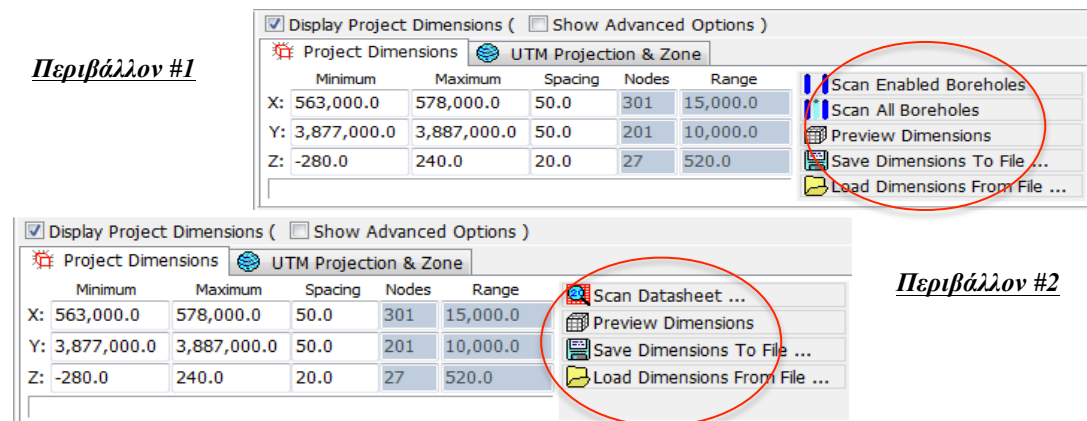


Σχήμα Π.3 Εντολή *Project / New*



Σχήμα Π.4 Τρέχον Project Folder (φάκελος αποθήκευσης εργασιών)

Αν οι ελάχιστες (minimum) και μέγιστες (maximum) συντεταγμένες κατά τους άξονες XYZ της περιοχής μελέτης είναι γνωστές, τότε πληκτρολογούνται άμεσα στα αντίστοιχα πεδία των διαστάσεων (όπως και έγινε σε αυτήν την εργασία). Αν δεν είναι γνωστές, τότε το λογισμικό θα τις υπολογίσει από τα χωρικά δεδομένα που θα εισαχθούν στα δύο περιβάλλοντα εργασίας (περιγράφονται στην παράγραφο Π.4), με τις εντολές: *Scan Enabled/All Boreholes (Περιβάλλον #1)* ή *Scan Datasheet (Περιβάλλον #2)*, (Σχήμα Π.5). Στη συνέχεια προτείνεται να γίνει επισκόπηση των (υπολογισμένων) διαστάσεων (εντολή: *Preview Dimensions*) για τον εντοπισμό τυχόν λαθών ή ασυμφωνιών (το πιο πιθανόν να οφείλονται στα δεδομένα που έχουν εισαχθεί).

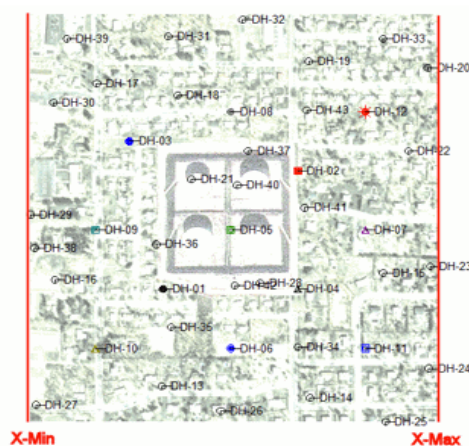


Σχήμα Π.5 Εντολές διαχείρισης διαστάσεων περιοχής μελέτης

Τα επόμενα Σχήματα Π.6, Π.7, Π.8 παρουσιάζουν τι αντιπροσωπεύει η κάθε διάσταση (η περιοχή εντός των κόκκινων γραμμών αποτελεί την περιοχή μελέτης και τα σημεία με μπλε ή κόκκινο αποτελούν σημεία δεδομένων, π.χ. σημεία γεωτρήσεων):

	Minimum	Maximum
X (Easting):	652,700.0	653,520.0
Y (Northing):	5,535,000.0	5,535,900.0
Z (Elevation):	1,230.0	1,530.0

	Minimum	Maximum
X (Easting):	652,700.0	653,520.0
Y (Northing):	5,535,000.0	5,535,900.0
Z (Elevation):	1,230.0	1,530.0

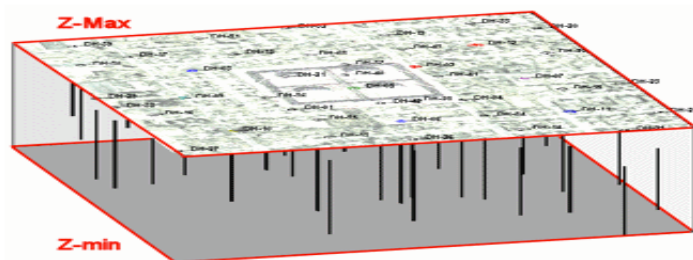


Σχήμα Π.6 X (min – max)



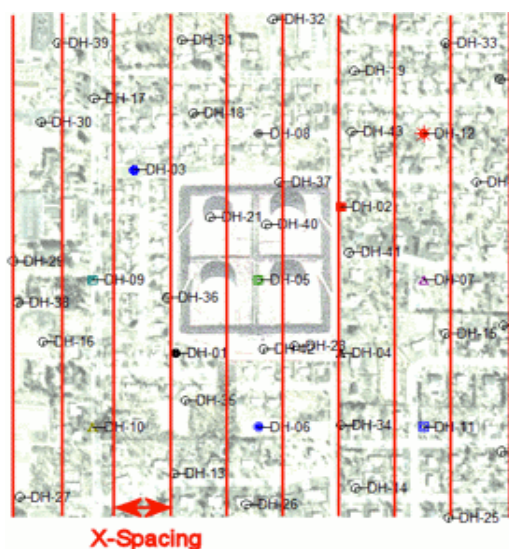
Σχήμα Π.7 Y (min – max)

	Minimum	Maximum
X (Easting):	652,700.0	653,520.0
Y (Northing):	5,535,000.0	5,535,900.0
Z (Elevation):	1,230.0	1,530.0



Σχήμα Π.8 Z (min – max)

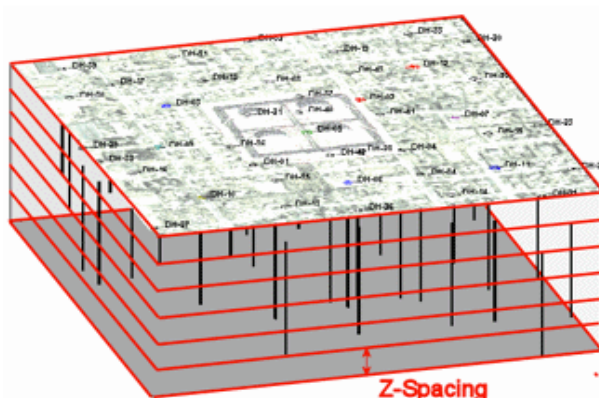
Οι ρυθμίσεις του μεσοδιαστήματος (Spacing – Σχήμα Π.1) αναφέρονται μόνο στα μοντέλα που παράγονται από μεθόδους παρεμβολής και αντιπροσωπεύουν την απόσταση των κόμβων κατά μήκος των αξόνων XYZ (Σχήματα Π.9, Π.10, Π.11).



Σχήμα Π.9 X spacing (μεσοδιάστημα)



Σχήμα Π.10 Y spacing (μεσοδιάστημα)

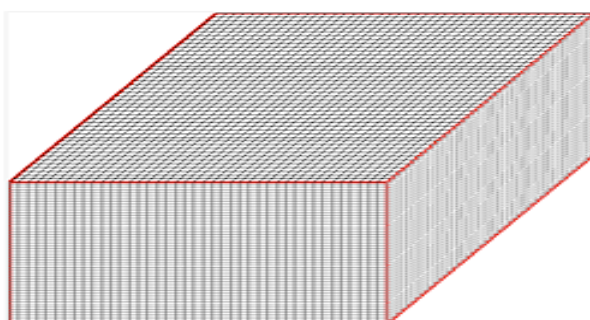


Σχήμα Π.11 Z spacing (μεσοδιάστημα)

Ο αριθμός των κόμβων (*Nodes* - Σχήμα Π.5) υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό. Είναι το πηλίκο της διαφοράς της μέγιστης και ελάχιστης τιμής κάθε διάστασης προς το αντίστοιχο μεσοδιάστημα (*spacing*). Προκύπτει ότι, όσο πιο μικρή τιμή έχει το μεσοδιάστημα τόσο μεγαλύτερη θα είναι η πυκνότητα του μοντέλου (Σχήματα Π.12, Π.13). Δεν υπάρχει η επιλογή της χειροκίνητης ρύθμισης του αριθμού των κόμβων, όμως είναι σημαντικό να ανανεώνεται σε κάθε αλλαγή ή προσθήκη νέων δεδομένων.

	Spacing	Nodes
X (Easting):	20	42
Y (Northing):	20	46
Z (Elevation):	5	60

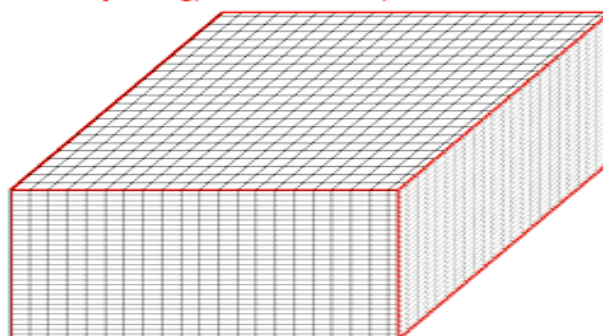
Closer spacing, more nodes, denser models



Σχήμα Π.12 Μικρό μεσοδιάστημα - μεγαλύτερος αριθμός κόμβων

	Spacing	Nodes
X (Easting):	40	21
Y (Northing):	40	23
Z (Elevation):	10	31

Wider spacing, fewer nodes, coarser models

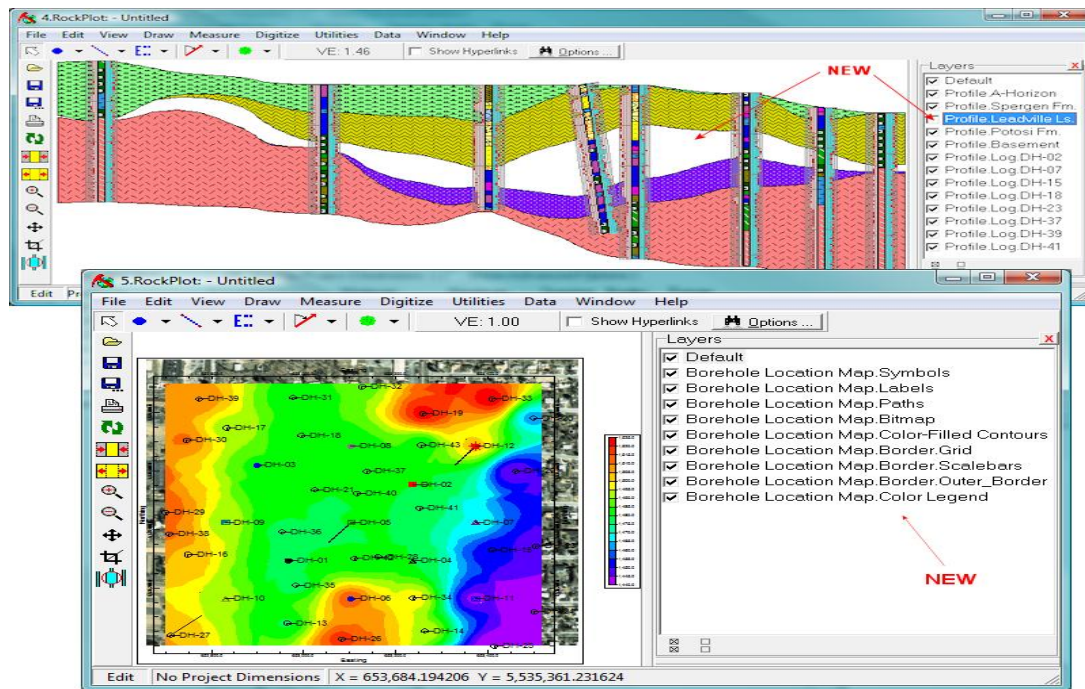


Σχήμα Π.13 Μεγάλο μεσοδιάστημα - μικρότερος αριθμός κόμβων

Π.3 ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

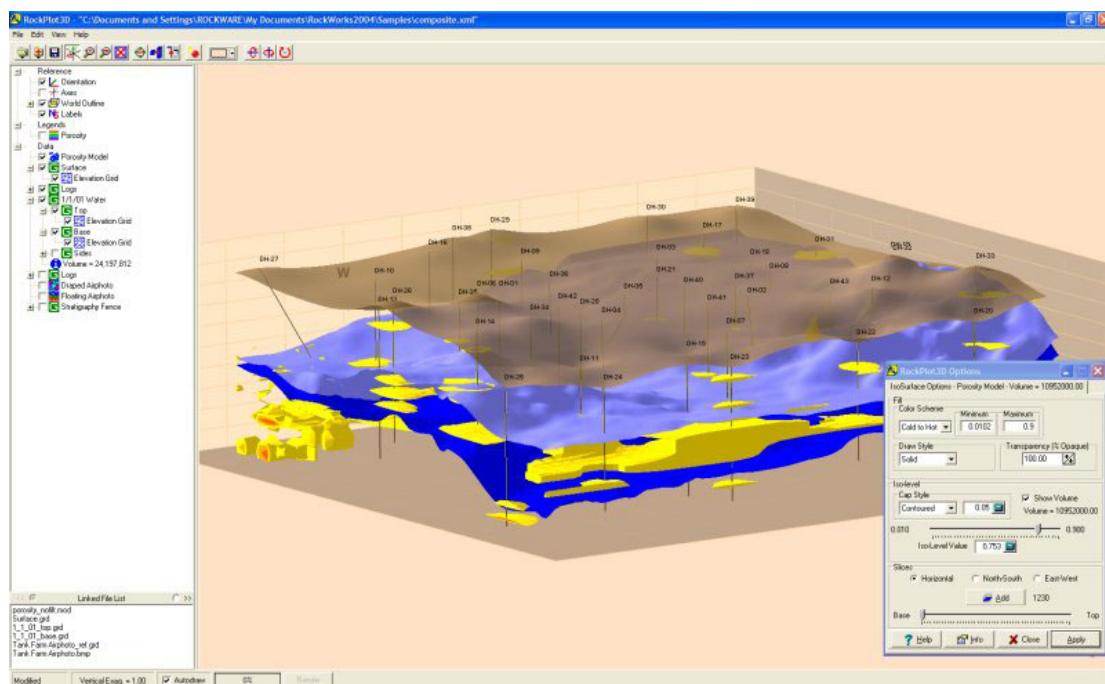
Το λογισμικό Rockworks15 περιλαμβάνει τρία (3) γραφικά περιβάλλοντα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων επεξεργασίας των χωρικών πληροφοριών.

Το *RockPlot2D* αποτελεί το πρώτο από τα τρία παράθυρα απεικόνισης και χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση και επεξεργασία των γραφικών αποτελεσμάτων δύο διαστάσεων (χάρτες, τομές, διαγράμματα). Δυνατότητες: διαδραστική ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των επιφανειών/στρωμάτων που θα προβάλλονται, προσάρτηση πολλαπλών απεικονίσεων σε μία, κατακόρυφη επέκταση (*vertical exaggeration*), χρήση εργαλείων σχεδίασης ή ψηφιοποίησης, δυνατότητα εξαγωγής των απεικονίσεων σε αρχεία πολλαπλών μορφών (DXF, PNG, JPG, BMP and KMZ) κ.α. (Σχήμα Π.14).



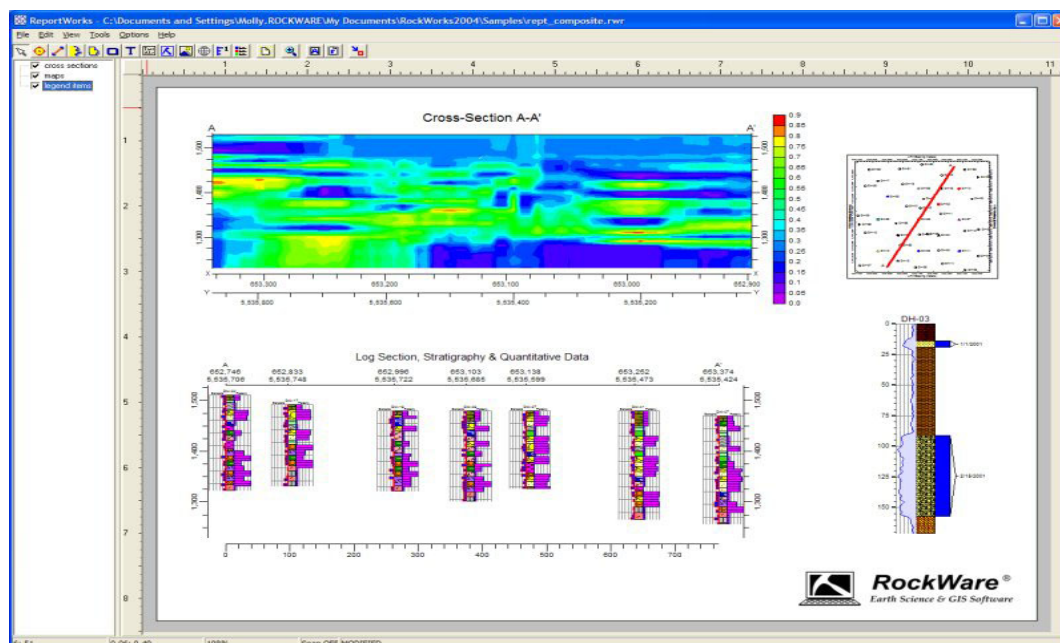
Σχήμα Π.14 περιβάλλον οπτικοποίησης RockPlot2D

Το δεύτερο περιβάλλον οπτικοποίησης είναι το *RockPlot3D OpenGL viewer*, που χρησιμοποιείται για την προβολή τρισδιάστατων γραφικών απεικονίσεων (στερεά μοντέλα, πλεγματικά μοντέλα επιφανειών, διαγράμματα). Δυνατότητες: διαδραστική ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των δεδομένων που θα προβάλλονται, προσάρτηση πολλαπλών απεικονίσεων σε μία, προσαρμογή ρυθμίσεων (βαθμός διαφάνειας, γωνία θέασης, ανάλυση κ.ά.), περιστροφή των απεικονίσεων γύρω από οποιοδήποτε άξονα κ.α. (Σχήμα Π.15).



Σχήμα Π.15 περιβάλλον οπτικοποίησης RockPlot3D OpenGL viewer

Το τρίτο περιβάλλον είναι το *ReportWorks*, το οποίο χρησιμοποιείται ως φόρμα εισαγωγής πολλαπλών απεικονίσεων για εκτύπωση ή παρουσίαση. Δυνατότητες: ρύθμιση της ανάλυσης κάθε εικόνας που θα εισαχθεί, εισαγωγή εικόνων διαφόρων τύπων (BMP, JPG, TIF), προσθήκη κειμένων (π.χ. επικεφαλίδες), εισαγωγή υπομνημάτων ανάλυσης ή συντεταγμένων των απεικονίσεων κ.α. (Σχήμα Π.16).



Σχήμα Π.16 περιβάλλον οπτικοποίησης ReportWorks

Π.4 ΚΥΡΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

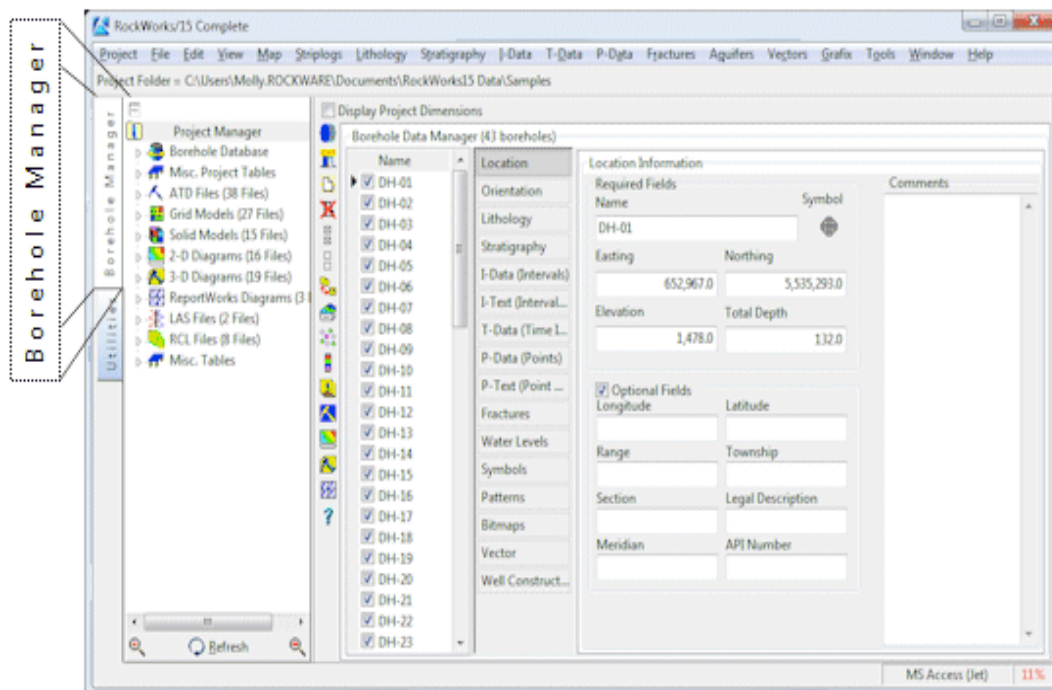
Το λογισμικό ROCKWORKS αποτελείται από δύο κύρια περιβάλλοντα (ή επιφάνειες) εργασίας. Πρόσβαση στο κάθε περιβάλλον αποκτάται από την αριστερή πλευρά, ανεξαρτήτως ποιο είναι ενεργό, καθώς μόνο το επιλεγμένο περιβάλλον γίνεται ορατό. Κάθε περιβάλλον έχει διαφορετική κεντρική γραμμή εντολών (οριζόντια γραμμή στο πάνω μέρος του παραθύρου), ενώ υπάρχουν διαφοροποιήσεις ως προς τους τύπους δεδομένων που αναγνωρίζουν και επεξεργάζονται.

Περιβάλλον #1: Βάση δεδομένων γεωτρήσεων (Borehole Manager)

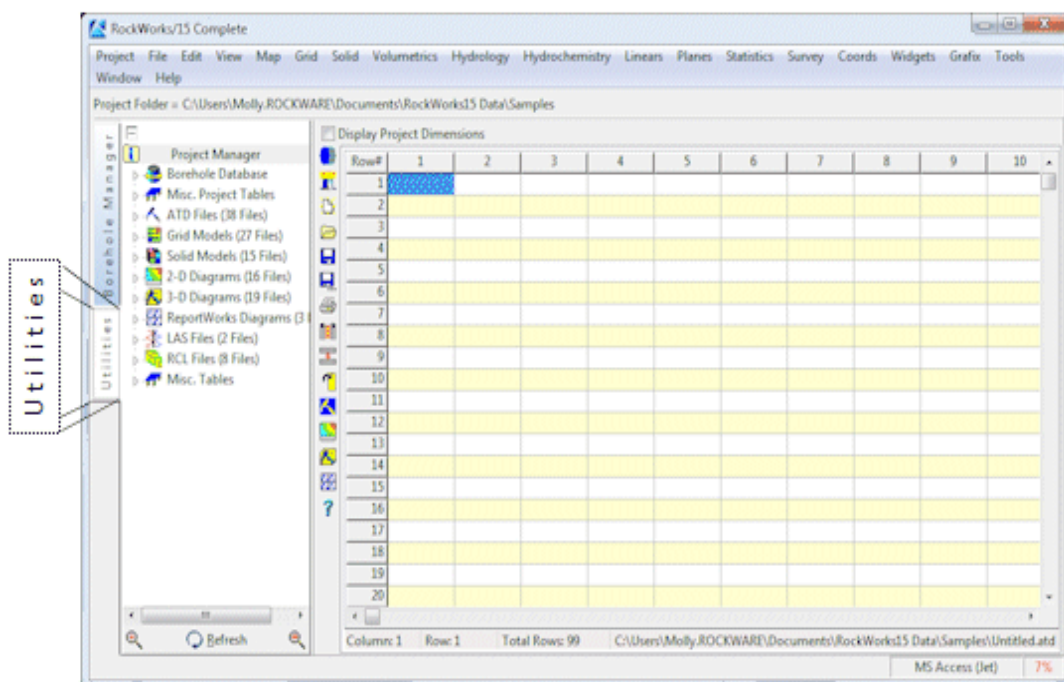
Στο περιβάλλον Borehole Manager (Σχήμα Π.17) εισάγονται δεδομένα γεωτρήσεων, τα οποία μπορεί να περιέχουν χωρικές (συντεταγμένες XYZ), στρωματογραφικές, λιθολογικές, γεωχημικές, γεωφυσικές, υδρολογικές, τεκτονικές (π.χ. ρήγματα) κ.α. πληροφορίες. Τα δεδομένα κάθε μοντελοποίησης αποθηκεύονται σε αρχεία με κατάληξη .mdb (Microsoft Access - compatible database).

Περιβάλλον #2: Εργαλεία (Utilities)

Το φύλλο δεδομένων (φύλλο τύπου Excel) του περιβάλλοντος Utilities (Σχήμα Π.18) έχει σχεδιαστεί για την εισαγωγή πληροφοριών όπως π.χ. τοπογραφικά δεδομένα επιφάνειας (XYZ) κ.α., ενώ αποθηκεύονται σε αρχεία με κατάληξη .atd (ASCII Tab - Delimited format).



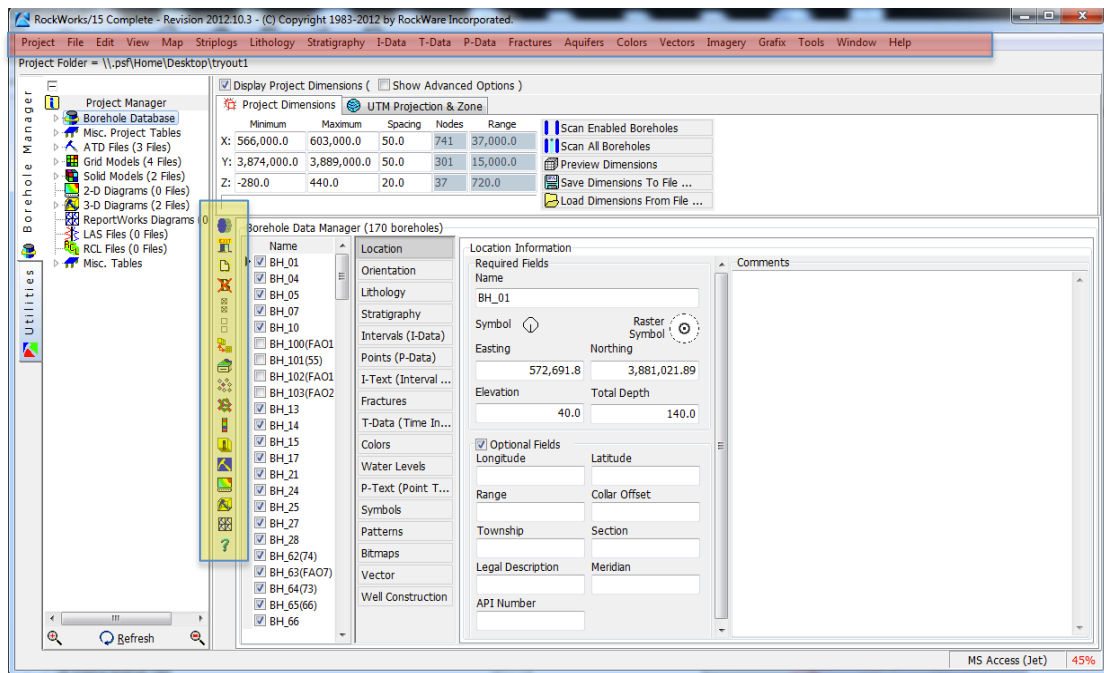
Σχήμα Π.17 Περιβάλλον Borehole Manager



Σχήμα Π.18 Περιβάλλον Utilities

Π.4.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ #1: ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Για την εισαγωγή των διαφόρων τύπων δεδομένων στη βάση γεωτρήσεων, πρέπει αρχικά να οριστούν οι γεωτρήσεις τις οποίες αφορούν, καθώς κάθε γεώτρηση χαρακτηρίζεται από τα 'προσωπικά' της δεδομένα. Στο Σχήμα Π.19 φαίνονται τα σημεία πρόσβασης στην εντολή για τη δημιουργία νέας γεώτρησης, όπως και για τις υπόλοιπες εντολές.



Σχήμα Π.19 Σημεία εντολής νέας γεώτρησης και λοιπών εντολών (χρωματιστά πλαίσια)

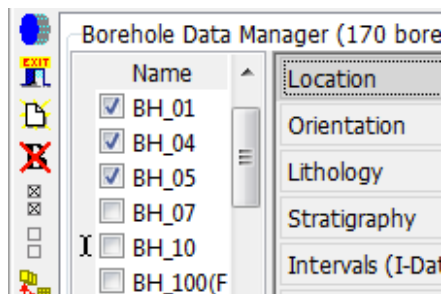
Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα εκτός από την κεντρική γραμμή εντολών (κόκκινο πλαίσιο), η οποία περιλαμβάνει γενικά όλες τις εντολές της βάσης γεωτρήσεων, υπάρχει και η βοηθητική στήλη εντολών (κίτρινο πλαίσιο) που παρέχει γρήγορη πρόσβαση σε μερικές εκ των εντολών που χρησιμοποιούνται συχνότερα. Όταν ο κέρσορας βρεθεί πάνω σε κάποιο εικονίδιο της στήλης το λογισμικό αναδεικνύει τη λειτουργία της κάθε εντολής. Στο Σχήμα Π.20 δίνεται συνοπτική επεξήγηση των εντολών της βοηθητικής στήλης.



1. Δημιουργία αντιγράφου ασφαλείας της τρέχουσας βάσης δεδομένων
2. Έξοδος από το λογισμικό RockWorks
3. Δημιουργία νέας γεώτρησης
4. Διαγραφή τρέχουσας γεώτρησης
5. Ενεργοποίηση όλων των γεωτρήσεων
6. Απενεργοποίηση όλων των γεωτρήσεων
7. Επεξεργασία της βάσης δεδομένων σε φύλλο δεδομένων τύπου Excel
8. Διαχείριση των τύπων δεδομένων (εμφάνιση/απόκρυψη τύπων)
9. Δημιουργία περιγράμματος τοποθεσίας γεωτρήσεων
10. Τοποθεσία γεωτρήσεων με Google Earth
11. Κατασκευή απεικόνισης λιθολογίας γεώτρησης δύο διαστάσεων
12. Κατασκευή απεικόνισης λιθολογίας γεώτρησης τριών διαστάσεων
13. Ρύθμιση γλώσσας εντολών RockWorks
14. Ενεργοποίηση παραθύρου RockPlot2D
15. Ενεργοποίηση παραθύρου RockPlot3D
16. Ενεργοποίηση παραθύρου ReportWorks
17. Πρόσβαση στον οδηγό εκμάθησης που παρέχει το λογισμικό

Σχήμα Π.20 Συνοπτική περιγραφή των εντολών γρήγορης πρόσβασης

Όσον αφορά τις παραπάνω εντολές, στο Σχήμα Π.21 δίνεται η ερμηνεία των εντολών 5 και 6 (ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των γεωτρήσεων). Σημειώνεται ότι μόνο οι ενεργοποιημένες ή οι επιλεγμένες γεωτρήσεις συμμετέχουν στην κατασκευή χαρτών, μοντέλων και διαγραμμάτων.

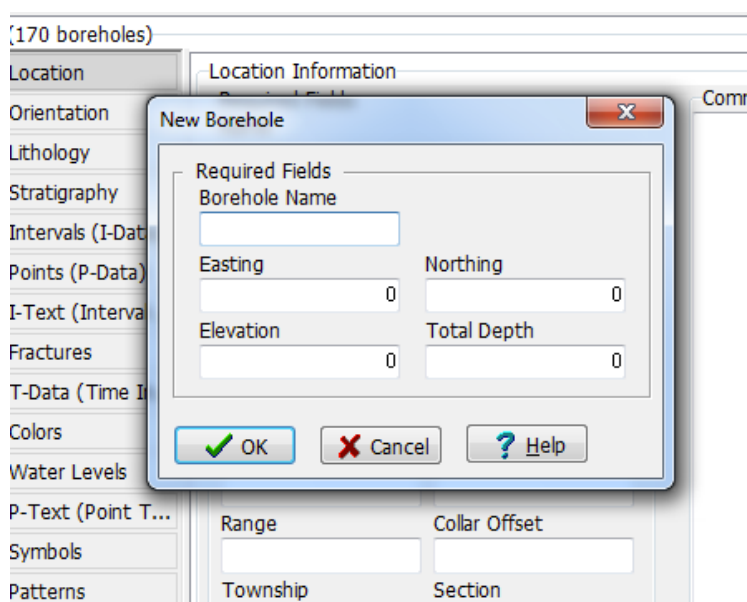


Σχήμα Π.21 Ενεργοποίηση και απενεργοποίηση γεωτρήσεων

Στο διπλανό σχήμα οι γεωτρήσεις με τις ονομασίες BH_01, BH_04, BH_05 είναι ενεργοποιημένες, ενώ οι υπόλοιπες όχι.

Η εντολή 7 διευκολύνει την εισαγωγή των δεδομένων στα αντίστοιχα πεδία, καθώς τα μετατρέπει σε πεδία φύλλου δεδομένων τύπου Excel, όπου πλέον θα ισχύουν οι κλασσικές εντολές αποκοπής (cut), αντιγραφής (copy), επικόλλησης (paste), η επιλογή πολλών πεδίων ταυτόχρονα κ.α.

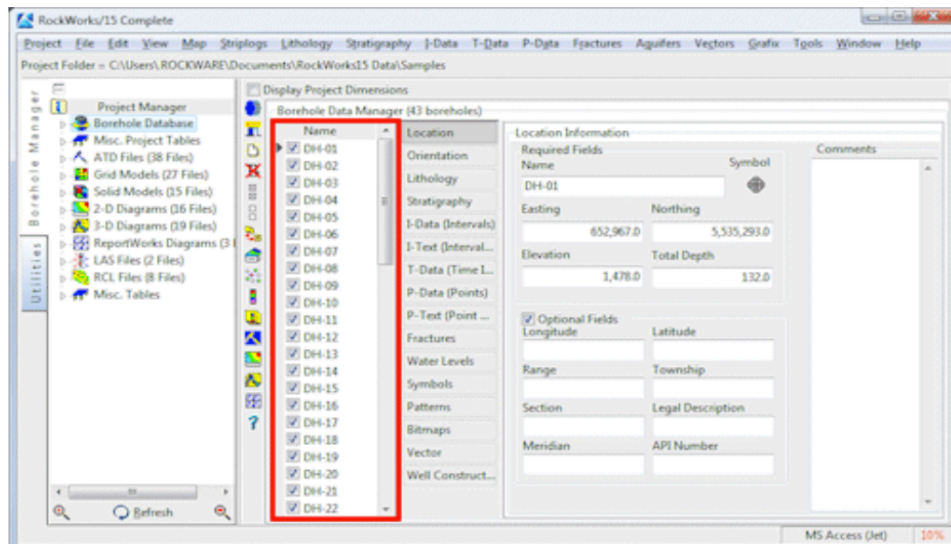
Εναλλακτική διαδρομή για την εντολή 3 από την κεντρική γραμμή εντολών: *File / New Borehole* και η εκτέλεσή της παραπέμπει σε νέο παράθυρο, όπου εισάγονται τα χωρικά δεδομένα που αφορούν το πεδίο Location (τοποθεσία) της νέας γεώτρησης, τα οποία αποτελούν βασικές πληροφορίες και δεν γίνεται να αποφευχθούν (Σχήμα Π.22).



Σχήμα Π.22 Υποχρεωτικά πεδία εισαγωγής χωρικών δεδομένων νέας γεώτρησης

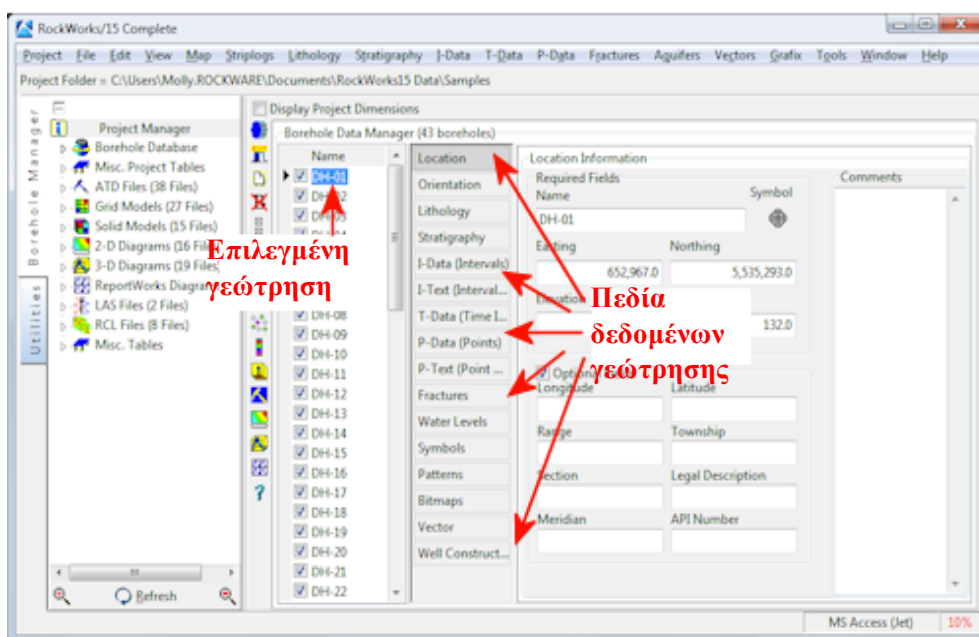
Τα δεδομένα τοποθεσίας περιλαμβάνουν το όνομα (Borehole Name), τις συντεταγμένες (γεωγραφικό μήκος, πλάτος και απόλυτο υψόμετρο) κατά τους άξονες X (Easting), Y (Northing), Z (Elevation) του κολάρου της κάθε γεώτρησης και το συνολικό βάθος της (Total Depth).

Σημειώνεται ότι τα βάθη και οι συντεταγμένες πρέπει να έχουν τις ίδιες μονάδες μέτρησης (μέτρα - m ή πόδια - ft), καθώς συνυπολογίζονται κατά την κατασκευή των μοντέλων. Το ίδιο ισχύει για όλα τα πεδία και εφόσον το λογισμικό υποθέτει ότι ο χρήστης γνωρίζει τι μονάδες χρησιμοποιεί, δε χρειάζεται κάπου να δηλωθούν. Αφού οριστεί η τοποθεσία, η νέα γεώτρηση καταχωρείται αυτόματα στη τρέχουσα βάση δεδομένων και το όνομα της εμφανίζεται στην αντίστοιχη στήλη (Σχήμα Π.23).



Σχήμα Π.23 Στήλη καταχώρησης των γεωτρήσεων

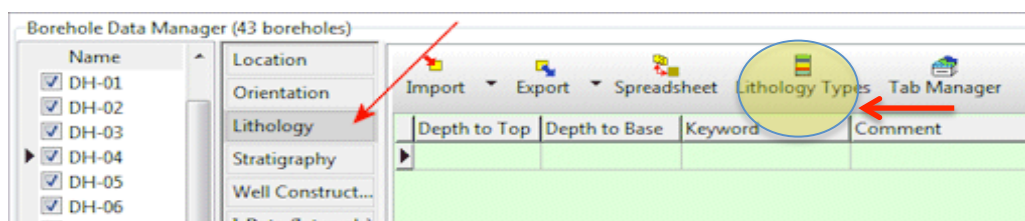
Το υποχρεωτικό πεδίο της τοποθεσίας (Location) και τα υπόλοιπα μη - υποχρεωτικά πεδία εισαγωγής δεδομένων της κάθε γεώτρησης είναι ομαδοποιημένα σε στήλη δίπλα από εκείνη των ονομάτων των γεωτρήσεων (Σχήμα Π.24).



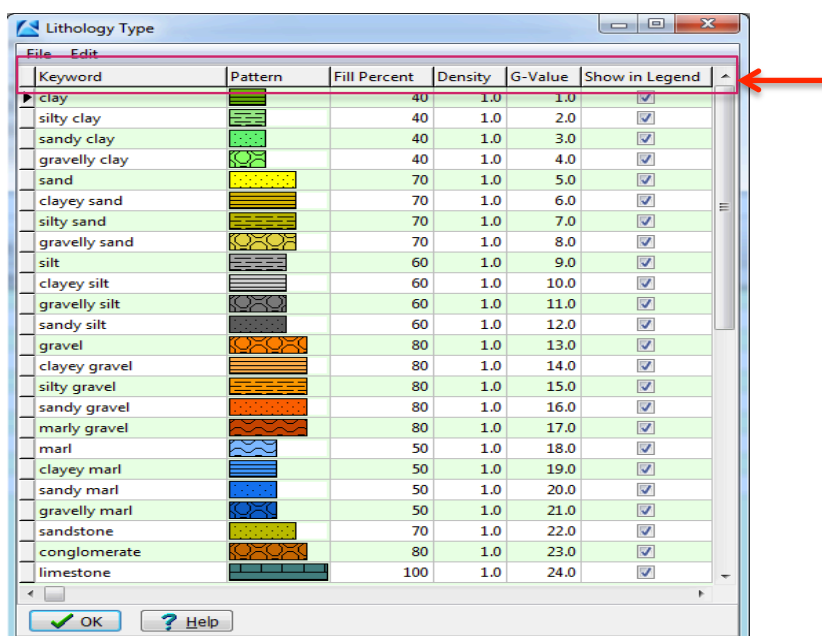
Σχήμα Π.24 Επιλεγμένη γεώτρηση και τα πεδία δεδομένων της

Πεδίο Orientation: Εισάγεται το αζιμούθιο και η κλίση κατά αντιστοιχία με το βάθος κάθε γεώτρησης. Αν η γεώτρηση είναι κατακόρυφη το πεδίο μένει κενό.

Πεδίο Lithology: Εισάγονται τα λιθολογικά δεδομένα κάθε γεώτρησης, δηλ. οι παρατηρούμενοι λιθολογικοί σχηματισμοί και τα αντίστοιχα βάθη όπου εμφανίζονται κατά τη διάτρηση (Σχήμα Π.25). Οι λιθολογικοί σχηματισμοί γίνονται αναγνωρίσιμοι από το λογισμικό αφού αρχικά οριστούν στον αντίστοιχο πίνακα (Σχήμα Π.26), με την εντολή *Lithology Types*.



Σχήμα Π.25 Πεδίο Lithology και εντολή *Lithology Types*

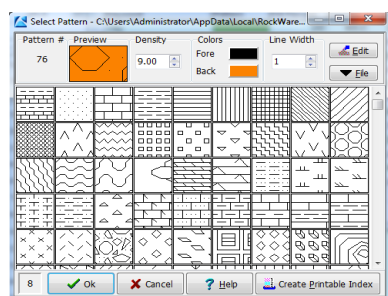


Σχήμα Π.26 Λιθολογικός πίνακας (Lithology Types Table)

Κάθε σειρά του πίνακα αφορά έναν λιθολογικό σχηματισμό και αποτελείται από 6 στήλες (αριστερά προς δεξιά):

Keyword: Όνομα σχηματισμού.

Pattern: Συμβολισμός (ή μοτίβο) σχηματισμού: με κλικ στο αντίστοιχο κελί του πίνακα, εμφανίζεται νέο παράθυρο όπου επιλέγεται ο επιθυμητός συμβολισμός και ρυθμίζεται η πυκνότητά του (*Density*), προτεινόμενη τιμή: 2-3 (διπλανό Σχήμα Π.27). Σημειώνεται ότι πρέπει να γίνουν επιλογές ευδιάκριτων μοτίβων και χρωμάτων, ώστε οι σχηματισμοί να ξεχωρίζουν στα διαγράμματα απεικονίσεων που θα κατασκευαστούν.



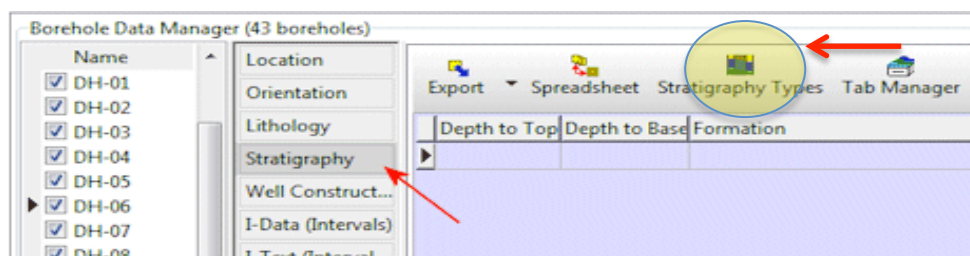
Fill Percent: Ποσοστό πλήρωσης εκάστοτε συμβολισμού ή μοτίβου (Pattern) στις απεικονίσεις των γεωτρητικών στηλών. Αν επιλεγθεί π.χ. 50% τότε θα πληρωθεί ο μισός διαθέσιμος χώρος.

Density: Πολλαπλασιαστής πυκνότητας λιθολογικών μοντέλων: χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του όγκου ή της μάζας των μοντέλων (αν ο χρήστης δεν ενδιαφέρεται, εισάγεται τυχαία τιμή, π.χ. 1, χωρίς να επηρεάζει άλλες επιλογές).

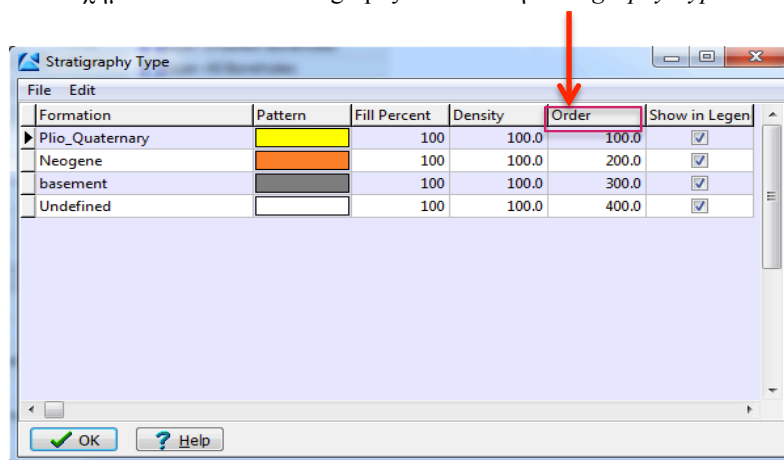
G-Value: Αντιπροσωπευτική αριθμητική τιμή κάθε λιθολογικού σχηματισμού: εισάγεται ένας θετικός ακέραιος αριθμός που αντιστοιχεί σε μόνο ένα σχηματισμό και δεν επαναλαμβάνεται. Κατά την επεξεργασία των δεδομένων και την κατασκευή των μοντέλων και των χαρτών, το λογισμικό αναγνωρίζει και ανακαλεί τις τιμές G και όχι τα ονόματα (Keywords) των σχηματισμών. Προτείνεται η τιμή G για τον πρώτο σχηματισμό του πίνακα να είναι '1' και να προστίθεται ο ακέραιος 1 για κάθε επόμενο που καταχωρείται.

Show in Legend: Καθορίζεται ποιοι από τους σχηματισμούς θα εμφανίζονται στα υπομνήματα των μοντέλων και των διαγραμμάτων επιλέγοντας τους στη συγκεκριμένη στήλη. Η λειτουργία είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις που έχουν οριστεί στον λιθολογικό πίνακα πολλοί σχηματισμοί, ενώ δεν εμπεριέχονται όλοι σε μερικές εκ των απεικονίσεων.

Πεδίο *Stratigraphy*: Εισάγονται τα (λιθο)στρωματογραφικά δεδομένα κάθε γεώτρησης, αφού αρχικά οριστούν οι (λιθο)στρωματογραφικές ενότητες (Σχήμα Π.28, Π.29).



Σχήμα Π.28 Πεδίο Stratigraphy και εντολή Stratigraphy Types



Σχήμα Π.29 (Λιθο)στρωματογραφικός πίνακας (Stratigraphy Types Table)

Οι (λιθο)στρωματογραφικές ενότητες ορίζονται όπως και οι λιθολογικοί σχηματισμοί με τη μόνη διαφοροποίηση να παρατηρείται στη στήλη *Order* (βλ. παραπάνω σχήμα) του (λιθο)στρωματογραφικού πίνακα.

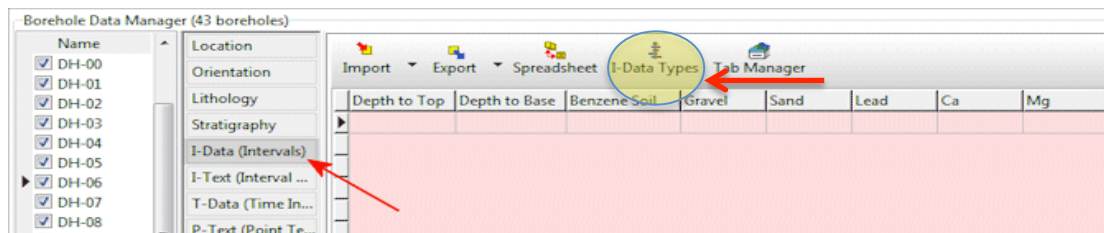
Σε αντίθεση με την αντίστοιχη στήλη *G-Value*, όπου η σειρά των λιθολογικών σχηματισμών μπορεί να είναι τυχαία, η στήλη *Order* εκτός από την αντιπροσωπευτική τιμή της κάθε (λιθο)στρωματογραφικής ενότητας, καθορίζει και τη σειρά εμφάνισης της από την επιφάνεια του εδάφους και κάτω. Προτείνεται η τιμή 1 για την πιο κοντινή στο έδαφος και διαδοχική αρίθμηση για τις επόμενες προς τα κάτω.

Στον παρακάτω Πίνακα Π.1 έχουν συγκεντρωθεί οι βασικές διαφορές των δεδομένων που εισάγονται στα πεδία λιθολογίας και στρωματογραφίας.

ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ	ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ
Αντιπροσωπεύει τους παρατηρούμενους λιθολογικούς σχηματισμούς από την κορυφή προς τη βάση μίας γεώτρησης	Αντιπροσωπεύει στρώματα ή ενότητες πολλών λιθολογικών σχηματισμών από την κορυφή προς τη βάση μίας γεώτρησης
Συνηθέστερα αποτελεί το πρώτο βήμα εισαγωγής δεδομένων στη βάση γεωτρήσεων	Συνηθέστερα αποτελεί το δεύτερο βήμα εισαγωγής δεδομένων στη βάση γεωτρήσεων
Μπορεί να περιέχει επαναλαμβανόμενους σχηματισμούς (π.χ. άμμος, άργιλος, άμμος, άργιλος)	Η κάθε στρωματογραφική ενότητα δε γίνεται να εμφανίζεται περισσότερες της μίας φορές σε μία γεώτρηση
Οι λιθολογικοί σχηματισμοί μπορούν να έχουν τυχαία σειρά εμφάνισης σε μία γεώτρηση	Οι στρωματογραφικές ενότητες έχουν προκαθορισμένη διαδοχή από πάνω προς τα κάτω
Δεν παρουσιάζονται πλευρικές διακυμάνσεις	Συχνές πλευρικές διακυμάνσεις
Δεν υποστηρίζονται οι συσχετισμοί μεταξύ των λιθολογικών σχηματισμών σε μία τομή	Οι στρωματογραφικές ενότητες γίνεται να συσχετιστούν σε μία τομή
Χρησιμοποιούνται μέθοδοι παρεμβολής για την κατασκευή στερεών μοντέλων (Solid models)	Χρησιμοποιούνται μέθοδοι παρεμβολής για την κατασκευή πλεγμάτων μοντέλων επιφανειών (surface grid models)
Οι αντίστοιχοι σχηματισμοί ορίζονται στον λιθολογικό πίνακα	Οι στρωματογραφικές ενότητες ορίζονται στο στρωματογραφικό πίνακα
Τα λιθολογικά δεδομένα εισάγονται στο πεδίο Lithology	Τα στρωματογραφικά δεδομένα εισάγονται στο πεδίο Stratigraphy

Πίνακας Π.1 Βασικές διαφορές λιθολογικών και στρωματογραφικών δεδομένων (οδηγός εκμάθησης Rockworks)

Πεδίο *I-Data (Intervals)*: Εισάγονται ποσοτικά δεδομένα, όπως π.χ. γεωχημικές ή γεωτεχνικές μετρήσεις κ.α., που αντιστοιχούν σε διαστήματα (Intervals) βάθους στην γεώτρηση. Παρόμοια με τα παραπάνω πεδία, με την εντολή *I-Data Types* αρχικά ορίζεται η μετρούμενη ιδιότητα. Η πρώτη στήλη δεξιά των στηλών εισαγωγής του βάθους θα πάρει το όνομα της ορισμένης ιδιότητας, ενώ δεν υπάρχει περιορισμός για τον αριθμό των ιδιοτήτων που θα οριστούν.



Σχήμα Π.30 Πεδίο I-Data (Intervals) και εντολή I-Data Types

Πεδίο I-Text (Interval Text): Εισάγονται μη-αριθμητικά δεδομένα που αντιστοιχούν σε διαστήματα βάθους, τα οποία μπορεί να αφορούν χρωματικές περιγραφές, ταυτότητες δειγμάτων κ.α.

Πεδίο T-Data (Time Intervals): Παρόμοιο με το πεδίο I-Data (Intervals) με τη διαφορά ότι επιτρέπεται η εισαγωγή δεδομένων, τα οποία θα διαφοροποιούνται με την πάροδο του χρόνου.

Πεδίο P-Data (Points): Εισάγονται αριθμητικά δεδομένα, όπως π.χ. γεωφυσικές μετρήσεις, που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα σημεία (Points) της γεώτρησης.

Πεδίο P-Text (Point Text): Εισάγονται μη-αριθμητικά δεδομένα που αντιστοιχούν σε σημεία της γεώτρησης και αφορούν σχόλια, αρίθμηση δειγμάτων κ.α.

Πεδίο Fractures: Εισάγονται δεδομένα ρηγμάτων, όπως βάθος, κλίση, διεύθυνση, μέγεθος κ.α.

Πεδίο Water Levels: Εισάγονται οι ημερομηνίες των μετρήσεων, βάθη και σχόλια των παρατηρούμενων υδροφόρων οριζώντων εντός των γεωτρήσεων.

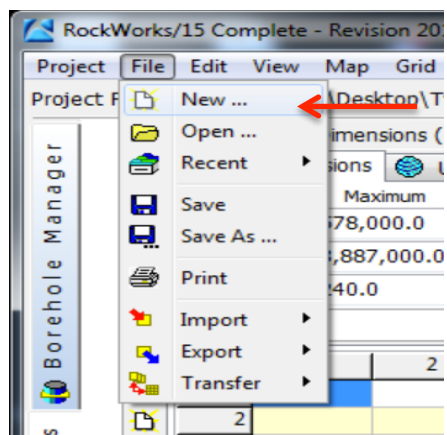
Πεδία Symbols, Patterns, Bitmaps: Επιλέγονται σύμβολα, μοτίβα και εικόνες που βοηθούν την αναπαράσταση των γεωτρήσεων.

Πεδίο Vectors: Εισάγονται διανυσματικά δεδομένα, όπως ροή υπόγειων υδάτων κ.α.

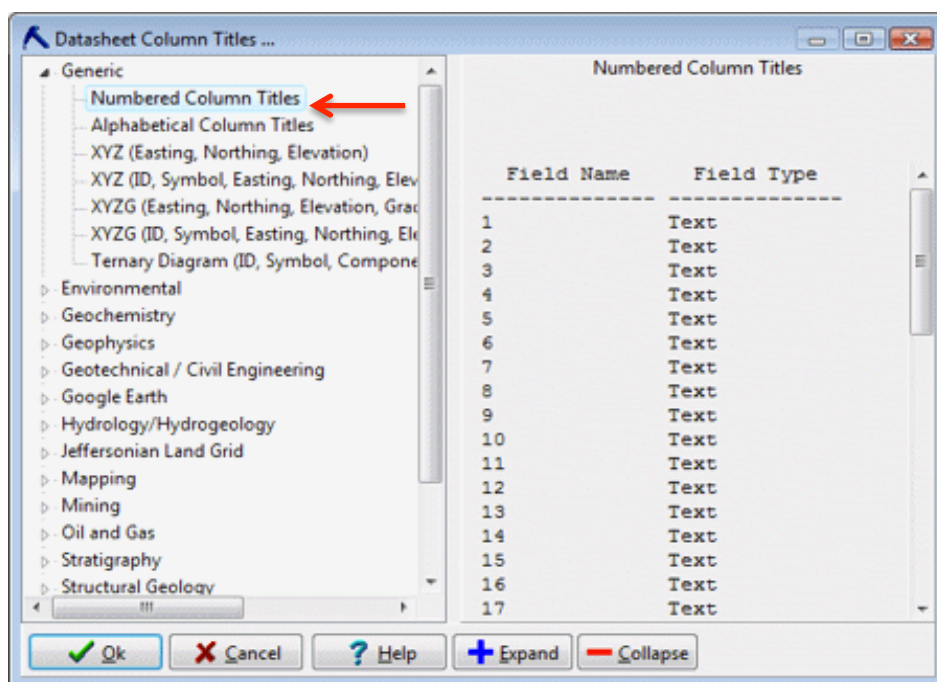
Πεδίο Well Construction: Ορίζονται τα υλικά κατασκευής και υποστήριξης της γεώτρησης σε συγκεκριμένα βάθη και διαμέτρους.

Π.4.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ #2: ΕΡΓΑΛΕΙΑ - UTILITIES

Αντίστοιχα για το περιβάλλον Utilities, αρχικά ορίζεται ο φάκελος δεδομένων (Project Folder), όπου θα αποθηκεύονται οι εργασίες που πρόκειται να γίνουν. Συνήθως είναι κοινή για τα δύο περιβάλλοντα, καθώς οι επιλογές αναφέρονται στην ίδια περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια από την *κεντρική γραμμή εντολών* δημιουργείται νέο φύλλο εργασίας με την εντολή *File / New* (Σχήμα Π.31) και στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγεται ο τύπος των στηλών του νέου φύλλου (Σχήμα Π.32). Το λογισμικό προσφέρει πληθώρα διαμορφωμένων στηλών, όπως απλές αριθμημένες στήλες, στήλες για την εισαγωγή συντεταγμένων, στήλες ιόντων υδροχημικών αναλύσεων κ.α. Στο τμήμα δεξιά του παραθύρου επιλογής τύπου στηλών εμφανίζεται προεπισκόπηση του επιλεγμένου τύπου. Αν ο χρήστης δεν είναι σίγουρος ποιον τύπο να επιλέξει, προτείνεται αρχικά η επιλογή *Generic / Numbered Column Titles* (αριθμημένες στήλες), ενώ είναι δυνατή η μετέπειτα διαμόρφωση των στηλών με την εντολή *View / Columns* από την κεντρική γραμμή εντολών.



Σχήμα Π.31 Εντολή νέου φύλλου εργασίας στο περιβάλλον Utilities (*File / New*)



Σχήμα Π.32 Παράθυρο επιλογής τύπου στηλών νέου φύλλου εργασίας Utilities

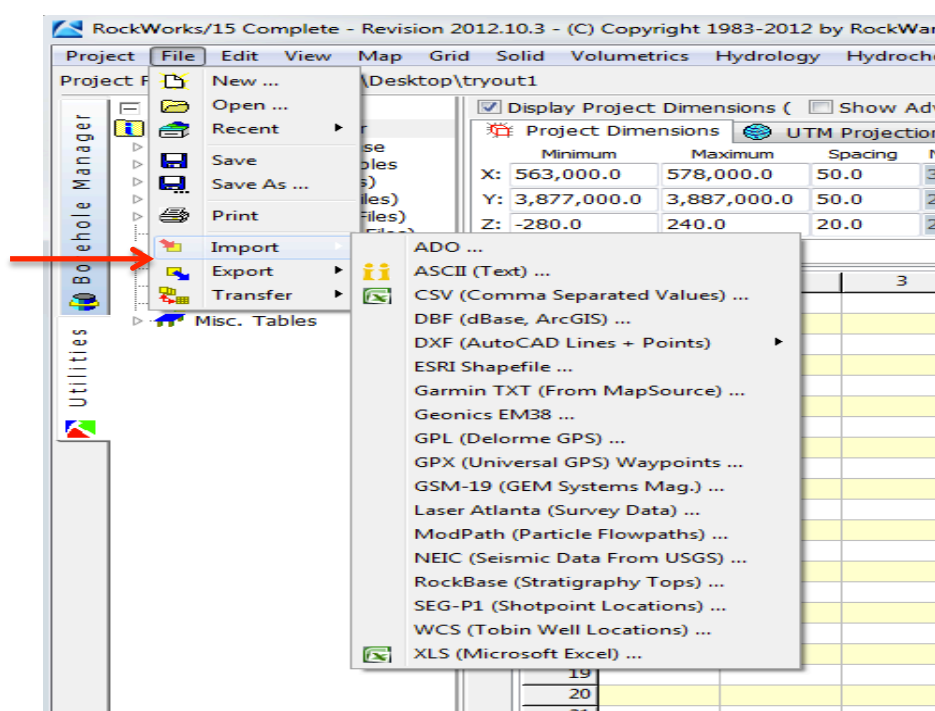
Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα για τον χρήστη να ανατρέξει σε ένα προϋπάρχον φύλλο εργασίας με την εντολή *File / Open* και την επιλογή του επιθυμητού .atd αρχείου από το παράθυρο που θα ανοίξει. Εναλλακτική διαδρομή αποτελεί η εντολή *File / Recent / Recent ATD Files*, η οποία δίνει πρόσβαση σε αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν πρόσφατα. Προσοχή πρέπει να δοθεί σε ποιον φάκελο δεδομένων (Project Folder) ανήκει το .atd αρχείο που θα επιλεγεί, καθώς μπορεί να μην ανήκει στην τρέχουσα βάση δεδομένων. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να οριστεί και η βάση δεδομένων (τρέχουσα ή διαφορετική).

Οι όποιες αλλαγές γίνουν στο νέο φύλλο δεδομένων αποθηκεύονται στην τρέχουσα βάση δεδομένων με την εντολή *File / Save*. Αν έχει χρησιμοποιηθεί ένα προϋπάρχον φύλλο δε χρειάζεται να οριστεί νέο όνομα αρχείου και οι αλλαγές αποθηκεύονται αυτόματα. Στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να αποθηκεύσει ένα προϋπάρχον φύλλο με διαφορετικό όνομα, εκτελείται η εντολή *File / Save As*.

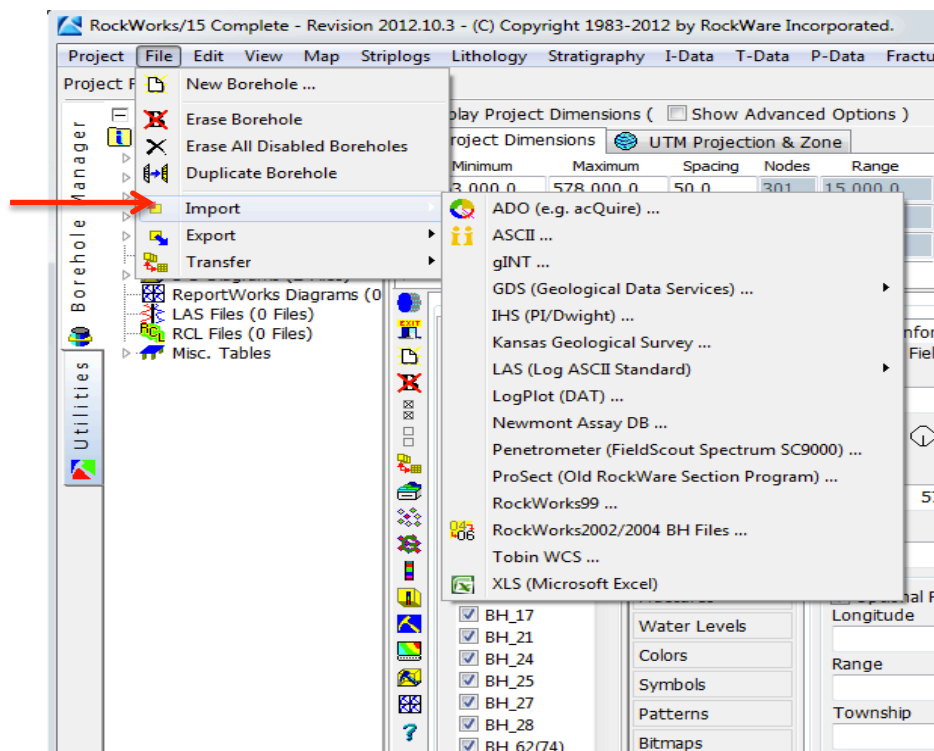
Μετά τη δημιουργία νέου φύλλου εργασίας (datasheet) γίνεται να ξεκινήσει η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων. Επιγραμματικά αναφέρεται ότι τα δεδομένα μπορεί να περιλαμβάνουν συντεταγμένες σημείων (XYZ data) για την κατασκευή χαρτών, δεδομένα από μετρήσεις κλίσεων και παρατάξεων επιφανειών για την κατασκευή στερεογραφικών διαγραμμάτων, δεδομένα από υδροχημικές αναλύσεις για την κατασκευή διαγραμμάτων Piper, δεδομένα που δεν προέρχονται από γεωτρήσεις, όπως μετρήσεις υψομέτρων για την κατασκευή τρισδιάστατων κατανομών, χαρτών ισοϋψών και τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας (DEMs ή DTMs) κ.α. Επιπλέον το περιβάλλον Utilities περιέχει εργαλεία κατασκευής πλεγμάτων και στερεών μοντέλων, στατιστικής επεξεργασίας, δισδιάστατης και τρισδιάστατης ανάλυσης διαρρήξεων (ροδοδιαγράμματα, στερεοδιαγράμματα, χάρτες γραμμώσεων), κατασκευής υδρολογικών και υδρογεωλογικών διαγραμμάτων (διαγράμματα ροής και διαγράμματα Stiff).

Π.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

Η ορθότητα των αποτελεσμάτων (2D ή 3D μοντέλα, χάρτες κτλ) του λογισμικού εξαρτάται από τη σωστή εισαγωγή των δεδομένων στα δύο κύρια περιβάλλοντα εργασίας. Υπάρχουν δύο τρόποι εισαγωγής δεδομένων· ο απλούστερος και πιο χρονοβόρος αφορά την εισαγωγή των δεδομένων με απ'ευθείας πληκτρολόγηση ή με τις εντολές αντιγραφή - επικόλληση (copy paste) από άλλο έγγραφο στα κατάλληλα πεδία (βλ. παράγραφο Π.4). Για μεγάλο όγκο δεδομένων ενδείκνυται ο δεύτερος τρόπος εισαγωγής, κατά τον οποίον το λογισμικό εισάγει βοηθητικά αρχεία δεδομένων από άλλες εφαρμογές, όπως π.χ. αρχεία κειμένου (text files), αρχεία Excel κ.α., με την εντολή *File / Import / (τύπος αρχείου)*.



Σχήμα Π.33 Εντολή *File / Import* και διαθέσιμοι τύποι αρχείων για εισαγωγή με Utilities



Σχήμα Π.34 Εντολή *File / Import* και διαθέσιμοι τύποι αρχείων για εισαγωγή με Borehole Manager

Στα σχήματα Π.33 και Π.34 φαίνεται ότι η εντολή *File / Import* εκτελείται και από τα δύο κύρια περιβάλλοντα εργασίας του λογισμικού, ενώ διαφέρει ως προς τους τύπους αρχείων και τη φύση των δεδομένων που υποστηρίζονται σε κάθε περιβάλλον.

Η δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων με βοηθητικά αρχεία προϋποθέτει σαν πρώτο βήμα, την κατάλληλη διαμόρφωση των αρχείων ώστε να αναγνωριστούν επιτυχώς από το RockWorks, ενώ κάθε τύπος αρχείου αντιμετωπίζεται διαφορετικά.

Για παράδειγμα, για να εισαχθεί ένα αρχείο τύπου ASCII, *American Standard Code for Information Interchange* (text file) στο περιβάλλον Borehole Manager πρέπει να έχει τη μορφή που φαίνεται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα Π.35).

```
<LOCATIONS>
Bore File Enab Rng Twp Sec Legal Long Lat Easting Northing Elev TD Sym Clr
DH-1 DH-1 Y 1 1 1 NE/SE -125.3423 44.53234 1505.00 54535.12 4543.4 202 255 0
DH-2 DH-2 Y 1 1 2 SW/NW -125.2334 45.48394 2102.23 43453.43 4654.8 210 121 0
DH-3 DH-3 Y 1 1 3 SE/SE -125.6543 44.53245 3245.25 32342.12 4021.6 157 44 453
</LOCATIONS>
```

Σχήμα Π.35 Αρχείο ASCII (text file) με δεδομένα πεδίου Location σε αναγνωρίσιμη μορφή

Ενδεικτικά αναφέρονται μερικές γενικές απαιτήσεις της κατάλληλης μορφής αναγνώρισης ενός αρχείου κειμένου, οι οποίες διαφοροποιούνται για κάθε πεδίο: (1) το λογισμικό χρειάζεται ενδείξεις (γράφονται με κεφαλαία) για να αναγνωρίσει τον τύπο δεδομένων που εισάγονται και να τα τοποθετήσει στο αντίστοιχο πεδίο. Στο παραπάνω σχήμα (δηλ. για το πεδίο Location), οι ενδείξεις είναι '<LOCATIONS>' και '</LOCATIONS>'.

Σημειώνεται ότι εφόσον τα δεδομένα αφορούσαν το πεδίο Stratigraphy, οι ενδείξεις θα μπορούσαν να είναι '<STRATIGRAPHY>' και '</STRATIGRAPHY>', (2) Για το πεδίο Location του Σχήματος Π.35 υποχρεωτικά συμπληρωμένες στήλες, συμπεριλαμβανομένου του ονόματος κάθε στήλης, πρέπει να είναι το όνομα της γεώτρησης (στήλη Bore), οι συντεταγμένες XYZ (στήλες Easting, Northing, Elevation αντίστοιχα) και το συνολικό βάθος της (στήλη TD), (3) η ακολουθία των στηλών δεδομένων πρέπει να συμφωνεί με τη σειρά του αντίστοιχου πεδίου, (4) οι στήλες χωρίζονται μεταξύ τους με tab χαρακτήρες, (5) Στην περίπτωση που εισαχθούν π.χ. στρωματογραφικά δεδομένα και δεν έχουν οριστεί εκ των προτέρων οι στρωματογραφικοί τύποι στον αντίστοιχο πίνακα (βλ. παράγραφο Π.4.1), το λογισμικό δημιουργεί έναν 'πρόχειρο' πίνακα που διορθώνει ή επικυρώνει στη συνέχεια ο χρήστης. Υποστηρίζεται και η εισαγωγή πινάκων με αρχεία κειμένου αρκεί να πληρούνται οι αντίστοιχες απαιτήσεις μορφοποίησης.

Στον οδηγό εκμάθησης (RockWorks15, Help) που παρέχει το λογισμικό, περιγράφονται οι κατάλληλες μορφές εισαγωγής όλων των τύπων δεδομένων, καθώς και τα επόμενα στάδια της εντολής *File / Import / ASCII* τα οποία δε θα σχολιαστούν περαιτέρω.

Επιπλέον τα δύο περιβάλλοντα του λογισμικού παρέχουν τη δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων με την εντολή *File / Export*, σε αρχεία τύπου ASCII (Text), DBF, XLS (Excel) για το περιβάλλον Utilities και σε αρχεία τύπου ASCII (text), LogPlot DAT, XLS (Excel), RockWorks2004 Borehole (BH) για το περιβάλλον Borehole Manager.

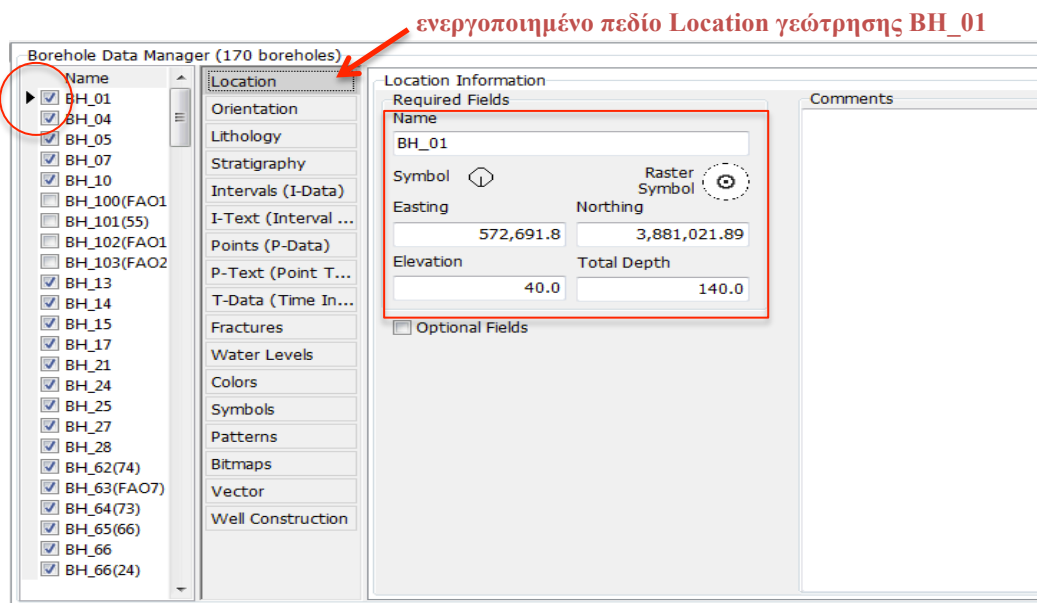
Για την αποφυγή λαθών και προβλημάτων ασυμφωνίας προτείνεται η εξαγωγή π.χ. ενός αρχείου ASCII (Text) των παραδειγμάτων του λογισμικού (samples data), το οποίο μπορεί να αποτελέσει οδηγό για την κατάλληλη μορφή εισαγωγής.

Τέλος, χρήσιμη μπορεί να αποβεί σε περιπτώσεις η δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων μεταξύ των δύο κύριων επιφανειών εργασίας, με την εντολή *File / Transfer*. Η εντολή περιορίζεται στη μεταφορά δεδομένων τοποθεσίας (Location) και στρωματογραφίας (Stratigraphy).

Π.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗ ΒΑΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Σε αυτήν την παράγραφο περιγράφονται τα πεδία δεδομένων που συμπληρώθηκαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, η απαιτούμενη μορφή των δεδομένων και η διαδικασία εισαγωγής τους στα αντίστοιχα πεδία.

Στο Σχήμα Π.36 φαίνονται τα δεδομένα του πεδίου Location της επιλεγμένης γεώτρησης BH_01, τα οποία συμπληρώνονται στο αρχικό στάδιο δημιουργίας μίας γεώτρησης (βλ. παράγραφο Π.4.1), αν προτιμηθεί η πληκτρολόγηση ως τρόπος εισαγωγής των δεδομένων στο συγκεκριμένο πεδίο. Μετά τη συμπλήρωσή τους, ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει σε αυτά ενεργοποιώντας το πεδίο, για τυχόν διορθώσεις ή αλλαγές.

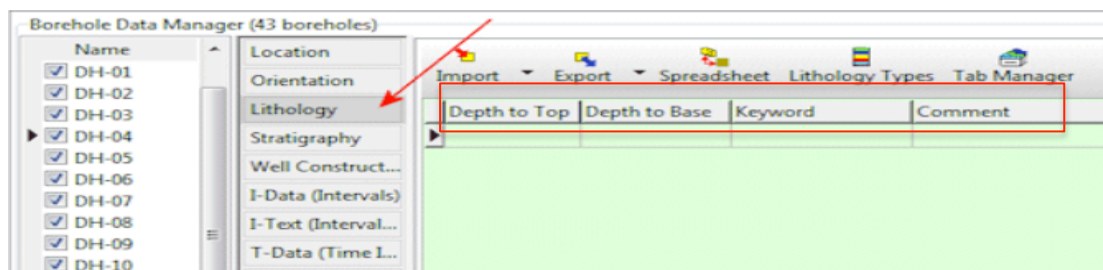


Σχήμα Π.36 Υποχρεωτικά δεδομένα πεδίου Location της γεώτρησης BH_01

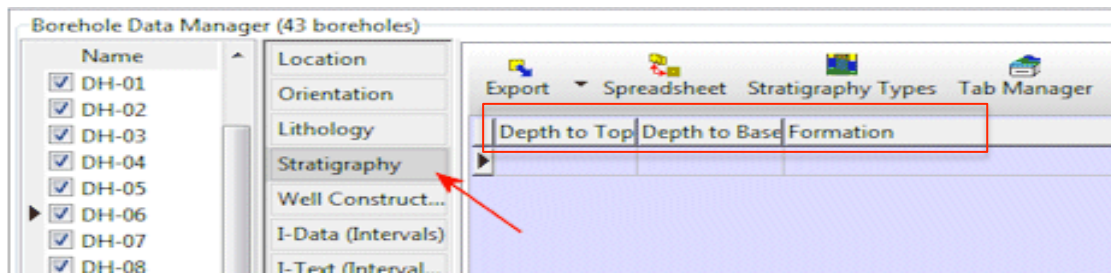
Στα Σχήματα Π.37 και Π.38 είναι ενεργοποιημένα τα πεδία *Lithology* και *Stratigraphy* αντίστοιχα. Φαίνονται οι στήλες εισαγωγής των δεδομένων, που αφορούν τους λιθολογικούς και στρωματογραφικούς τύπους που έχουν οριστεί (βλ. παράγραφο Π.4.1) και τα βάθη όπου εμφανίζονται. Πιο αναλυτικά οι στήλες των δύο πεδίων:

- *Depth to Top (m)*: εισάγεται το μετρούμενο βάθος όπου ξεκινάει ο πρώτος λιθολογικός ή στρωματογραφικός σχηματισμός.
- *Depth to Base (m)*: εισάγεται το μετρούμενο βάθος όπου τελειώνει ο πρώτος λιθολογικός ή στρωματογραφικός σχηματισμός.
- *Keyword / Formation*: εισάγεται το όνομα του παρατηρούμενου λιθολογικού ή στρωματογραφικού σχηματισμού, όπως έχει οριστεί στον αντίστοιχο πίνακα (Stratigraphy / Lithology Types Table). Μη ορισμένοι σχηματισμοί δε γίνεται να εισαχθούν.
- *Comment*: εισάγονται επιπλέον υποσημειώσεις για το διάστημα. Η συγκεκριμένη στήλη υπάρχει μόνο στο πεδίο Lithology, συμπληρώνεται προαιρετικά και δε συμμετέχει στην επεξεργασία των δεδομένων.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα διαστήματα που παρατηρούνται στη συγκεκριμένη γεώτρηση, όπως και για όλες τις γεωτρήσεις.



Σχήμα Π.37 Εισαγωγή δεδομένων στο πεδίο Λιθολογίας (Lithology tab)



Σχήμα Π.38 Εισαγωγή δεδομένων στο πεδίο Στρωματογραφίας (Stratigraphy tab)

Στην παρούσα εργασία ορίστηκαν είκοσι τέσσερις (24) λιθολογικοί και τρεις (3) (λιθο)στρωματογραφικοί σχηματισμοί (βλ. παράγραφο Π.4.1), οι οποίοι χαρακτηρίζουν τα λιθολογικά και τα (λιθο)στρωματογραφικά δεδομένα των τριάντα τριών (33) γεωτρήσεων που εισήχθησαν στη βάση των γεωτρήσεων.

Keyword	Pattern	Fill Percent	Density	G-Value	Show in Legend
clay		40	1.0	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>
silty clay		40	1.0	2.0	<input checked="" type="checkbox"/>
sandy clay		40	1.0	3.0	<input checked="" type="checkbox"/>
gravelly clay		40	1.0	4.0	<input checked="" type="checkbox"/>
sand		70	1.0	5.0	<input checked="" type="checkbox"/>
clayey sand		70	1.0	6.0	<input checked="" type="checkbox"/>
silty sand		70	1.0	7.0	<input checked="" type="checkbox"/>
gravelly sand		70	1.0	8.0	<input checked="" type="checkbox"/>
silt		60	1.0	9.0	<input checked="" type="checkbox"/>
clayey silt		60	1.0	10.0	<input checked="" type="checkbox"/>
gravelly silt		60	1.0	11.0	<input checked="" type="checkbox"/>
sandy silt		60	1.0	12.0	<input checked="" type="checkbox"/>
gravel		80	1.0	13.0	<input checked="" type="checkbox"/>
clayey gravel		80	1.0	14.0	<input checked="" type="checkbox"/>
silty gravel		80	1.0	15.0	<input checked="" type="checkbox"/>
sandy gravel		80	1.0	16.0	<input checked="" type="checkbox"/>
marly gravel		80	1.0	17.0	<input checked="" type="checkbox"/>
marl		50	1.0	18.0	<input checked="" type="checkbox"/>
clayey marl		50	1.0	19.0	<input checked="" type="checkbox"/>
sandy marl		50	1.0	20.0	<input checked="" type="checkbox"/>
gravelly marl		50	1.0	21.0	<input checked="" type="checkbox"/>
sandstone		70	1.0	22.0	<input checked="" type="checkbox"/>
conglomerate		80	1.0	23.0	<input checked="" type="checkbox"/>
limestone		100	1.0	24.0	<input checked="" type="checkbox"/>

Σχήμα Π.39 Πίνακας λιθολογικών σχηματισμών (Lithology Types Table)

Formation	Pattern	Fill Percent	Density	Order	Show in Legend
Plio_Quaternary		100	1.0	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>
Neogene		100	1.0	2.0	<input checked="" type="checkbox"/>
Basement		100	1.0	3.0	<input checked="" type="checkbox"/>

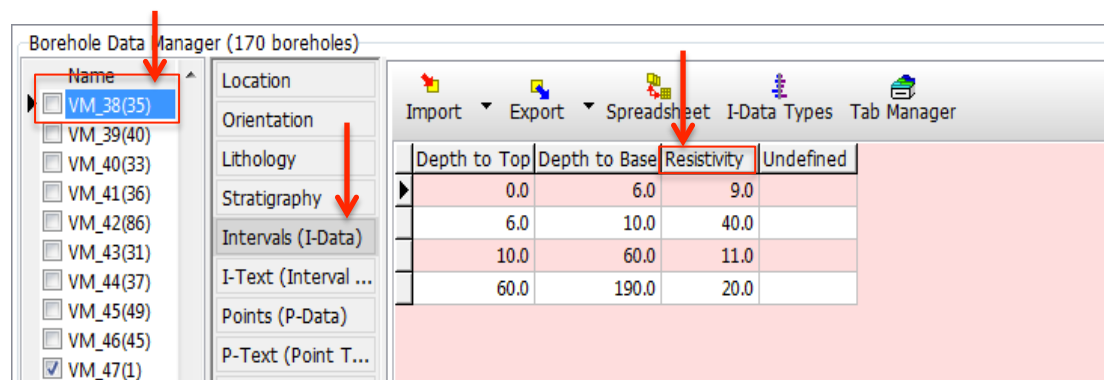
Σχήμα Π.40 Πίνακας (λιθο)στρωματογραφικών αποθέσεων (Stratigraphy Types Table)

Το επόμενο πεδίο που συμπληρώθηκε είναι το *I-Data (Intervals)*. Το λογισμικό ορίζει στην περιγραφή που παρέχει, ότι στο συγκεκριμένο πεδίο εισάγονται δεδομένα από γεωχημικές μετρήσεις και στο πεδίο P-Data (Points) δεδομένα από γεωφυσικές μετρήσεις. Στην παρούσα εργασία τα γεωφυσικά δεδομένα εισήχθησαν στο I-Data πεδίο, δηλ. ως διαστήματα (Intervals) και όχι ως σημεία (Points). Η ιδιότητα που μετρήθηκε και ορίστηκε στον αντίστοιχο πίνακα (I-Data Types Table - βλ. παράγραφο Π.4.1.) είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των γεωλογικών σχηματισμών (βλ. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ) και η στήλη ονομάστηκε: Resistivity (Αντίσταση)

Το πεδίο περιλαμβάνει τις ακόλουθες στήλες εισαγωγής δεδομένων (Σχήμα Π.41):

- *Depth to top (m)*: εισάγεται το μετρούμενο βάθος όπου ξεκινάει το πρώτο διάστημα (Interval).
- *Depth to Base (m)*: εισάγεται το μετρούμενο βάθος όπου τελειώνει το πρώτο διάστημα.
- *Column 1 - Resistivity*: εισάγεται η μέτρηση που αφορά το πρώτο διάστημα.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα διαστήματα βαθών που διακρίθηκαν και αφορούν τη συγκεκριμένη βυθοσκόπηση, εκ των εβδομήντα (70) που καταχωρήθηκαν στη βάση δεδομένων του λογισμικού. Σημειώνεται ότι κάθε βυθοσκόπηση έχει εισαχθεί υπό μορφή γεώτρησης, δηλ. έχει καταχωρηθεί στη στήλη των γεωτρήσεων και περιλαμβάνει όνομα και χωρικά δεδομένα (συντεταγμένες XYZ).



Depth to Top	Depth to Base	Resistivity	Undefined
0.0	6.0	9.0	
6.0	10.0	40.0	
10.0	60.0	11.0	
60.0	190.0	20.0	

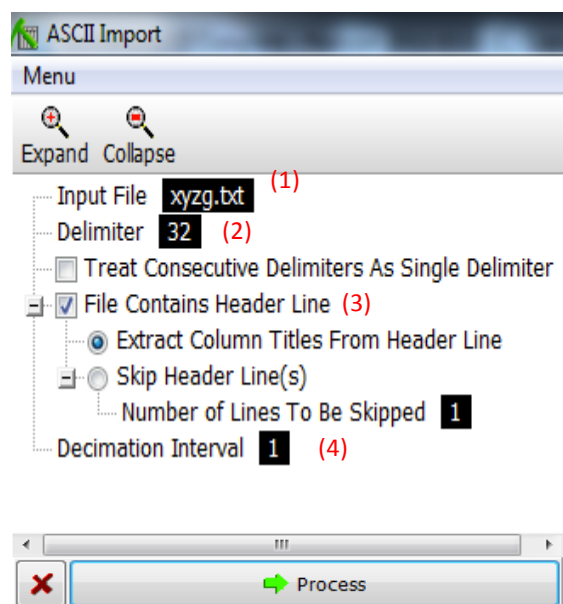
Σχήμα Π.41 Στήλες εισαγωγής δεδομένων πεδίου I-Data

Π.5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ UTILITIES

Τα δεδομένα που πρόκειται να εισαχθούν στο φύλλο δεδομένων Utilities στην προκειμένη περίπτωση, αποτελούνται από σημεία με γνωστές συντεταγμένες (XYZ data). Τα σημεία προέκυψαν από την υφιστάμενη αποτύπωση και συμπληρώθηκαν με στοιχεία τοπογραφικού αναγλύφου από ψηφιοποίηση τοπογραφικών χαρτών της περιοχής μελέτης (λεκάνη Τυμπακίου). Λόγω του μεγάλου όγκου των καταλόγων συντεταγμένων, δε συνίσταται η πληκτρολόγηση ως τρόπος εισαγωγής. Επομένως τα δεδομένα εισάγονται με την εντολή *File / Import / ASCII (Text)* και η αναγνωρίσιμη μορφή του αρχείου κειμένου ASCII περιλαμβάνει:

Κάθε σειρά του κειμένου πρέπει να περιέχει τις συντεταγμένες ενός μόνο σημείου, ενώ κάθε συντεταγμένη πρέπει να διαχωρίζεται από την επόμενη με κενό διάστημα (space - delimited), με κόμμα (comma – delimited) ή με χαρακτήρα tab – delimited. Η αναγραφή επικεφαλίδων στις στήλες (π.χ. επικεφαλίδα Easting-X για τη στήλη με τις συντεταγμένες κατά τον άξονα των X) αποτελεί προαιρετική επιλογή.

Η εκτέλεση της εντολής παραπέμπει σε νέο παράθυρο ρυθμίσεων όπου,



Σχήμα Π.42 Ρυθμίσεις εισαγωγής δεδομένων από αρχείο κειμένου

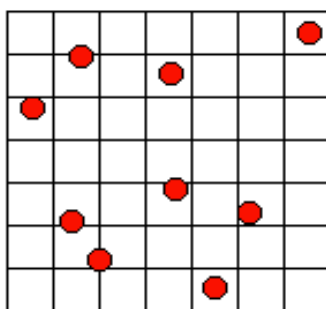
ο χρήστης υποδεικνύει στο λογισμικό: (1) σε ποιο φάκελο βρίσκεται το αρχείο κειμένου που θα εισαχθεί, (2) ποιος τύπος διαχωριστή (delimiter) συντεταγμένων έχει χρησιμοποιηθεί (space, comma, tab – delimited), (3) αν στο αρχείο περιέχονται επικεφαλίδες για τις στήλες δεδομένων και (4) ορίζεται το διάστημα επιλογής των δεδομένων εισαγωγής (*Decimation Interval*), π.χ. για διάστημα: 1, το λογισμικό θα εισάγει όλες τις σειρές του αρχείου, ενώ για διάστημα: 10, θα εισάγει τα δεδομένα ανά δέκα σειρές (δηλ. σειρά 1, 10, 20 κτλ). Μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων επιλέγεται *Process*.

Στη συνέχεια τα δεδομένα εμφανίζονται στο φύλλο δεδομένων Utilities, ο χρήστης ελέγχει την ορθότητα ή την πληρότητά τους και αν χρειαστεί προχωρά σε διορθώσεις ή προσθήκες. Οι διορθώσεις / προσθήκες μπορεί να περιλαμβάνουν την εισαγωγή στηλών ή σειρών (εντολή: *Edit / Columns / Insert* ή *Edit / Rows / Insert*), τη διαγραφή στηλών ή σειρών (εντολή: *Edit / Columns / Delete* ή *Edit / Rows / Delete*), τη συγχώνευση δύο στηλών σε μία τρίτη (εντολή: *Edit / Columns / Merge*), την αφαίρεση χαρακτήρων, όπως κόμματα (commas) ή κενά (spaces), από τα αριθμητικά δεδομένα που πιθανόν να εμποδίζουν την αναγνώρισή τους από το λογισμικό (εντολή: *Edit / Column / Fix*), την εύρεση των απόλυτων τιμών μίας στήλης (εντολή: *Edit / Columns / Math / Absolute*), αριθμητικές πράξεις στήλης με στήλη ή στήλης με σταθερά (εντολή: *Edit / Columns / Math / Column & Column* ή *Edit / Columns / Math / Column & Constant*), την επιλογή δεδομένων από το φύλλο δεδομένων Utilities με συγκεκριμένα κριτήρια, π.χ. απομάκρυνση των συντεταγμένων (XYZ) των σημείων που βρίσκονται εκτός των ορισμένων διαστάσεων της περιοχής μελέτης (Project Dimensions – βλ. παράγραφο Π.2), (εντολή: *Edit / Filter / Remove Data Based On Column Parameters* και π.χ. *Edit / Filter / Remove Points Outside Project Area*) κ.α.

Π.6 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ

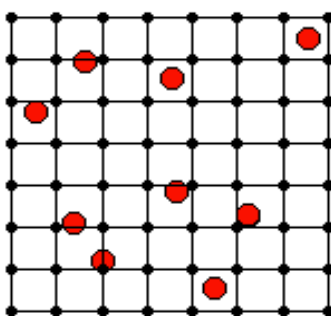
Η καναβοποίηση (ή πλεγματοποίηση) και η μοντελοποίηση αποτελούν βασικές διαδικασίες των λογισμικών προσομοίωσης και υλοποιούνται με μεθόδους ή αλγόριθμους παρεμβολής (Gridding & Modeling methods). Αφορούν την επεξεργασία χωρικών δεδομένων (π.χ. συντεταγμένες από τοπογραφικό ανάγλυφο, συντεταγμένες κολάρων γεωτρήσεων κ.α) και δεδομένων ιδιοτήτων (π.χ. γεωφυσικές μετρήσεις, γεωχημικές συγκεντρώσεις κ.α.) για την κατασκευή πλεγματικών και στερεών μοντέλων (*Grid & Solid Models*).

Η επεξεργασία των χωρικών δεδομένων περιλαμβάνει τη μετατροπή της ακανόνιστης κατανομής τους (Σχήμα Π.43), σύμφωνα με τις XYZ καρτεσιανές συντεταγμένες τους εντός των ορισμένων διαστάσεων μίας περιοχής μελέτης (Project Dimensions), σε καθορισμένη διάταξη ή πλέγμα νέων τιμών παρεμβολής.



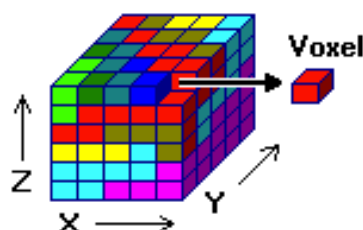
Σχήμα Π.43 Ακανόνιστη κατανομή χωρικών δεδομένων συντεταγμένων XYZ

Κατά τη διαδικασία της καναβοποίησης υπολογίζονται οι άγνωστες XYZ συντεταγμένες των κόμβων του κανάβου (Grid Nodes), με βάση τις γνωστές XYZ συντεταγμένες των δεδομένων. Το αποτέλεσμα είναι ένα αρχείο πλέγματος με κατάληξη *.grd* (grid file), που περιέχει τις υπολογισμένες με μεθόδους παρεμβολής συντεταγμένες XY (προσέγγιση των αγνώστων τιμών στις ενδιάμεσες θέσεις των γνωστών τιμών - *interpolation*) και με την τεχνική της πρόβλεψης συντεταγμένες Z – απόλυτα υψόμετρα (αντίθετο παρεμβολής, δηλ. προσέγγιση αγνώστων τιμών σε θέσεις εκτός των γνωστών τιμών - *extrapolation*) των ισαπέχοντων κόμβων (Σχήμα Π.44).



Σχήμα Π.44 Παρεμβολή τιμών κόμβων πλέγματος (Grid Nodes)

Κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης, η ορισμένων διαστάσεων περιοχή μελέτης υποδιαιρείται σε κελιά (cells) ή *voxels* (κύβοι τριών διαστάσεων) (Σχήμα Π.45). Κάθε *voxel* ορίζεται από τις συντεταγμένες XYZ των κορυφών του, που υπολογίζονται με παρεμβολή σύμφωνα με τη σχετική θέση του στην περιοχή μελέτης, δηλ. τις γνωστές συντεταγμένες XYZ των εισαχθέντων δεδομένων ιδιοτήτων. Η τέταρτη μεταβλητή για κάθε *voxel* (G value) αποτελεί την ποσοτική μέτρηση της φυσικής ιδιότητας που εξετάζεται και υπολογίζεται με βάση τις γνωστές μετρήσεις που έχουν καταχωρηθεί. Το αποτέλεσμα είναι ένα αρχείο τρισδιάστατου πλέγματος με κατάληξη *.mod*.



Σχήμα Π.45 Υποδιαίρεση περιοχής μελέτης σε voxels

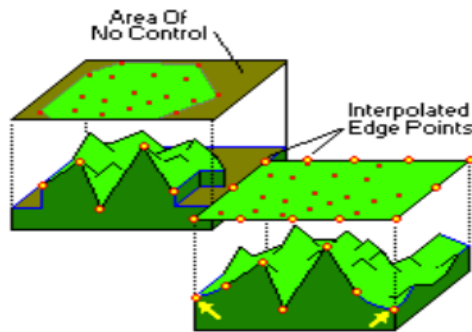
Για την κατασκευή πλεγματικών και στερεών μοντέλων το λογισμικό διαθέτει πολλές μεθόδους παρεμβολής δεδομένων, ενώ στην τρέχουσα μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκαν κυρίως δύο: μέθοδος τριγωνοποίησης (Triangulation) και μέθοδος αντίστροφων αποστάσεων (Inverse - Distance).

Για την κατασκευή πλεγματικών μοντέλων με τη μέθοδο τριγωνοποίησης:

Τα σημειακά δεδομένα (γνωστών XYZ) συνδέονται με (όσο γίνεται) ισόπλευρα τρίγωνα αποτελώντας τις κορυφές κάθε τριγώνου. Μετά το σχηματισμό του 'δικτύου τριγώνων' (γνωστό και ως πλέγμα Delaunay), υπολογίζεται η κλίση κάθε τριγώνου από τις γνωστές συντεταγμένες XYZ των σημείων – κορυφών (control points). Στους κόμβους του πλέγματος (Σχήμα Π.43, Π.44) που βρίσκονται εντός κάθε τριγώνου, εκχωρείται μία τιμή υψομέτρου (άξονας των Z) σύμφωνα με την τομή των κόμβων με το κεκλιμένο τριγωνικό επίπεδο, ενώ οι συντεταγμένες XY των κόμβων υπολογίζονται με παρεμβολή των γνωστών XY των κορυφών των τριγώνων.

Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των κόμβων που βρίσκονται εκτός των τριγώνων (Σχήμα Π.46), η μέθοδος τριγωνοποίησης παρέχει δύο επιλογές: (1) Παρεμβολή συνοριακών σημείων (Interpolate Edge Points) και (2) Χωρίς παρεμβολή συνοριακών σημείων (No Edge Interpolation).

Αν επιλεγθεί η επιλογή (1), τοποθετούνται 5 ισαπέχοντα σημεία (εκ των οποίων, ένα σε κάθε γωνία) κατά μήκος κάθε συνοριακής πλευράς της περιοχής μελέτης (Σχήμα Π.46), στα οποία εκχωρούνται συντεταγμένες Z που θα υπολογιστούν με τη μέθοδο αντίστροφων αποστάσεων (περιγράφεται στη συνέχεια), με βάση τις γνωστές Z των χωρικών δεδομένων. Αν επιλεγθεί η επιλογή (2), για τα σημεία εκτός του δικτύου Delaunay ορίζεται από το χρήστη συγκεκριμένη τιμή Z στην περίπτωση που θα συμπεριληφθούν ή απροσδιόριστη τιμή (τιμή *null*: $-e^{27}$) στην περίπτωση που θα αγνοηθούν.



Σχήμα Π.46 Παρεμβολή των συνόρων της περιοχής μελέτης με συνδυασμό δύο μεθόδων

Για την κατασκευή πλεγματοικών μοντέλων με τη μέθοδο αντίστροφων αποστάσεων: Οι συντεταγμένες XY υπολογίζονται με παρεμβολή των γνωστών XY και η τιμή που αφορά το υψόμετρο – Z, που εκχωρείται σε κάθε κόμβο του πλέγματος (Σχήμα Π.43, Π.44) αποτελεί τον σταθμισμένο μέσο όρο όλων των γνωστών σημείων ή των γειτονικών γνωστών σημείων σε δεδομένη ακτίνα 45° , που γίνεται να μεταβληθεί από το χρήστη. Η τιμή κάθε γνωστού σημείου σταθμίζεται σύμφωνα με την αντιστρόφως ανάλογη απόστασή του από το άγνωστο σημείο – κόμβο παρεμβολής, υψωμένη σε δύναμη με εκθέτη (Weighting Exponent) που ορίζει ο χρήστης. Μία γενική μαθηματική έκφραση της μεθόδου αποτελεί:

$$Z - node = \sum_{i=1}^N w_i \cdot z_i$$

όπου, Z: ζητούμενη τιμή υψομέτρου αγνώστου σημείου, $z_1, z_2, z_3, \dots, z_N$: τιμή υψομέτρου γνωστού σημείου, N: αριθμός γνωστών σημείων που συμμετέχουν και w_i : συντελεστής βάρους που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$w_i = \frac{d_i^{-n}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-n}}$$

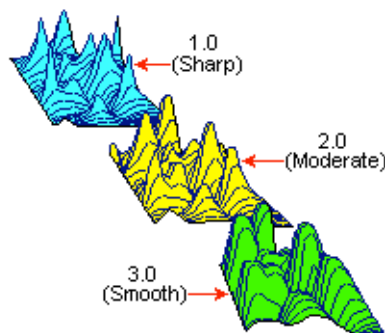
όπου, $d_1, d_2, d_3, \dots, d_N$: αποστάσεις αγνώστου σημείου από τα γνωστά σημεία (1,2,3, ...,N), και n: ο συντελεστής επιρροής της απόστασης αγνώστου και γνωστών σημείων (Weighting Exponent).

Ο συντελεστής n καθορίζει το ρυθμό μείωσης του βάρους. Για $n=0$ δεν υπάρχει μείωση και επομένως η τιμή Z του κάθε σημείου παρεμβολής υπολογίζεται ως ο μέσος όρος όλων των τιμών Z των γνωστών σημείων. Όσο αυξάνεται ο συντελεστής n, τόσο μικρότερη επιρροή έχουν τα πιο μακρινά γνωστά σημεία στην τιμή που υπολογίζεται και εκχωρείται στο άγνωστο σημείο.

Η επιλογή του συντελεστή n εξαρτάται από το βαθμό της επιθυμητής εξομάλυνσης της παρεμβολής (Σχήμα Π.47), την πυκνότητα και την κατανομή των γνωστών σημείων και τη μέγιστη απόσταση επιρροής που επιτρέπει το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιούνται.

Στην παρούσα προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε συντελεστής $n=2$, δηλ. παρεμβολή τετραγωνικά σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων (inverse distance squared weighted interpolation).

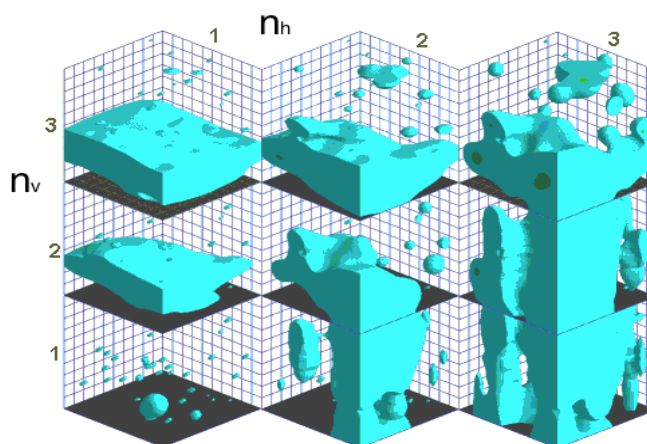
Για την έτερη ρύθμιση της παρεμβολής, Number of Points, δηλ. τον μέγιστο αριθμό γνωστών σημείων που θα συμμετέχουν στην προσέγγιση των αγνώστων τιμών υψομέτρου, επιλέχθηκε ο αριθμός 8 (προτεινόμενος από το λογισμικό).



Σχήμα Π.47 Εξομάλυνση αντίστροφων αποστάσεων παρεμβολής

Για την κατασκευή στερεών μοντέλων χρησιμοποιήθηκε *παράλλαξη* της μεθόδου αντίστροφων αποστάσεων (Inverse Distance Weighting), κατά την οποία δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης μεταξύ των αγνώστων κόμβων και των γνωστών σημείων. Συνεπώς η επιλογή των γνωστών σημείων που θα σταθμιστούν για τον υπολογισμό του αγνώστου κόμβου, θα κατευθυνθεί από τη ρυθμισμένη κλίση. Οι δύο επιμέρους συντελεστές βάρους αφορούν την οριζόντια (Horizontal, n_h) και την κάθετη διεύθυνση (Vertical, n_v). Στο Σχήμα Π.48 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της επιρροής της κλίσης.

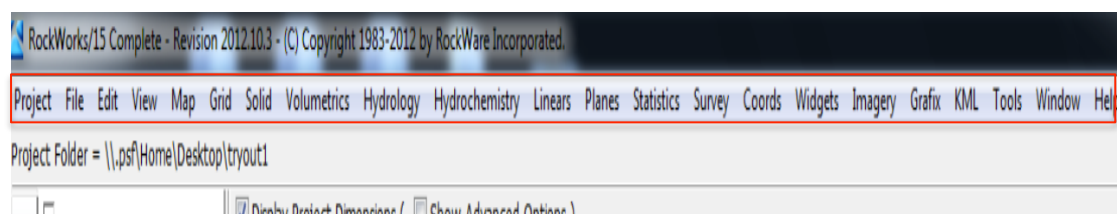
Στην παρούσα εργασία ορίστηκε $n_h=2$ και $n_v=5$, ώστε η μοντελοποίηση να αποκτήσει οριζόντια κλίση και να αναδειχθούν οι μεταβολές της φυσικής ιδιότητας που εξετάζεται (ειδική ηλεκτρική αντίσταση - βλ. παράγραφο Π.5.1 και ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3) σε μορφή οριζόντιων στρωμάτων. Όσον αφορά τον αριθμό των γνωστών σημείων που θα συμμετέχουν στην προσέγγιση των συντεταγμένων XYZ των κορυφών κάθε voxel, δεν τέθηκε κάποιος περιορισμός ή φίλτρο, δηλ. επιλέχθηκε All Points.



Σχήμα Π.48 Επιρροή συντελεστών βάρους με μέθοδο παρεμβολής: Inverse Distance Weighting

Π.7 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΝΤΟΛΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ UTILITIES

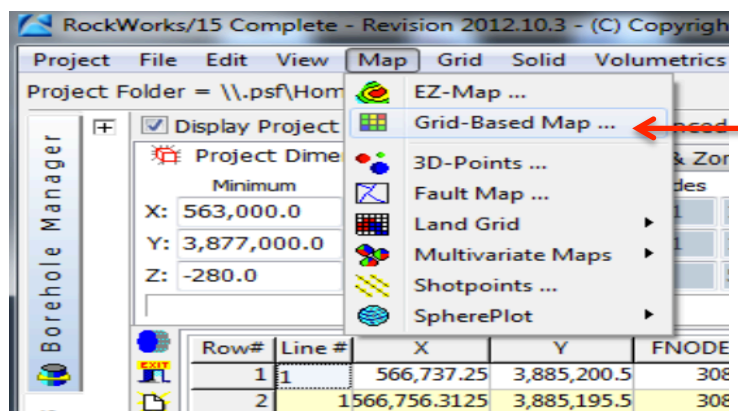
Τα χωρικά δεδομένα, μετά την εισαγωγή και τον έλεγό τους, είναι διαθέσιμα για όποια παράμετρο σχεδίασης επιλεχθεί. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με τις εντολές που βρίσκονται στην κεντρική γραμμή εντολών (Σχήμα Π.49). Η περιγραφή που ακολουθεί περιορίζεται στις εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία.



Σχήμα Π.49 Κεντρική γραμμή εντολών Utilities (Project, File, Edit, View, Map κτλ)

Με την εντολή Map παράγονται διάφοροι τύποι μοντέλων και χαρτών, ανάλογα με τη φύση των δεδομένων που εισάγονται και τις ανάγκες χαρτογράφησης.

Για την κατασκευή του πλεγματικού μοντέλου της επιφάνειας της περιοχής μελέτης από τοπογραφικό υπόβαθρο σε τρεις διαστάσεις επιλέγεται η εντολή *Map / Grid-Based Map* (Σχήμα Π.50).

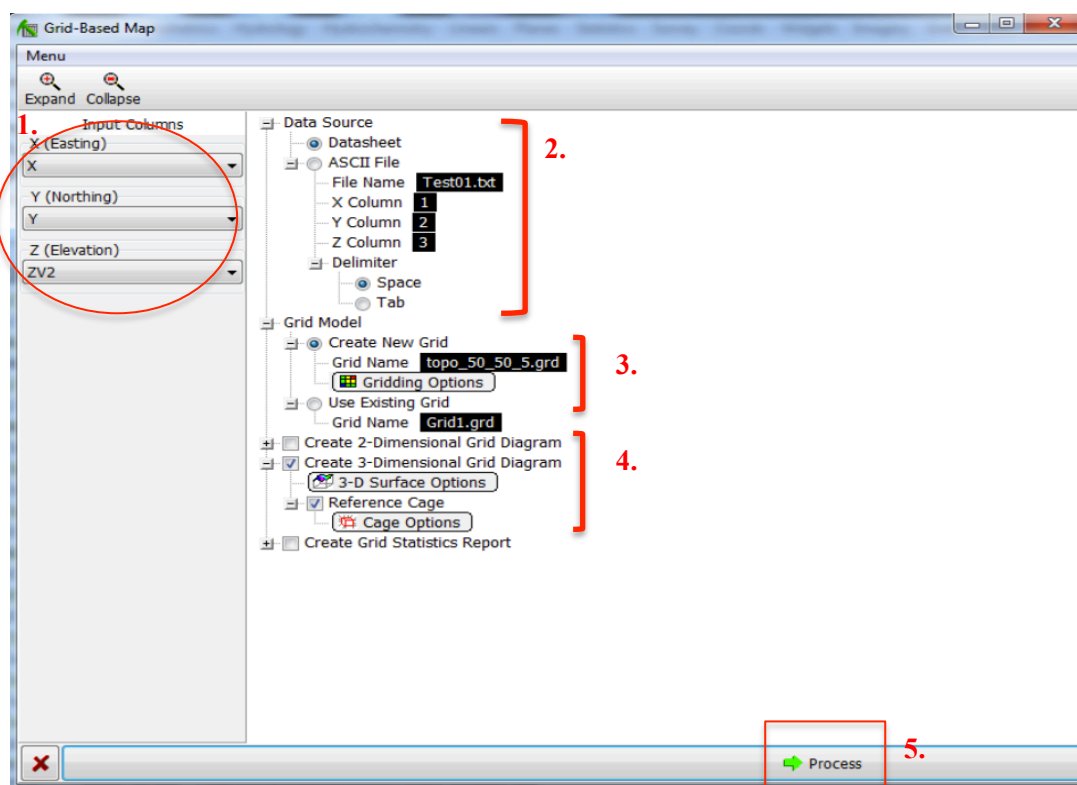


Σχήμα Π.50 Εντολή *Map / Grid-Based Map*

Οι απαραίτητες ρυθμίσεις γίνονται στο νέο παράθυρο που παραπέμπει η εκτέλεση της προαναφερθείσας εντολής. Οι ρυθμίσεις περιλαμβάνουν τις παρακάτω επιλογές και η αρίθμηση αντιστοιχεί στους αριθμούς όπως φαίνονται στο Σχήμα Π.51:

1. Καθορίζονται οι επικεφαλίδες των στηλών που περιέχουν τις συντεταγμένες κατά τους άξονες X, Y, Z όπως έχουν διαμορφωθεί στο φύλλο δεδομένων Utilities. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην αντιστοίχιση των στηλών, ώστε το λογισμικό να αντλήσει τις συντεταγμένες από τις κατάλληλες στήλες. Η αντιστοιχία αγνοείται αν χρησιμοποιηθεί βοηθητικό αρχείο δεδομένων.

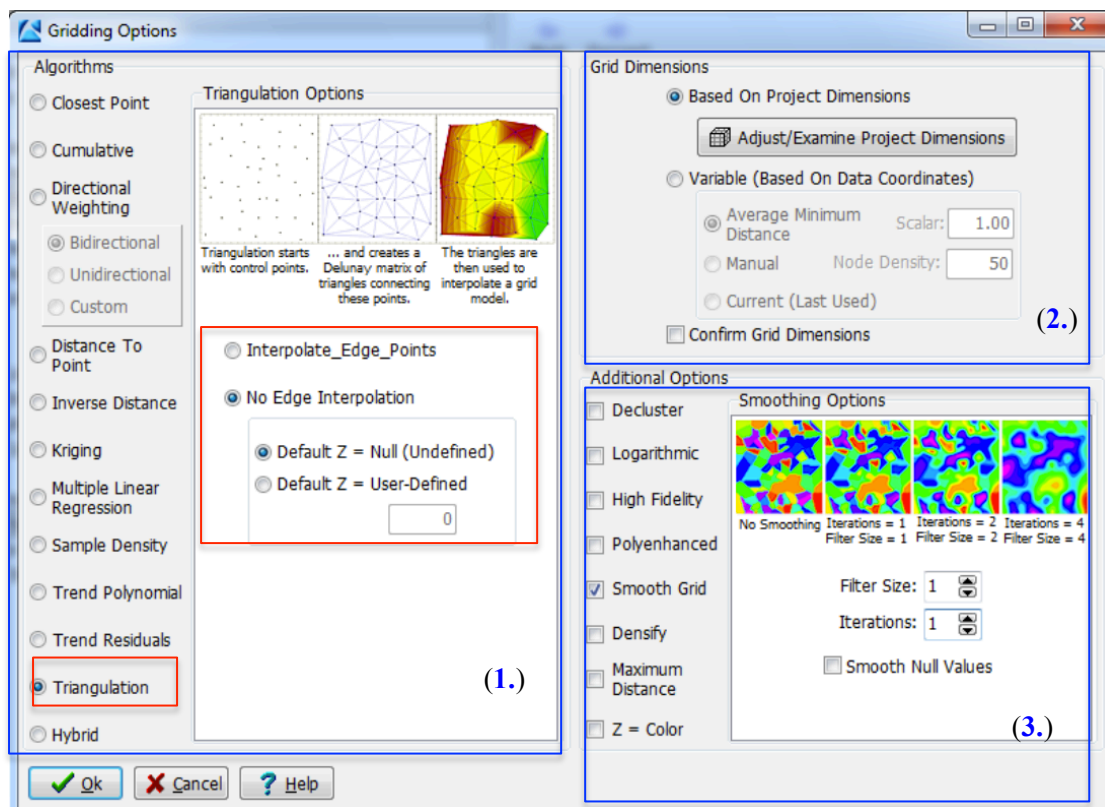
2. Καθορίζεται η πηγή άντλησης των δεδομένων από το λογισμικό (Data Source). Επιλέγεται *Datasheet* (πηγή: φύλλο δεδομένων Utilities και ισχύει η ρύθμιση 1.) ή *ASCII File* (πηγή: εξωτερικό αρχείο κειμένου). Σημειώνεται ότι η επιλογή του αρχείου κειμένου ως πηγή δεδομένων μπορεί να αντικαταστήσει την εντολή *File / Import / ASCII (Text)* (βλ. παράγραφο Π.5.2). Αν τελικά επιλεχθεί *ASCII File* ως πηγή, με κλικ στο *File Name* καθορίζεται που βρίσκεται το αρχείο κειμένου, γίνεται η ανάλογη αντιστοίχιση της ρύθμισης 1. στα πεδία ακριβώς από κάτω και επιλέγεται ο διαχωριστής των στηλών του αρχείου (*Delimiter*: space ή tab).



Σχήμα Π.51 Παράθυρο ρυθμίσεων πλεγματικού μοντέλου σε τρεις διαστάσεις

3. Όσον αφορά την κατασκευή πλεγματικού μοντέλου (Grid Model), επιλέγεται *Create New Grid* (δημιουργία νέου πλέγματος), ορίζεται το όνομα αποθήκευσής του (πεδίο *Grid Name*) σε αρχείο τύπου *.grd* και με κλικ στο πεδίο *Gridding Options* (επιλογές καναβοποίησης) εμφανίζεται νέο παράθυρο ρυθμίσεων (Σχήμα Π.52).

Το νέο παράθυρο εμπεριέχει τρεις τύπους ρυθμίσεων: (1.) αλγόριθμοι παρεμβολής, (2.) διαστάσεις και κόμβοι του πλεγματικού μοντέλου (δηλ. διαστάσεις της περιοχής μελέτης – βλ. παράγραφο Π.2), (3.) πρόσθετες επιλογές καναβοποίησης, που δρουν αφού κατασκευαστεί το πλεγματικό μοντέλο και ανεξαρτήτως του αλγορίθμου παρεμβολής που έχει επιλεχθεί.



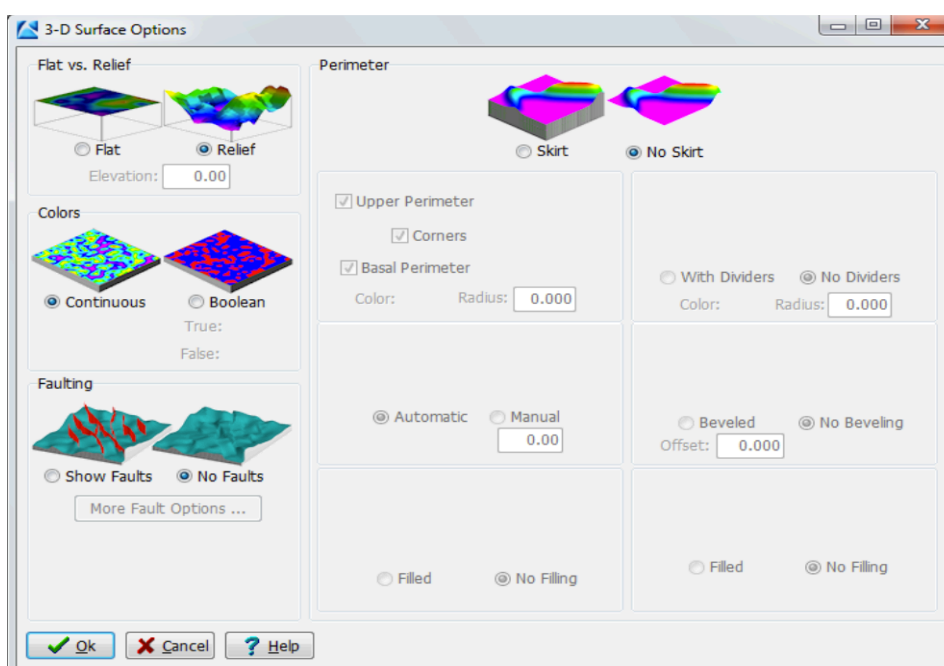
Σχήμα Π.52 Ρυθμίσεις καναβοποίησης (Gridding Options)

Για τις ρυθμίσεις (1.) επιλέγεται ο αλγόριθμος τριγωνοποίησης, χωρίς παρεμβολή συνοριακών σημείων με τιμή υψομέτρου *null* (βλ. παράγραφο Π.6).

Για τις ρυθμίσεις (2.) επιλέγεται *Based on Project Dimensions*, δηλ. οι τρέχουσες διαστάσεις της περιοχής μελέτης (current Project Dimensions - βλ. παράγραφο Π.2) να αποτελούν τις διαστάσεις του πλεγματοειδούς μοντέλου. Η συγκεκριμένη επιλογή προτείνεται για τις περιπτώσεις όπου πολλαπλά μοντέλα πρόκειται να συγκριθούν ή να συνεργαστούν και επομένως χρειάζεται μία κοινή διαστασιοποίηση. Με την επιλογή *Adjust Project Dimensions* ελέγχονται ή διορθώνονται οι τρέχουσες διαστάσεις.

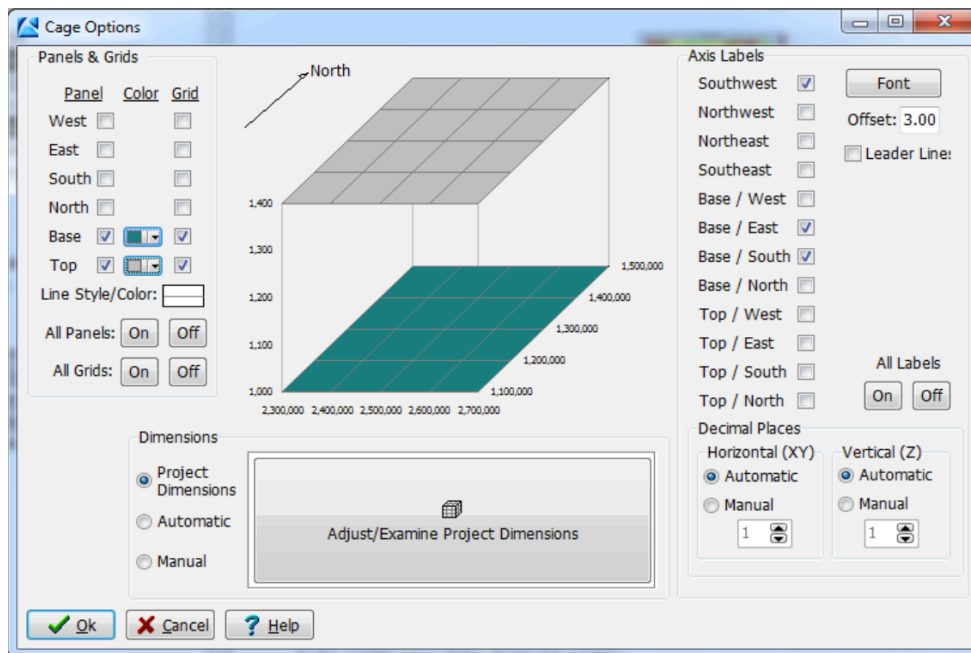
Για τις ρυθμίσεις (3.) επιλέγεται *Smooth Grid*, ώστε να απομακρυνθούν οι ψευδείς τιμές (noise) από το πλέγμα, εκχωρώντας νέα τιμή Z σε κάθε κόμβο που προκύπτει από το μέσο όρο των γειτονικών τιμών. Για την επιμέρους επιλογή *Filter Size*, που καθορίζει τον αριθμό των γειτονικών κόμβων, επιλέγεται 1 και ο μέσος όρος θα συνυπολογιστεί από τον κάθε κόμβο και των αμέσως 8 γειτονικών του. Με μεγαλύτερο *Filter Size* αυξάνεται ο αριθμός των γειτονικών κόμβων. Για την επιλογή *Iterations*, επιλέγεται 1 και η διαδικασία γίνεται μία φορά.

4. Αφού παραχθεί το πλεγματοκό μοντέλο της επιφάνειας του εδάφους, γίνεται να απεικονισθεί με δισδιάστατο ή με τρισδιάστατο διάγραμμα. Επιλέγεται τρισδιάστατη απεικόνιση (Create 3-Dimensional Grid Diagram – Σχήμα Π.51) και με την εκτέλεση της υπο-εντολής *3-D Surface Options* εμφανίζεται νέο παράθυρο επιλογών (Σχήμα Π.53). Για την πρώτη ρύθμιση επιλέγεται *Relief* (αντί για *Flat*), ώστε η επιφάνεια να απεικονισθεί με τρισδιάστατο ανάγλυφο. Η δεύτερη ρύθμιση αφορά τα χρώματα απεικόνισης (*Colors*) και επιλέγεται *Continuous* (αντί για *Boolean*), ώστε οι τιμές *Z* του πλεγματοκού μοντέλου να απεικονισθούν με εύρος χρωμάτων. Στην επόμενη ρύθμιση επιλέγεται *No Faults*, καθώς δε χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ρηγμάτων και για τις ρυθμίσεις περιμέτρου επιλέγεται *No Skirt*, δηλ. η περίμετρος του τρισδιάστατου διαγράμματος της επιφάνειας δε θα έχει περίζωμα.



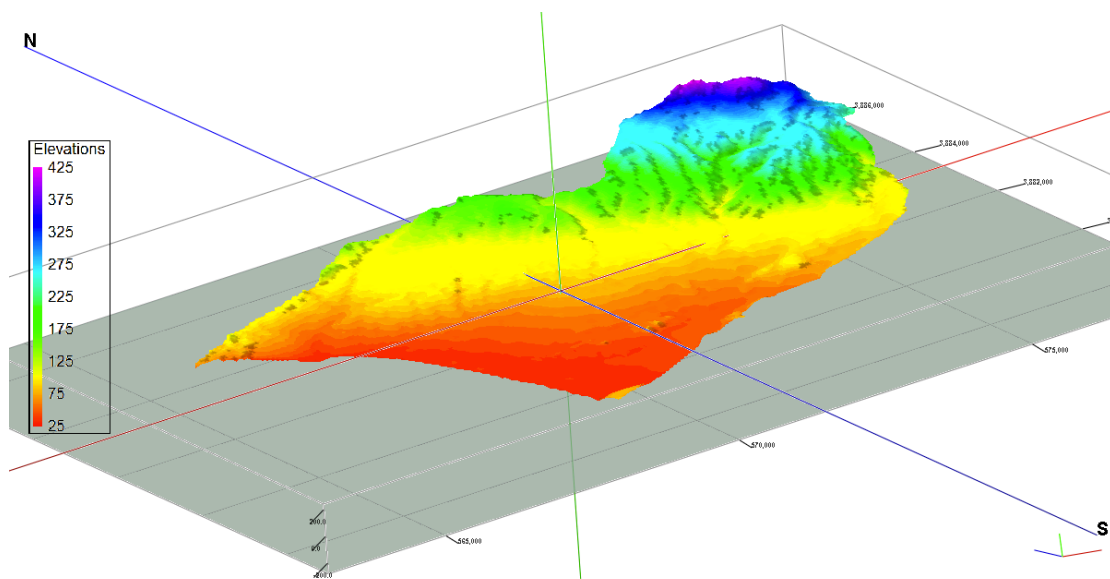
Σχήμα Π.53 Ρυθμίσεις επιφάνειας (3-D Surface Options)

Με την δεύτερη υπο-εντολή κατασκευάζεται ένα κελί αναφοράς (*Reference Cage*), το οποίο περικλείει την απεικόνιση. Ότι αφορά την εμφάνιση και τη σχεδίαση του κελιού (διαστάσεις, χρώματα, άξονες κτλ) ρυθμίζεται από το νέο παράθυρο (Σχήμα Π.54) που εμφανίζεται με κλικ στην επιλογή *Cage Options* (ρυθμίσεις κελιού).



Σχήμα Π.54 Ρυθμίσεις κελιού αναφοράς (Cage Options)

5. Όταν ρυθμιστούν όλες οι παράμετροι, επιλέγεται Process και ολοκληρώνεται η διαδικασία.

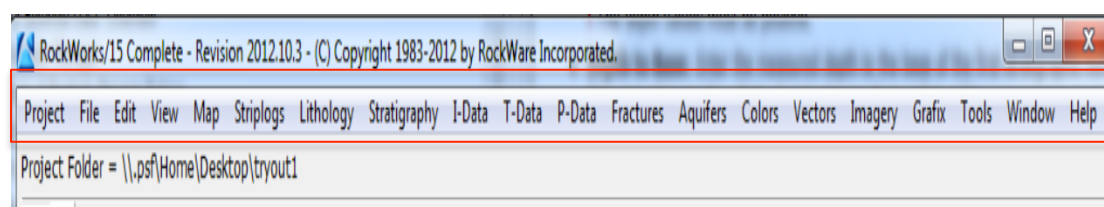


Σχήμα Π.55 Τρισδιάστατο πλεγματοτικό μοντέλο της επιφάνειας της περιοχής μελέτης (λεκάνης Τυμπακίου) με τοπογραφικό ανάγλυφο και με κατακόρυφη υπερύψωση x3 (vertical exaggeration).

Για την εμφάνιση χρωματικού υπομνήματος των υψομετρικών μεταβολών στο τρισδιάστατο διάγραμμα του πλεγματοτικού μοντέλου της επιφάνειας εκτελείται η εντολή *Edit / Add Legend / Color Legend*. Υποστηρίζεται η προσαρμογή του υπομνήματος στο μοντέλο, ρυθμίζοντας το όνομα και τα υψομετρικά ισοδιαστήματά του με κλικ στο πεδίο Legend στη στήλη δεξιά στο παράθυρο απεικόνισης.

Π.8 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΝΤΟΛΩΝ ΒΑΣΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

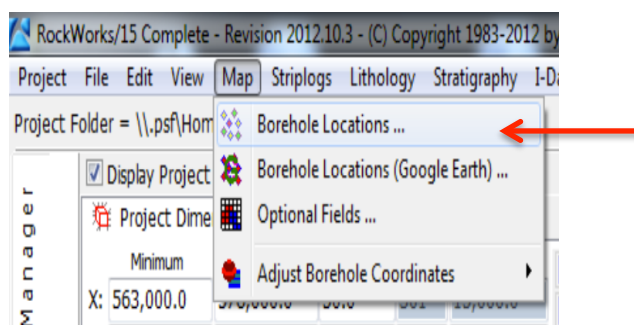
Επόμενο βήμα μετά την εισαγωγή των δεδομένων γεωτρήσεων είναι η επεξεργασία τους. Οι εντολές διαχείρισης των δεδομένων, οι οποίες σχολιάστηκαν στην εισαγωγική περιγραφή του περιβάλλοντος Borehole Manager (βλ. παράγραφο Π.4.1), και οι εντολές επεξεργασίας των δεδομένων βρίσκονται στην κεντρική γραμμή εντολών (Σχήμα Π.56). Ακολουθεί περιγραφή των υπόλοιπων εντολών της συγκεκριμένης προσομοίωσης: *Map / Borehole Locations*, *Striplogs / Single Log (2D)*, *Striplogs / Multi-Log Section*, *Striplogs / Multi-Log 3D*, *Stratigraphy / Model*, *Stratigraphy / Section / Straight (Straight-Line Correlations)*, *Stratigraphy / Fence / Modeled (Interpolated Surface Models)*, *Stratigraphy / Structural Elevations / 2-Dimensional*, *Stratigraphy / Stratigraphic Thicknesses / 2-Dimensional (Isopach)*, *I-Data / Model*, *I-Data / Section*.



Σχήμα Π.56 Κεντρική γραμμή εντολών Borehole Manager (Project, File, Edit, View και Map, Striplogs, Lithology, Stratigraphy, I-Data κτλ)

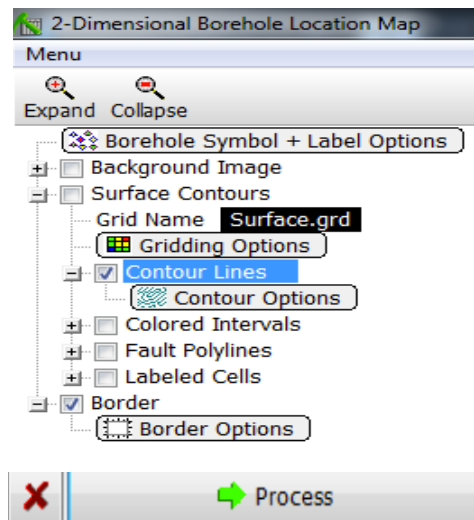
Π.8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΜΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Το περίγραμμα της περιοχής μελέτης με την κατανομή των γεωτρητικών και των γεωηλεκτρικών δεδομένων κατασκευάζεται με την εκτέλεση της εντολής *Map / Borehole Locations* (Σχήμα Π.57) και ρύθμιση των παραμέτρων στο παράθυρο που εμφανίζεται (Σχήμα Π.58), αφού αρχικά επιλεχθούν οι γεωτρήσεις ή / και οι βυθοσκοπήσεις που θα απεικονιστούν.



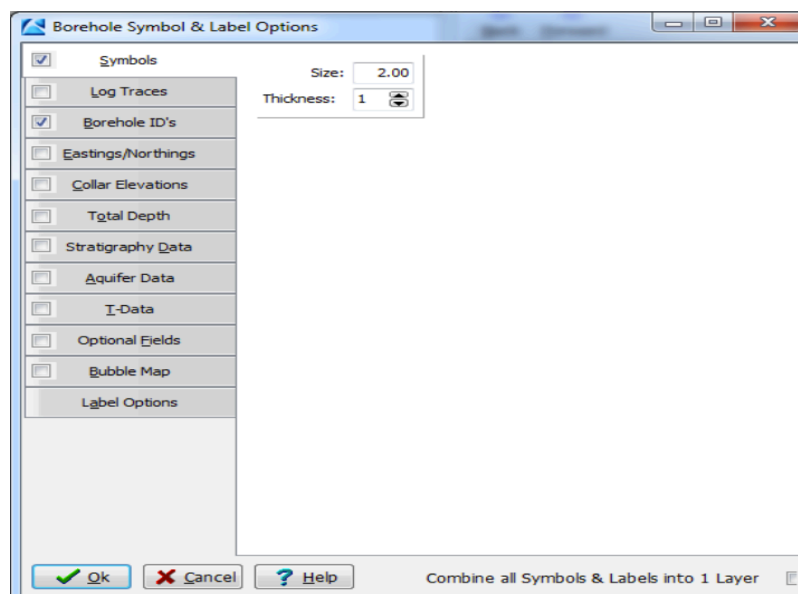
Σχήμα Π.57 Εντολή *Map / Borehole Locations*

Στο παράθυρο ρυθμίσεων της εντολής: με κλικ στο πεδίο Borehole Symbol + Label Options ανοίγει νέο παράθυρο (Σχήμα Π.59), όπου ο χρήστης καθορίζει τη σχεδίαση των ταυτοτήτων των γεωτρήσεων που θα συμμετέχουν στο περίγραμμα (σύμβολα και ταυτότητες γεωτρήσεων, μέγεθος και τύπος γραμματοσειρών κτλ).

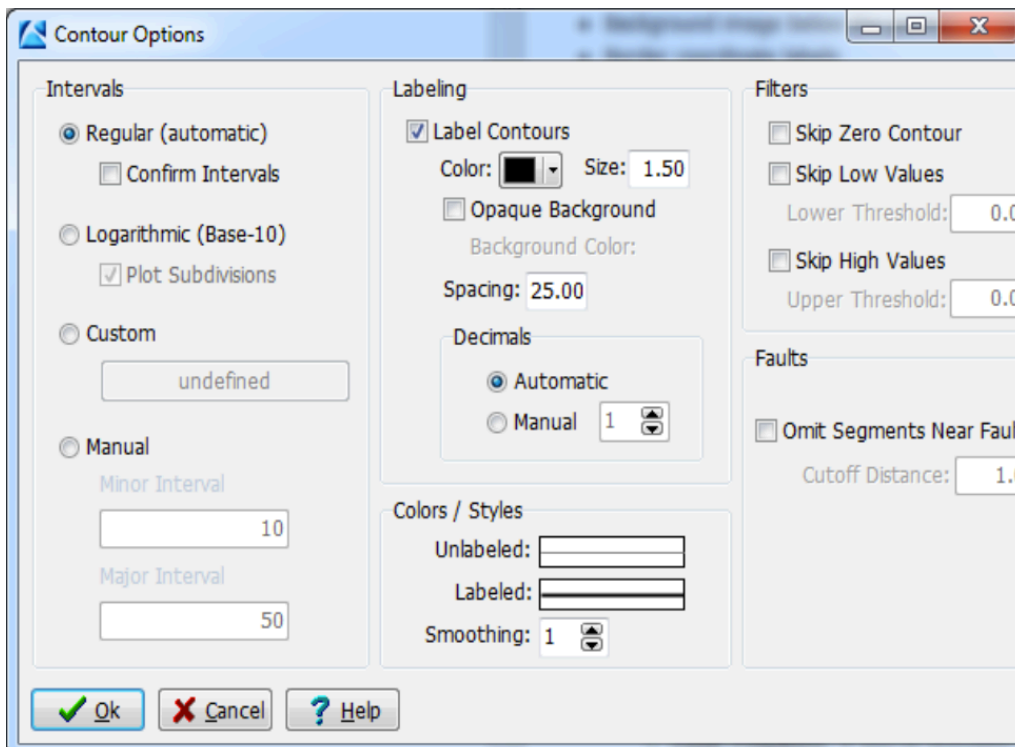


Σχήμα Π.58 Ρυθμίσεις εντολής *Map / Borehole Locations*

Επιλέγοντας Surface Contours απεικονίζονται στο περίγραμμα οι υψομετρικές μεταβολές της επιφάνειας με την μορφή ισοϋψών γραμμών (*Contour Lines*). Για τις ρυθμίσεις καναβοποίησης (*Gridding Options*) επιλέγεται η μέθοδος τριγωνοποίησης χωρίς παρεμβολή συνοριακών κόμβων με τιμή υψομέτρου *null* (βλ. παράγραφο Π.6) και για τις διαστάσεις του περιγράμματος επιλέγεται *Based on Project Dimensions*, ώστε να αντληθούν από τις τρέχουσες (βλ. παράγραφο Π.2). Στη συνέχεια ρυθμίζονται οι παράμετροι των ισοϋψών στο αντίστοιχο παράθυρο (εμφανίζεται με κλικ στο πεδίο *Contour Options* - Σχήμα Π.60) και τέλος το περίγραμμα οριοθετείται επιλέγοντας Border και ρυθμίζοντας τις αντίστοιχες παραμέτρους στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται με κλικ στο πεδίο *Border Options* (σχεδίαση περιμετρικών αξόνων, τίτλοι αξόνων κτλ). Η διαδικασία ολοκληρώνεται επιλέγοντας Process και η τελική απεικόνιση προβάλεται στο περιβάλλον οπτικοποίησης *RockPlot2D* (βλ. παράγραφο Π.3). Στην περίπτωση που διατίθεται η περίμετρος της περιοχής, προσαρτάται στο περίγραμμα με την εντολή *File / Append*.



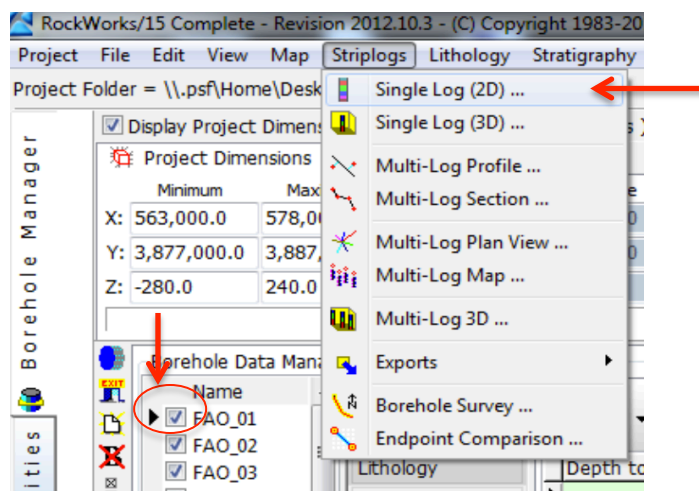
Σχήμα Π.59 Borehole Symbol + Label Options



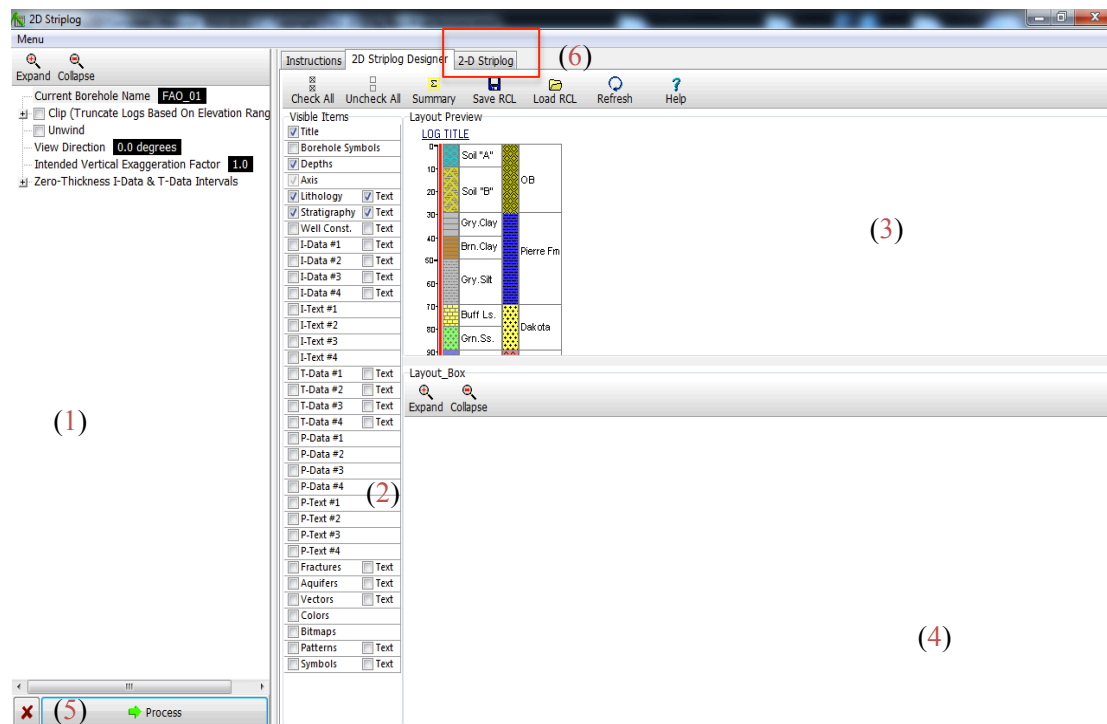
Σχήμα Π.60 Ρυθμίσεις *ισοϋψών* [Επιλέγεται Regular (automatic) για τη ρύθμιση των διαστημάτων των ισοϋψών και μαύρο χρώμα μεγέθους 1.50 για τις ταυτότητες των ισοϋψών.]

Π.8.2 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Επιλέγεται η γεώτρηση που πρόκειται να απεικονιστεί (μαύρος κέρσορας επί της γεώτρησης), εκτελείται η εντολή *Striplogs / Single Log (2D)* (Σχήμα Π.61) και εμφανίζεται νέο παράθυρο ρυθμίσεων (Σχήμα Π.62).



Σχήμα Π.61 Εντολή *Striplogs / Single Log (2D)*

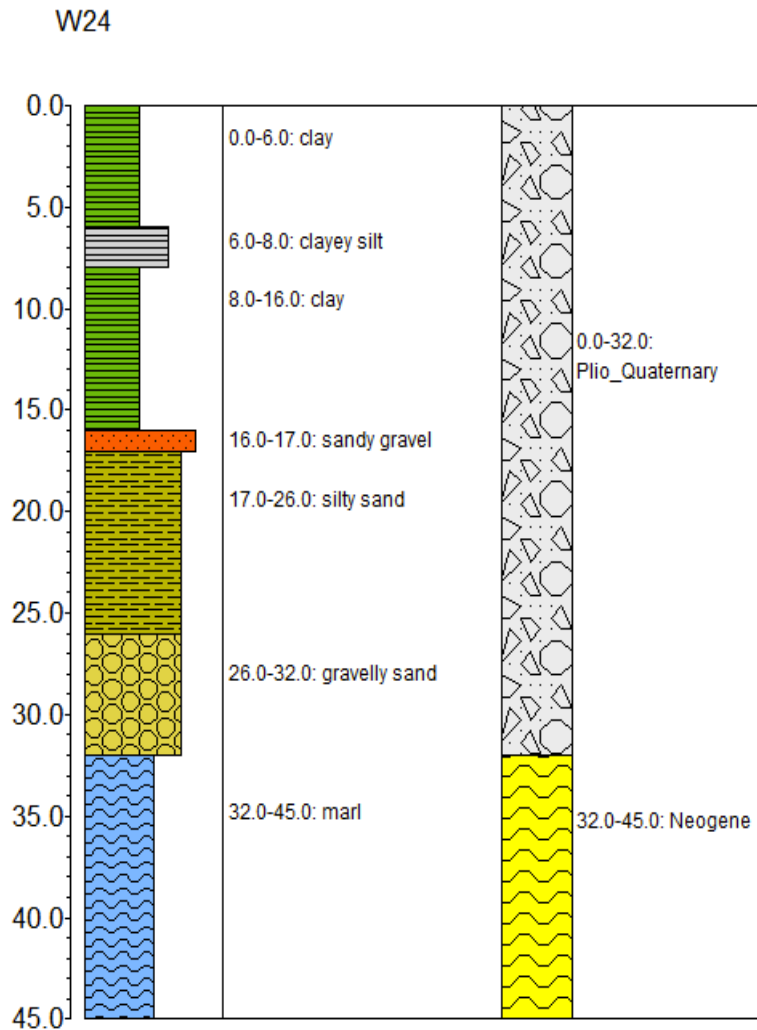


Σχήμα Π.62 Παράθυρο ρυθμίσεων εντολής *Striplogs / Single Log (2D)*

Στο παραπάνω σχήμα: (1) οι ρυθμίσεις στο αριστερό τμήμα του παραθύρου δε χρησιμοποιήθηκαν και δεν αναλύονται, (2) από τη στήλη στο κέντρο του παραθύρου επιλέγονται οι τύποι δεδομένων που θα συμμετέχουν στην απεικόνιση, (3) στο δεξιά και πάνω τμήμα του παραθύρου ρυθμίζεται η σχετική τοποθέτηση των τύπων δεδομένων στην απεικόνιση (τοποθετούνται με τη σειρά επιλογής τους από την κεντρική στήλη, αριστερά προς δεξιά, ενώ γίνεται να αλλάξει η θέση και το μέγεθός τους και με το ποντίκι - *drag and drop*), (4) στο δεξιά και κάτω τμήμα του παραθύρου ρυθμίζεται η σχεδίαση και εμφάνιση που θα έχει στην απεικόνιση ο κάθε τύπος δεδομένων που θα επιλεγεί (οι ρυθμίσεις σχεδίασης είναι διαφορετικές για κάθε τύπο και εμφανίζονται στο τμήμα 4 με κλικ στον αντίστοιχο τύπο της κεντρικής στήλης 2), (5) όταν γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις επιλέγεται *Process* και ολοκληρώνεται η διαδικασία και (6) προβάλλεται η απεικόνιση σε νέα καρτέλα, που αποτελεί το περιβάλλον οπτικοποίησης *RockPlot2D*.

Αν η απεικόνιση είναι αποδεκτή, ο χρήστης μπορεί να προβεί σε αποθήκευση / εκτύπωση / εξαγωγή κ.α. με τις αντίστοιχες εντολές στο *RockPlot2D* ή να επιστρέψει στην προηγούμενη καρτέλα *2D Striplog Designer* και να την επαναρυθμίσει μέχρι να αποκτήσει την επιθυμητή μορφή.

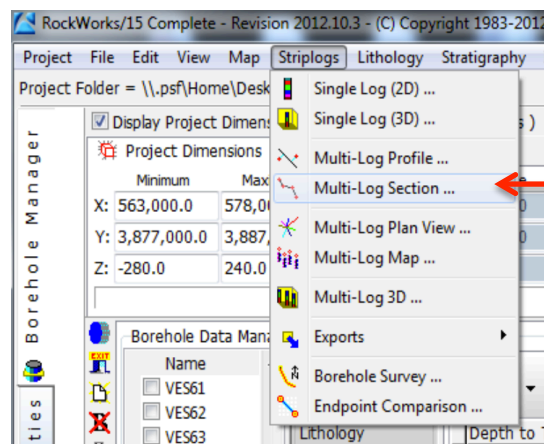
Στην τρέχουσα μοντελοποίηση επιλέχθηκαν από την κεντρική στήλη (2) οι επιλογές *Title*, *Depths*, *Lithology*, *Lithology Text*, *Stratigraphy* και *Stratigraphy Text*, έγιναν οι ρυθμίσεις σχεδίασης και προέκυψε για τη γεώτρηση **W24** η παρακάτω κατακόρυφη δισδιάστατη απεικόνιση (Σχήμα Π.63).



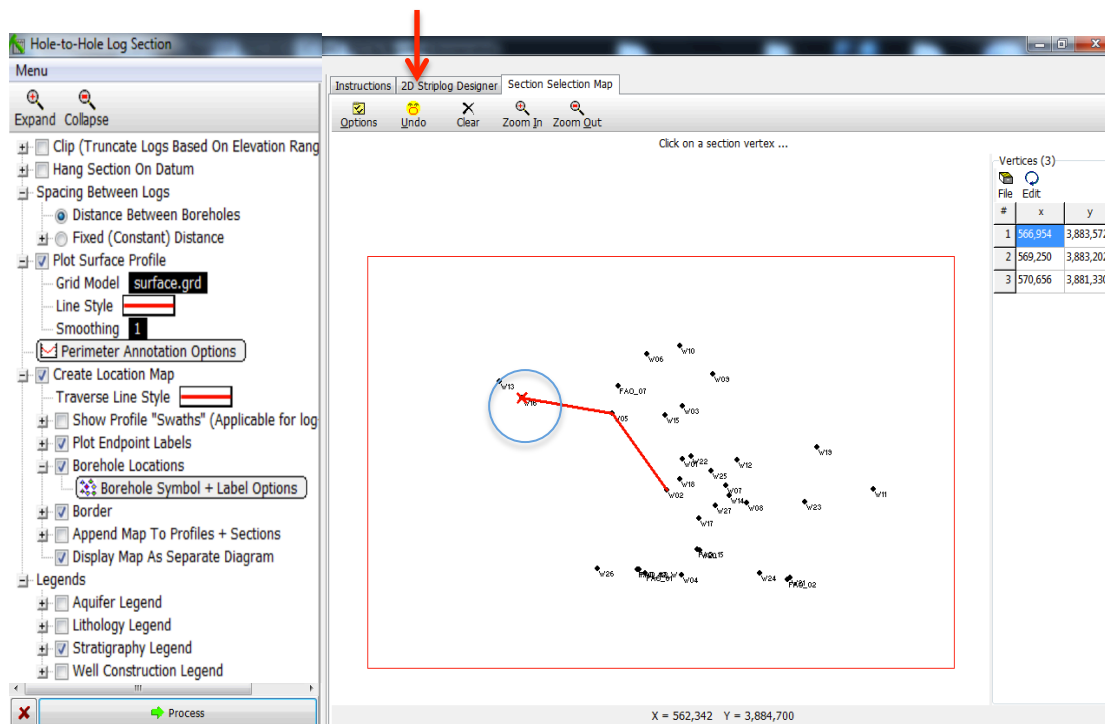
Σχήμα Π.63 Δισδιάστατη κατακόρυφη απεικόνιση (μητρώο - log) γεώτρησης W24

Π.8.3 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Ενεργοποιούνται οι γεωτρήσεις που θα συμμετέχουν στο δισδιάστατο διάγραμμα απεικόνισης (ή και όλες), εκτελείται η εντολή *Striplogs / Multi-Log Section* (Σχήμα Π.64) και ανοίγει νέο παράθυρο ρυθμίσεων (Σχήμα Π.65).



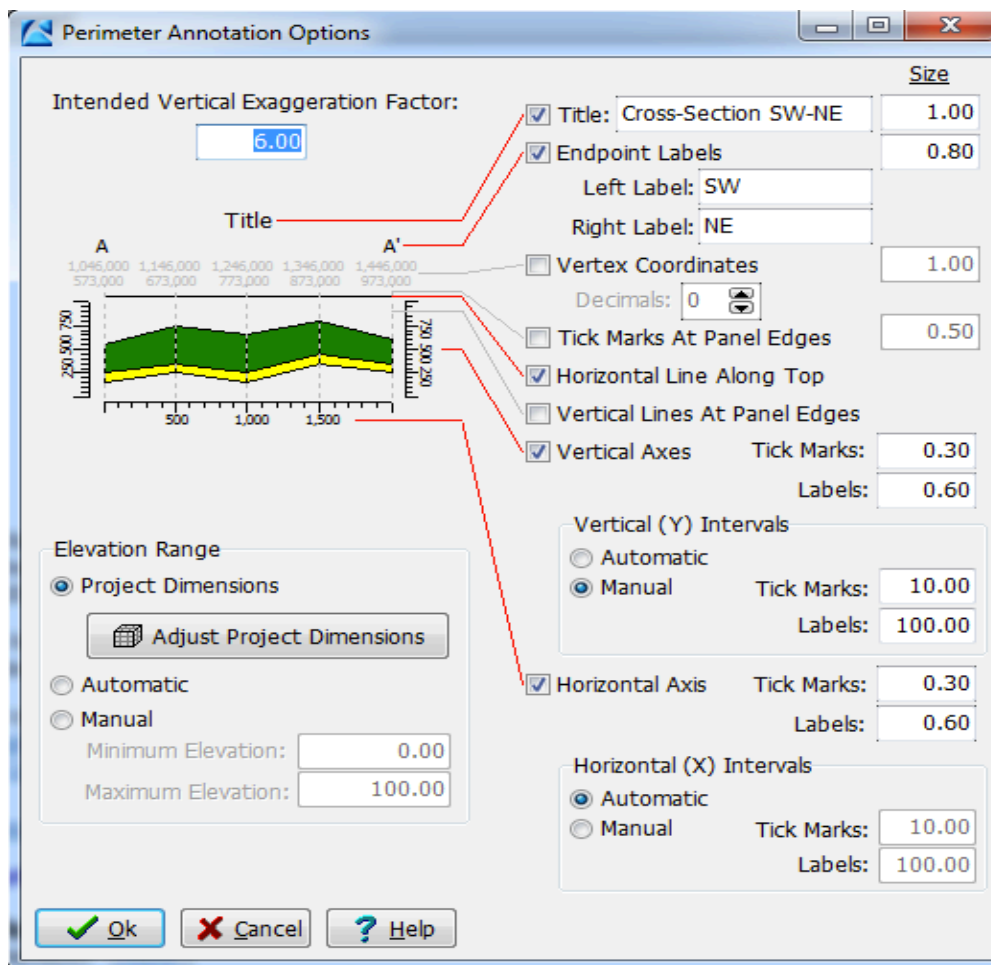
Σχήμα Π.64 Εντολή *Striplogs / Multi - Log Section*



Σχήμα Π.65 Παράθυρο ρυθμίσεων εντολής *Striplogs / Multi – Log Section*

Στο κεντρικό τμήμα του Σχήματος Π.65, ορίζονται οι γεωτρήσεις που θα απεικονίζονται στο 2D διάγραμμα που πρόκειται να κατασκευαστεί. Με κλικ γίνεται η διαλογή των επιθυμητών γεωτρήσεων και η ένδειξη **X** συμβολίζει την πρώτη γεώτρηση που θα επιλεγεί. Η επόμενη επιλεγείσα γεώτρηση συνδέεται με την προηγούμενη με κόκκινη γραμμή μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία επιλογής. Οι συντεταγμένες (XY) της κάθε επιλεγμένης γεώτρησης εμφανίζονται στον πίνακα στη στήλη δεξιά του παραθύρου. Σημειώνεται ότι η τελική απεικόνιση θα συμπεριλάβει μόνο τις γεωτρήσεις από τις οποίες περνάει η τεθλασμένη (κόκκινη) γραμμή μελέτης. Η επιλογή των δεδομένων των γεωτρήσεων που θα απεικονίζονται και οι επιμέρους ρυθμίσεις γίνονται από το παράθυρο του 2D Striplog Designer (κόκκινο βέλος στο Σχήμα Π.65 – βλ. παράγραφο Π.7.2).

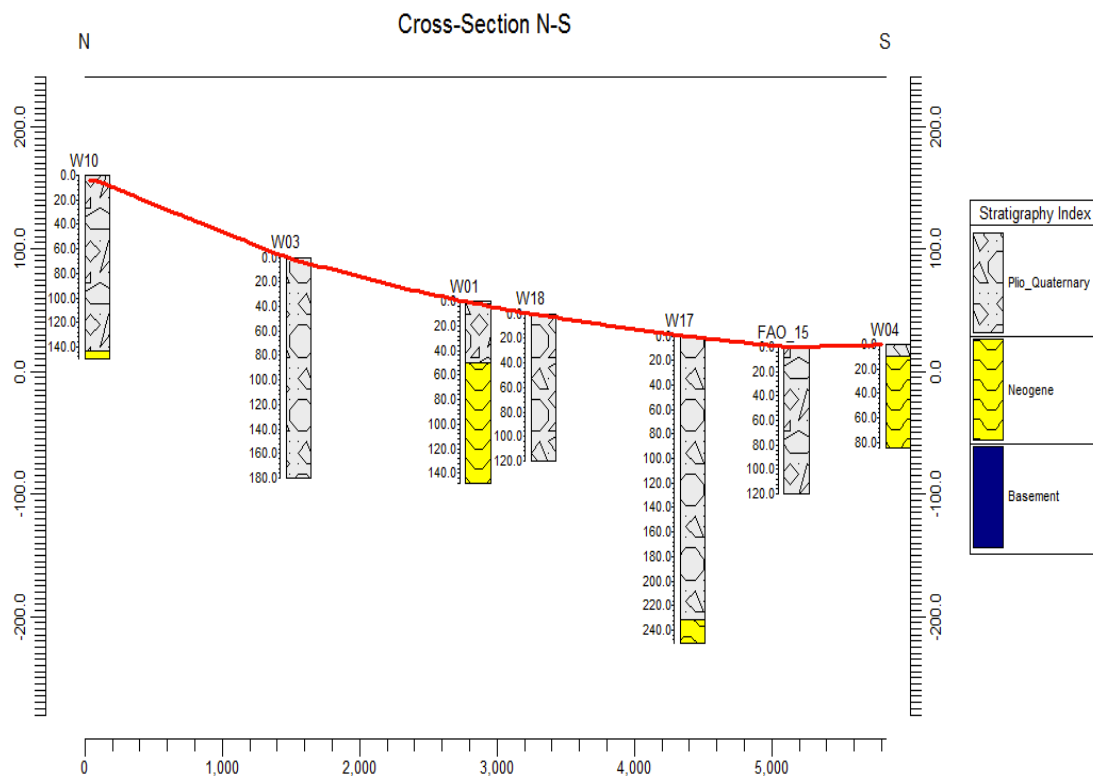
Από τις ρυθμίσεις στο αριστερά τμήμα του παραπάνω σχήματος και για τη ρύθμιση Spacing Between Logs, επιλέγεται *Distance Between Boreholes*, δηλ. η απεικονιζόμενη απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων να αποτελεί την πραγματική (με βάση τις συντεταγμένες του κολάρου κάθε γεώτρησης) αντί για *Fixed (Constant) Distance*, δηλ. τακτική απόσταση που ορίζεται από τον χρήστη. Με την επιλογή Plot Surface Profile, συμπεριλαμβάνεται στην απεικόνιση μία γραμμή που αντιπροσωπεύει την τοπογραφία της επιφάνειας της περιοχής. Με κλικ στο πεδίο *Grid Model* επιλέγεται το ήδη κατασκευασμένο και αποθηκευμένο στον Project Folder (βλ. παράγραφο Π.2) πλεγματικό μοντέλο (κατασκευάζεται με την εντολή *Map / Borehole Locations* με ενεργοποιημένη τη ρύθμιση *Contour Options* – βλ. παράγραφο Π.8.1). Με την επιλογή Perimeter Annotation Options (με κλικ ανοίγει νέο παράθυρο ρυθμίσεων – Σχήμα Π.66) ορίζονται παράμετροι που αφορούν τη σχεδίαση της απεικόνισης (τίτλοι, διαβάθμιση αξόνων XYZ κ.α.).



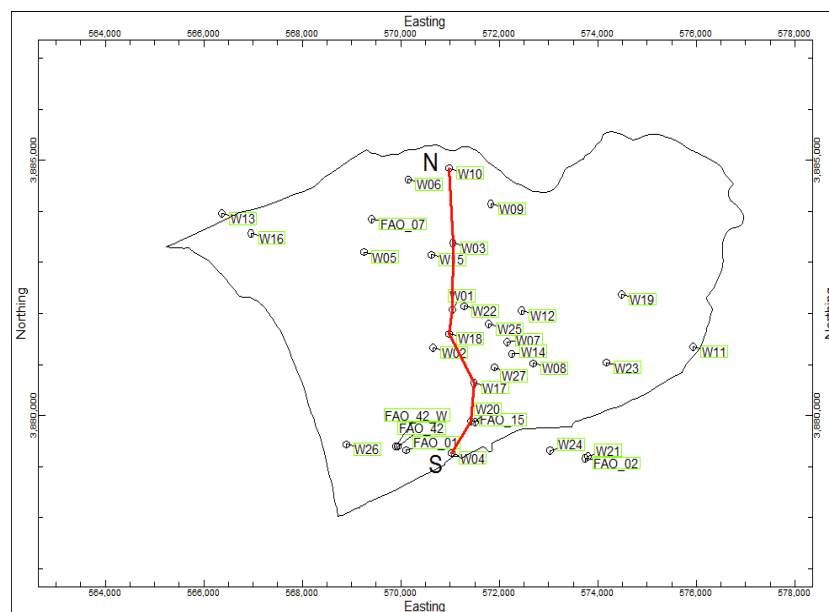
Σχήμα Π.66 Perimeter Annotation Options

Με την επιλογή Create Separate Location Map κατασκευάζεται περίγραμμα που επιδεικνύει την ορισθείσα τεθλασμένη γραμμή μελέτης. Οι ταυτότητες των γεωτρήσεων που θα συμμετέχουν στην απεικόνιση εμφανίζονται ενεργοποιώντας την επιλογή *Borehole Locations* (πρόσβαση σε επιμέρους ρυθμίσεις απεικόνισης, με κλικ στην επιλογή *Borehole Symbol + Label Options* – βλ. παράγραφο Π.8.1). Επιπλέον επιλέγεται να παρουσιαστούν οι ενδείξεις *αρχής* και *τέλους* της τεθλασμένης γραμμής μελέτης (ορίζονται στο παράθυρο ρυθμίσεων της επιλογής *Perimeter Annotation Options*), ενεργοποιώντας την επιλογή *Plot Endpoint Labels*. Η εισαγωγή του υπομνήματος γίνεται επιλέγοντας το ανάλογο με τον τύπο δεδομένων που απεικονίζονται (στην προκειμένη *Stratigraphy Legend*), στη ρύθμιση Legends. Σημειώνεται ότι οι ρυθμίσεις των υπομνημάτων γίνεται να επαναπροσδιοριστούν και από το περιβάλλον προβολής της απεικόνισης. Η διαδικασία ολοκληρώνεται επιλέγοντας Process. Το δισδιάστατο διάγραμμα και το περίγραμμα τοποθεσίας των γεωτρήσεων (αν έχει επιλεγθεί η αντίστοιχη ρύθμιση), προβάλλονται σε νέα καρτέλα (περιβάλλον *RockPlot2D*).

Αναφέρεται ότι με την εντολή *Striplogs / Profile*, η γραμμή μελέτης μπορεί να είναι μόνο ευθεία (όχι τεθλασμένη) και στην τελική απεικόνιση προβάλλονται οι γεωτρήσεις εκατέρωθεν της γραμμής σε πλάτος που ορίζεται από το χρήστη.



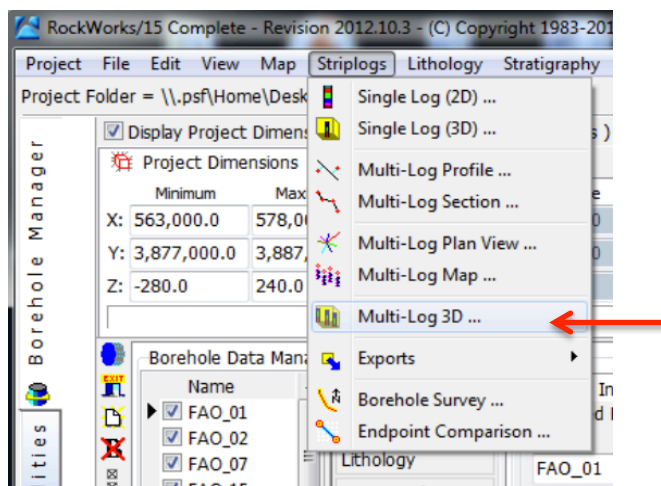
Σχήμα Π.67 Δισδιάστατη κατακόρυφη απεικόνιση της στρωματογραφίας των γεωτρήσεων W10, W03, W01, W18, W17, FAO 15 και W04, διεύθυνσης N - S



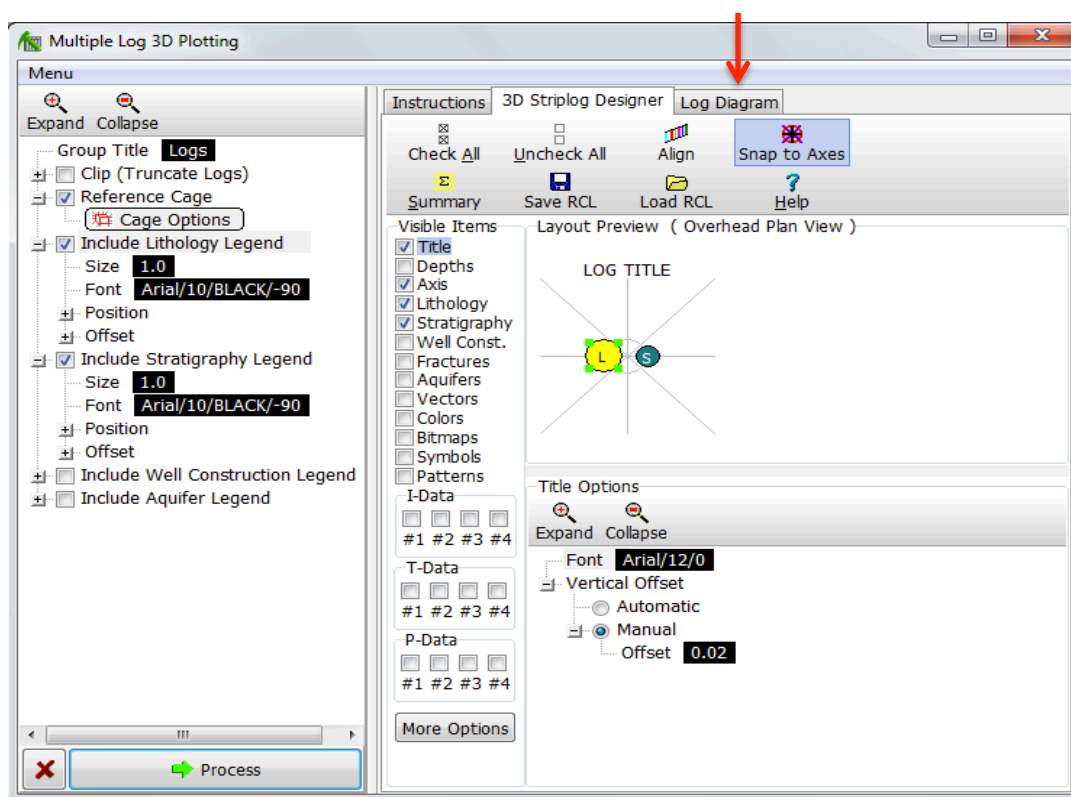
Σχήμα Π.68 Περίγραμμα περιοχής μελέτης και θέσεις γεωτρήσεων κατά τη διεύθυνση N – S (Separate Location Map)

Π.8.4 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Ενεργοποιούνται οι γεωτρήσεις που πρόκειται να απεικονιστούν, εκτελείται η εντολή *Striplogs / Multi-Log 3D* (Σχήμα Π.69) και ανοίγει νέο παράθυρο ρυθμίσεων (Σχήμα Π.70).

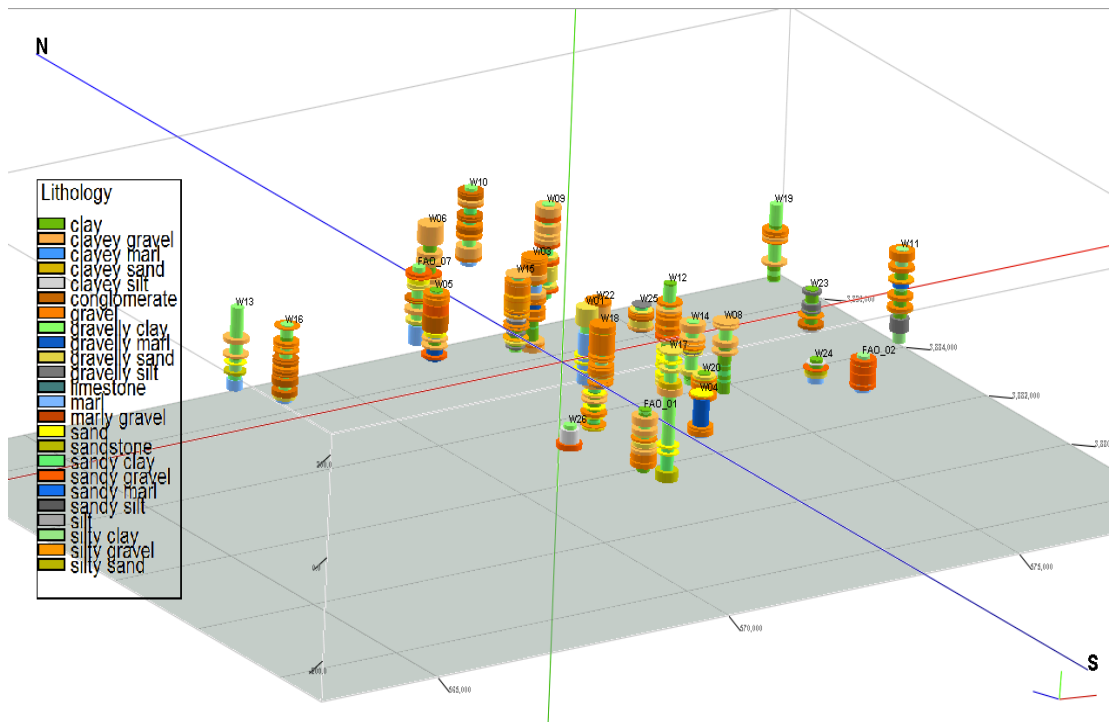


Σχήμα Π.69 Εντολή *Striplogs / Multi-Log 3D*



Σχήμα Π.70 Παράθυρο ρυθμίσεων εντολής *Striplogs / Multi-Log 3D*

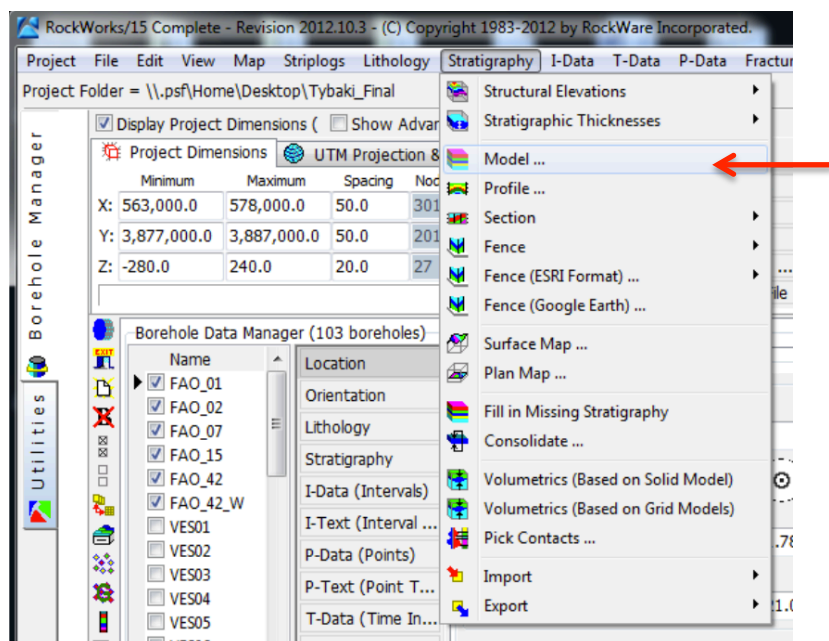
Σε σχεδόν πλήρη αντιστοιχία με τη διαδικασία κατασκευής της δισδιάστατης απεικόνισης των γεωτρήσεων (βλ. παράγραφο Π.8.2 – Σχήμα Π.62), στο αριστερό τμήμα του νέου παραθύρου ρυθμίσεων επιλέγεται το υπόμνημα της τρισδιάστατης απεικόνισης (λιθολογίας ή/και στρωματογραφίας) και το κελί αναφοράς (*Reference Cage* - βλ. παράγραφο Π.7). Στη συνέχεια και στο κεντρικό τμήμα ενεργοποιούνται οι τύποι δεδομένων προς απεικόνιση, στο κάτω και δεξιά τμήμα ρυθμίζονται καταλλήλως οι παράμετροι σχεδίασης των δεδομένων που επιλέχθηκαν και με *Process* το τρισδιάστατο διάγραμμα των γεωτρήσεων προβάλλεται σε νέα καρτέλα, που πλέον αποτελεί το περιβάλλον οπτικοποίησης RockPlot3D (κόκκινο βέλος στο παραπάνω σχήμα).



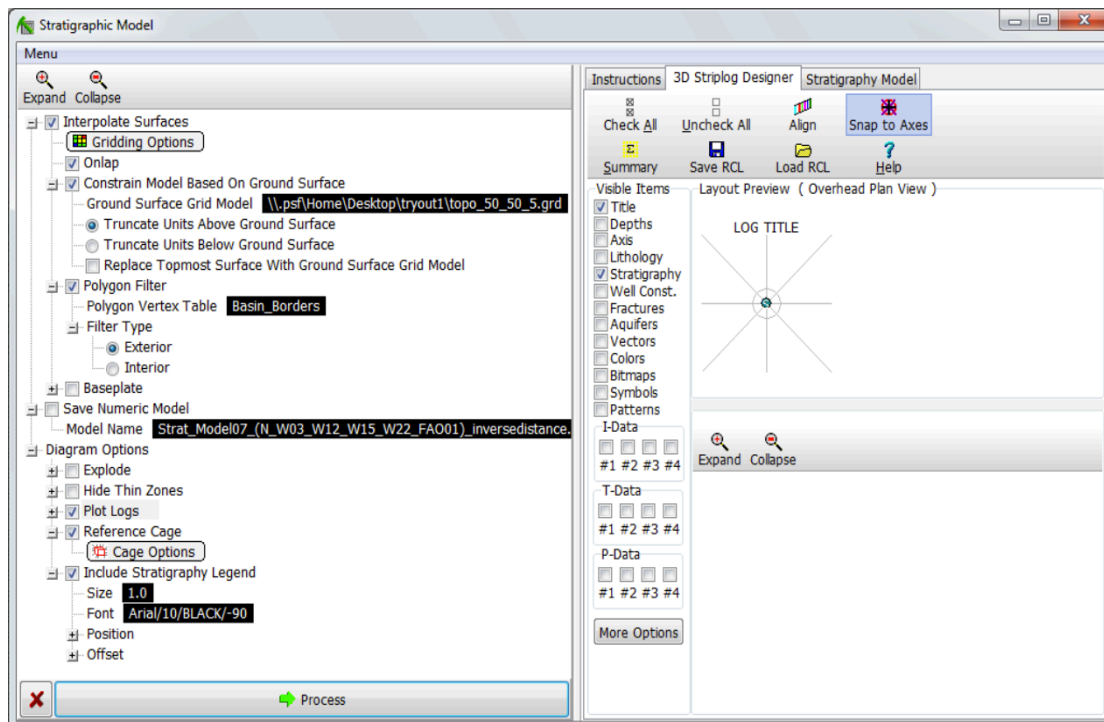
Σχήμα Π.71 Τρισδιάστατο διάγραμμα λιθολογίας 26 (εκ των 33) γεωτρήσεων

Π.8.5 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για την κατασκευή τρισδιάστατου (λιθο)στρωματογραφικού μοντέλου επιλέγονται οι γεωτρήσεις από τις οποίες θα αντληθούν τα χωρικά και στρωματογραφικά δεδομένα, εκτελείται η εντολή *Stratigraphy / Model* (Σχήμα Π.72) και εμφανίζεται νέο παράθυρο ρυθμίσεων (Σχήμα Π.73).

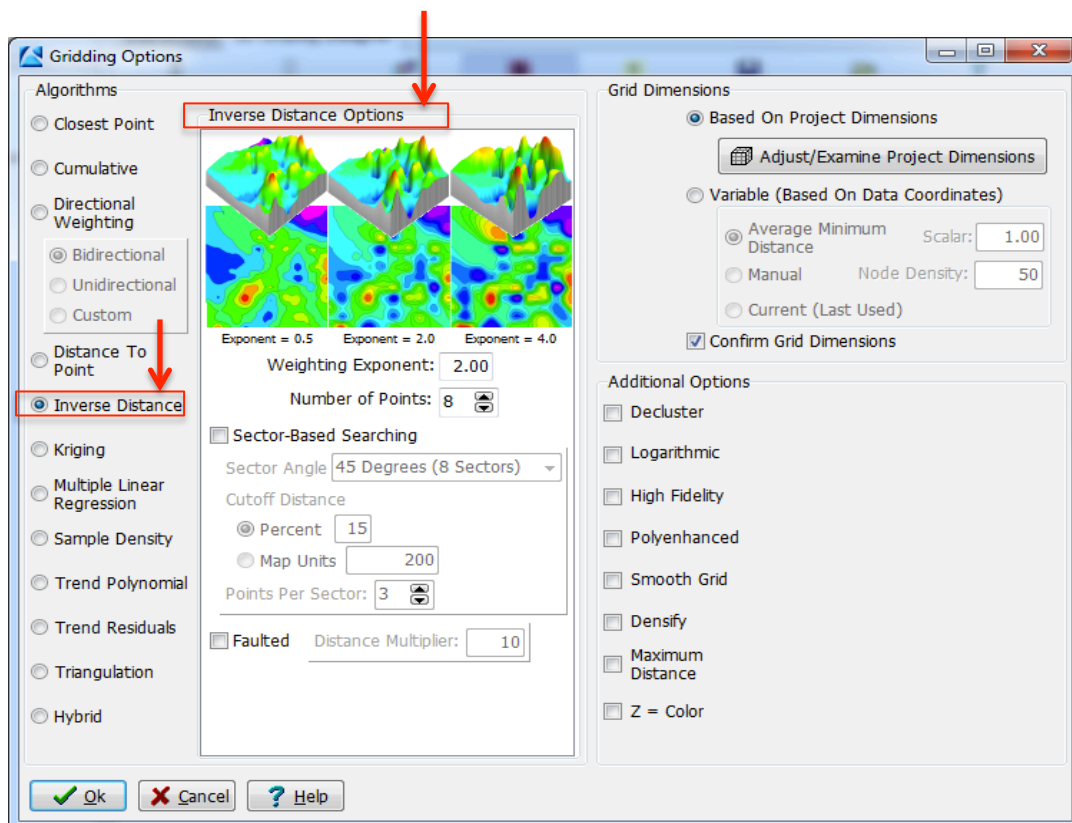


Σχήμα Π.72 Εντολή *Stratigraphy / Model*



Σχήμα Π.73 Παράθυρο ρυθμίσεων εντολής *Stratigraphy / Model*

Στο αριστερό τμήμα του παραπάνω σχήματος οι παράμετροι που ρυθμίστηκαν: Για την παρεμβολή των χωρικών δεδομένων (*Interpolate Surfaces*), με κλικ στην επιλογή *Gridding Options* ανοίγει νέο παράθυρο (Σχήμα Π.74) με τις ρυθμίσεις καναβοποίησης.

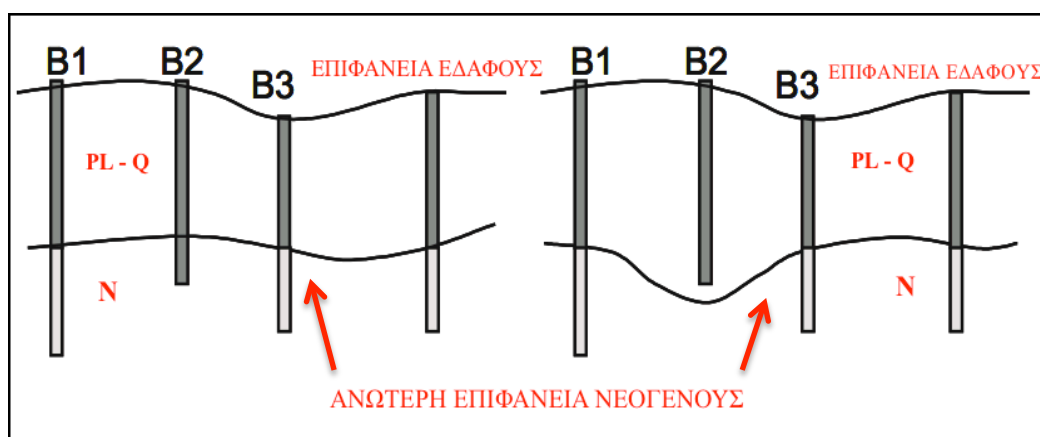


Σχήμα Π.74 Παράθυρο ρυθμίσεων καναβοποίησης (*Gridding Options*)

Στο παραπάνω σχήμα, επιλέγεται η μέθοδος αντίστροφων αποστάσεων (Inverse Distance), με συντελεστή βάρους (Weighting Exponent): 2 και με γειτονικά σημεία (Number of Points): 8 (βλ. παράγραφο Π.6). Οι διαστάσεις των πλεγματικών μοντέλων θα βασιστούν στις ορισμένες διαστάσεις της περιοχής μελέτης (Grid Dimensions / Based On Project Dimensions), ενώ δεν ενεργοποιείται καμμία πρόσθετη επιλογή καναβοποίησης (Additional Options).

Το λογισμικό θα χρησιμοποιήσει την παραπάνω μέθοδο για την παρεμβολή των σημειακών δεδομένων (συντεταγμένες XYZ των συμμετέχοντων γεωτρήσεων και διαστήματα βαθών των λιθοστρωματογραφικών δεδομένων) και τελικά την κατασκευή πλεγματικών μοντέλων της ανώτερης και της κατώτερης επιφάνειας για κάθε λιθοστρωματογραφική ενότητα. Σημειώνεται ότι τα πλεγματικά μοντέλα των επιφανειών θα απεικονιστούν στο τρισδιάστατο διάγραμμα που θα κατασκευαστεί σύμφωνα με τα μοτίβα και τα χρώματα όπως έχουν οριστεί στον λιθοστρωματογραφικό πίνακα (Stratigraphy Types Table – βλ. παράγραφο Π.4.1) και θα αποθηκευτούν στην τρέχουσα βάση δεδομένων (π.χ. Neogene_top, Neogene_base κτλ).

Για την αποφυγή των περιοριστικών φαινομένων του Σχήματος Π.75 και τη βέλτιστη προσαρμογή της παρεμβολής με τη λιθοστρωματογραφία της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος τριγωνοποίησης, με παρεμβολή των συνοριακών κόμβων (Triangulation – Interpolate Edge Points), (βλ. παράγραφο Π.6). Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων, φαίνεται η μέθοδος τριγωνοποίησης να προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα και στην πραγματική διαδοχή των αποθέσεων.



Σχήμα Π.75 Αριστερά: όχι καλή προσαρμογή της παρεμβολής με τη λιθοστρωματογραφία (Chiles et al. 2004)

Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις που έγιναν για το Σχήμα Π.73, αφορούν την ενεργοποίηση της παραμέτρου Onlap, με την οποία αποφεύγονται περιπτώσεις όπου τμήματα υπερκείμενων λιθοστρωματογραφικών ενοτήτων εκτείνονται κάτω από την κατώτερη επιφάνεια υποκείμενων ενοτήτων. Το λογισμικό δίνει προτεραιότητα στη διαδοχή των ενοτήτων όπως έχει οριστεί στη στήλη *Order του* στρωματογραφικού πίνακα (βλ. παράγραφο Π.4.1), κατασκευάζοντας τα πλεγματικά μοντέλα των επιμέρους επιφανειών από κάτω προς τα πάνω.

Η επόμενη επιλογή, Constrain Model Based On Model Surface, αφορά τον περιορισμό ή την αντικατάσταση (ενεργοποίηση επιλογής *Replace Topmost Surface With Ground Surface Grid Model*) της ανώτερης επιφάνειας της ανώτερης λιθοστρωματογραφικής ενότητας, από το πλεγματικό μοντέλο της επιφάνειας του εδάφους που πρέπει να έχει ήδη κατασκευαστεί στο περιβάλλον Utilities (βλ. παράγραφο Π.7). Με κλικ στο πεδίο *Ground Surface Grid Model*, υποδεικνύεται το εν λόγω .grd αρχείο ίδιων διαστάσεων (τρέχοντες) και ενεργοποιείται η επιλογή *Truncate Units Above Ground Surface*, ώστε να αποδοθούν *null* τιμές στους κόμβους πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (δηλ. να αγνοηθούν).

Στη συνέχεια το λιθοστρωματογραφικό μοντέλο περιορίζεται εφαρμόζοντας πολυγωνικό φίλτρο με την επιλογή Polygon Filter. Με κλικ στο πεδίο *Polygon Vertex Table* υποδηλώνεται το φίλτρο και επιλέγεται ως τύπος φίλτρου (*Filter Type*), *Exterior*, ώστε να αποκλειστούν από την απεικόνιση οι κόμβοι εκτός του φίλτρου.

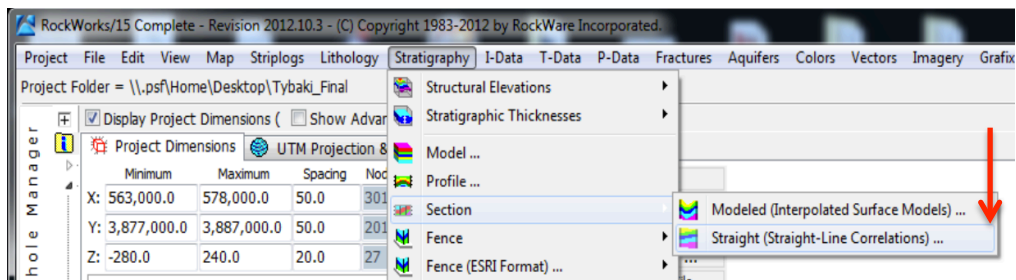
[τρόπος κατασκευής πολυγωνικού φίλτρου: στο περιβάλλον RockPlot2D: εντολή *Digitize / Polygons* {με διαδοχικά κλικ σε συγκεκριμένα σημεία (δηλ. σε συγκεκριμένες γνωστές XY) σχεδιάζεται η περίμετρος της περιοχής μελέτης} και εντολή *Data / Copy Numeric Data To Clipboard*, στο περιβάλλον Borehole Manager: εντολή *Project / Project Manager*, στη στήλη που εμφανίζεται στο αριστερό τμήμα του περιβάλλοντος δεξιά κλικ στο *Polygon Table* και *Add a Polygon Table*, στο πεδίο που εμφανίζεται ορίζεται το όνομα του πολύγωνου, *OK* και στο παράθυρο που ανοίγει *Paste*.]

Ενεργοποιείται η επιλογή Save Numeric Model και στο πεδίο *Model Name* ορίζεται το όνομα αποθήκευσης του λιθοστρωματογραφικού μοντέλου, σε αρχείο .mod.

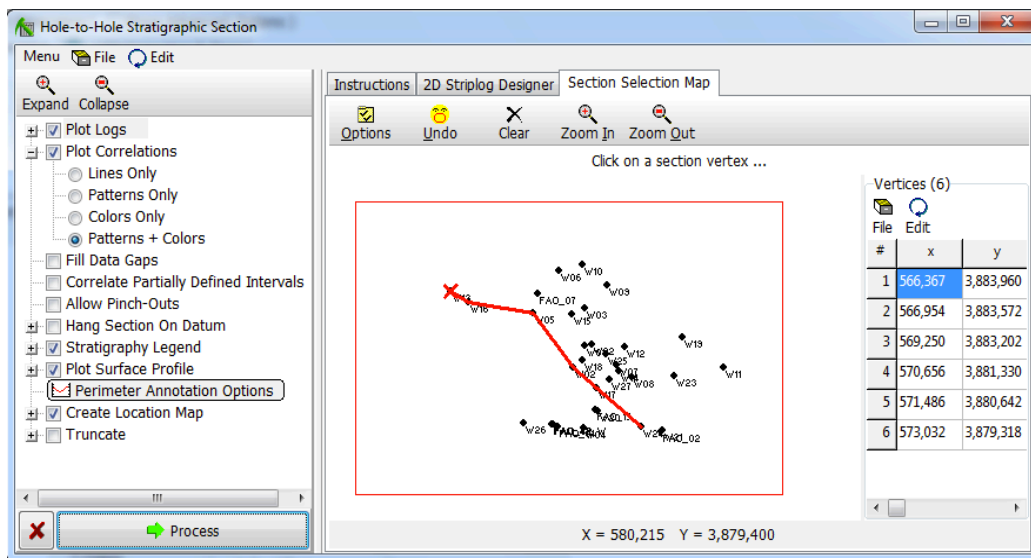
Τέλος για τις ρυθμίσεις του διαγράμματος (Diagram Options) με το οποίο θα απεικονιστεί το μοντέλο στο περιβάλλον οπτικοποίησης RockPlot3D, επιλέγονται: *Plot Logs* (και αντίστοιχα ρυθμίζονται οι παράμετροι σχεδίασης των γεωτρητικών στηλών στο τμήμα δεξιά του παραθύρου του Σχήματος Π.75 – 3D Striplog Designer – βλ. παράγραφο Π.8.4), κελί αναφοράς (*Reference Cage* – βλ. παράγραφο Π.7) και λιθοστρωματογραφικό υπόμνημα (*Include Stratigraphy Legend*). Με Process ολοκληρώνεται η κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου.

Π.8.6 ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ

Για την κατασκευή δισδιάστατων λιθοστρωματογραφικών τομών, ενεργοποιούνται τουλάχιστον οι συμμετέχοντες γεωτρήσεις, εκτελείται η εντολή *Stratigraphy / Section / Straight (Straight-Line Correlations)* (Σχήμα Π.76) και ανοίγει νέο παράθυρο ρυθμίσεων (Σχήμα Π.77).



Σχήμα Π.76 Εντολή *Stratigraphy / Section / Straight (Straight-Line Correlations)*

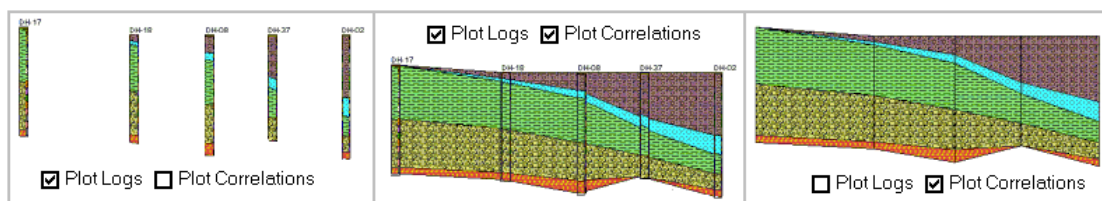


Σχήμα Π.77 Παράθυρο ρυθμίσεων εντολής *Stratigraphy / Section / Straight (Straight-Line Correlations)*

Στο τμήμα δεξιά του παραπάνω σχήματος και στην καρτέλα *Section Selection Map*, ορίζεται η διεύθυνση της τομής του μοντέλου και οι γεωτρήσεις που θα περιλαμβάνει με τεθλασμένη γραμμή μελέτης (βλ. παράγραφο Π.8.3).

Στο αριστερό τμήμα ενεργοποιούνται και ρυθμίζονται οι επιλογές:

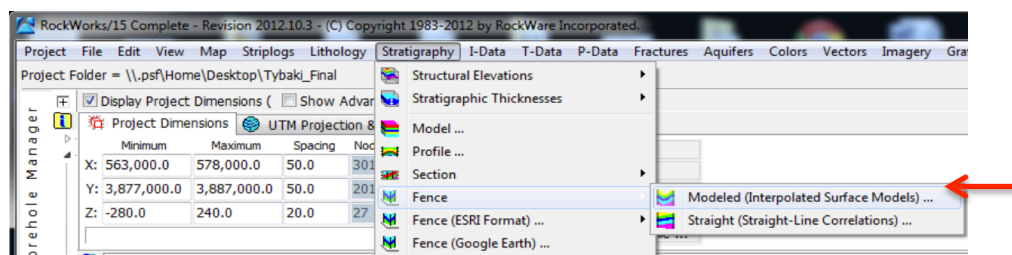
Plot Logs, για την απεικόνιση των γεωτρητικών στηλών που θα βρίσκονται στη διεύθυνση της τομής και ρυθμίζονται οι παράμετροι σχεδίασης τους από το παράθυρο του 2D Striplog Designer (2^η καρτέλα στο δεξιοί τμήμα του σχήματος, βλ. παράγραφο Π.8.2). *Plot Correlations*, για τη συσχέτιση με ευθείες γραμμές των λιθοστρωματογραφικών ενοτήτων μεταξύ των γεωτρήσεων (δηλ. δε γίνεται μοντελοποίηση με κάποια μέθοδο παρεμβολής) και *Patterns + Colors*, για την πλήρωση των πλαισίων ανάμεσα στις γεωτρήσεις με τα αντίστοιχα μοτίβα και χρώματα των ενοτήτων (παράδειγμα στο Σχήμα Π.78), όπως έχουν οριστεί στον στρωματογραφικό πίνακα (*Stratigraphy Types Table*).



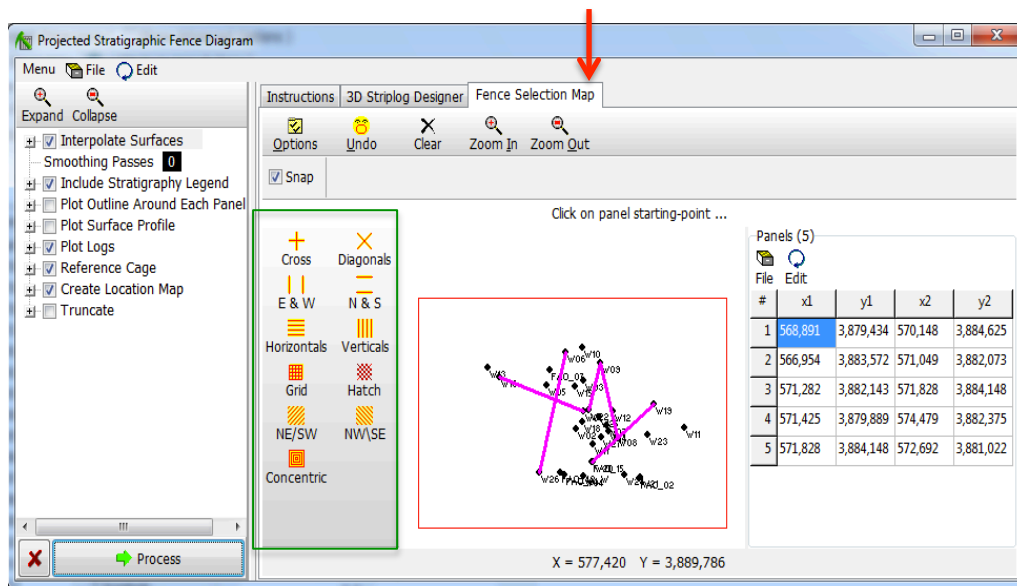
Σχήμα Π.78 Παράδειγμα συσχέτισης λιθοστρωματογραφικών ενοτήτων με ευθείες γραμμές

Stratigraphy Legend, για να συμπεριληφθεί στην απεικόνιση το λιθοστρωματογραφικό υπόμνημα. Plot Surface Profile, για να σχεδιαστεί στο διάγραμμα γραμμή που αντιπροσωπεύει την τοπογραφία της επιφάνειας του εδάφους. Perimeter Annotation Options, κλικ στο πεδίο για την παραμετροποίηση σχεδιαστικών ρυθμίσεων. Create Location Map, για να απεικονιστεί σε ξεχωριστή καρτέλα το περίγραμμα της περιοχής έρευνας με τη διεύθυνση της τομής και τις θέσεις των γεωτρήσεων που περιλαμβάνονται (βλ. παράγραφο Π.8.3).

Για την κατασκευή τρισδιάστατων λιθοστρωματογραφικών τομών, επιβεβαιώνεται ότι οι γεωτρήσεις που θα συμμετέχουν είναι επιλεγμένες, εκτελείται η εντολή *Stratigraphy / Fence / Modeled (Interpolated Surface Models)* (Σχήμα Π.79) και ανοίγει νέο παράθυρο ρυθμίσεων (Σχήμα Π.80).



Σχήμα Π.79 Εντολή *Stratigraphy / Fences / Modeled (Interpolated Surface Models)*



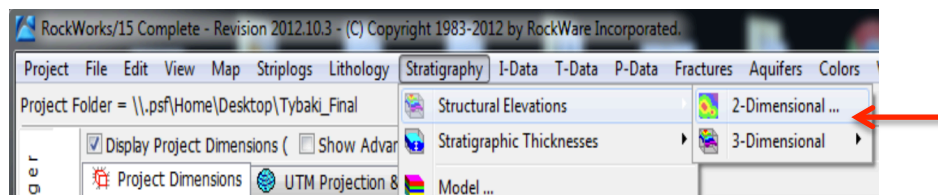
Σχήμα Π.80 Ρυθμίσεις εντολής *Stratigraphy / Fences / Modeled (Interpolated Surface Models)*

Στο τμήμα δεξιά του παραπάνω σχήματος και στην καρτέλα Fence Selection Map, ορίζονται πολλαπλές γραμμές μελέτης (Panels) (κόκκινο πλαίσιο στο σχήμα) με την κάθε μία να ενώνει μόνο δύο γεωτρήσεις και τις γραμμές να γίνεται να τέμνονται ή να ενώνονται μεταξύ τους. Η διαδικασία επιλογής των γραμμών συνναυτίζεται με την αντίστοιχη διαδικασία της εντολής *Stratigraphy / Section / Straight (Straight-Line Correlations)* (βλ. παραπάνω) ή της εντολής *Striplogs / Section* (βλ. παράγραφο Π.8.3). Σημειώνεται ότι το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής έτοιμων γραμμών ή Panels (πράσινο πλαίσιο στο σχήμα).

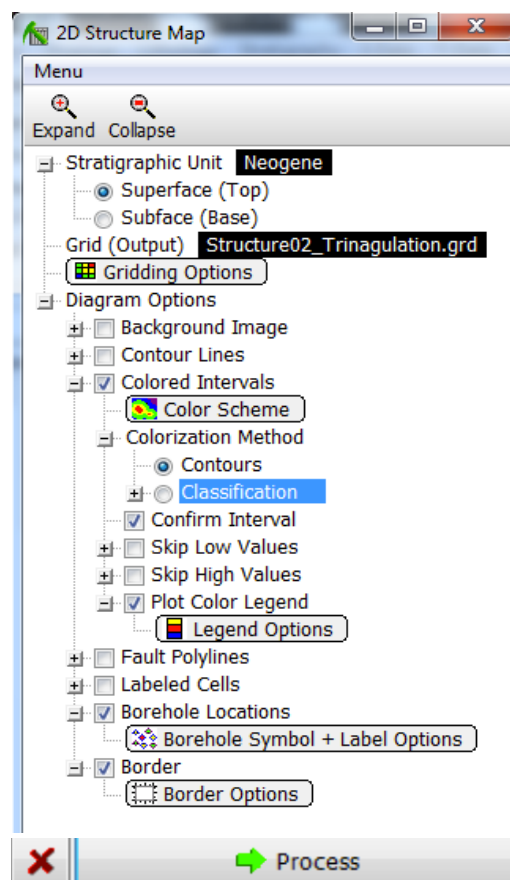
Στο αριστερό τμήμα ενεργοποιούνται και ρυθμίζονται οι επιλογές: Interpolate Surfaces (μέθοδος τριγωνοποίησης, με παρεμβολή συνοριακών κόμβων), Onlap, Constrain Model Based On Model Surface, Truncate Units Above Ground Surface, Polygon Filter, Include Stratigraphy Legend, Plot Logs, Reference Cage, Create Location Map σε πλήρη αντιστοιχία με τις εντολές *Stratigraphy / Model* (βλ. παράγραφο Π.8.5) και *Stratigraphy / Section / Straight (Straight-Line Correlations)*.

Π.8.7 ΛΙΘΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΙΣΟΒΑΘΩΝ ΚΑΙ ΙΣΟΠΑΧΩΝ

Για την κατασκευή βαθυμετρικών χαρτών της ανώτερης ή της κατώτερης επιφάνειας συγκεκριμένης λιθοστρωματογραφικής ενότητας, επιλέγονται οι απαραίτητες γεωτρήσεις, εκτελείται η εντολή *Stratigraphy / Structural Elevations / 2-Dimensional* (Σχήμα Π.81) και εμφανίζεται νέο παράθυρο ρυθμίσεων (Σχήμα Π.82).



Σχήμα Π.81 Εντολή *Stratigraphy / Structural Elevations / 2-Dimensional*

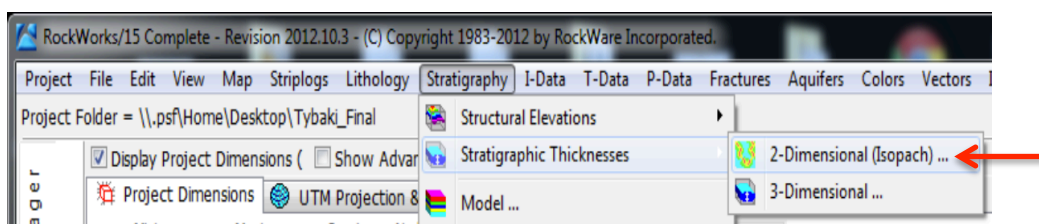


Σχήμα Π.82 Ρυθμίσεις εντολής *Stratigraphy / Structural Elevations / 2-Dimensional*

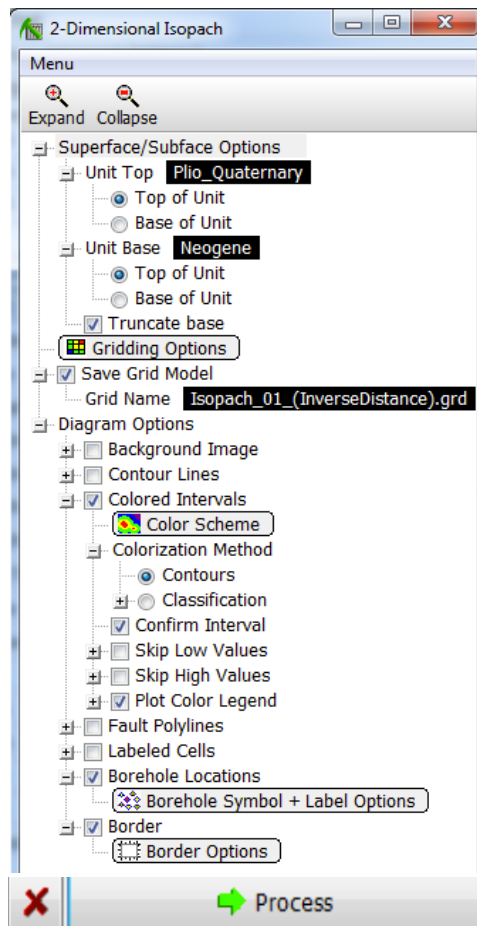
Στο ανωτέρω σχήμα ρυθμίζονται οι επιλογές:

Με κλικ στο πεδίο Stratigraphic Unit, ορίζεται η λιθοστρωματογραφική ενότητα που θα χαρτογραφηθεί και επιλέγεται η ανώτερη ή η κατώτερη επιφάνειά της, ενεργοποιώντας την επιλογή *Superface (Top)* ή την επιλογή *Subface (Base)* αντίστοιχα. Ο βαθυμετρικός χάρτης, που θα κατασκευαστεί και θα απεικονίζει τα ανώτερα ή τα κατώτερα βάθη της επιλεγμένης ενότητας, θα αποθηκευτεί με όνομα που ορίζεται με κλικ στο πεδίο Grid Output. Ακολούθως επιλέγεται η μέθοδος παρεμβολής που θα εφαρμοστεί στα χωρικά δεδομένα με κλικ στις ρυθμίσεις καναβοποίησης (Gridding Options). Στην προκειμένη έγινε παρεμβολή με τη μέθοδο τριγωνοποίησης – παρεμβολή συνοριακών κόμβων και με τη μέθοδο αντίστροφων αποστάσεων – με συντελεστή βάρους 2 και γειτονικά σημεία 8 (βλ. παράγραφο Π.6). Όσον αφορά τις ρυθμίσεις του διαγράμματος απεικόνισης του βαθυμετρικού χάρτη (Diagram Options), επιλέγεται οι μεταβολές των βαθών να απεικονιστούν με χρωματική διαβάθμιση κατά διαστήματα (*Colored Intervals*), που ορίζεται με κλικ στο πεδίο *Color Scheme* και η μέθοδος χρωματοποίησης (*Colorization Method*) να αφορά ισοϋψείς (*Contours*) με βάση τις αριθμητικές τιμές παρεμβολής των κόμβων του πλέγματος και τα στρωματογραφικά δεδομένα. Επιπλέον ενεργοποιείται η επιλογή *Confirm Interval*, ώστε ο χρήστης να συμφωνήσει με το διάστημα των ισοϋψών που θα υπολογίσει και θα προτείνει το λογισμικό σύμφωνα με το μέγιστο και το ελάχιστο βάθος ή να ορίσει νέο διάστημα, στο παράθυρο διαλόγου που θα εμφανιστεί λίγο πριν την προβολή του τελικού διαγράμματος. Το χρωματικό υπόμνημα συμπεριλαμβάνεται στην απεικόνιση επιλέγοντας *Plot Color Legend* και η σχεδίασή του (ύψος, πλάτος, τίτλος κτλ) ρυθμίζεται με κλικ στο πεδίο *Legend Options* (υπενθυμίζεται ότι γίνεται να ρυθμιστεί και στο περιβάλλον RockPlot2D, όπου θα προβληθεί το διάγραμμα). Ο τελικός χάρτης θα εμπεριέχει τις ταυτότητες των γεωτρήσεων ενεργοποιώντας την επιλογή Borehole Locations (πρόσβαση στις αντίστοιχες ρυθμίσεις με κλικ στο πεδίο *Borehole Symbol + Label Options* - βλ. παράγραφο Π.8.1) και η απεικόνιση θα οριοθετηθεί επιλέγοντας Border και ρυθμίζοντας τις αντίστοιχες παραμέτρους με κλικ στο πεδίο *Border Options*.

Για την κατασκευή χαρτών ισοπαχών των λιθοστρωματογραφικών ενότητων, επιλέγονται οι γεωτρήσεις που θα συμπεριλαμβάνονται, εκτελείται η εντολή *Stratigraphy / Stratigraphic Thicknesses / 2-Dimensional (Isopach)* (Σχήμα Π.83) και ανοίγει νέο παράθυρο ρυθμίσεων (Σχήμα Π.84).



Σχήμα Π.83 Εντολή *Stratigraphy / Stratigraphic Thicknesses / 2-Dimensional (Isopach)*



Σχήμα Π.84 Ρυθμίσεις εντολής *Stratigraphy / Stratigraphic Thicknesses / 2-Dimensional (Isopach)*

Στο παραπάνω σχήμα:

Με τη ρύθμιση Superface/Subface Options, ορίζεται η ανώτερη και η κατώτερη επιφάνεια της ίδιας ή των διαφορετικών λιθοστρωματογραφικών ενοτήτων από τις οποίες θα προκύψει ο χάρτης ισοπαχών. Με κλικ στο πεδίο *Unit Top* επιλέγεται η ανώτερη ή η κατώτερη επιφάνεια της ανώτερης λιθοστρωματογραφικής ενότητας και με κλικ στο πεδίο *Unit Base* επιλέγεται η ανώτερη ή η κατώτερη επιφάνεια της κατώτερης λιθοστρωματογραφικής ενότητας, εντός των οποίων θα γίνει η παρεμβολή των τιμών των κόμβων των δύο πλεγμάτων. Ακολουθώντας ενεργοποιείται η επιλογή *Truncate Base*, ώστε να περιοριστεί πιθανή επέκταση της κατώτερης επιφάνειας πάνω από την ανώτερη, λόγω αραιής κατά θέσεις πυκνότητας σημειακών χωρικών δεδομένων.

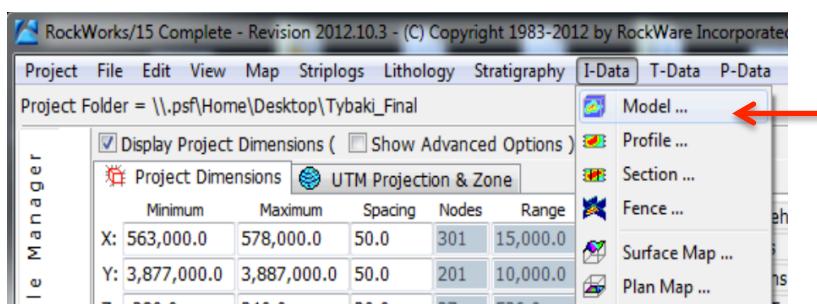
Η λειτουργία της προαναφερθείσας ρύθμισης αποφαίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη δεδομένου ότι ο χάρτης ισοπαχών κατασκευάζεται εφαρμόζοντας την ορισμένη μέθοδο παρεμβολής στην άνω και κάτω επιφάνεια και στη συνέχεια αφαιρώντας το κατώτερο από το ανώτερο πλέγμα. Επομένως στην περίπτωση που ενδεχομένως τα δύο πλέγματα ή επιφάνειες τέμνονται σε κάποιο σημείο, θα προκύψει αρνητική τιμή πάχους που φυσικά καθίσταται μη αποδεκτή. Για την αποφυγή παρόμοιων περιπτώσεων οι δύο επιφάνειες αρχικά συγκρίνονται και στα προβληματικά σημεία η κατώτερη επιφάνεια περιορίζεται κάτω από την υπερκείμενή της, ώστε το αποτέλεσμα της αφαίρεσης των παχών τους να έχει τιμή μηδέν.

Η παραμετροποίηση των υπόλοιπων ρυθμίσεων (αποθήκευση χάρτη ισοπαχών - *Save Grid Model / Grid Name*, ρυθμίσεις καναβοποίησης - *Gridding Options* και ρυθμίσεις διαγράμματος - *Diagram Options*) γίνεται σε πλήρη αντιστοιχία με τις αντίστοιχες ρυθμίσεις της παραπάνω εντολής *Stratigraphy / Structural Elevations / 2-Dimensional*.

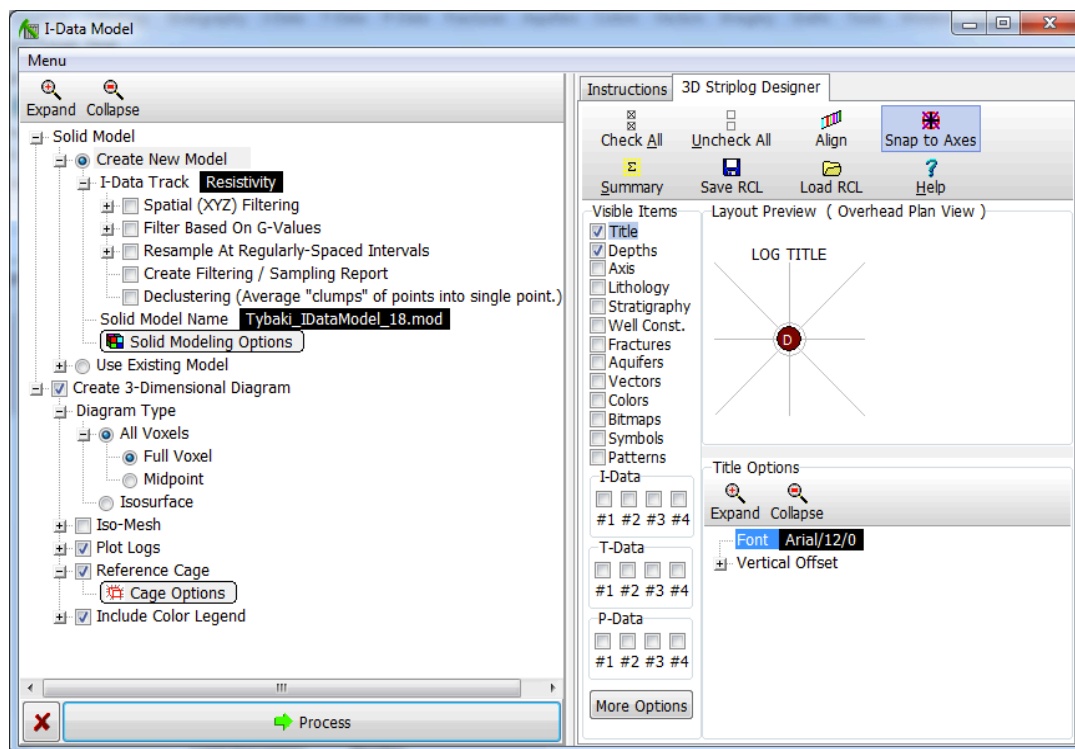
Με την ολοκλήρωση της κατασκευής των χαρτών ισοβαθών και των χαρτών ισοπαχών, υποστηρίζεται από το λογισμικό η δυνατότητα προσαρμογής της περιμέτρου της περιοχής που ερευνάται. Η περιμετροποίηση των χαρτών γίνεται με την εφαρμογή φίλτρου από το περιβάλλον *Utilities*, εκτελώντας την εντολή *Grid / Filters / Polygon Clip*. Στο νέο παράθυρο ρυθμίσεων, ορίζεται ο χάρτης που θα φιλτραριστεί με κλικ στο πεδίο *Input (Grid) Model*, το όνομα αποθήκευσης του επεξεργασμένου χάρτη με κλικ στο πεδίο *Output (Grid) Model* και το πολυγωνικό φίλτρο που θα εφαρμοστεί με κλικ στο πεδίο *Polygon Vertex Table*. Η διαδικασία συνεχίζεται επιλέγοντας *Exterior*, ως τύπο φίλτρου (*Filter Type*) και ορίζοντας νέα κωδικοποιημένη τιμή χρωματικής απόχρωσης για τα σημεία – κόμβους εκτός του φίλτρου, δηλ. εκτός της περιμέτρου που θα προσαρμοστεί. Με κλικ στο πεδίο *New Exterior Value* επιλέγεται απροσδιόριστη τιμή: $null = -e^{27}$, δηλ. καμμία τιμή (και κατ' επέκταση κανένα χρώμα) για τους εξωτερικούς κόμβους. Τέλος επιλέγεται δισδιάστατο διάγραμμα απεικόνισης (*Create 2-Dimensional Grid Diagram*) του νέου (ισοβαθών ή ισοπαχών) χάρτη με περίμετρο, με τις υπόλοιπες ρυθμίσεις (*Symbols, Labels, Colored Intervals, Border*) να ταυτίζονται με τις αντίστοιχες ρυθμίσεις των εντολών που περιγράφονται στην τρέχουσα παράγραφο.

Π.8.8 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Για την κατασκευή μοντέλου ιδιοτήτων και τρισδιάστατου διαγράμματος απεικόνισης, επιλέγονται οι βυθοσκοπήσεις από τις οποίες θα αντληθούν τα χωρικά δεδομένα της ιδιότητας που εξετάζεται (στην προκειμένη της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης - βλ. παράγραφο 5.5.1 και ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3), εκτελείται η εντολή *I-Data / Model* (Σχήμα Π.85) και ρυμίζονται οι επιμέρους παράμετροι στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται (Σχήμα Π.86).



Σχήμα Π.85 Εντολή *I-Data / Model*



Σχήμα Π.86 Ρυθμίσεις εντολής *I-Data / Model*

Στο αριστερό τμήμα του παραπάνω σχήματος:

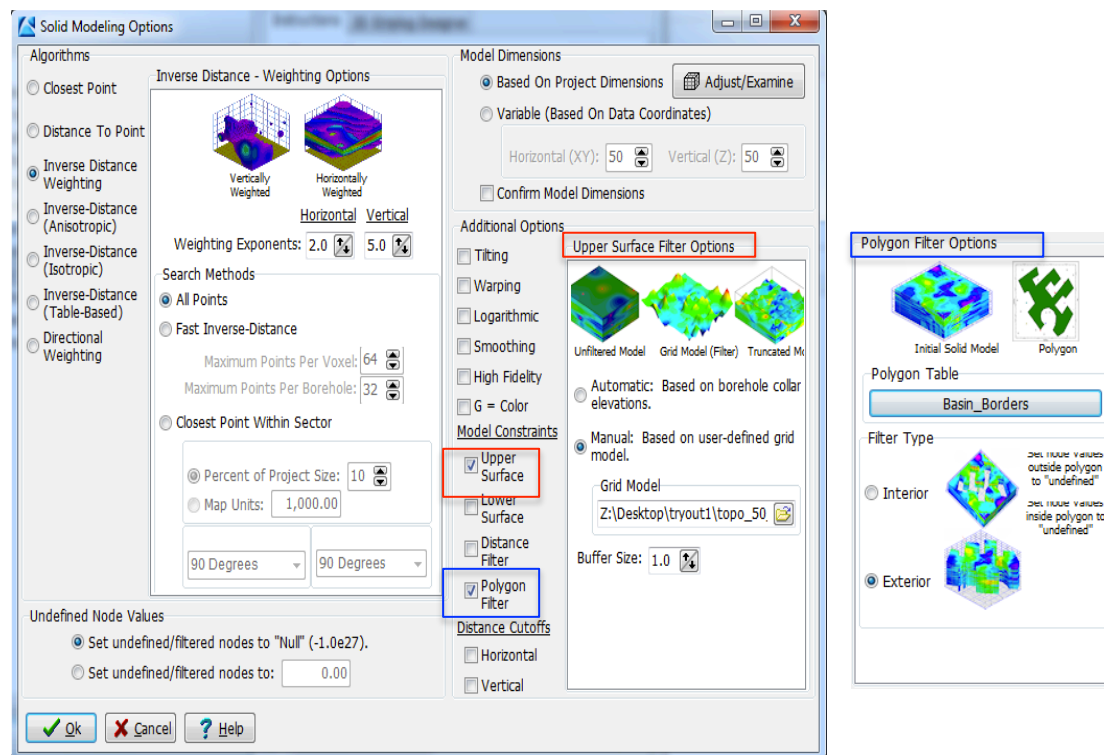
Επιλέγεται η κατασκευή νέου μοντέλου (*Create New Model*), ορίζεται η ιδιότητα της οποίας τα δεδομένα θα μοντελοποιηθούν με κλικ στο πεδίο *I-Data Track* (στην προκειμένη *Resistivity*). Στη συνέχεια ορίζεται το όνομα αποθήκευσης του μοντέλου που θα κατασκευαστεί με κλικ στο πεδίο *Solid Model Name* και ρυθμίζονται οι παράμετροι μοντελοποίησης στο νέο παράθυρο (Σχήμα Π.87) που προκύπτει με κλικ στο πεδίο *Solid Modeling Options*. Ακολούθως ενεργοποιείται η επιλογή κατασκευής τρισδιάστατου διαγράμματος απεικόνισης του μοντέλου (*Create 3-Dimensional Diagram*) και ως τύπος διαγράμματος (*Diagram Type*), επιλέγεται *All Voxels*, ώστε το μοντέλο να απεικονιστεί με διαφορετικών αποχρώσεων κελιά ή κύβους (*Voxels* - βλ. παράγραφο Π.6), που θα αντιπροσωπεύουν τις μεταβολές της εξεταζόμενης ιδιότητας (ειδική ηλεκτρική αντίσταση) και *Full Voxel*, ώστε να πληρωθεί με χρώμα ολόκληρο το voxel (και όχι μόνο το κεντρικό σημείο του - *Midpoint*). Τέλος, ενεργοποιούνται οι επιλογές *Reference Cage* (κελί αναφοράς - βλ. παράγραφο Π.7) και *Include Color Legend* (χρωματικό υπόμνημα - επαναρυθμίζεται στο περιβάλλον οπτικοποίησης του διαγράμματος, *RockPlot3D*).

Οι ρυθμίσεις μοντελοποίησης (*Solid Modeling Options*) περιλαμβάνουν:

στο αριστερό τμήμα του παρακάτω σχήματος, επιλέγεται η μέθοδος παρεμβολής των αντίστροφων αποστάσεων, με οριζόντιο συντελεστή βάρους: 2, κατακόρυφο συντελεστή βάρους: 5 και συμμετοχή όλων των κόμβων (βλ. παράγραφο Π.6).

Στο πάνω και δεξιά τμήμα, το μοντέλο θα διαστασιοποιηθεί με βάση τις τρέχουσες διαστάσεις της περιοχής μελέτης και επομένως επιλέγεται *Based On Project Dimensions*.

Τέλος, στο κάτω και δεξιά τμήμα (*Model Constraints*), η ανώτερη επιφάνεια του μοντέλου ιδιοτήτων θα περιοριστεί από το πλεγματοτικό μοντέλο τοπογραφικού αναγλύφου της επιφάνειας του εδάφους (βλ. παράγραφο Π.7) και θα εφαρμοστεί πολυγωνικό φίλτρο (βλ. παράγραφο Π.8.5), που αποτελεί την περίμετρο της περιοχής μελέτης, ώστε το μοντέλο να περιοριστεί και περιφερειακά. Σημειώνεται ότι θα εφαρμοστεί και δεύτερο πολυγωνικό φίλτρο μικρότερης περιμέτρου, ώστε να απομονωθεί η παράκτια ζώνη της λεκάνης και να εξεταστεί πιο διεξοδικά το φαινόμενο της υφαλμύρινσης του υδροφόρου ορίζοντα (βλ. παράγραφο 2.3).

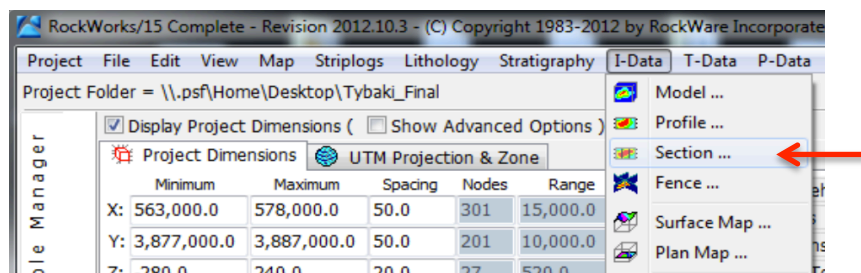


Σχήμα Π.87 Ρυθμίσεις μοντελοποίησης (*Solid Modeling Options*)

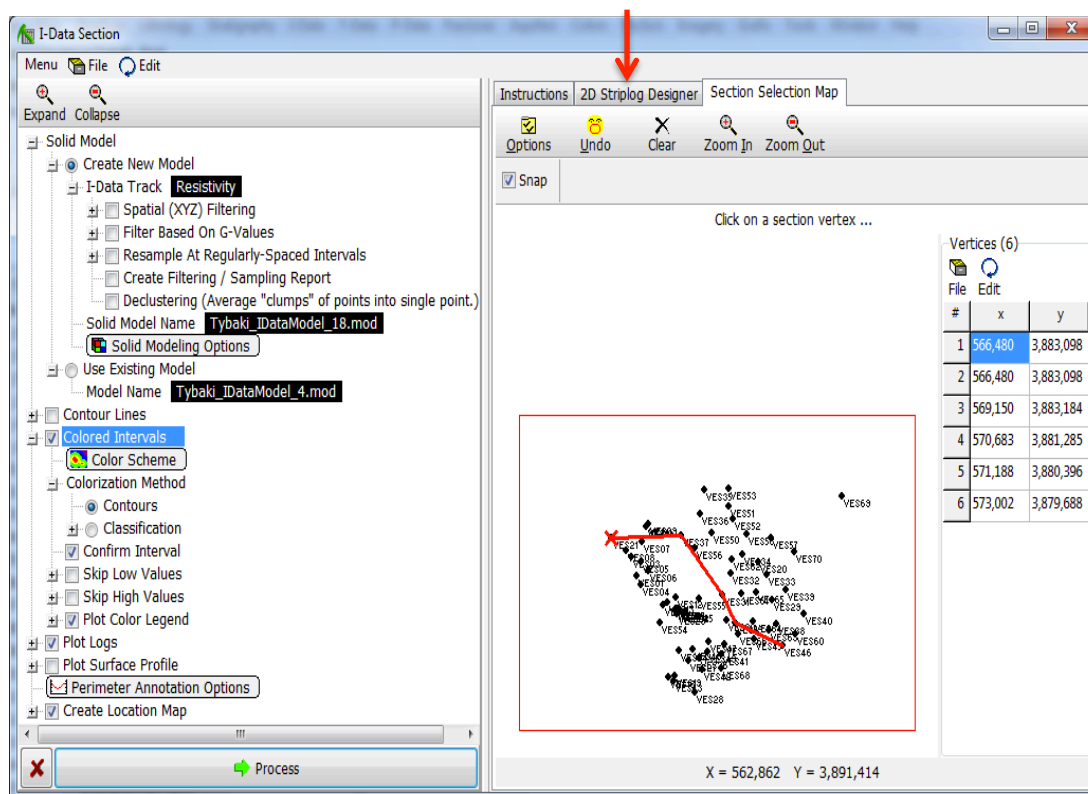
Για τον πρώτο περιορισμό, ενεργοποιείται η επιλογή *Upper Surface* (κόκκινο χρώμα στο παραπάνω σχήμα) και εμφανίζονται οι παράμετροι φιλτραρίσματος (*Upper Surface Filter Options*), όπου επιλέγεται *Manual: Based on user-defined grid model* και υποδηλώνεται το περιοριστικό πλεγματοτικό μοντέλο με κλικ στο πεδίο *Grid Model*. Για το δεύτερο περιορισμό, αντίστοιχα επιλέγεται *Polygon Filter*, υποδεικνύεται το πολυγωνικό φίλτρο με κλικ στο πεδίο *Polygon Table* και ορίζεται ο τύπος του φίλτρου ως *Exterior*, ώστε να δωθούν *null* (απροσδιόριστες) τιμές και να αποκλειστούν οι κόμβοι εκτός του φίλτρου.

Π.8.9 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ

Για την κατασκευή γεωηλεκτρικών τομών σε οποιαδήποτε διεύθυνση, επιλέγονται οι εμπλεκόμενες βυθοσκοπήσεις, εκτελείται η εντολή *I-Data / Section* (Σχήμα Π.88) και η διαδικασία μεταφέρεται σε νέο παράθυρο ρυθμίσεων (Σχήμα Π.89).



Σχήμα Π.88 Εντολή I-Data / Section



Σχήμα Π.89 Ρυθμίσεις εντολής I-Data / Section

Στο κεντρικό τμήμα του ανωτέρω σχήματος και στην καρτέλα Section Selection Map, ορίζεται η διεύθυνση της τομής με τεθλασμένη γραμμή μελέτης και κατ' επέκταση οι βυθοσκοπήσεις που θα εμπλέκονται σε αυτήν (βλ. παράγραφο Π.8.3).

Στο αριστερό τμήμα, επιλέγεται η κατασκευή νέου μοντέλου ιδιοτήτων σε πλήρη αντιστοιχία με τις ρυθμίσεις της παραγράφου Π.8.8 ή επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ένα ήδη κατασκευασμένο και αποθηκευμένο μοντέλο (π.χ. με την προηγουμένως περιγραφείσα εντολή, *I-Data / Model*) ενεργοποιώντας την επιλογή Use Existing Model και επισημαίνοντας το μοντέλο με κλικ στο πεδίο *Model Name*.

Οι μεταβολές των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο δισδιάστατο διάγραμμα προβολής της τομής, θα απεικονιστούν με εναλλαγές χρωματικών διαστημάτων (Colored Intervals - βλ. παράγραφο Π.8.7). Οι αποχρώσεις ορίζονται με κλικ στο πεδίο *Color Scheme* και το χρωματικό υπόμνημα συμπεριλαμβάνεται ενεργοποιώντας την επιλογή *Plot Color Legend*.

Οι υπόλοιπες επιλογές που ρυθμίζονται:

Plot Logs (σχεδίαση βυθοσκοπήσεων από τις οποίες διέρχεται η τεθλασμένη γραμμή μελέτης και παραμετροποίηση των ρυθμίσεων σχεδίασης στην καρτέλα 2D Striplog Designer - βλ. παράγραφο Π.8.2 - στην προκειμένη επιλέχθηκαν τα πεδία *Title* και *Depths*), Perimeter Annotation Options και Create Location Map (βλ. παράγραφο Π.8.3).