



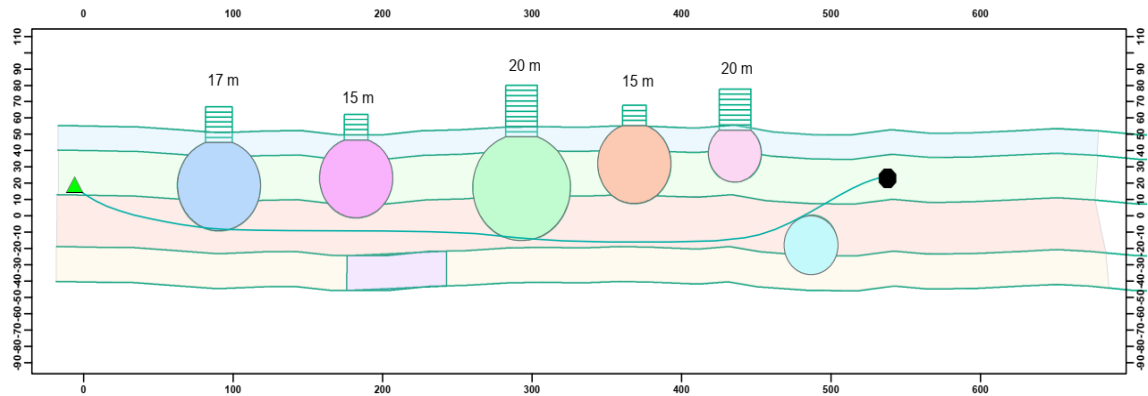
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΧΑΡΑΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΕΝΤΟΣ ΚΑΤΟΙΚΗΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ
ΜΕ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΚΑΙ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ
ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΣΠΥΡΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Μαρίνος Καττής Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Πρόδρομος Ψαρρόπουλος Ε.ΔΙ.Π Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΧΑΡΑΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΕΝΤΟΣ ΚΑΤΟΙΚΗΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕ
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΚΑΙ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΣΠΥΡΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Μαρίνος Καττής Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Πρόδρομος Ψαρρόπουλος Ε.ΔΙ.Π Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2019



NATIONAL TECHNICAL UNIVERISTY OF ATHENS

SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING

DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE AND RURAL
DEVELOPMENT

LABORATORY OF STRUCTURAL MECHANICS

**ROUTE OPTIMIZATION OF UNDERGROUND TUNNEL IN URBAN AREAS
WITH GEOTECHNICAL AND STUCTURAL CRITERIA USING
GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS**

THESIS

PAPASPYROS VASILEIOS

SUPERVISOR: Marinos Kattis Associated Professor NTUA

COSUPERVISOR: Prodromos Psarropoulos Special Scientific Stuff NTUA

ATHENS, March 2019

Copyright © Παπασπύρος Βασίλειος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που εμπεριέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει σε ουδεμία περίπτωση να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές της διπλωματικής εργασίας κ. Μαρίνο Καττή και κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, τόσο για την υποστήριξη που παρείχαν σχετικά με τις γνώσεις τους, την βοήθεια τους στην επίλυση των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν, αλλά και την γενικότερη στήριξη σε όλους τους τομείς κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στο κύριο Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, ο οποίος παρά τις επαγγελματικές υποχρεώσεις του, μου προσέφερε καίριες συμβουλές για την εκπόνηση της εργασίας όποτε υπήρχε ανάγκη, μέσω της εμπειρίας του και των γνώσεών του.

Θα ήθελα στην συνέχεια να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Στέφανο Τσουγκράνη, ο οποίος, ως μεταπτυχιακός φοιτητής αρχικώς, και ως απόφοιτος στην συνέχεια, βοήθησε με τις γνώσεις τους πάνω στα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα και την κατασκευή εργαλείων υποστήριξης λήψης αποφάσεων βοήθησε αποφασιστικά στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής.

Επίσης σημαντικό μερίδιο στην επίτευξη του στόχου της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής έχουν και οι φίλοι μου, οι οποίοι μου συμπαραστάθηκαν έμπρακτα, είτε ψυχολογικά, είτε με το αυξημένο ενδιαφέρον τους για την πορεία της όλης διαδικασίας.

Καταληκτικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω πάνω από όλα τα μέλη της οικογένειας μου που δεν έπαψαν καμία στιγμή να με υποστηρίζουν και να πιστεύουν στις δυνατότητές μου κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Κατά την διάρκεια όλων των ετών της ζωής μου αλλά ακόμη περισσότερο τα τελευταία πέντε χρόνια της φοίτησης μου στην Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., οι συμβουλές τους και η κριτική που μου άσκησαν, με βοήθησαν να εξελιχθώ ως χαρακτήρας και να γίνω καλύτερος άνθρωπος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κατασκευή και χρήση σηράγγων ξεκίνησε από την αρχαιότητα, ωστόσο τα πρώτα κύρια έργα σηραγγοποιίας αρχίζουν να εμφανίζονται από τον 19^ο αιώνα. Με το πέρας των δεκαετιών, η ραγδαία ανάγκη των διαρκώς αυξανόμενου πληθυσμού μεγάλων ευρωπαϊκών και αμερικανικών πόλεων για γρήγορη μετακίνηση, είτε εντός των πόλεων, είτε μεταξύ τους, οδήγησαν στην έξαρση της κατασκευής υπόγειων σηράγγων. Η τριβή των επιστημόνων / μηχανικών με τα συσχετιζόμενα προβλήματα που προέκυψαν από την εκσκαφή σηράγγων οδήγησαν στην πληρέστερη θεώρηση και τον καθορισμό του περίπλοκου χαρακτήρα του εγχειρήματος, ο οποίος δομείται από διοικητικές, οικονομικές και πολιτικές συνιστώσες. Έτσι, η επιστημονική κοινότητα ανέπτυξε με την βοήθεια της τεχνολογίας διάφορα εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων σχετικά με την διαδικασία της χάραξης σηράγγων. Ωστόσο ακόμη και στις πιο αναπτυγμένες χώρες δεν λείπουν οι αστοχίες λόγω παράβλεψης ορισμένων σημαντικών μεταβλητών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται ένα εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων γεωγραφικού πληροφοριακού συστήματος, με στόχο την διεύρυνση της χρησιμότητάς τους, στον καθορισμό της χάραξης σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές, τόσο οριζοντιογραφικά, όσο και κατά βάθος. Ο σχεδιασμός της χάραξης συντελείται λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ανάγκη για την αποφυγή εμποδίων οποιασδήποτε μορφής, όσο και με γεωτεχνικά και δομοστατικά κριτήρια. Οι κύριες χωρικές συνιστώσες όπου γίνεται εστίαση είναι τα δημόσια κτήρια, κάτω από τα οποία είναι προτιμότερο να μην γίνονται εκσκαφές, οι βολβοί των τάσεων που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση επιφανειακών κατασκευών και του εδάφους και τέλος οι γεωλογικές συνθήκες.

ABSTRACT

The construction and use of tunnels begun during the ancient times, however the first major tunneling projects only begun in the midst of 19th century. Over the decades to follow, the ever growing needs of the big European and North American urban population for safe a quick transportation inside the city limits or between different locations have driven a surge in construction of underground tunnels. The active involvement of scientists / engineers with the issues associated with tunnel construction led to a more complete view over its complexity, which is constructed mainly of social, administrative, economically and politically components. For this reason the scientific community with the help of technology has begun constructing decision making tools in order to optimize the construction of this kind of projects.

The current thesis presents a decision making tool with the help of geographic information systems, in order to expand their utility in route optimization in urban areas both horizontally and in depth with geotechnical and structural criteria. The spatial components which are being focused are the public buildings at which it is not advisable to excavate beneath, the bulbs of pressure which are created by the interaction between the foundation and the soil and finally the geological conditions of the study area.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή στο Θέμα και Στόχοι.....	1
1.1 Εισαγωγή στο θέμα	1
1.2 Στόχοι της Εργασίας	3
1.3 Δομή της Εργασίας.....	3
Κεφάλαιο 2 : Επιφανειακές Σήραγγες σε Κατοικημένες Περιοχές	5
2.1 Εισαγωγή	5
2.2 Χάραξη Σηράγγων	6
2.2.1. Βασικά Κριτήρια για τη Χάραξη.....	6
2.2.2 Κίνδυνοι στην Κατασκευή Σηράγγων	7
2.3. Μέθοδος Διάνοιξης με TBM (Μηχανές Ολομέτωπης Διάνοιξης)	9
2.3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά των Μηχανών Ολομέτωπης Διάνοιξης TBM.....	10
2.3.2 Ταξινόμηση των Μηχανοποιημένων Τεχνικών Διάνοιξης TBM.....	12
2.3.3 Πλεονεκτήματα χρήσης Μηχανημάτων ολομέτωπης Κοπής σε Κατοικημένες Περιοχές.....	15
2.4 Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων με NATM (New Austrian Tunneling Method ..	16
2.4.1 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου NATM	17
2.4.2 Σχεδιασμός της Διάνοιξης και εκσκαφή με την μέθοδο NATM	19
2.4.3 Πλεονεκτήματα μεθόδου NATM σε σχέση με άλλες μεθόδους σε Κατοικημένες περιοχές.....	22
2.4 Λοιπές Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων.....	23
2.4.1 Μέθοδος Ανοιχτού Ορύγματος Cut and Cover και Cover and Cut	23
2.4.2 Μέθοδος Διάνοιξης TNM.....	25
2.5 Παρακολούθηση της συμπεριφοράς των Σηράγγων σε Κατοικημένες περιοχές.....	26
2.5.1 Παρακολούθηση των Μετακινήσεων του Τοιχώματος της Σήραγγας	27
2.5.2 Παρακολούθηση των Μετακινήσεων της Βραχώμαζας	28
2.5.3 Μετρήσεις των Πίεσεων στην Επένδυση της Σήραγγας	30
2.5.4 Μετρήσεις Δυνάμεων και Μετρήσεις των Παροχών	30
Κεφάλαιο 3 : Καθιζήσεις λόγω Διάνοιξης Σήραγγας σε Κατοικημένες Περιοχές και Τάσεις Επιφανειακών Κατασκευών	31

3.1	Εμπειρικές Μέθοδοι Εκτίμησης των Επιφανειακών Εδαφικών Μετακινήσεων.....	32
3.1.1	Κατακόρυφες Εδαφικές Μετακινήσεις στον άξονα της Σήραγγας	32
3.1.2	Οριζόντιες Εδαφικές Μετακινήσεις Κάθετα στον Άξονα της Σήραγγας	36
3.1.3	Κατακόρυφες επιφανειακές Μετακινήσεις κατά μήκος του άξονα της Σήραγγας.....	38
3.1.4	Εδαφικές Μετακινήσεις Έπειτα το Πέρασ της Κατασκευής	39
3.2	Κριτήρια Εδαφικών Μετακινήσεων και Κατηγορίες Βλαβών Κτηρίων.....	40
3.2.1	Παραμορφώσεις στις Υπερκείμενες Κατασκευές κατά την Διάνοιξη Σήραγγας.....	41
3.2.2	Κριτήρια Επιτρεπόμενων Καθιζήσεων	42
3.2.3	Κατηγορίες Βλαβών Κτηρίων.....	46
3.3	Επιβολή Τάσεων Στο Έδαφος Λόγω Εξωτερικών Φορτίων	49
3.3.1	Ορθή Δύναμη επί Ελαστικού Ημιχώρου	50
3.3.2	Ορθή Πίεση σε Κυκλική Επιφάνεια	51
3.3.3	Ορθή Πίεση σε Ορθογωνική Επιφάνεια.....	52
3.3.4	Ορθή Φόρτιση σε Απειρομήκη Γραμμή	53
3.3.5	Ορθή Πίεση σε Απειρομήκη Λωρίδα.....	53
Κεφάλαιο 4 : Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα και Εφαρμογή τους στην Χάραξη Σηράγγων σε Κατοικημένες Περιοχές.....		55
4.1	Εισαγωγή.....	55
4.2	Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα.....	55
4.2.1	Ροή Εργασιών σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών.....	57
4.2.2	Το Μοντέλο Δεδομένων	59
4.2.3	Αναπαράσταση των δεδομένων.....	59
4.2.4	Θεμελιώδεις Έννοιες ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών.....	64
4.3	Περιγραφή του Λογισμικού ArcGis v. 10.4 και της εφαρμογής ArcMap	66
4.4	Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα και Βέλτιστη Χάραξη Σηράγγων.....	70
4.4.1	Μοντελοποίηση του Προβλήματος.....	70
4.4.2	Βασικά Χρησιμοποιούμενα Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν.....	71
Κεφάλαιο 5 : Εκπόνηση Βέλτιστης Χάραξης Αβαθούς Σήραγγας σε Κατοικημένες Περιοχές σε Περιβάλλον ArcMap.....		80
5.1	Εισαγωγή.....	80

5.2 1 ^η Εφαρμογή : Βέλτιστη Οριζοντιογραφική Χάραξη Σήραγγας σε Κατοικημένες Περιοχές.....	80
5.2.1 Γενικό Πλαίσιο της Περιοχής Μελέτης.....	80
5.2.2 Συλλογή και Διαχείριση των Δεδομένων	81
5.2.3 Διαμόρφωση Κριτηρίων	85
5.2.4 Δημιουργία Μοντέλου και εκπόνηση της διαδικασίας	86
5.2.5 Αποτελέσματα του Μοντέλου	91
5.3 2 ^η Εφαρμογή : Βέλτιστη Κατά Βάθος Χάραξη Σήραγγας σε Κατοικημένες Περιοχές.....	93
5.3.1 Γενικό Πλαίσιο της Περιοχής Μελέτης.....	93
5.3.2 Συλλογή και Διαχείριση Δεδομένων.....	94
5.3.3 Διαμόρφωση Κριτηρίων	96
5.3.4 Δημιουργία Μοντέλου και εκπόνηση της Διαδικασίας	97
5.3.5 Αποτελέσματα του Μοντέλου	101
Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα και Πιθανές Μελλοντικές Προεκτάσεις	104
6.1 Συμπεράσματα και Αποτίμηση της Εργασίας	104
6.2 Μελλοντικές προεκτάσεις της μεθοδολογίας και του εργαλείου υποστήριξης λήψης αποφάσεων.....	105
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	107

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Κεφάλαιο 1

Εικόνα 1.1 : Από αριστερά και δεξιόστροφα (α) Υπόγειος Αυτοκινητόδρομος (Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel#/media/File:2007_09_19_-_894tunnel_-_WB_3.JPG), (β) Υπόγεια σήραγγα metro υπό κατασκευή (Πηγή: https://ru.depositphotos.com/89381490/stock-photo-kiev-subway-tunnel.html) και (γ) Υπόγεια σήραγγα metro πλήρως λειτουργική (Πηγή: http://sidirodromikanea.blogspot.com/2018/09/10-4.html).....	1
Εικόνα 1.2 : Από αριστερά και δεξιόστροφα (α) Κατάρρευση τμήματος της επιφάνειας στη Λωζάννη λόγω των εργασιών του Metro. (Πηγή: https://randomwire.com/subterranean-danger/) (β) Κατάρρευση τμήματος του Metro της Κολωνίας λόγω μη σωστής Σχεδίασης της σήραγγας (Πηγή: https://www.tunneltalk.com/Cologne-collapse-Mar09-Deadly-collapse-in-Cologne.php).....	2

Κεφάλαιο 2

Εικόνα 2.1 : Κατανομή Ανεπιθύμητων Συμβάντων (Sousa et al., 2010).....	8
Εικόνα 2.2 : Μηχάνημα Διάνοιξης Σηράγγων TBM στο metro της Θεσσαλονίκης (Πηγή : https://www.ametro.gr/?page_id=378).....	10
.....	11
Εικόνα 2.3 : Βασικά Τμήματα Μηχανής Διάνοιξης Σηράγγων TBM (Πηγή: Καλιαμπάκος, 2017).....	11
Σχήμα 2.4 : Μηχανή Διάνοιξης τύπου Boom με ευθύγραμμη κοπτική κεφαλή (roadheader) (Πηγή : https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/mechanical-cutting-equipment/roadheaders-for-tunneling/).....	13
Εικόνα 2.4 : Βασικά Τμήματα Μηχανής Διάνοιξης τύπου Main-Beam (Πηγή : Robbins, Appendix D – Tunnel Boring Machines March 2009).....	14
Εικόνα 2.5 : Διάγραμμα με λεπτομερή αναφορά στα μέρη ενός Μηχανήματος Διάνοιξης Σηράγγων με Διπλή Ασπίδα (Πηγή : http://www.therobbinscompany.com/products/tunnel-boring-machines/double-shield/double-shield-detail/).....	15
Εικόνα 2.7 : Τεχνικές της μεθόδου NATM (πηγή: http://bestsupportunderground.com/natm-shotcrete/?lang=en).....	16
Εικόνα 2.8 : Πως επηρεάζει ο χρόνος τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχομάζας την υποστήριξη της σήραγγας όπου I: πολύ νωρίς. Η πίεση στην άμεση υποστήριξη (p1) είναι πολύ μεγάλη. II: κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης. Η πίεση (p2) μειώνεται σημαντικά .	

III: πολύ αργά. Η πίεση (p_3) έχει αυξηθεί λόγω χαλάρωσης της βραχομάζας, με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης . (Πηγή : Καββαδάς 2004).....	17
Εικόνα 2.9 : Εκτίμηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης κατά το σύστημα Q (NGI) (Πηγή : Καββαδάς 2004).....	20
Εικόνα 2.10 : Διάνοιξη Σήραγγας σε 10 υποφάσεις με 2 πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα (Πηγή : Καββαδάς 2004).....	21
Εικόνα 2.11 : Διάνοιξη Σήραγγας σε 3 υποφάσεις καθ' ύψος (top heading and bench) (Πηγή : Καββαδάς 2004).....	21
Σχήμα 2.12 : Μηχάνημα ψεκασμού Σκυροδέματος για την άμεση υποστήριξη της Σήραγγας (Πηγή : https://www.icm.co.jp/english/product/natm.html)	22
Εικόνα 2.13 : Μέθοδος Διάνοιξης Cut and Cover. Αναλυτικά τα βήματα της μεθόδου (Πηγή : Mouratidis, 2008).....	24
Εικόνα 2.14 : Μέθοδος Διάνοιξης Cover and Cut ή Top down . Αναλυτικά τα βήματα της μεθόδου (Πηγή : Mouratidis, 2008)	25
Εικόνα 2.14 : Έλεγχος μικρομετακινήσεων με τοπογραφικές μεθόδους (total station και reflex targets) (Πηγή: https://www.aplitor.com/tunnels).....	27
Εικόνα 2.15 : Από αριστερά και δεξιόστροφα (α) Ψηφιακό Εκστασιόμετρο (Πηγή: https://www.geosense.co.uk/products/details/Digital_Tape_Extensometer)	29
(β) Εκστασιόμετρο με Ταινία (αναλογικό) (Πηγή: https://www.rstinstruments.com/Tape-Extensometer.html)	29
(γ) Τυπικό Αποκλισιόμετρο (Πηγή: https://roctest.com/en/product/profil-digital-inclinometer-probe/)	29
(δ) Μετρήσεις Μικρομετακινήσεων με Εκστασιόμετρο Ράβδου (Πηγή: http://www.cordintec.com/geo.html)	29
Εικόνα 2.17 : Από αριστερά και αριστερόστροφα (α) Παροχόμετρο (Πηγή : (http://gr.digital-instrument.com/flow-transmitter/electromagnetic-flow-meter/high-quality-smart-electromagnetic-flow-meter.html)	30
(β) Τοποθετημένα Ηλεκτρομηκυνσιόμετρα σε τοίχωμα Σήραγγας (Πηγή : http://www.geodata.at/en/sensors-systems-software/sensoren/strain_gauges-pressure_cells.php).....	30

Κεφάλαιο 3

Εικόνα 3.1 : Ιδεατή Καμπύλη που αναπαριστά τις επιφανειακές κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις (καθιζήσεις) υπό συνθήκες «ελευθέρου πεδίου» (Πηγή : Σακελλαρίου, 2008)	33
Εικόνα 3.2 : Προοπτική Εικόνα των Επιφανειακών κατακόρυφων καθιζήσεων λόγω Διάνοιξης Σήραγγας (Πηγή : Καθιζήσεις και Συγκλίσεις προκαλούμενες από την Διάνοιξη Αβαθών Σηράγγων. Αναλυτικές και υπολογιστικές Μέθοδοι εκτίμησης , Μαρία Κορδελούλη et al, 2008)	33

Εικόνα 3.3 Σχεδιάγραμμα που δείχνει τις κατά πλάτος Κατανομές Οριζόντιων Επιφανειακών Μετακινήσεων, λόγω Διάνοιξης Σήραγγας (Πηγή : Σακελλαρίου, 2008)	38
Εικόνα 3.4 : Σχεδιάγραμμα Κατανομής Επιφανειακών Καθιζήσεων κατά μήκος του άξονα της Σήραγγας (Πηγή : Σακελλαρίου, 2008).....	39
Εικόνα 3.4 : Καθορισμός Εδαφικών μετακινήσεων και παραμόρφωσης κτηρίων. Α) Καθίζηση ϵ , διαφορική καθίζηση δ_s , στροφή θ , γωνιακή παραμόρφωση α , β) Μετατόπιση Δ , Λόγος σχετικής μετατόπισης Δ/L , γ) Απόκλισης θεμελίωσης ω και σχετική στροφή β (Πηγή: Burland, 1994)	41
Εικόνα 3.5 Όρια Διαφορικών Καθιζήσεων και γωνιακών στροφών κατά Navtas (Πηγή : Σακελλαρίου, 2008).....	44
Εικόνα 3.7 : Συσχέτιση κατηγορίας βλάβης με την κρίσιμη οριακή εφελκυστική παραμόρφωση και την μέγιστη σχετική μετατόπιση υπό συνθήκες κύρτωσης ($L/H = 1.0$) (Πηγή: Burland,1994).....	47
Εικόνα 3.8 : Συγκεντρωμένο Φορτίο επί Ελαστικού Ημιχώρου (Πηγή : Καββαδάς, 2005)	50
Εικόνα 3.9 : Κατανομή Τάσεων κάτω από Κυκλικό Θεμέλιο (Πηγή : Μ Καββαδάς, 2005)	51
Εικόνα 3.10 : Από αριστερά και αριστερόστροφα α) Τάσεις κάτω από την γωνία ορθογωνικού φορτίου β) Τάσεις κάτω από τυχόν σημείο Μ γ) Βολβοί Τάσεων κάτω από ορθογωνικό και τετραγωνικό θεμέλιο (Πηγή : Καββαδάς, 2005 Στοιχεία και G.E Barnes, 1995)	52
Εικόνα 3.11 : Σχεδιάγραμμα που παρουσιάζει την φόρτιση Απειρομήκουσ Λωρίδας (Πηγή : Καββαδάς, 2005)	54

Κεφάλαιο 4

Εικόνα 4.1 : Σχηματική αναπαράσταση τριών βασικών τμημάτων ενός Γ.Π.Σ το οποίο περιλαμβάνει το υλικό και τον εξοπλισμό για την συλλογή και προβολής της πληροφορίας,το λογισμικό και τους μεθόδους για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων και της απόδοσης της τελικής πληροφορίας-προϊόντος . (Πηγή : http://xsomaras.somweb.gr/?p=459)	57
Εικόνα 4.2 : Διάγραμμα ολοκληρωμένης Χωρικής Προσέγγισης (Πηγή : Διαφάνειες μαθήματος Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα Σχολή Αγρονόμων και τοπογράφων Μηχανικών)	58
Εικόνα 4.3 : Απόδοση Εικόνας σε φατνία με τιμές 0 και 1 με την μέθοδο του σημαντικότερου (Πηγή : Διαφάνειες μαθήματος Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα Σχολή Αγρονόμων και τοπογράφων Μηχανικών).....	60
Εικόνα 4.4 : Αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου σε διανυσματική (vector) και ψηφιδωτή μορφή (raster) (Πηγή : David J Saab May 2003).....	61

Εικόνα 4.5 : Μοντέλο Διανυσματικών Δεδομένων σε σχέση με με τον φυσικό Κόσμο. Διακρίνονται οι συντεταγμένες (x,y) (Πηγή : http://www.geography.hunter.cuny.edu/~jochen/GTECH351/lectures/lecture04/concepts/03%20-%20Geographic%20data%20models.html).....	62
Εικόνα 4.5 : Μοντέλο Ψηφιδωτών Δεδομένων. Διακρίνονται οι διαφορετικές τιμές στα κελιά που αποτελούν την εικόνα στα οποία ο αριθμός (3) απεικονίζει τα δάση, ο αριθμός (2) τα λιβάδια και ο αριθμός (1) το νερό . (Πηγή : http://www.oogazone.com/2018/best-hd-vector-and-raster-gis-vector-image/)....	63
Εικόνα 4.7 : Παράδειγμα αλληλοεπικάλυψης θεματικών επιπέδων διανυσματικού και ψηφιδωτού μοντέλου ώστε να υπάρχει όσο καλύτερη απεικόνιση γίνεται του πραγματικού κόσμου (Πηγή : https://imagui.eu/pemanfaatan-sig-system-information-geografis-untuk.html).....	66
Εικόνα 4.8 : Παράθυρο διαλόγου ArcMap v.10.4 στην οποία αριστερά διακρίνονται οι εφαρμογές Arc Toolbox και διάφορα θεματικά επίπεδα στο Table of Contents και δεξιά το ArcCatalog από το οποίο γίνεται σύνδεση των δεδομένων	68
Εικόνα 4.9 : Το παράθυρο διαλόγου του εργαλείου ArcCatalog από το οποίο μπορεί ο χρήστης να διαχειριστεί τα δεδομένα που υπάρχουν διαθέσιμα. Αριστερά διακρίνεται η “δενδρική προβολή”	69
Εικόνα 4.10 : Από αριστερά προς τα δεξιά. (α) Ανάθεση τιμών στο ψηφιδωτό της επιφανείας προέλευσης, η οποία συμβολίζεται με την τιμή 1, και του σημείου προορισμού που συμβολίζεται με τον αριθμό 2. (β) Υπέρθωση αυτού του ψηφιδωτού με το ψηφιδωτό κόστους . (γ) Τελικό ψηφιδωτό, το οποίο περιέχει τις συσσωρευτικές τιμές κόστους ανά κελί. (Πηγή : http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-distance.htm)	72
Εικόνα 4.11 : Οι τρεις διαφορετικές περιπτώσεις υπολογισμού του συσσωρευτικού κόστους μαζί με τους τύπους που χρησιμοποιούνται (Πηγή : http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-the-path-distance-tools-work.htm).....	73
Εικόνα 4.12 : Καθορισμός της μέγιστης ευκλείδειας απόστασης (Πηγή : http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-euclidean-distance-analysis.htm)	73
Εικόνα 4.13 : Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από μετατροπή πολυγωνικών οντοτήτων σε ψηφιδωτά δεδομένα και με τις τρεις μεθόδους ανάθεσης τιμών. (Πηγή : http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/conversion/how-polygon-to-raster-works.htm).....	74
Εικόνα 4.14 : Μετατροπή ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) σε ένα ψηφιδωτό επίπεδο με την κλίση σε μοίρες ή ποσοστό ανύψωσης (Πηγή : http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm)	75

Εικόνα 4.15 : Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των δύο αποτελεσμάτων εξομάλυνσης στην ίδια πολυγωνική γραμμή. (Πηγή : http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/cartography/smooth-line.htm)	76
Εικόνα 4.14 : Η λειτουργία του εργαλείου Ένωσης(Union) (Πηγή : http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/analysis-toolbox/union.htm).....	77
Εικόνα 4.15 : Η λειτουργία του εργαλείου Τομής θεματικών Επιπέδων (Intersect). (Πηγές : http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/analysis-toolbox/intersect.htm)	78
Εικόνα 4.17 : Η λειτουργία του εργαλείου Αποκοπής (Clip). (Πηγή : http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/analysis-toolbox/clip.htm).....	78

Κεφάλαιο 5

Εικόνα 5.1 : Από Αριστερά και Δεξιόστροφα α) Δήμος Αγίας Βαρβάρας (Πηγή : Wikipedia,2019) β) Δήμος Κορυδαλλού (Πηγή : Wikipedia,2019) γ) Περιοχή μελέτης (Πηγή : Προσωπικό Αρχείο,2019) δ) Καλλικρατικοί Δήμοι της Περιφέρειας Αττικής (Πηγή : https://www.printcenter.com.gr/xartes-ellados.html)	81
Εικόνα 5.2 : Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (D.E.M) της Αττικής που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των κλίσεων	82
Εικόνα 5.3 : Γεωαναφερμένος Χάρτης Εδαφολογικών στοιχείων	83
Εικόνα 5.4 : Ψηφιοποιημένος Χάρτης Εδαφικών ζωνών στην Περιοχή Μελέτης	84
Εικόνα 5.5 : Ψηφιοποιημένος Χάρτης Υπαρχόντων Ρηγμάτων και Πιθανόν Ρηγμάτων στην περιοχή της Νότιας και Δυτικής Αττικής.....	84
Εικόνα 5.6 : Χάρτης Τελικής ψηφιοποιημένης Περιοχής στην οποία διακρίνονται η Αφετηρία και ο Προορισμός της χάραξης	86
Εικόνα 5.7 : Το Σταθμισμένο Άθροισμα της ευκλείδειας απόστασης μεταξύ σημείου Αφετηρίας και σημείο Προορισμού	87
Εικόνα 5.8 : Το σταθμισμένο Ποιοτικό Κόστος στην περιοχή μελέτης έπειτα από την υπέρθεση όλων των χρησιμοποιούμενων θεματικών επιπέδων	88
Εικόνα 5.9 : Απεικόνιση της διαφοράς μεταξύ την πολυγωνικής γραμμής και της εξομαλυμένης μορφής της βέλτιστης χάραξης.....	89
Εικόνα 5.10 : Το παραγόμενο θεματικό επίπεδο του Κόστους Απόστασης από το εργαλείο Cost Distance.....	90
Εικόνα 5.11: Το διάγραμμα ροής όπως αυτό κατασκευάστηκε στο εργαλείο Model Builder	90
Εικόνα 5.12 : Απεικόνιση των δύο διαφορετικών διαδρομών της χάραξης σήραγγας σε κατοικημένες περιοχές από τα ίδια σημεία Αφετηρίας και Προορισμού . Από Αριστερά προς τα Δεξιά α) Βέλτιστη Διαδρομή 1 β) Βέλτιστη Διαδρομή 2.....	92
Εικόνα 5.13 : Περιοχή μελέτης για την Κατά Βάθος Χάραξη Σήραγγας στην περιοχή Αγίας Βαρβάρας- Κορυδαλλού	93

Εικόνα 5.14 : Από Αριστερά και Δεξιόστροφα α) Βολβός Τάσεων από φόρτιση του εδάφους κτηρίου με 2 υπόγεια β) Βολβός Τάσεων από φόρτιση του εδάφους κτηρίου χωρίς υπόγειο	95
Εικόνα 5.15 : Τιμές Φορτίσεων των Βολβών Τάσεων λόγω των Κτηρίων της Επιφάνειας.....	95
Εικόνα 5.16 : Σταθμισμένο Άθροισμα Ευκλείδειας Απόσταση Αφετηρίας και Προορισμού	98
Εικόνα 5.17 : Το Σταθμισμένο Ποιοτικό Κόστος όπως αυτό προέκυψε από την υπέρθεση των χρησιμοποιούμενων θεματικών επιπέδων.....	99
Εικόνα 5.18 : Το ελάχιστο Κόστος Διαδρομής στην δεύτερη εφαρμογή	99
Εικόνα 5.19 : Το Θεματικό επίπεδο που παρουσιάζει την Γειτνίαση Κελιών Ελαχίστου Κόστους (Backlink raster).....	100
Εικόνα 5.20 : Το διάγραμμα ροής όπως αυτό κατασκευάστηκε στο εργαλείο Model Builder για την δεύτερη εφαρμογή	101
Εικόνα 5.21 : Βέλτιστη Ομαλοποιημένη κατά Βάθος Χάραξη υπόγειας Σήραγγας όπως προέκυψε έπειτα την χρήση του Model Builder για το πρώτο θεματικό επίπεδο που προέκυψε από την σταθμισμένη υπέρθεση	102
Εικόνα 5.22 : Βέλτιστη Ομαλοποιημένη κατά Βάθος Χάραξη υπόγειας Σήραγγας όπως προέκυψε έπειτα την χρήση του Model Builder για το δεύτερο θεματικό επίπεδο που προέκυψε από την σταθμισμένη υπέρθεση	103

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.1 Μέγιστο Μήκος και μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση (Πηγή : Σοφιανός , 2018)	7
Πίνακας 2.2 : Ταξινόμηση Μηχανών Διάνοιξης (AFTES 2000)	12

Κεφάλαιο 3

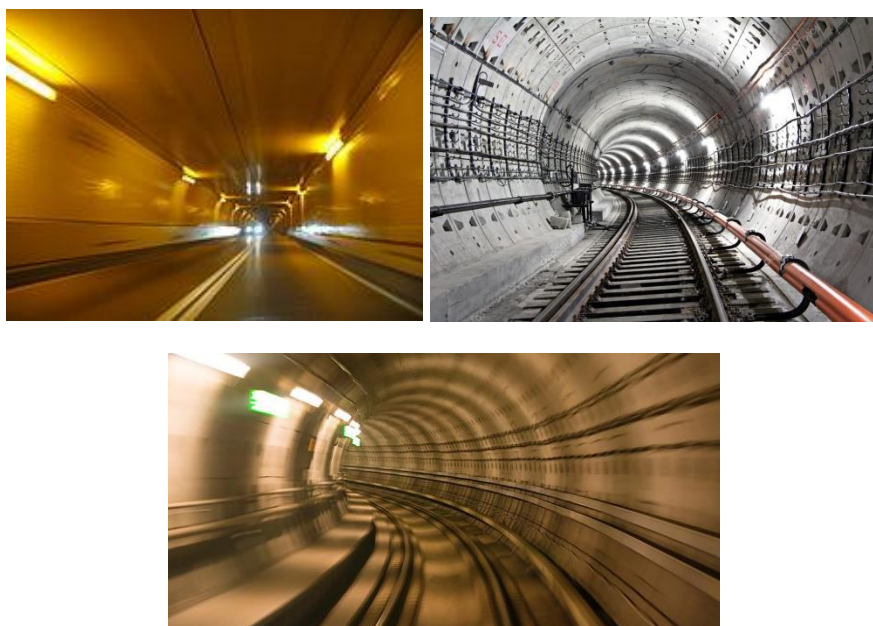
Πίνακας 3.1 : Ασφαλή όρια Καθιζήσεων και γωνιακής στροφής κατά Skempton και Mac Donald (Πηγή : Σακελλαρίου, 2008)	43
Πίνακας 3.2 : Συσχέτιση του τύπου της κατασκευής και της επιτρεπόμενης γωνιακής στροφής β της θεμελίωσης του (Πηγή : Bjerum, 1953)	44
Πίνακας 3.3 Προτεινόμενα Όρια γωνιακής στροφής και λόγου Σχετικής μετατόπισης (Tomlison 1980) (Πηγή : Σακελλαρίου, 2008)	45
Πίνακας 3.4 Κατηγορίες Βλαβών Κτηρίων με βάση την οριακή εφελκυστική παραμόρφωση και την τυπική βλάβη ή ευκολία επισκευής (Πηγή : Γεωτεχνική Σακελλαρίου, 2008)	48

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή στο Θέμα και Στόχοι

1.1 Εισαγωγή στο θέμα

Οι σήραγγες αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά τεχνικά έργα λόγω του ότι συνδέουν δυσπρόσιτες περιοχές κυρίως ως προς τον συγκοινωνιακό τομέα (υπόγειοι αυτοκινητόδρομοι, σήραγγες metro, υποθαλάσσιες σήραγγες), ενώ δευτερεύοντος υπάρχουν κι άλλες πιο σπάνιες χρήσεις (π.χ. μεταφορά νερού, πετρελαίου κλπ.). Ο πιο κοινός ορισμός της είναι ότι πρόκειται για ένα υπόγειο πέρασμα το οποίο έχει δημιουργηθεί μέσω της εκσκαφής εδαφικού υλικού (χώμα, έδαφος, βράχος) και περικλείεται από αυτό εκτός από την αρχή και το τέλος του.

Αποτελούν δύσκολα έργα λόγω της ετερογένειας και μη προβλεψιμότητας των ιδιοτήτων του εδάφους, του μεγάλου βάρους που καλούνται να συγκρατήσουν και του υψηλού κόστους που οφείλεται κυρίως στον εξειδικευμένο μηχανολογικό εξοπλισμό που απαιτείται για τη διάνοιξη.



Εικόνα 1.1: Από αριστερά και δεξιόστροφα (α) Υπόγειος Αυτοκινητόδρομος (Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel#/media/File:2007_09_19_-_894tunnel_-_WB_3.JPG), (β) Υπόγεια σήραγγα metro υπό κατασκευή (Πηγή: <https://ru.depositphotos.com/89381490/stock-photo-kiev-subway-tunnel.html>) και (γ) Υπόγεια σήραγγα metro πλήρως λειτουργική (Πηγή: <http://sidirodromikanea.blogspot.com/2018/09/10-4.html>)

Ιδιαίτερη κατηγορία σηράγγων αποτελούν οι αβαθείς σήραγγες σε κατοικημένο και πυκνοδομημένο περιβάλλον, καθώς στις υπάρχουσες δυσκολίες σχεδιασμού υπεισέρχονται επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό τους. Από τεχνικής απόψεως, η κατασκευή των σηράγγων κάτω από τις πόλεις είναι απαιτητική εξαιτίας της παρουσίας κτισμάτων στην επιφάνεια με ιδιαίτερη έμφαση στα κτίσματα πολιτιστικής κληρονομιάς, δημόσιας διοίκησης και ιδιαίτερης χρήσης γης, όπως για παράδειγμα φυλακές και στρατόπεδα. Επίσης, υπάρχει μεγάλο ρίσκο για σημαντικές μεταβολές στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της ύπαρξής τους με αποτέλεσμα αρνητικές επιπτώσεις σε παλαιά κτίσματα εάν δεν έχει ληφθεί υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού της. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στην επικινδυνότητα τέτοιου είδους σηράγγων αποτελεί το σχετικά μικρό βάθος στο οποίο χαράσσονται που δεν ξεπερνά τα 24-30 μέτρα κάνοντας δύσκολη τη περάτωση του έργου διότι υπάρχει μηδενική ανοχή για διαταραχές του υπεδάφους στην περιοχή.

Από γεωτεχνική σκοπιά, σημαντικό ρόλο στη χάραξη μιας αβαθούς σήραγγας σε κατοικημένες περιοχές έχουν η εκτίμηση των συνθηκών του εδάφους για την κατασκευή της σήραγγας, ο εντοπισμός του τύπου του γεωυλικού, οι ιδιότητες που έχει και η σύνδεσή του με το περιβάλλον (π.χ υπόγεια ύδατα). Επίσης, η ύπαρξη γεωκινδύνων που υπό προϋποθέσεις μπορούν να προκαλέσουν κατάρρευση της σήραγγας, όπως ρηγματώσεις, σπήλαια και κοιλότητες μέσα στο γεωυλικό, πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να αποφευχθούν αστοχίες που συνεπάγεται με τη δημιουργία σοβαρών ατυχημάτων. Παραδείγματα αστοχιών σε αβαθείς σήραγγες υπάρχουν πολλά σε όλο τον κόσμο ακόμα και στις πιο αναπτυγμένες χώρες στον τομέα των κατασκευών υπόγειων μεταφορών όπως είναι η Γερμανία όπου τον Μάρτιο του 2009 στην πόλη της Κολωνίας υπήρξε κατάρρευση ενός μικρού τμήματος του δικτύου metro της πόλης με τραγικό απολογισμό δύο νεκρούς και σημαντικές ζημιές σε σπίτια και διαμερίσματα στην περιοχή καθώς κυριολεκτικά χαθήκανε κάτω από τη γη. Τα αίτια της κατάρρευσης αποδόθηκαν στην αποσάθρωση του εδάφους λόγω της σύστασης του αλλά και της επιπλέον χαλάρωσης του λόγω απότομης εισροής υδάτων μέσω του ποταμού της πόλης καθώς και της μη ανοχής των στηρίξεων των τοιχωμάτων του έργου.



Εικόνα 1.2: Από αριστερά και δεξιόστροφα (α) Κατάρρευση τμήματος της επιφάνειας στη Λωζάννη λόγω των εργασιών του Metro. (Πηγή: <https://randomwire.com/subterranean-danger/>) (β) Κατάρρευση τμήματος του Metro της Κολωνίας λόγω μη σωστής Σχεδίασης της σήραγγας (Πηγή: <https://www.tunneltalk.com/Cologne-collapse-Mar09-Deadly-collapse-in-Cologne.php>)

Συμπερασματικά, η σημασία κατασκευής των σηράγγων σε παγκόσμια κλίμακα και η τήρηση της απαραίτητης προσοχής σε όλα τα στάδια τόσο του σχεδιασμού και της επίβλεψης όσο και της συντήρησης του έργου. Η διαδικασία, όμως, που επιτυγχάνεται μέσω της βέλτιστης χάραξης των σηράγγων μπορεί να προβλέψει τέτοιου είδους κινδύνους. Έτσι, κρίνεται απαραίτητο να δημιουργηθεί ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων κατά τη χάραξη του έργου.

1.2 Στόχοι της Εργασίας

Το σημαντικότερο κομμάτι κάθε εργασίας αποτελεί η επίτευξη των στόχων που έχει θέσει αρχικά ο συγγραφέας της, υποβοηθώντας παράλληλα και στην αποτίμηση των τελικών αποτελεσμάτων. Στην συγκεκριμένη εργασία, βασικός στόχος αποτελεί η ανάπτυξη ενός εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων μελλοντικών σχεδιασμών έργων κατασκευής σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές ιδιαίτερα στο στάδιο της χάραξής της. Ο συγκεκριμένος στόχος για να επιτευχθεί είναι σημαντικό να οριστούν αρχικά οι εξής υποστόχοι:

- Ορισμός Βασικών γεωκινδύνων που πιθανών να αντιμετωπιστούν με έμφαση στο είδος του εδάφους (καθιζήσεις) και την αποφυγή των βολβών τάσεων από τα κτήρια της επιφάνειας.
- Κατηγοριοποίηση των κτηρίων στις κατοικημένες περιοχές ανάλογα με την χρήση του και τις ιδιαιτερότητες του ώστε κάτω από σημαντικά κτήρια είτε πολιτιστικά είτε κοινωφελούς σημασίας να μην υπάρχει κίνδυνος λόγω καθιζήσεων.
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας εκτίμησης περιοχών γεωκινδύνων.
- Βελτιστοποίηση επεξεργασίας και διαχείρισης δεδομένων.
- Επιτάχυνση διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

1.3 Δομή της Εργασίας

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκαν αρχικά βασικές έννοιες και αρχές που αφορούν τις διαδικασίες που ακολουθήθηκαν στα μετέπειτα βήματα και βιβλιογραφία. Ακολουθεί η παρουσίαση του εργαλείου που αναπτύχθηκε καθώς

και βασικές έννοιες του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε δηλαδή του ArcGIS ενώ στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε διάφορες εφαρμογές τόσο επιφανειακής όσο και υπόγειας χάραξης .

Τέλος, παρουσιάζεται η αποτίμηση του αποτελέσματος, όπως προέκυψε από την διαδικασία, και προτάσεις για σημεία της που μπορούν να βελτιωθούν ή να προεκταθούν ακόμη περισσότερο ώστε το εργαλείο να γίνει ακόμη πιο ακριβές. Ειδικότερα, τα κεφάλαια διαμορφώθηκαν ως εξής:

- Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται το θέμα της εργασίας, γίνονται κατανοητοί οι στόχοι της και διευκρινίζεται η δομή της.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικά στοιχεία και αρχές της χάραξης επιφανειακών Σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές που βοηθούν στην κατανόηση του θέματος και αποτελούν θεμελιώδη κομμάτι στις μετέπειτα χρησιμοποιούμενες διαδικασίες.
- Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά είδη των γεωκινδύνων, δίνοντας έμφαση στις καθιζήσεις που μπορούν να προκληθούν από την διάνοιξη μιας σήραγγας σε κατοικημένες περιοχές, στα αίτια και τις εκτιμήσεις που μπορούν να γίνουν. Επίσης γίνεται αναφορά στις τάσεις που προκαλούνται από τις θεμελιώσεις επιφανειακών κατασκευών.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το χρησιμοποιούμενο λογισμικό ArcMap μέσω κατά κύριο λόγο γίνεται η ανάπτυξη του εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία της κατασκευής του εργαλείου αποφάσεων, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, διαμόρφωση των κριτηρίων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκε.
- Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μία αποτίμηση της εργασίας, εξάγοντας συμπεράσματα, περιορισμούς και πιθανές προεκτάσεις που μελλοντικά μπορούν να γίνουν.

Κεφάλαιο 2 : Επιφανειακές Σήραγγες σε Κατοικημένες Περιοχές

2.1 Εισαγωγή

Με στόχο την καλύτερη κατανόηση των κινδύνων που μπορούν να απορρέουν από την διάνοιξη μιας υπόγειας σήραγγας σε κατοικημένες περιοχές, οφείλεται να παρουσιαστούν και να κατανοηθούν βασικές έννοιες και διαδικασίες με τις οποίες γίνεται η ορθή διάνοιξη και χάραξη τους.

Βασικές λειτουργίες μιας υπόγειας σήραγγας σε κατοικημένη περιοχή μπορεί να είναι α) Συγκοινωνιακής , β) Μεταφοράς γ) Στάθμευσης δ) Αποθήκευσης Υλικών ε) Φρεάτων στ) Βοηθητικής εξυπηρέτησας διάφορες ανάγκες μιας πόλης.

Οι κυριότεροι τρόποι κατασκευής υπόγειων έργων είναι η μέθοδος του «ανοιχτού ορύγματος» (cut and cover) και η μέθοδος της κλειστής διάνοιξης. Η μέθοδος του ανοιχτού ορύγματος γίνεται αρχικά με επιφανειακή εκσκαφή (cut) και στην συνέχεια με επανεπίχωση (cover). Η μέθοδος της κλειστής διάνοιξης πραγματοποιείται με υπόγεια εκσκαφή και αποσκοπεί στην ελάχιστη δυνατή διαταραχή της εδαφικής επιφάνειας. Χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε αστικές περιοχές κυρίως εξαιτίας της μικρότερων επιδράσεων - οχλήσεων που προκαλεί στο κυκλοφοριακό δίκτυο και στην καθημερινή ζωή των πολιτών. Είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί στους περισσότερους τύπους εδαφών όταν το βάθος εκσκαφής είναι σημαντικό και σχεδόν πάντοτε όταν η διάνοιξη πραγματοποιείται σε βραχώδες υλικό.

Οι κυριότεροι τρόποι διάνοιξης υπόγειου έργου με τη μέθοδο της κλειστής διάνοιξης είναι οι εξής:

- Η κατασκευή του έργου με μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης (TBM)
- Ο συμβατικός τρόπος (Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης-NATM)

Ωστόσο το σημαντικότερο βήμα πριν από την διάνοιξη της σήραγγας είναι το στάδιο της χάραξης το οποίο έχει πολύ σημαντικό ρόλο.

2.2 Χάραξη Σηράγγων

2.2.1. Βασικά Κριτήρια για τη Χάραξη

Κατά την διάρκεια του σταδίου της χάραξης σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές, τα βασικά κριτήρια οριζόντιας και κάθετης χάραξης, όπως η ακτίνα καμπυλότητας και οι κλίσεις των σηράγγων, αποτελούν τη βάση για τη χάραξη μίας υπόγειας σήραγγας.

2.2.1.1 Οριζόντια χάραξη

Στην περίπτωση της χάραξης σήραγγας γραμμής metro σε κατοικημένες περιοχές επιδιώκεται να γίνεται διέλευση κάτω από κεντρικούς δρόμους, περιοχές με χαμηλή πυκνότητα δόμησης ή ακατοίκητες περιοχές, όπου αυτό είναι δυνατό, ώστε να επιτευχθεί η μικρότερη δυνατή όχληση, από ζημιές που πιθανόν να εκδηλωθούν κατά τη φάση της εκσκαφής, στις υπερκείμενες κατασκευές. Βέβαια πάντα υπάρχουν και περιοχές όπου τα παραπάνω δεν είναι δυνατό να εφαρμοστούν και έτσι οι αστικές σήραγγες πολλές φορές περνάνε κάτω από κτήρια, ωστόσο είναι σημαντικό να αποφεύγονται τα κτήρια δημόσιας χρήσης, διατηρητέα κτήρια ή με ειδικές χρήσεις.

Όσον αφορά συγκοινωνιακές σήραγγες, η οριζόντια τους χάραξη γίνεται κυρίως ώστε να επιτευχθεί η υπερπήδηση εμποδίων όπως είναι κάποιος λόφος ή κάποιο βουνό ώστε να απαλείφουν μεγάλες περιβαλλοντικές αλλοιώσεις στο τοπικό περιβάλλον με την επιφανειακή χάραξη γύρω του, αλλά και για την μικρότερη συγκοινωνιακή όχληση της επιφάνειας ειδικά εάν υπάρχουν επιπλέον μεγάλοι οδικοί άξονες στην περιοχή.

2.2.1.2 Μηκοτομή της Χάραξης

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές από τις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ-Χ, 2001) η μέγιστη επιτρεπτή κλίση είναι 4 % ενώ η κατά μήκος κλίση πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Μία σήραγγα μονής κατεύθυνσης η μέγιστη κλίση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3%, ενώ για σήραγγα διπλής κυκλοφορίας αυτή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 2%. Η επίκλιση δε θα πρέπει να υπερβαίνει το 10 - 12%. Σύμφωνα με την ΟΜΟΕ/ΤΟΔ (2002), σε οδούς της κατηγορίας Α οι κατά μήκος

κλίσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 4%. Ιδιαίτερα σε σήραγγες μεγάλου μήκους (> 1km), πρέπει να επιδιώκεται η τιμή της μέγιστης κατά μήκος κλίσης να μην υπερβαίνει το 2.4%. Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα που μπορούν τα οχήματα να αναπτύσσουν τα οχήματα είναι 80-100 Km/h .

Έντονες κλίσεις έχουν ως μειονέκτημα τη μεγαλύτερη ρύπανση από τα καυσαέρια, τη μεγαλύτερη πιθανότητα ατυχημάτων, τη ταχεία διασπορά εύφλεκτων υλικών, και τη μείωση της ταχύτητας των βαρέων οχημάτων.

s [%]	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
ΣΔΚ *[m]	>3000	>3000	>3000	1400	700	500	400	300
ΣΜΚ **[m]	>3000	>3000	>3000	>3000	>3000	>3000	1000	600

*ΣΔΚ: Σήραγγα Διπλής Κατεύθυνσης, **ΣΜΚ: Σήραγγα Μονής Κατεύθυνσης

Πίνακας 2.1 Μέγιστο Μήκος και μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση (Πηγή : Σοφιανός , 2018)

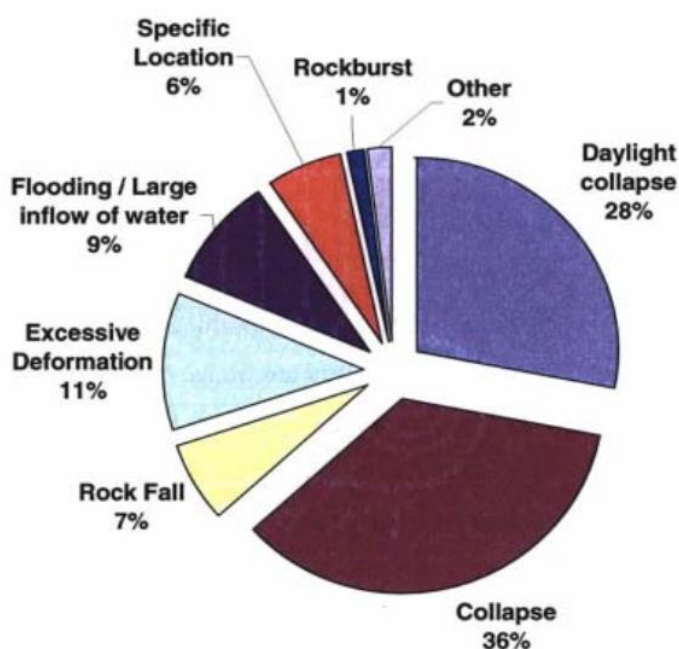
Όσον αφορά την χάραξη σηράγγων γραμμών metro ακολουθούν τους ίδιους περίπου κανόνες με τις συγκοινωνιακές. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που έχει θέσει η Αττικό Μετρό, η μέγιστη επιτρεπτή κλίση είναι 4%. Ύπαρξη μεγαλύτερων κλίσεων καθιστούν δύσκολη έως αδύνατη την κίνηση των συρμών. Προτεινόμενη κλίση είναι το 1,4 %. Η ελάχιστη κλίση ώστε να εξασφαλίζεται η φυσική ροή των υδάτων στο εσωτερικό της σήραγγας προκειμένου να απομακρυνθούν στη συνέχεια είναι 0,3 %.

2.2.2 Κίνδυνοι στην Κατασκευή Σηράγγων

Η φύση της κατασκευής σηράγγων προϋποθέτει ότι ο υπεύθυνος για την κατασκευή και λειτουργία μίας σήραγγας, ταυτόχρονα, αναλαμβάνει την πρόκληση να αντιμετωπίσει ένα σημαντικό σύνολο κινδύνων. Λόγω όμως της δεδομένης αβεβαιότητας που διακρίνει τις γεωλογικές και τις υδρογεωλογικές συνθήκες, υπάρχει κίνδυνος να προκύψουν αρκετά ανεπιθύμητα συμβάντα τα οποία προκαλούν υπερβάσεις του εκτιμώμενου κόστους και της εκτιμώμενης διάρκειας του έργου, καθώς επίσης και διακινδύνευση ανθρωπίνων ζωών. Επιπλέον, η καταγραφή θεαματικών καταρρεύσεων σηράγγων αλλά και άλλων καταστροφών

στο παρελθόν έχει υποδείξει την δυνητικά μεγάλη τρωτότητα της σηραγγοποιίας σε ατυχήματα μεγάλης κλίμακας. Επιπρόσθετα, στην κατασκευή σηράγγων και λοιπών υπογείων κατασκευών σε αστικό περιβάλλον (όπως και στην περίπτωση της εργασίας), η σημασία της πρόβλεψης και πρόληψης κινδύνων αυξάνεται, καθώς οι συνέπειες από πιθανά ατυχήματα πλέον επηρεάζουν τρίτα πρόσωπα, αλλά και ιδιωτική και δημόσια περιουσία.

Τέλος, η επιρροή της όχλησης και των πιθανών προβλημάτων κατά την κατασκευή ενός αστικού υπογείου έργου μπορεί να δημιουργήσει ένα κλίμα αρνητικότητας της κοινής γνώμης ως προς τέτοιου είδους έργα, δρώντας ανασταλτικά στην περαιώση του έργου.



Εικόνα 2.1 :Κατανομή Ανεπιθύμητων Συμβάντων (Sousa et al., 2010)

Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται η κατανομή των ανεπιθύμητων συμβάντων για ένα σύνολο εξεταζομένων περιπτώσεων της έρευνας της (Sousa et al., 2010). Μεγαλύτερη συχνότητα αστοχιών είναι οι καταρρεύσεις (επιφανείας και υπογείων) με αντίστοιχα ποσοστά 28% και 35%. Φυσικά αυτό δεν σημαίνει ότι οι καταρρεύσεις είναι το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατά την διάρκεια της κατασκευής σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές ωστόσο δίνει μία σημαντική εικόνα.

2.3. Μέθοδος Διάνοιξης με TBM (Μηχανές Ολομέτωπης Διάνοιξης)

Το πρώτο μηχάνημα διάνοιξης σηράγγων κατασκευάστηκε από τον Χένρι Τζόζεφ Μάους (Henry Joseph Maus) με την ονομασία Mountain Slicer. Είχε κατασκευαστεί έπειτα από παραγγελία του Βασιλιά της Σαρδηνίας και του Πεδεμοντίου Albert το 1844 για να γίνει διάνοιξη της σιδηροδρομικής σήραγγας Frejus (Φρέγιους) μεταξύ Ιταλίας και Γαλλίας διαμέσου των Άλπεων. Ωστόσο η επανάσταση του 1848 επηρέασε την χρηματοδότηση του έργου και η ολοκλήρωση της σήραγγας έγινε έπειτα από 10 χρόνια.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, το πρώτο μηχάνημα διάνοιξης σηράγγων κατασκευάστηκε το 1843 και ήταν φτιαγμένο εξολοκλήρου από χυτοσίδηρο. Χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή της σήραγγας Χούσακ (Hoosac) ανεπιτυχώς καθώς έπειτα από 3 μετά υπέστη βλάβη. Στις αρχές του 1940 ο Τζέιμς Σ. Ρόμπινς κατασκεύασε ένα μηχάνημα TBM το οποίο είχε την δυνατότητα να σκάψει 44 μέτρα σε 24 ώρες και ήταν δέκα φορές πιο γρήγορο από οποιοδήποτε άλλο μηχάνημα εκείνη την εποχή.

Ωστόσο η εφεύρεση που έκανε τα μηχανήματα διάνοιξης σηράγγων αποτελεσματικά, οικονομικά και αξιόπιστα και άρχισαν να διαμορφώνουν τα μοντέρνα μηχανήματα ήταν η περιστρεφόμενη κεφαλή, η οποία βασίζεται στις ίδιες αρχές με την κεφαλή με κρουστικά δρέπανα που είχε χρησιμοποιήσει ο Μάους πριν έναν αιώνα αλλά με βελτιωμένη απόδοση. Η βελτίωση επιτεύχθηκε στην μείωση των στοιχείων τριβής και την χρησιμοποίηση δίσκων κοπής με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με τα ισχυρά καρφιά που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε.

Οι κυριότεροι λόγοι οι οποίοι οδήγησαν στην ανάπτυξη της μηχανικής όρυξης σηράγγων, είναι το γεγονός ότι η χρησιμοποίηση εκρηκτικών υλών οι οποίες χρησιμοποιούνταν κατά κύριο λόγο μέχρι εκείνη την περίοδο είχε ως αποτέλεσμα τον επηρεασμό της περιοχής γύρω από την εκσκαφή τόσο περιβαλλοντικά όσο και απ γεωλογικά (διάβρωση εδάφους , χάσιμο της συνεκτικότητας κλπ).

Επιπλέον ο κύκλος εκσκαφής με την χρήση εκρηκτικών είναι ασυνεχής με την έννοια ότι μεσολαβούν πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα μεταξύ των διαφόρων φάσεων ενώ αντίθετα με την χρήση μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής ειδικά στην σημερινή εποχή που έχουν την δυνατότητα μέσω μιας ανυψωτικής μηχανής να γίνεται επένδυση της σήραγγας έχει μειώσει σημαντικά τον κύκλο εργασιών διάνοιξης σηράγγων.

Παρακάτω παρουσιάζεται μηχάνημα ολομέτωπης κοπής (μετροπόντικας) ο οποίος χρησιμοποιείται στην διάνοιξη του metro Θεσσαλονίκης .



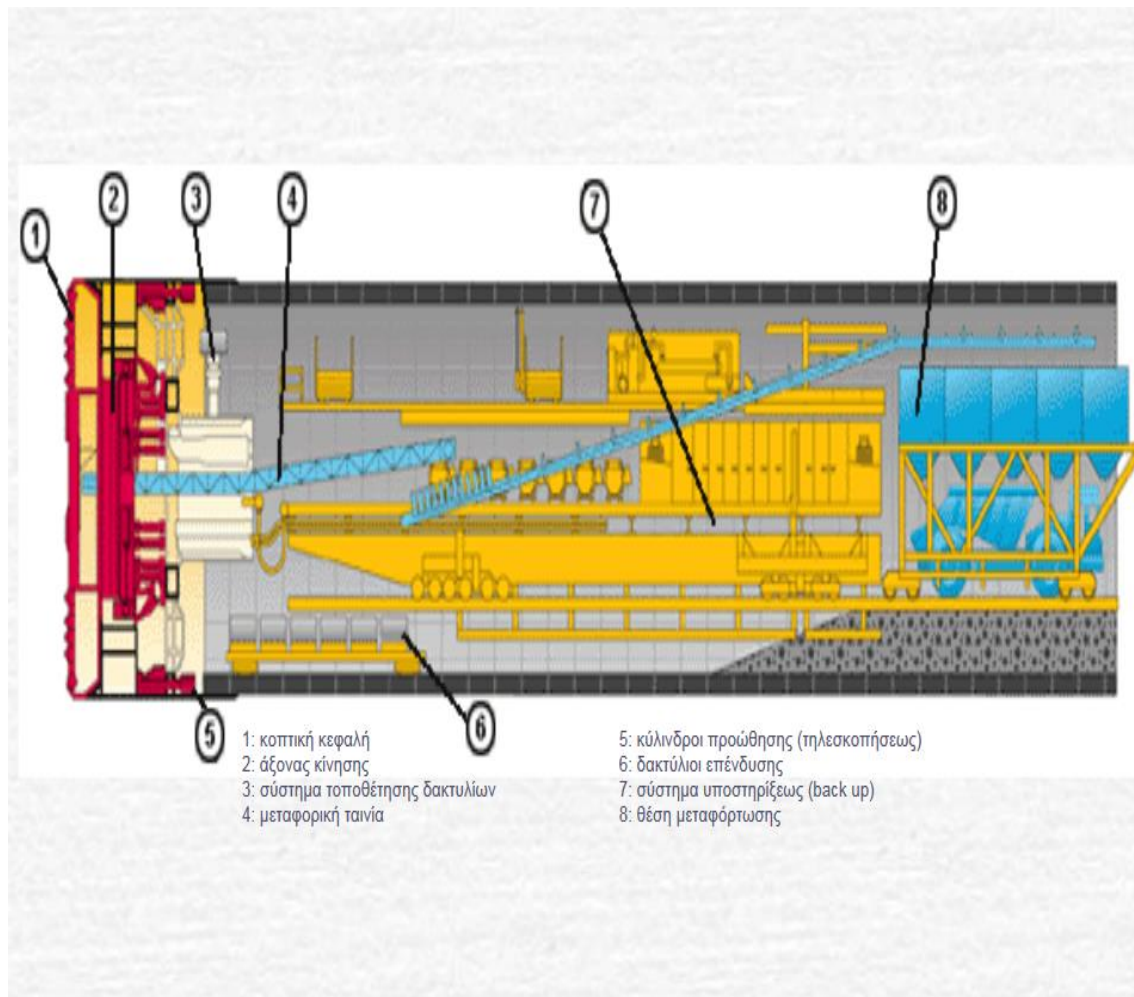
Εικόνα 2.2 : Μηχάνημα Διάνοιξης Σηράγγων TBM στο metro της Θεσσαλονίκης (Πηγή : https://www.ametro.gr/?page_id=378)

2.3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά των Μηχανών Ολομέτωπης Διάνοιξης TBM

Οι μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης είναι η προσφιλέστερη μέθοδος για την κατασκευή σηράγγων κυκλικής διατομής σε κατοικημένες περιοχές. Με τις μηχανές αυτές εκτελούνται ταυτόχρονα η διάνοιξη της σήραγγας, η υποστήριξη του μετώπου και των τοιχωμάτων και η τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης. Έχουν διάμετρο από 1 μέχρι 14 μέτρα ενώ σε συγκεκριμένα έργα υπάρχουν κεφαλές που φτάνουν τα 19 μέτρα διάμετρο και αποτελούνται από τα εξής τμήματα:

- Ολομέτωπη κοπτική κεφαλή (τύμπανο προώθησης) εφοδιασμένη με διάφορα είδη κοπτικών (σιαγώνες σύνθλιψης για εδάφη και κυλιόμενοι κοπτικοί δίσκοι για σκληρά πετρώματα). Το τύμπανο προώθησης, εκτός από τη διάνοιξη εξασφαλίζει και τη στήριξη του μετώπου της σήραγγας, ενώ παράλληλα υπάρχουν μεταβλητά ανοίγματα ώστε να είναι δυνατή η αλλαγή των κοπτήρων υπό ασφαλείς συνθήκες. Η κοπτική κεφαλή έχει την ικανότητα να περιστρέφεται και από τις δυο διευθύνσεις, ώστε οι σιαγώνες να μπορούν να καθαριστούν από μόνες τους όταν γίνεται διάτρηση σε μαλακά εδάφη. Στο τύμπανο υπάρχουν ανθρωποθυρίδες για να μπορεί να γίνει επιθεώρηση του χώρου μεταξύ του μετώπου και του τυμπάνου.
- Μεταλλική κυλινδρική ασπίδα για την ακτινική υποστήριξη της σήραγγας.

- Θάλαμο εργασίας πίσω από την κοπτική κεφαλή.
- Ανυψωτική μηχανή η οποία μεταφέρει και τοποθετεί την επένδυση στο πίσω μέρος της ασπίδας. Η επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένα θολωτά στοιχεία από μπετόν ή από χυτοσίδηρο (θολίτες) τα οποία συνδεόμενα το ένα με το άλλο με κοχλίες σχηματίζουν ένα δακτύλιο. Η μεταλλική ασπίδα και οι θολίτες είναι υδατοστεγείς ενώ νερό μπορεί να εισέλθει στο μέτωπο της σήραγγας μόνον από τα ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής.
- Σύστημα υδραυλικών προωθητικών γρύλων σε κυκλική διάταξη εξασφαλίζει την προώθηση του τυμπάνου.
- Μηχανή αποκομιδής των προϊόντων της εκσκαφής.



Εικόνα 2.3 : Βασικά Τμήματα Μηχανής Διάνοιξης Σηράγγων TBM (Πηγή : Καλιαμπάκος, 2017)

2.3.2 Ταξινόμηση των Μηχανοποιημένων Τεχνικών Διάνοιξης TBM

Οι μηχανοποιημένες τεχνικές διάνοιξης είναι αυτές στις οποίες η εκσκαφή γίνεται μηχανικά με τη βοήθεια οδόντων, αξινών ή δίσκων. Η ταξινόμησή τους βοηθάει τη δύσκολη επιλογή της μεθόδου διάνοιξης σύμφωνα με τις υπάρχουσες γεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες αλλά και τον συσχετισμό του έργου με άλλες υφιστάμενες κατασκευές. Ο πίνακας 2.1 ταξινομεί τις μηχανές με βάση την υποστήριξη που παρέχουν στην εκσκαφή, όπως προτείνεται από το AFTES.

Είδος Υποστήριξης	Ομάδες	Κατηγορίες	Τύπος
καμία	μηχανή διάνοιξης τύπου boom	κοπτική κεφαλή	ευθυγραμμισμένη κοπτική κεφαλή εγκάρσια κοπτική κεφαλή
		εκσκαφικού τύπου	εκσκαφικός βραχίονας αποξέστης ή σπαστήρας υδραυλικός θραυστήρας στροφείου
	μηχανή διάνοιξης main-beam		
	μηχανή διεύρυνσης σήραγγας		
περιφερειακή υποστήριξη	μηχανή διάνοιξης ανοιχτού μετώπου με ασπίδα	ασπίδα με στοιχεία συγκράτησης	ολικού μετώπου
		τμηματική ασπίδα	ολικού μετώπου μερικού μετώπου
		διπλή ασπίδα	ολικού μετώπου
περιφερειακή και μεταωπιαία υποστήριξη	μηχανή διάνοιξης κλειστού μετώπου με ασπίδα	μηχανική υποστήριξη	ολικού μετώπου μερικού μετώπου
		ασπίδα με συμπεσμένο αέρα	ολικού μετώπου μερικού μετώπου
		slurry shield	ολικού μετώπου μερικού μετώπου
		μηχανή EPB	ολικού μετώπου
		ασπίδα μικτού μετώπου	ολικού μετώπου

Πίνακας 2.2 : Ταξινόμηση Μηχανών Διάνοιξης (AFTES 2000)

Όπως παρατηρείται από τον παραπάνω πίνακα οι μηχανές διάνοιξης TBM χωρίζονται σε ομάδες και εν συνεχείας σε κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους . Παρακάτω γίνεται συνοπτική παρουσίαση των κυρίων ομάδων και κατηγοριών.

2.3.2.1 Μηχανή διάνοιξης τύπου boom

Οι μηχανές με βραχίονα (boom) αποτελούνται από ένα βραχίονα εκσκαφής τοποθετημένο σε ένα αυτοπρωθούμενο πλαίσιο κι εφοδιασμένο με έναν από τους παρακάτω τύπους εργαλείων:

- Εκσκαφέα, σπαστήρα ή υδραυλικό θραυστήρα στροφείου.

- Ευθύγραμμη ή εγκάρσια κοπτική κεφαλή (roadheader).

Ο βραχίονας πραγματοποιεί διαδοχικά περάσματα στο μέτωπο της κεφαλής στο οποίο η πρόσβαση είναι εφικτή κάθε χρονική στιγμή. Στη δύναμη διείδυσης των εργαλείων ανθίσταται μόνο το βάρος του μηχανήματος χωρίς κάποιο επιπλέον βοήθημα. Οι μηχανές τύπου boom, που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή διαφόρων διατομών σηράγγων, είναι κατάλληλες για εδάφη υψηλής συνεκτικότητας και για μαλακό βράχο ωστόσο αυτή η τεχνική διάνοιξης δεν παρέχει καμία άμεση υποστήριξη οπότε είναι σημαντικό να συνοδεύεται από τεχνική υποστήριξη όπως νεύρα χάλυβα, μάνταλα βράχου, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κ.λπ.



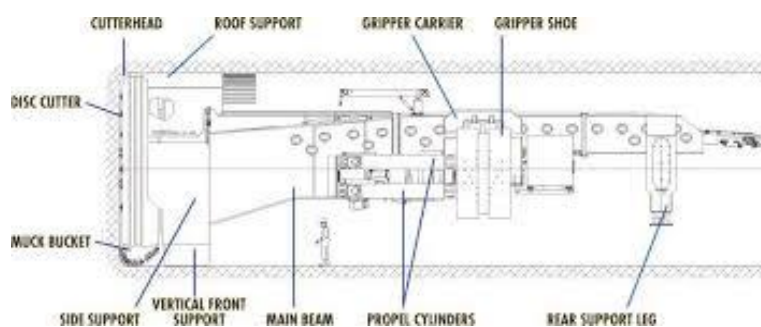
Σχήμα 2.4 : Μηχανή Διάνοιξης τύπου Boom με ευθύγραμμη κοπτική κεφαλή (roadheader) (Πηγή : <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/mechanical-cutting-equipment/roadheaders-for-tunneling/>)

2.3.2.2 Μηχανή διάνοιξης Main-Beam

Οι μηχανές διάνοιξης τύπου κύριας δοκού (main beam) διαθέτουν μία περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή που μπορεί να εκσκάπτει ολόκληρο το μέτωπο της σήραγγας σε ένα ενιαίο πέρασμα. Η κεφαλή διαθέτει διάφορους κόπτες (δίσκοι, περιστρεφόμενα πριονωτά τρυπάνια), ενώ η πρόσβαση στο μέτωπο είναι δυνατή μετά την απόσυρσή της, όταν παύει η λειτουργία της μηχανής.

Οι μηχανές αυτού του τύπου είναι κατάλληλες για τη διάνοιξη σηράγγων σε βράχο υψηλής αντοχής αλλά το μειονέκτημα τους είναι ότι δεν είναι δυνατή η χρησιμοποίησή τους σε μη συνεκτικά εδάφη, ενώ όταν οι εργασίες πραγματοποιούνται κάτω από υδροφόρο ορίζοντα είναι υποχρεωτική η λήψη επιπλέον μέτρων ασφαλείας. Για αδύναμη βραχομάζα η φέρουσα επιφάνεια των στοιχείων συγκράτησης πρέπει να αυξάνεται προκειμένου να αποτραπεί η διάτρηση του εδάφους από αυτά.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως όταν γίνεται χρήση μηχανής main beam σε σκληρό έδαφος πρέπει να λαμβάνεται κάθε προφύλαξη, ώστε οι κόπτες της κεφαλής να μπορούν να αντικατασταθούν με μεγάλη ασφάλεια.



Εικόνα 2.4 : Βασικά Τμήματα Μηχανής Διάνοιξης τύπου Main-Beam (Πηγή : Robbins, 2009)

2.3.2.3 Μηχανή διεύρυνσης Σήραγγας

Οι μηχανές διεύρυνσης της σήραγγας λειτουργούν όπως και οι μηχανές main beam με μόνη διαφορά ότι η κεφαλή περισσότερο σύρεται παρά ωθείται. Η διατομή της σήραγγας κατασκευάζεται με ενιαίο πέρασμα με μία κοπτική κεφαλή ή με πολλαπλά περάσματα με χρήση κοπτικών μηχανών αυξανόμενης διαμέτρου. Οι μηχανές αυτού του τύπου είναι οριζόντιων ή κεκλιμένων σηράγγων και επιπλέον είναι κατάλληλες για την διάνοιξη μεγάλων σηράγγων.

2.3.2.4 Μηχανή Διάνοιξης Ανοιχτού Μετώπου με Ασπίδα

Οι μηχανές που παρέχουν άμεση πλευρική υποστήριξη ανήκουν στην κατηγορία των TBM ανοιχτού μετώπου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά την εκσκαφή, υποστηρίζουν τις παρειές της σήραγγας όχι όμως το μέτωπό της. Οι μηχανές μπορούν να έχουν δύο είδη ασπίδας:

- ασπίδα ενός δοχείου (one-can shield).
- ασπίδα δύο ή περισσότερων δοχείων που συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις.

2.3.2.4 Μηχανή Διάνοιξης Κλειστού Μετώπου με Ασπίδα

Τα TBM που παρέχουν άμεση πλευρική και μετωπική υποστήριξη κατά τη διάρκεια της εκσκαφής σηράγγων ανήκουν στην κατηγορία μηχανών διάνοιξης κλειστού μετώπου με ασπίδα. Με εξαίρεση τα TBM μηχανικής υποστήριξης, όλα διαθέτουν ένα θάλαμο κοπτικής κεφαλής στο μέτωπο, απομονωμένο από το οπίσθιο μέρος της μηχανής με ένα διάφραγμα. Η προώθηση κατά την διάρκεια των εκσκαφών αυτών

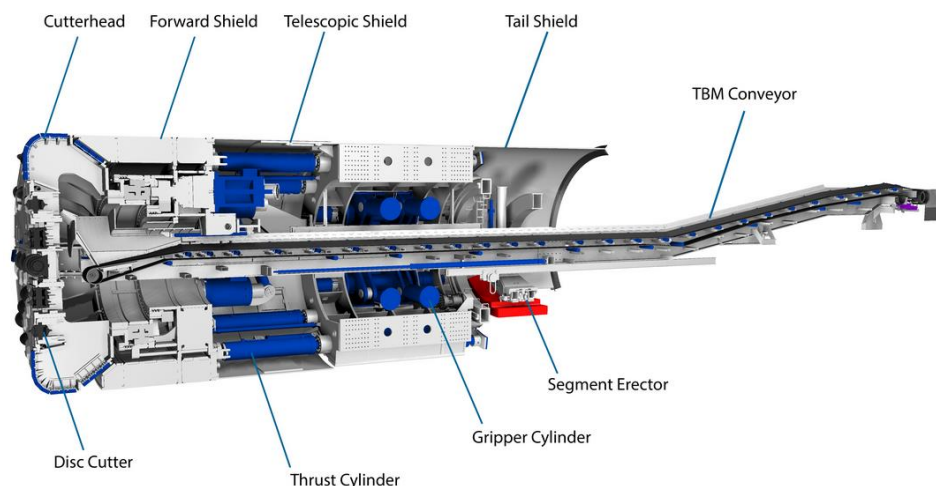
των μηχανών γίνεται με τη βοήθεια εμβόλων που αντιστηρίζονται στην επένδυση η οποία ανεγείρεται στην ουρά τους με χρήση κατάλληλου ανυψωτή.

2.3.3 Πλεονεκτήματα χρήσης Μηχανημάτων ολομέτωπης Κοπής σε Κατοικημένες Περιοχές

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μηχανημάτων ολομέτωπης εκσκαφής σε σχέση με άλλες μεθόδους είναι οι παρακάτω :

- η υψηλή ταχύτητα προχώρησης σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους εξόρυξης.
- η μικρή διαταραχή της βραχώμαζας.
- οι μειωμένες δονήσεις για αυτό τον λόγω προτιμούνται σε έργα όπως το metro σε πυκνοκατοικημένες περιοχές σε σχέση με άλλες μεθόδους.
- η διαμόρφωση ομοιόμορφης διατομής.
- η σημαντική μείωση των υπερεκσκαφών.
- η τυποποίηση της υποστήριξης και η αυξημένη ασφάλεια των εργαζομένων.

Σημαντικό μειονέκτημα της χρήσης μηχανών ολομέτωπης κοπής είναι α) το υψηλό κόστος, β) οι μειωμένες επιδόσεις, γ) η προβληματική συμπεριφορά σε δύσκολες γεωλογικές συνθήκες και τέλος δ) προβλήματα σε εισροές υπόγειων νερών.

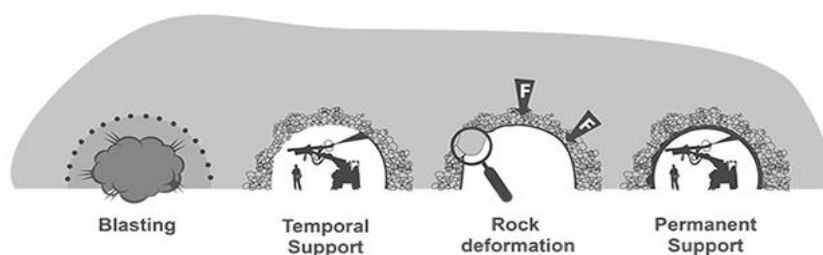


Εικόνα 2.5 : Διάγραμμα με λεπτομερή αναφορά στα μέρη ενός Μηχανήματος Διάνοιξης Σηράγγων με Διπλή Ασπίδα (Πηγή : <http://www.the Robbinscompany.com/products/tunnel-boring-machines/double-shield/double-shield-detail/>)

2.4 Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων με NATM (New Austrian Tunneling Method

Η "Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunnelling Method - NATM) ουσιαστικά δεν αποτελεί μια αυτοτελή μέθοδο αλλά προκύπτει από ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων οι οποίες εφαρμοσθήκαν συστηματικά στις αρχές της δεκαετίας του 1950 για τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις. Ωστόσο οι συγκεκριμένες τεχνικές είχαν εφαρμοσθεί και πριν το 1950 τόσο στην Αυστρία όσο και σε άλλα μέρη του κόσμου . Η συστηματοποίηση χρησιμοποίησης και ονομασία τους (NATM) έγινε από Αυστριακούς Μηχανικούς (Rabcewicz, Mueller, Brunner και Pacher) περί το 1950. Έτσι, η "Μέθοδος NATM" όταν προτάθηκε δεν ήταν ούτε "Νέα" ούτε "Αυστριακή" διότι είχε είδη χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα κατασκευών αλλά ούτε και "Μέθοδος" αφού ουσιαστικά αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών οι οποίες μάλιστα αλλάζουν με την πρόοδο της τεχνολογίας . Γενικά δεν υπάρχει αποδεκτός ορισμός της "Μεθόδου NATM", εφόσον ο όρος συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου. Η πιο συνήθης εφαρμογή της μεθόδου NATM είναι η διάνοιξη της διατομής της σήραγγας σε μία ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια (παθητικά ή προεντεταμένα). Η υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας μόνο με αγκύρια χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπάγεται επίσης στην κατηγορία της μεθόδου NATM.

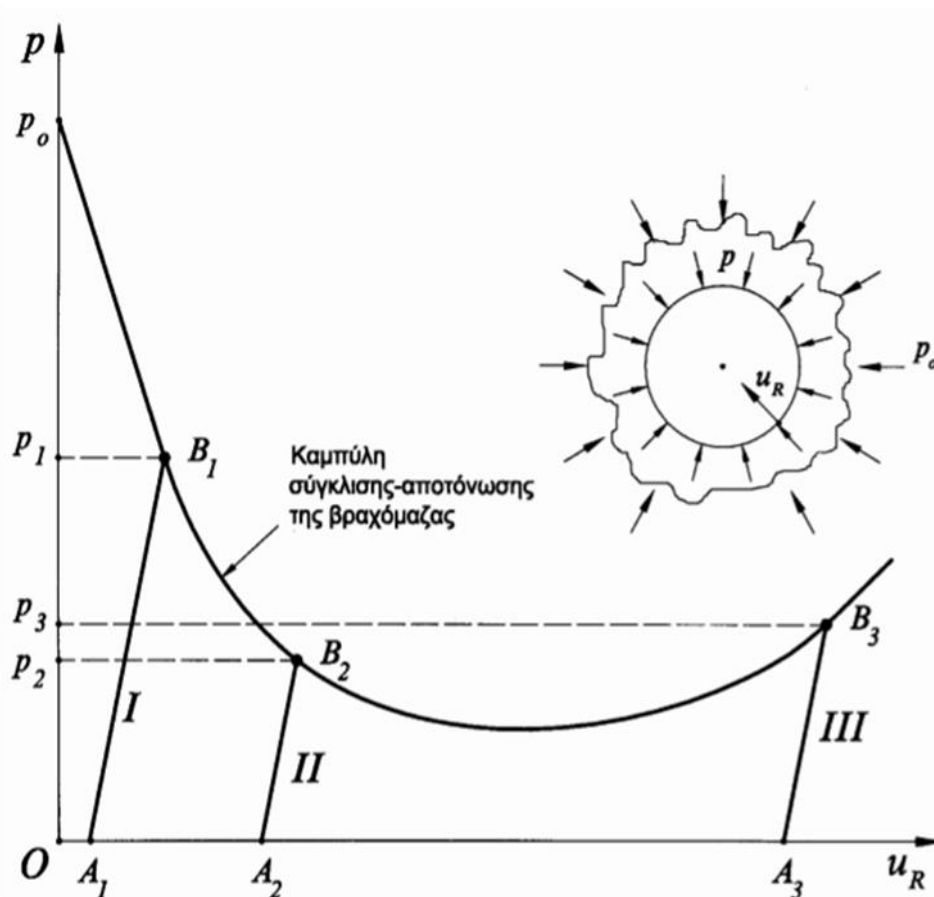
Τέλος, σύμφωνα με τη μέθοδο NATM η άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της "τελικής επένδυσης" της σήραγγας η οποία θεωρείται ως φέρον στοιχείο (σε ορισμένες περιπτώσεις δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχομάζας). Παρακάτω παραθέτονται τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου NATM



Εικόνα 2.7 : Τεχνικές της μεθόδου NATM (πηγή: <http://bestsupportunderground.com/natm-shotcrete/?lang=en>)

2.4.1 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου NATM

Το βασικότερο στοιχείο της μεθόδου NATM είναι ότι τόσο η διάνοιξη της σήραγγας όσο και η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης της γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί η αντοχή της βραχομάζας που περιβάλλει την σήραγγα μέσω μιας ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, σε ικανό βαθμό ώστε να μειωθούν αρκετά οι πιέσεις επί της άμεσης υποστήριξης αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχομάζας, όπου ως συνέπεια προκύπτει η αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη και τελικώς η πιθανή κατάρρευση της σήραγγας.



Εικόνα 2.8 : Πως επηρεάζει ο χρόνος τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχομάζας την υποστήριξη της σήραγγας όπου I: πολύ νωρίς. Η πίεση στην άμεση υποστήριξη (p_1) είναι πολύ μεγάλη. II: κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης. Η πίεση (p_2) μειώνεται σημαντικά. III: πολύ αργά. Η πίεση (p_3) έχει αυξηθεί λόγω χαλάρωσης της βραχομάζας, με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης. (Πηγή : Καβαδαός 2004)

Επιπλέον ένα αρκετά σημαντικό ποσοστό της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής δηλαδή πριν η εκσκαφή φθάσει στη συγκεκριμένη θέση με αποτέλεσμα η σύγκλιση του τοιχώματος της να αυξάνει με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής.

Έτσι προκύπτει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αντοχή της βραχομάζας έχει ενεργοποιηθεί επαρκώς πολύ κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής και συνεπώς η άμεση υποστήριξη θα πρέπει να κατασκευασθεί κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής. Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στα παρακάτω σημεία:

- Η εκσκαφή της διατομής της σήραγγας συνήθως γίνεται σε περισσότερες από μια φάσεις. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μείωση της επιφάνεια του μετώπου της εκσκαφής κάθε φάσης και συνεπώς μειώνεται η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος
- Γίνεται κατασκευή της άμεσης υποστήριξης της διατομής σε μικρή απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής για να μην υπάρξει περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και να αποφευχθεί η χαλάρωση της βραχομάζας. Για αυτόν τον λόγο σε κάθε φάσης εκσκαφής γίνονται μικρά βήματα της τάξεως των 1-2 μέτρων αναλόγως της ποιότητας της βραχομάζας. Το μήκος του βήματος εκσκαφής μειώνεται όσο χειρότερη είναι η ποιότητα της βραχομάζας.
- Η άμεση υποστήριξη της διατομής πρέπει να αναλάβει φορτία όσο τον δυνατόν ταχύτερα ώστε να περιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και συνεπώς η χαλάρωση της βραχομάζας. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πλεονεκτεί επειδή η παραμικρή σύγκλιση του τοιχώματος προκαλεί τη φόρτισή του ενώ ταυτόχρονα έχει πολύ μικρό χρόνο πήξεως. Επιπλέον η χρήση αγκυρίων βράχου οπλίζει την περιβάλλουσα βραχομάζα και συντελεί στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου στη βραχομάζα.
- Η μέθοδος NATM βασίζεται σε μετρήσεις της συμπεριφοράς του τμήματος της σήραγγας που έχει ήδη διανοιχθεί (όπως μετρήσεις της σύγκλισης του τοιχώματος, της πίεσης της βραχομάζας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, της θλιπτικής τάσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ). Εάν σε κάποια μεταγενέστερη φάση αλλάξουν οι μετρήσεις λόγω διαφορετικών συνθηκών τότε η πυκνότητα των μέτρων άμεσης υποστήριξης προσαρμόζεται στις επιτόπου συνθήκες
- Γίνεται ολοκλήρωση του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο περιμετρικά της διατομής της σήραγγας. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας κλειστός δακτύλιος με πολύ μικρή παραμορφωσιμότητα ώστε να περιορίζονται οι περαιτέρω συγκλίσεις του τοιχώματος. Βέβαια περίπτωση βραχομάζας με καλά μηχανικά

χαρακτηριστικά συχνά δεν είναι απαραίτητο να ολοκληρώνεται ολόκληρος ο δακτύλιος της διατομής, δηλαδή δεν επενδύεται με σκυρόδεμα το δάπεδο της σήραγγας.

- Σε περίπτωση διάνοιξης σηράγγων σε βραχομάζα με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά ή σε εδαφικούς σχηματισμούς, είναι συνήθως η εμφάνιση φαινομένων αστάθειας του μετώπου της εκσκαφής. Τα φαινόμενα αυτά προκαλούν αύξηση της σύγκλισης και χαλάρωση της βραχομάζας με κίνδυνο όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα την κατάρρευση του έργου. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να ληφθούν διάφορα μέτρα βελτίωσης της ευστάθειας του μετώπου ανάλογα με τον προϋπολογισμό του έργου όπως η αύξηση του αριθμού των φάσεων εκσκαφής, η διαμόρφωση του μετώπου με κλίση ως προς την κατακόρυφο, ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια, ενίσχυση της οροφής με ράβδους (spiles) ή δοκούς προπορείας (forepoling) , κατασκευή τιμμεντενέσεων και η επένδυση του μετώπου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα .

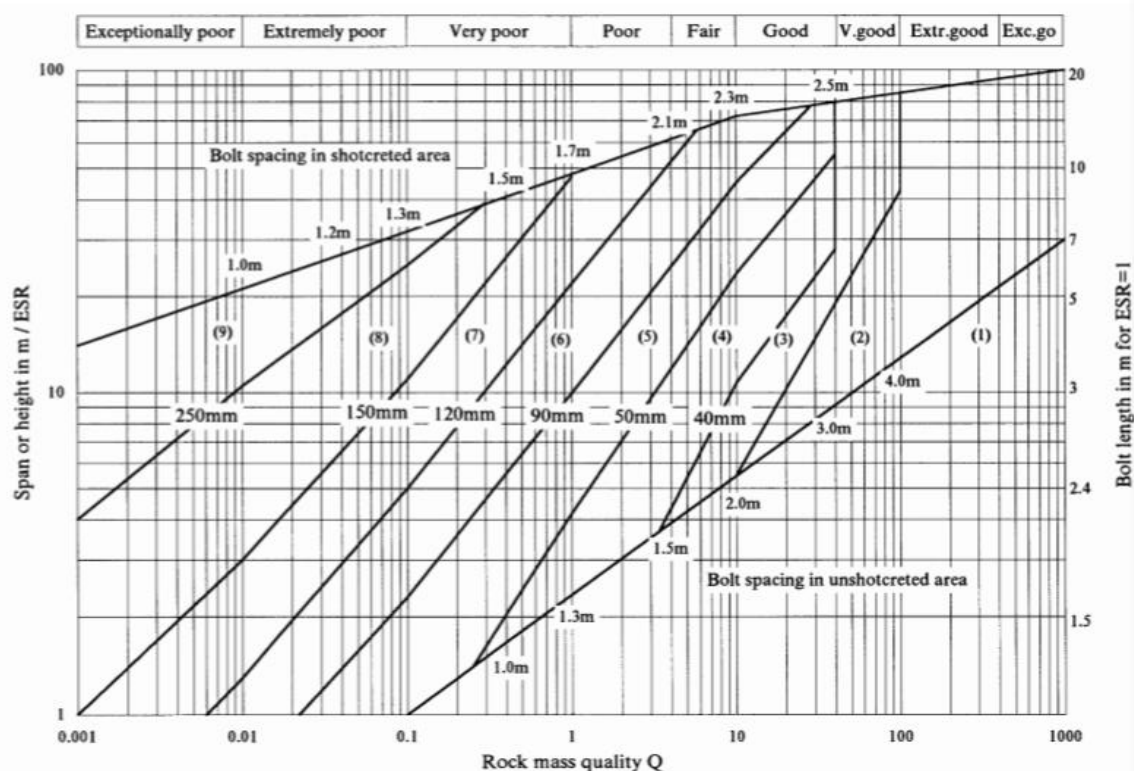
2.4.2 Σχεδιασμός της Διάνοιξης και εκσκαφή με την μέθοδο NATM

Ο σχεδιασμός της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας θα πρέπει να αντανακλά στην φάση της συγκεκριμένης εκσκαφής. Για το σκοπό αυτό ο σχεδιασμός γίνεται ως εξής:

1. Ανάλογα με τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών ερευνών που έχουν γίνει η βραχομάζα κατατάσσεται σε 3-4 κατηγορίες (με βάση τα μηχανικά χαρακτηριστικά) κατά μήκος της σήραγγας. Οι κατηγορίες αυτές συνήθως βασίζονται στα συστήματα κατατάξεως (RMR, GSI, Q).
2. Στην συνέχεια κατασκευάζονται οι τυπικές διατομές διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας ανάλογα την κατάταξη που έχει προηγηθεί και διαφέρουν ως προς το είδος των μέτρων. Πολύ σημαντικό στοιχείο στον σχεδιασμό είναι ότι θα πρέπει να είναι κατασκευαστικά δυνατή η αλλαγή της διατομής της σήραγγας από τον ένα τύπο στον άλλο με σχετική ευχέρεια για την περάτωση του έργου .
3. Τέλος γίνεται διατύπωση ενός συνόλου κριτηρίων με βάση τα οποία θα είναι δυνατή η επιλογή χρησιμοποιούμενης τυπικής διατομής κατά την κατασκευή της σήραγγας. Τα κριτήρια αυτά συνήθως βασίζονται α) στην ποιότητα της

βραχομάζας, β) το πάχος των υπερκειμένων γαιών, γ) ο προσανατολισμός των ασυνεχειών της βραχομάζας, δ) τα αποτελέσματα των μετρήσεων συμπεριφοράς του έργου σε προηγούμενες διατομές ή σε προηγούμενη φάση εκσκαφής στη συγκεκριμένη θέση κλπ.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η άμεση υποστήριξη της σήραγγας ακολουθείται από την κατασκευή της τελικής επένδυσης η οποία λαμβάνει μέρος (ή το σύνολο) των φορτίων της περιβάλλουσας βραχομάζας.

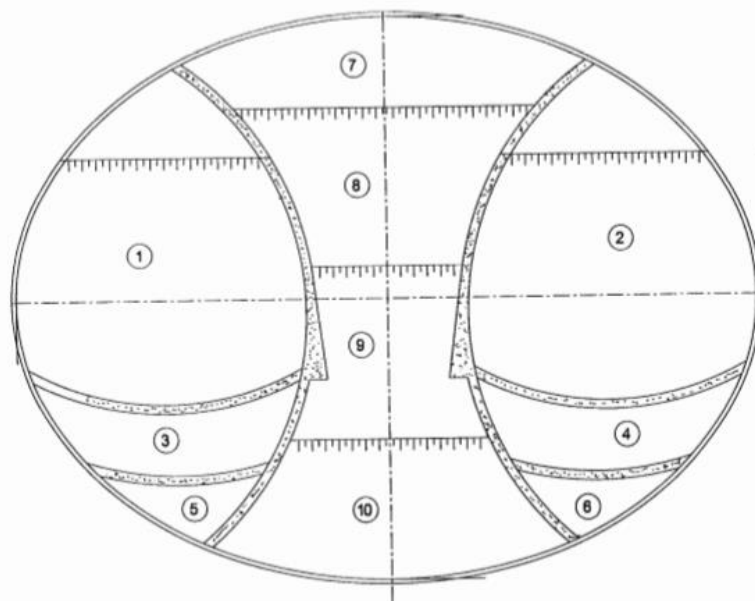


Εικόνα 2.9 : Εκτίμηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης κατά το σύστημα Q (NGI) (Πηγή : Καββαδάς, 2004)

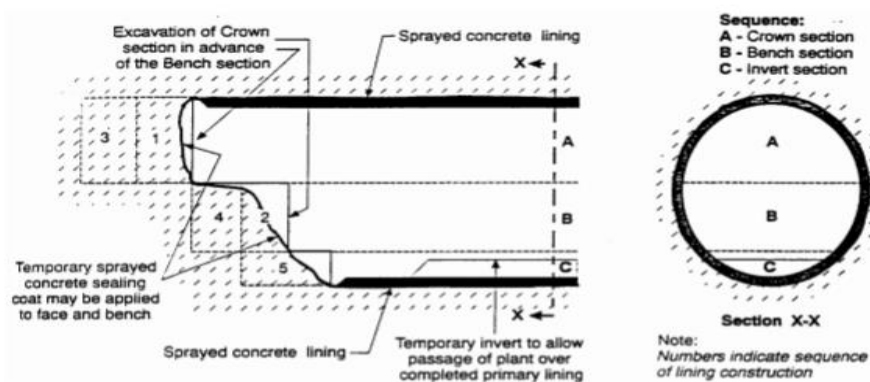
Η εκσκαφή σηράγγων με τη μέθοδο NATM συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσης όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Τα κυριότερα συστήματα εκσκαφής είναι:

1. Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας (top heading and bench). Η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση εκσκαφής (top heading) μπορεί να εκσκαφεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά το πλάτος της σήραγγας. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα-πυλώτη που χρησιμεύει και για τη διερεύνηση των συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοξη της σήραγγας.

2. Εκσκαφή με πλευρικές στοές (side-wall drifts). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε σήραγγες μεγάλου εύρους σε βραχομάζες με σχετικώς πτωχά χαρακτηριστικά ή στις περιπτώσεις όπου είναι κρίσιμος ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος (π.χ. σε αστικές περιοχές). Περιλαμβάνει την υποδιαίρεση της διατομής κατά το πλάτος και διάνοιξη πρώτα της μιας πλευράς και στη συνέχεια της άλλης πλευράς. Σε ιδιαίτερες δύσκολες συνθήκες η μέθοδος μπορεί να περιλάβει δυο πλευρικές στοές και ενδιάμεσο πυλώνα (twin side-wall drifts with central pillar). Στην περίπτωση αυτή πρώτα διανοίγονται οι πλευρικές στοές και στο τέλος διανοίγεται ο κεντρικός πυλώνας.



Εικόνα 2.10 : Διάνοιξη Σήραγγας σε 10 υποφάσεις με 2 πλευρικές στοές και κεντρικό πυλώνα (Πηγή : Καββαδάς, 2004)



Εικόνα 2.11 : Διάνοιξη Σήραγγας σε 3 υποφάσεις καθ' ύψος (top heading and bench) (Πηγή : Καββαδάς, 2004)

Η τελική επένδυση συνήθως κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του συνόλου του μήκους της σήραγγας αλλά οπωσδήποτε αφού η σήραγγα ισορροπήσει με την άμεση υποστήριξη, δηλαδή αφού πρακτικώς μηδενιστούν οι ρυθμοί εξέλιξης των μετακινήσεων, εντάσεων κλπ.



*Σχήμα 2.12 : Μηχάνημα ψεκασμού Σκυροδέματος για την άμεση υποστήριξη της Σήραγγας
(Πηγή : <https://www.icm.co.jp/english/product/natm.html>)*

2.4.3 Πλεονεκτήματα μεθόδου NATM σε σχέση με άλλες μεθόδους σε Κατοικημένες περιοχές

Η μέθοδος διάνοιξης NATM ως μέθοδος αλλά και λόγω ότι πρόκειται ένα σύνολο τεχνικών που ανάλογα με την υπάρχουσα κατάσταση μπορούν να μεταβληθούν .

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους όπως διάνοιξη με TBM ή ασπίδα είναι τα εξής:

1. Η προσαρμοστικότητα της ανάλογα με τις γεωτεχνικές συνθήκες που αντιμετωπίζονται την συγκεκριμένη φάση .
2. Έχει την δυνατότητα να προσαρμοστεί εύκολα σε μεταβολές της γεωμετρίας της διατομής και στη διάνοιξη μή-κυκλικών διατομών ιδιαίτερα στις περιπτώσεις των σηράγγων αυτοκινητοδρόμων.

3. Χρειάζεται μηχανικό εξοπλισμό σχετικώς μικρότερου κόστους σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους και συνεπώς πλεονεκτεί οικονομικά σε σήραγγες μικρού μήκους.
4. Επιτρέπει ευκολότερη στεγάνωση της σήραγγας με συνθετική μεμβράνη (η οποία συνήθως τοποθετείται μεταξύ της άμεσης και της τελικής επένδυσης).

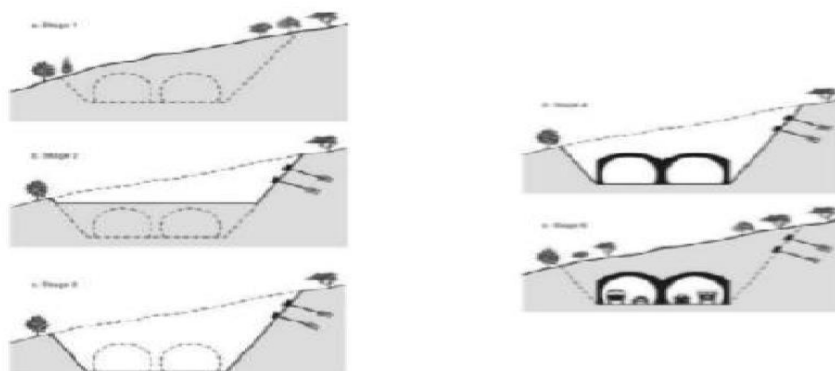
2.4 Λοιπές Μέθοδοι Διάνοιξης Σηράγγων

Στην συνέχεια ακολουθούν ορισμένες άλλες μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων που χρησιμοποιούνται πιο σπάνια στην διάνοιξη σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές

2.4.1 Μέθοδος Ανοιχτού Ορύγματος Cut and Cover και Cover and Cut

Η μέθοδος ανοικτού ορύγματος είναι μία από τις πιο παλιές μεθόδους διάνοιξης σηράγγων και χρησιμοποιείται για την κατασκευή υπόγειων σιδηροδρόμων σε αστικές περιοχές (Γραμμή 1 ηλεκτρικός Σιδηρόδρομος Αθηνών) όπως και σε σήραγγες οδοποιίας μικρού μήκους. Τα τελευταία χρόνια έχει υιοθετηθεί καταλλήλως ώστε να διευκόλυνση την κατασκευή των στομίων εισόδου και εξόδου σηράγγων. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι η εκσκαφή μιας τάφρου η οποία πρέπει να σκεπαστεί και η επί τόπου κατασκευή της Σήραγγας η οποία στην συνέχεια καλύπτεται με εδαφικά υλικά (επιχωματώσεις). Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει σταδιακή εκσκαφή και εφαρμογή της υποστήριξης του έργου με προσωρινούς τοίχους και συστήματα σύσφιξης.

Σε περίπτωση εξαιρετικά δυσμενών γεωλογικών συνθηκών χρειάζεται προενίσχυση των εδαφών είτε με σκυρόδεμα είτε αγκύρια ώστε να ελαχιστοποιηθούν ή να αποφευχθούν τα προβλήματα σταθερότητας κατά την εκσκαφή . Μόλις επιτευχθεί το επίπεδο θεμελίωσης , ξεκινούν οι διαδικασίες σκυρόδετησης της σήραγγας ενώ στην συνέχεια γίνεται στεγανοποίηση και τοποθέτηση της επίχωσης άνωθεν της σήραγγας .

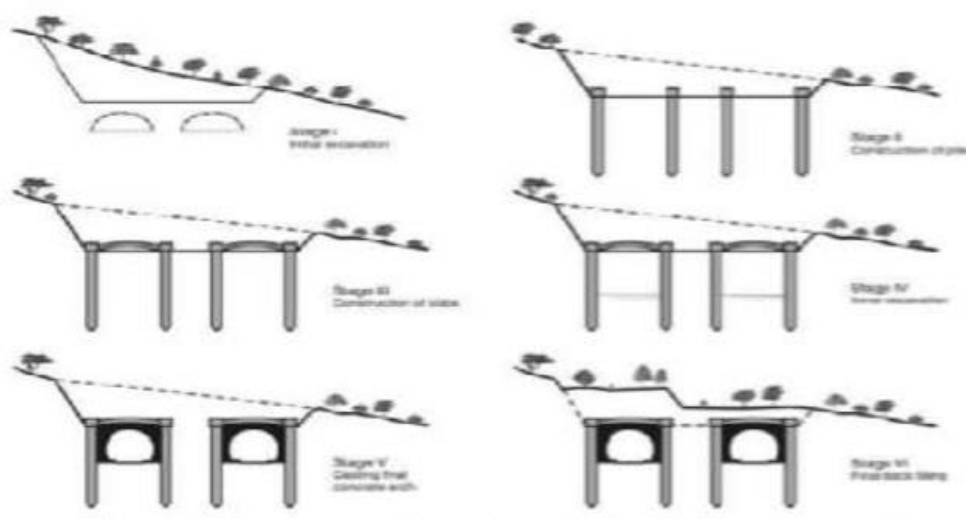


Εικόνα 2.13 : Μέθοδος Διάνοιξης Cut and Cover. Αναλυτικά τα βήματα της μεθόδου (Πηγή : Mouratidis, 2008)

Παραλλαγή της μεθόδου ανοικτής εκσκαφής αποτελεί και η μέθοδος επικάλυψης και εκσκαφής (cover and cut ή αλλιώς top and down). Η διαδικασία της κατασκευής περιλαμβάνει έξι ευδιάκριτα στάδια τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Στο πρώτο στάδιο εκτελείται η αρχική ανασκαφή και βαθμολόγηση. Το επίπεδο ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέψει την πρόσβαση και μετακίνηση του εξοπλισμού για τη διάτρηση υποστυλώσεων και την κατασκευή πλακών .
2. Στο δεύτερο στάδιο γίνεται κατασκευή μιας σειράς υποσυστημάτων από κάθε πλευρά του τμήματος σηράγγων.
3. Στο τρίτο στάδιο γίνεται τοποθέτηση αντηρίδων που ενώνουν τα υποστρώματα και στην συνέχεια κατασκευάζεται η άνω πλάκα.
4. Στο τέταρτο στάδιο εκτελείται η “κάτω” εκσκαφή η οποία είναι απολύτως προστατευμένη από τα υποστρώματα/άνω πλάκα με εφαρμογή εκτοξευμένου σκυροδέματος στην επιφάνεια του βράχου, ανάμεσα από τις υποστυλώσεις του έργου.
5. Στο πέμπτο στάδιο κατασκευάζεται η εσωτερική επένδυση της σήραγγας .
6. Στο έκτο και τελευταίο στάδιο πραγματοποιούνται οι διαδικασίες επιχωμάτωσης της σήραγγας.

Πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ο μειωμένος χρόνος εκτεταμένων εργοταξιακών εργασιών καθώς και η ταχύτητα απόδοσης του έργου . Στα αρνητικά πρόκειται για μία εξαιρετικά πολυδάπανη και πολυπλοκότερη κατασκευή σε σχέση με την μέθοδο Cut and Cover.



Εικόνα 2.14 : Μέθοδος Διάνοιξης Cover and Cut ή Top down . Αναλυτικά τα βήματα της μεθόδου (Πηγή : Mouratidis, 2008)

2.4.2 Μέθοδος Διάνοιξης TNM

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο σύστημα ταξινόμησης της βραχώμαζας Q. Εφαρμόζεται για διακλασμένο πέτρωμα με εύρος αντοχών σε μονοαξονική θλίψη 3 έως 300MPa και για αργλικές ζώνες με ισχυρές επιτόπου τάσεις. Οι συνήθεις μέθοδοι εκσκαφής συνίστανται σε διάτρηση και χρήση εκρηκτικών, μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM) για σκληρά πετρώματα και μηχανική εκσκαφή σε αργλικές ζώνες.

Η προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη περιλαμβάνει ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, συστηματική τοποθέτηση αγκυρίων, περιστασιακά αγκύρια, δακτύλιο από ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ράβδους και προκατασκευασμένα με σκυρόδεμα πλαίσια.

Η προσωρινή υποστήριξη αποτελεί μέρος της μόνιμης υποστήριξης, δε χρησιμοποιείται ενίσχυση με μεταλλικό πλέγμα, δε χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που παρασκευάζεται σαν ξηρό μίγμα (gunite) αλλά μόνο σαν υγρό μίγμα και δε χρησιμοποιούνται άκαμπτα ή εύκαμπτα μεταλλικά πλαίσια.

Η μέθοδος TNM εφαρμόζεται κυρίως σε διακλασμένες βραχομάζες που έχουν την τάση να δημιουργούν υπερεκσκαφές και όπου η διάνοιξη γίνεται με τη χρήση εκρηκτικών.

2.5 Παρακολούθηση της συμπεριφοράς των Σηράγγων σε Κατοικημένες περιοχές

Σημαντικό κομμάτι των σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές εκτός από την χάραξη και τον σχεδιασμό τους αποτελεί η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας κατά την διάρκεια τόσο της διάνοιξης όσο και της περιόδου της λειτουργίας της, ελέγχοντας την συμπεριφορά των στοιχείων που έρχεται σε επαφή (βραχομάζα , Τοιχώματα, Επιφάνεια εδάφους κλπ).

Η επιτυχία της διάνοιξης και υποστήριξης των σηράγγων βασίζεται σε σημαντικό βαθμό στη συστηματική παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας σε κάθε φάση της κατασκευής της .

Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας γίνεται μέσω συστηματικών μετρήσεων και κατάλληλης αξιολόγησής των. Κατά τη διάνοιξη και υποστήριξη σηράγγων συνήθως μετρούνται τα εξής:

- Μετακινήσεις: α) του τοιχώματος της σήραγγας, β) της βραχομάζας που περιβάλλει τη σήραγγα και γ) της επιφάνειας του εδάφους.
- Πιέσεις: α) της βραχομάζας στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, β) υδατικές πιέσεις στο έδαφος που περιβάλλει τη σήραγγα.
- Δυνάμεις: α) εφελκυσμός στα αγκύρια, β) θλίψη/κάμψη στα χαλύβδινα πλαίσια.
- Παροχή διηθήσεων υπογείων υδάτων.

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις παραπάνω μετρήσεις. Το είδος των μετρήσεων, οι θέσεις τοποθέτησης των οργάνων μέτρησης, η συχνότητα των μετρήσεων, οι τρόπος της αξιολόγησής τους, τα αποδεκτά όρια των μετρήσεων και, τέλος, οι ενέργειες που θα πρέπει να αναλαμβάνονται σε περίπτωση που οι μετρήσεις υπερβούν τα αποδεκτά όρια θα πρέπει να αποτελούν αντικείμενο ειδικής μελέτης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολύ συχνό φαινόμενο στις κατασκευές σηράγγων είναι οι μετρήσεις να γίνονται αλλά να μην αξιολογούνται ή να μην είναι γνωστά τα μέγιστα αποδεκτά όρια με αποτέλεσμα να μην λαμβάνονται κατάλληλες ενέργειες για την διόρθωση πιθανών αστοχιών.

2.5.1 Παρακολούθηση των Μετακινήσεων του Τοιχώματος της Σήραγγας

Η παρακολούθηση των μετακινήσεων του τοιχώματος των Σηράγγων γίνεται κατά κύριο τρόπο με τοπογραφικές μεθόδους χρησιμοποιώντας τοπογραφικό εξοπλισμό. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται τα εξής εργαλεία.

- Τοπογραφική αποτύπωση της μετακίνησης σε τρεις άξονες (3-D convergency). Αμέσως μετά την εκσκαφή της σήραγγας τοποθετούνται στα τοιχώματα της σήραγγας οπτικοί ανακλαστήρες (reflex targets). Οι συντεταμένες στο χώρο των ανακλαστήρων μετρούνται σε τακτά διαστήματα με τοπογραφικό όργανο (total station). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να παρακολουθείται η χρονική εξέλιξη της μετακίνησης ενός σημείου του τοιχώματος της σήραγγας ή η σχετική απόσταση μεταξύ δυο σημείων του τοιχώματος. Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από την απόσταση σκόπευσης, την ακρίβεια του οργάνου την διάθλαση των ακτινών λόγω θερμοκρασίας ή πιθανών ύπαρξης καυσαερίων. Η συνήθης ακρίβεια τέτοιων μετρήσεων είναι 2-4mm.
- Χωροσταθμική υψομετρική αποτύπωση με την βοήθεια χωροβάτη γίνεται μέτρηση του υψομέτρου στόχων που τοποθετούνται στο δάπεδο και τις παρειές της σήραγγας. Η συνηθισμένη ακρίβεια των μετρήσεων αυτών είναι 1-2mm.
- Μέτρηση της απόστασης μεταξύ δυο σημείων στο τοίχωμα της σήραγγας με μεταλλική μετροταινία (tape extensometer). Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξεως του 0.4mm.



Εικόνα 2.14 : Έλεγχος μικρομετακινήσεων με τοπογραφικές μεθόδους (total station και reflex targets) (Πηγή: <https://www.aplitop.com/tunnels>)

2.5.2 Παρακολούθηση των Μετακινήσεων της Βραχομάζας

Η παρακολούθηση των μετακινήσεων της βραχομάζας η οποία περιβάλλει το έργο γίνεται με την βοήθεια διαφόρων εργαλείων και τεχνικών.

- Με εκτασιόμετρα ράβδου τα οποία τοποθετούνται εντός γεωτρήσεων (extensometers). Εντός γεώτρησης τοποθετούνται μεταλλικές ράβδοι των οποίων το ένα άκρο στερεώνεται εντός της γεώτρησης με κάποιο σύστημα ακύρωσης και το άλλο άκρο προεξέχει ελαφρώς από το στόμιο της γεώτρησης. Επιπλέον στην ίδια γεώτρηση μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερες της μιας ράβδοι που πακτώνονται σε διάφορα βάθη. Με το όργανο αυτό γίνεται μέτρηση της σχετικής μετακίνησης του σημείου πακτώσεως της ράβδου ως προς το στόμιο της γεώτρησης δηλαδή ως προς το τοίχωμα της σήραγγας, εφόσον οι γεωτρήσεις γίνονται από το εσωτερικό της σήραγγας.
- Με μαγνητικά εκτασιόμετρα τα οποία τοποθετούνται εντός γεωτρήσεων (magnetic probe extensometers). Εντός γεώτρησης τοποθετείται πλαστικός σωλήνας ο οποίος φέρει μεταλλικούς δακτυλίους ανά 0.40m. Ο σωλήνας πακτώνεται εντός της γεωτρήσεως με τσιμεντένεμα (Ενέσιμο μη συρρικνωμένο λεπτόκοκκο κονίαμα). Κατά τη μέτρηση, εισάγεται στο σωλήνα μια βολίδα η οποία με μαγνητική μέθοδο μετράει την απόσταση μεταξύ των δακτυλίων. Η σχετική μετακίνηση των δακτυλίων δίνει την παραμόρφωση της βραχομάζας αφού οι δακτύλιοι παρακολουθούν τη μετακίνηση της βραχομάζας.
- Με ολισθαίνοντα εκτασιόμετρα (sliding micrometer). Εντός γεώτρησης τοποθετείται ειδικός πλαστικός σωλήνας ο οποίος σε τακτά διαστήματα φέρει μεταλλικούς δακτυλίους κατάλληλου σχήματος (measuring marks). Ο σωλήνας στην συνέχεια στερεώνεται εντός της γεώτρησης με τσιμεντένεμα. Κατά τη μέτρηση εισάγεται στο σωλήνα μεταλλικό στέλεχος που ολισθαίνει κατά μήκος του σωλήνα και σταματά (κλειδώνει) στις θέσεις των μεταλλικών δακτυλίων. Με τον τρόπο αυτό μετράται η σχετική απόσταση μεταξύ των δακτυλίων με μεγάλη ακρίβεια της τάξης του 0.01mm. Η σχετική μετακίνηση των δακτυλίων δίνει την παραμόρφωση της βραχομάζας αφού οι δακτύλιοι παρακολουθούν τη μετακίνηση της βραχομάζας.
- Με αποκλισιόμετρα (inclinometers). Εντός γεώτρησης τοποθετείται (και πακτώνεται με τσιμεντένεμα) ειδικός πλαστικός σωλήνας. Κατά την διάρκεια της μέτρησης εισάγεται εντός του σωλήνα ειδική βολίδα η οποία εφαρμόζει ακριβώς και ολισθαίνει κατά μήκος του σωλήνα. Η βολίδα διαθέτει ένα ηλεκτρονικό σύστημα (ηλεκτρονικό εκκρεμές) με το οποίο καταγράφεται η απόκλιση από την κατακόρυφο της βολίδας σε κάθε θέση. Με ολοκλήρωση

των αποκλίσεων μπορεί να υπολογισθεί η μετακίνηση του σωλήνα σε διεύθυνση εγκάρσια προς τον άξονά του. Τα αποκλισιόμετρα συνήθως τοποθετούνται από την επιφάνεια του εδάφους σε κατακόρυφη διεύθυνση και μετρώνται οι οριζόντιες αποκλίσεις του σωλήνα με την πάροδο του χρόνου.



Εικόνα 2.15 : Από αριστερά και δεξιόστροφα (α) Ψηφιακό Εκστασιόμετρο (Πηγή: https://www.geosense.co.uk/products/details/Digital_Tape_Extensometer)

(β) Εκστασιόμετρο με Ταινία (αναλογικό) (Πηγή: <https://www.rststruments.com/Tape-Extensometer.html>)

(γ) Τυπικό Αποκλισιόμετρο (Πηγή: <https://roctest.com/en/product/profil-digital-inclinometer-probe/>)

(δ) Μετρήσεις Μικρομετακινήσεων με Εκστασιόμετρο Ράβδου (Πηγή: <http://www.cordintec.com/qeo.html>)

Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ

2.5.3 Μετρήσεις των Πίεσεων στην Επένδυση της Σήραγγας

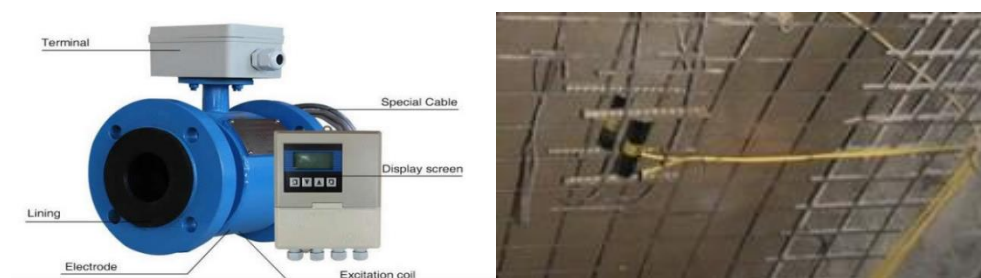
Οι εδαφικές πιέσεις που ασκούνται στην επένδυση της σήραγγας μπορούν να μετρηθούν με κύτταρα πίεσεως (pressure cells) που τοποθετούνται στη επιφάνεια κατά την κατασκευή της επένδυσης. Οι υδατικές πιέσεις στο έδαφος γύρω από μια σήραγγα μπορούν να μετρηθούν με πιεζόμετρα. Τα πιεζόμετρα είναι διαφόρων τύπων: υδραυλικά (stand-ripe), ηλεκτρικά (vibrating wire, strain gauge) ή πνευματικά (pneumatic).

2.5.4 Μετρήσεις Δυνάμεων και Μετρήσεις των Παροχών

Τα φορτία των εφελκόμενων ή θλιβόμενων στοιχείων (π.χ. αγκύρια) μπορούν να μετρηθούν με την τοποθέτηση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (strain gauges) ή μετρητών φορτίου (load cells) κατά την κατασκευή των φορτιζόμενων στοιχείων. Εάν δεν έχει γίνει τοποθέτηση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων στα αρχικά στάδια της κατασκευής τότε μπορεί να ανοιχτεί μια μικρή οπή στο φορτιζόμενο στοιχείο και να τοποθετηθεί ένα σύστημα τριών ηλεκτρομηκυνσιομέτρων τα οποία στη συνέχεια πακτώνονται εντός της οπής με εποξειδική ρητίνη.

Στη συνέχεια αφαιρείται ένα αρκετά μεγάλο τμήμα του φορτιζόμενου στοιχείου που περιλαμβάνει και τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα. Κατά την αφαίρεση, το στοιχείο αποφορτίζεται και τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα φορτίζονται με φορτίο ίσο και αντίθετο με το φορτίο του στοιχείου πριν αφαιρεθεί.

Η μέτρηση υδατικών παροχών εντός της σήραγγας γίνεται με παροχόμετρα ή με σύστημα ελεγχόμενης υπερχειλίσης.



Εικόνα 2.17 : Από αριστερά και αριστερόστροφα (α) Παροχόμετρο (Πηγή : (<http://gr.digital-instrument.com/flow-transmitter/electromagnetic-flow-meter/high-quality-smart-electromagnetic-flow-meter.html>)

(β) Τοποθετημένα Ηλεκτρομηκυνσιόμετρα σε τοίχωμα Σήραγγας (Πηγή : http://www.geodata.at/en/sensors-systems-software/sensoren/strain_gauges-pressure_cells.php)

Κεφάλαιο 3 : Καθιζήσεις λόγω Διάνοιξης Σήραγγας σε Κατοικημένες Περιοχές και Τάσεις Επιφανειακών Κατασκευών

Οι βασικότερες μέθοδοι εκτίμησης των εδαφικών μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους λόγω διάνοιξεως αβαθών σηράγγων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως:

- **Μέθοδοι Αναλυτικών Κλειστών Λύσεων** : Οι μέθοδοι αναλυτικών κλειστών λύσεων είναι ιδιαίτερως χρήσιμες στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με τις επιτόπου γεωτεχνικές συνθήκες. Οι Sagasetta (1987) και Verruijt και Booker (1995) έχουν παρουσιάσει κλειστές αναλυτικές λύσεις με βάση τη θεωρία της Ελαστικότητας. Ο Sagasetta (1987) παρουσίασε μία απλή κλειστή αναλυτική ελαστική λύση για τον υπολογισμό των κατακόρυφων και των οριζόντιων εδαφικών μετακινήσεων, λόγω διάνοιξης σήραγγας, σε εδάφη με μηδενική μεταβολή όγκου (δηλαδή υπό αστράγγιστες συνθήκες, με λόγο Poisson $\nu = 0.4$). Χρησιμοποιώντας παρόμοια τεχνική οι Verruijt και Booker (1995) παρουσίασαν μια κλειστή ελαστική λύση για εδάφη με διαφορετικούς λόγους Poisson.
- **Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων** : Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην ανάλυση προβλημάτων παραμόρφωσης του συστήματος εδάφους-σηράγγων και η διεθνής βιβλιογραφία έχει να παρουσιάσει σημαντικές ερευνητικές εργασίες όπως π.χ. των Ghaboussi et al (1978), Tan και Clough (1980), Rowe et al (1983) και Rowe και Kack (1983). Πιο συγκεκριμένα, οι Rowe και Kack (1983), αναλύοντας επιτόπου μετρήσεις καθιζήσεων από διάφορες περιπτώσεις σηράγγων κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι καθιζήσεις που εκτιμώνται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων την οποία παρουσίασαν, προσεγγίζουν αρκετές φορές σε μεγάλο βαθμό της μετρηθείσας καθιζήσης. Επιτυχείς εκτιμήσεις οριζοντίων μετακινήσεων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έχουν αναφερθεί από τους Lee et al (1994). Παρόλα αυτά, ο Gunn (1993) τονίζει ότι η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης, ακόμα και με τη χρήση εξελιγμένων ελαστοπλαστικών μοντέλων προσομοίωσης της συμπεριφοράς των εδαφών, προσφέρει σχετικά «πτωχές» εκτιμήσεις για τις επιφανειακές καθιζήσεις. Κατά τον Gunn, η καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων, η οποία εκτιμάται με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος και μικρό βάθος συγκρινόμενη με εκείνη που προβλέπεται από την καμπύλη σφάλματος με βάση τις επιτόπου μετρήσεις.

- **Εμπειρικές Μέθοδοι :** Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την εκτίμηση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων και ειδικότερα των επιφανειακών καθιζήσεων κάθετα στον άξονα της σήραγγας. Από τις εμπειρικές μεθόδους, η πλέον διαδεδομένη είναι εκείνες των Martos (1948), Peck (1959), Schmidt (1959), Clough και Schmidt (1981), Attewell και Yeates (1984), η οποία αναλύεται στις επόμενες ενότητες.

3.1 Εμπειρικές Μέθοδοι Εκτίμησης των Επιφανειακών Εδαφικών Μετακινήσεων

3.1.1 Κατακόρυφες Εδαφικές Μετακινήσεις στον άξονα της Σήραγγας

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος για την εκτίμηση των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων, όπως προαναφέρθηκε, είναι εκείνη των Martos (1948), Peck (1959), Schmidt (1959), Clough και Schmidt (1981), Attewell και Yeates (1984) η οποία προϋποθέτει ότι η καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων είναι δυνατόν να προσομοιωθεί, με ικανοποιητική ακρίβεια, από μία καμπύλη σφάλματος (Σχ. 3.1). Η μαθηματική έκφραση της καμπύλης αυτής έχει προκύψει μετά από στατιστική επεξεργασία και αξιολόγηση μεγάλου αριθμού επιτόπου μετρήσεων υπό συνθήκες «ελευθέρου πεδίου» από διάφορες περιπτώσεις διανοίξεων υπογείων ανοιγμάτων σε μεγάλη ποικιλία γεωτεχνικών συνθηκών και δίνεται από την εξίσωση:

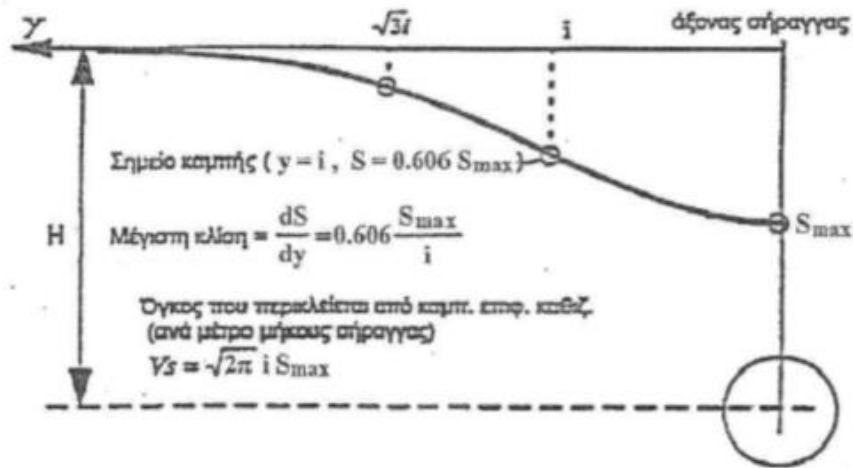
$$S = S_{\max} * e^{\frac{-y^2}{2 * i^2}} \quad (3.1)$$

Όπου :

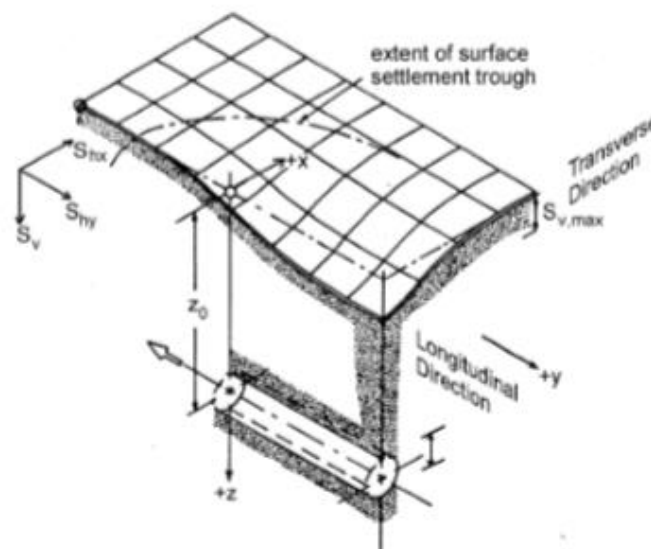
S : η καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους, σε εγκάρσια απόσταση y από τον άξονα της σήραγγας,

S_{\max} : η μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους η οποία προκύπτει για τη θέση $y = 0$ (θέση του άξονα της σήραγγας),

i : η τυπική απόκλιση της καμπύλης των καθιζήσεων. Αντιστοιχεί στη θέση του σημείου καμπής της καμπύλης (σημείο με τη μέγιστη κλίση). Στις πρακτικές εφαρμογές το εύρος της καμπύλης των επιφανειακών καθιζήσεων λαμβάνεται ίσο με $3i$.



Εικόνα 3.1 : Ιδεατή Καμπύλη που αναπαριστά τις επιφανειακές κατακόρυφες εδαφικές μετακινήσεις (καθιζήσεις) υπό συνθήκες «ελευθέρου πεδίου» (Πηγή: Σακελλαρίου, 2008)



Εικόνα 3.2 : Προοπτική Εικόνα των Επιφανειακών κατακόρυφων καθιζήσεων λόγω Διάνοιξης Σήραγγας (Πηγή : Μαρία Κορδελούλη et .al, 2008)

Στο σημείο καμπής μεγιστοποιείται η κλίση ($\frac{ds}{dy}$) της καμπύλης, η οποία εκφράζεται από την σχέση 3.2 ενώ η καμπυλότητα ($\frac{d^2S}{dy^2}$) εκφράζεται από την σχέση 3.3

$$\frac{ds}{dy} = - S_{max} * \frac{y}{i^2} * e^{\frac{-y^2}{2*i^2}} \quad (3.2)$$

$$\frac{d^2S}{dy^2} = \frac{S_{max}}{i^2} * \left(\frac{y}{i^2} - 1 \right) * e^{\frac{-y^2}{2*i^2}} \quad (3.3)$$

Η απώλεια εδαφικού όγκου (ground loss) ανά μονάδα μήκους σήραγγας V_s στην επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή ο όγκος ο οποίος περικλείεται από την καμπύλη των επιφανειακών καθιζήσεων, υπολογίζεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s dy = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{max} * e^{\frac{-y^2}{2*i^2}} dy \cong \sqrt{2\pi} * i * S_{max} \quad (3.4)$$

Οπότε προκύπτει η σχέση :

$$S_{max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} * i} \quad (3.4)$$

Με την παραδοχή της ύπαρξης συνθηκών ισόογκης παραμόρφωσης προκύπτει ότι ο όγκος των εδαφικών καθιζήσεων ανά μονάδα μήκους της σήραγγας V_s (στην επιφάνεια) ισούται με την απόλυτη τιμή του όγκου του γεωυλικού, ο οποίος περικλείεται μεταξύ της τελικής θέσης (μετά την παραμόρφωση) και της αρχικής θέσης (πριν την παραμόρφωση) των τοιχωμάτων της σήραγγας. Ως «σχετική απώλεια εδαφικού όγκου» (relative ground loss), VI , ορίζεται ο λόγος της προαναφερθείσας απώλειας εδαφικού όγκου, V_s , προς το ιδεατό εμβαδόν της διατομής της σήραγγας που εκσκάπτεται, V .

$$VI = \frac{V_s}{V} \% \quad (3.5)$$

Οι Clough και Schmidt (1981) κατάφεραν να επιτύχουν την αρχική εκτίμηση του μεγέθους της σχετικής απώλειας του εδαφικού, $VI = \frac{V_s}{V} \%$ συναρτήσει της τιμής του συντελεστή υπερφόρτισης (overload factor, Peck(1959).

$$N = \frac{(P_o - P_i)}{\frac{\sigma_c}{2}} \quad (3.7)$$

Όπου

p_o : είναι η ολική πίεση των υπερκείμενων γαιών στη στάθμη του άξονα της σήραγγας ($p_o = \gamma H$).

p_i : είναι η πίεση στο εσωτερικό της σήραγγας λόγω της αντιστήριξης της, (λαμβάνεται $p_i = 0$ υπέρ της ασφαλείας).

σ_c : είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του περιβάλλοντος τη σήραγγα γεωυλικού, η οποία στην περίπτωση αστοχίας κατά Mohr - Coulomb δίνεται από τη σχέση: $\sigma_c = 2 * c * \tan(44^\circ + \phi/2)$ με c η τιμή της συνοχής και ϕ η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής του εν λόγω γεωυλικού.

Οι Clough και Schmidt (1981) προτείνουν για τις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει επαρκής εμπειρία, κυρίως λόγω των επικρατούσων γεωτεχνικών συνθηκών, η εκτίμηση του μεγέθους VI γίνεται με τη βοήθεια των παρακάτω σχέσεων:

(α) Για προσεκτική Κατασκευή σήραγγας :

$$\frac{V_s}{V} = 0.002 * e^{N-1} \quad (3.8)$$

(β) Για συνήθη επιμέλεια στην κατασκευή σήραγγας :

$$\frac{V_s}{V} = 0.004 * e^{N-1} \quad (3.9)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος της σχετικής απώλειας του εδαφικού όγκου εξαρτάται άμεσα από τον λόγο H/D. Έτσι σε αβαθείς σήραγγες σε αργιλικά εδάφη, όπου ο λόγος H/D είναι μικρός το μέγεθος του VI είναι σημαντικά μεγάλο, ως αποτέλεσμα της μη ενεργοποίησης, σε σημαντικό βαθμό, του μηχανισμού «θόλου» (arching). Οι O'Reilly & New (1982), αξιολογώντας τις μετρήσεις καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε ποικίλες εδαφικές συνθήκες, οι οποίες έδειξαν ότι η τυπική απόκλιση αυξάνεται κατά προσέγγιση γραμμικά συναρτήσει του βάθους διάνοιξης της σήραγγας και είναι ανεξάρτητη της διαμέτρου της και του τρόπου διάνοιξής της, κατέληξαν στη σχέση:

$$i = K * H \quad (3.10)$$

όπου

K: παράμετρος που εκφράζει το πλάτος της καμπύλης καθιζήσεων

H: το βάθος διανοίξεως της σήραγγας.

Σχετικά με την παράμετρο K, οι Mair και Taylor (1997) συνιστούν για πρακτικές εφαρμογές σχεδιασμού να λαμβάνεται K=0.4 για την περίπτωση αργιλικών εδαφών και K=0.34 για την περίπτωση κοκκωδών εδαφών, ενώ ο Burland (2001) προτείνει K=0.2-0.3 για κοκκώδη εδάφη, K=0.4-0.4 για στιφρές αργίλους και K=0.4-0.7 για μαλακές αργίλους. Οι Clough και Schmidt (1981) προτείνουν, μόνον για αργίλους, την παρακάτω σχέση :

$$\frac{i}{D} = 0.4 * (H/D)^{0.8} \quad (3.11)$$

Όπου :

D: η διάμετρος της σήραγγας

H: το βάθος του άξονα της σήραγγας.

Οι Oteo και Sagasetta (1982) συνδέοντας δεδομένα και στοιχεία μετρήσεων της βιβλιογραφίας, καθώς και μεγάλο αριθμό αποτελεσμάτων αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία προτείνουν την ακόλουθη γραμμική σχέση :

$$\frac{i}{R} = 1.04*(H/D) - 0.42 \quad (3.12)$$

όπου:

R: η ακτίνα της σήραγγας.

D: η διάμετρος της σήραγγας.

H: το βάθος του άξονα της σήραγγας.

Τέλος, οι Mair και Taylor (1993) ύστερα από αξιολόγηση σημαντικού αριθμού επιτόπου μετρήσεων των κατακόρυφων εδαφικών μετακινήσεων σε διαφορετικές στάθμες (zs) υπερκείμενες των σηράγγων, κυρίως σε αργιλικά εδάφη, κατέληξαν στην ακόλουθη σχέση :

$$i = \left\{ 0.174 + 0.324 * \left(1 - \frac{z_0}{H} \right) \right\} * H \quad (3.13)$$

όπου:

zs: το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους όπου εξετάζεται η κατανομή των καθιζήσεων

H: το βάθος του άξονα της σήραγγας.

3.1.2 Οριζόντιες Εδαφικές Μετακινήσεις Κάθετα στον Άξονα της Σήραγγας

Εκτός από τις κατακόρυφες μετακινήσεις (καθιζήσεις), κατά τη διάρκεια διάνοιξης μιας σήραγγας παρουσιάζονται και οριζόντιες μετακινήσεις οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα στις υπερκείμενες κατασκευές λόγω των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η εκτίμηση των οριζόντιων μετακινήσεων. Οι Mair et al. (1995), πρότειναν την παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό των οριζόντιων μετακινήσεων (sh) κάνοντας την παραδοχή ότι η συνισταμένη των διανυσμάτων των εδαφικών μετακινήσεων κατευθύνεται προς τον άξονα της σήραγγας.

$$S_h = \frac{y}{h} * S \quad (3.14)$$

όπου :

y : η εγκάρσια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας

H : το βάθος του άξονα της σήραγγας

S : η καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους σε εγκάρσια απόσταση y από τον άξονα της σήραγγας

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.1 και 3.14 καταλήγουμε στην ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$S_h = \frac{y}{h} * S_{max} * e^{\frac{-y^2}{2*i^2}} \quad (3.14)$$

Οι οριζόντιες παραμορφώσεις (ϵ_h) προκύπτουν από την παραγωγή της εξίσωσης 2.15 από όπου προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$\epsilon_h = \frac{dS_h}{dy} = \frac{S_{max}}{H} * \left[1 - \frac{-y^2}{i^2} \right] * e^{\frac{-y^2}{2*i^2}} \quad (3.15)$$

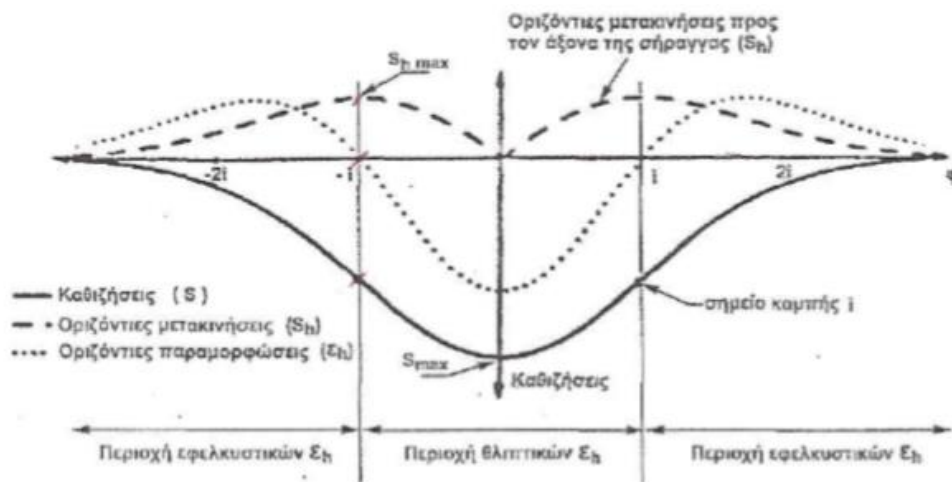
Η μέγιστη επιφανειακή οριζόντια εδαφική μετακίνηση (S_{hmax}) παρουσιάζεται στη θέση $y=\pm i$ και δίνεται από την εξίσωση :

$$S_{hmax} = 0.505 * S_{max} * \left(\frac{\pm i}{H} \right) \quad (3.17)$$

Οι Sagaseta και Oteo (1995) αναφέρουν ότι σύμφωνα με τις παρατηρήσεις συμπεριφοράς του εδάφους, οι οριζόντιες μετακινήσεις στην επιφάνεια είναι περίπου ίσες προς το 1/3-1/2 των αντίστοιχων καθιζήσεων και προτείνουν τελικώς με βάση αποτελέσματα αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, ότι ο λόγος της μέγιστης οριζόντιας μετακινήσεως προς την μέγιστη καθίζηση να είναι περίπου 0.3

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται η κατά πλάτος κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων (s_h), των οριζόντιων παραμορφώσεων (ϵ_h) καθώς και οι αντίστοιχες καθιζήσεις (s) στην επιφάνεια του εδάφους λόγω διανοίξεως σήραγγας (Mair et al, 1995).

Γίνεται αντιληπτό ότι οι οριζόντιες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του εδάφους είναι εφελκυστικές ($\epsilon_h < 0$) για $y > i$ και $y < -i$ και θλιπτικές ($\epsilon_h > 0$) για $-i < y < i$.



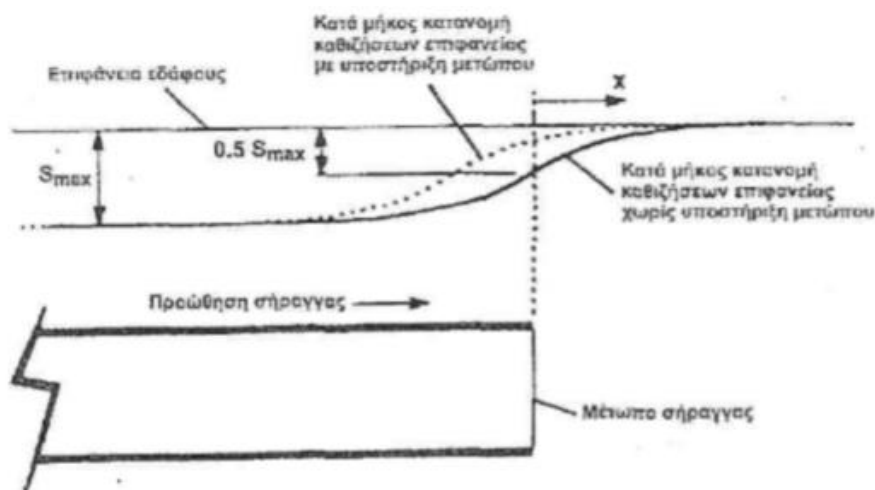
Εικόνα 3.3 Σχεδιάγραμμα που δείχνει τις κατά πλάτος Κατανομές Οριζόντιων Επιφανειακών Μετακινήσεων, λόγω Διάνοιξης Σήραγγας (Πηγή: Σακελλαρίου, 2008)

3.1.3 Κατακόρυφες επιφανειακές Μετακινήσεις κατά μήκος του άξονα της Σήραγγας

Οι μετακινήσεις που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες αφορούν σε επίπεδο εγκάρσιο στον άξονα της σήραγγας. Ωστόσο κατά τη διάνοξη της σήραγγας παρουσιάζονται και μετακινήσεις κατά μήκος του άξονά της.

Οι Attewell και Woodman (1982) αξιοποιώντας μετρήσεις από κατασκευές σηράγγων σε αργιλικά εδάφη κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι καθιζήσεις κατά μήκος του άξονα της διάνοιξης μιας σήραγγας προσεγγίζονται ικανοποιητικά από μια συνάρτηση πιθανότητας όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4.

Αν στη θέση του μετώπου τα μέτρα υποστήριξης δεν είναι ικανοποιητικά η άμεση καθίζηση (s) λαμβάνει τιμή ίση με $0.4 \cdot s_{\max}$ ενώ σε αντίθετη περίπτωση είναι αισθητά μικρότερη του $0.4 \cdot s_{\max}$ τόσο στην περίπτωση ύπαρξης στιφρής αργίλου, όσο και για την περίπτωση παρουσίας μαλακής αργίλου στην περιοχή διέλευσης της σήραγγας.



Εικόνα 3.4 : Σχεδιάγραμμα Κατανομής Επιφανειακών Καθιζήσεων κατά μήκος του άξονα της Σήραγγας (Πηγή: Σακελλαρίου, 2008)

3.1.4 Εδαφικές Μετακινήσεις Έπειτα το Πέρασ της Κατασκευής

Οι μετακινήσεις λόγω της διάνοιξης μιας σήραγγας δεν γίνονται μόνο κατά το χρονικό διάστημα κατά το οποίο αυτή κατασκευάζεται αλλά μπορούν να εκδηλωθούν και μετά το πέρας της κατασκευής. Η μεταβολή της κατανομής των πιέσεων πριν και μετά την κατασκευή της σήραγγας, η διαπερατότητα του εδάφους στο οποίο γίνεται διάνοιξη της σήραγγας και η διαφορά αυτής σε σχέση με τη διαπερατότητα της επένδυσης είναι οι κυριότεροι παράγοντες που συντελούν στην εμφάνιση καθιζήσεων έπειτα το πέρας της κατασκευής.

Ειδικότερα, σε αργιλικά εδάφη όπου οι πιέσεις του νερού των πόρων μεταβάλλονται σημαντικά (αστραγγιστες συνθήκες κατά την κατασκευή και στραγγισμένες συνθήκες μετά το πέρας της κατασκευής) μπορούν να σημειωθούν μεγάλες καθιζήσεις.

Οι Mair (1998) και Burland (2001) επισήμαναν ότι σε μαλακές αργίλους οι μακροχρόνιες μετακινήσεις που πραγματοποιούνται έχουν σχεδόν αμελητέα οριζόντια συνιστώσα, πρόκειται δηλαδή για καθιζήσεις οι οποίες έχουν τιμές από 30% έως 90% της συνολικής καθίζησης.

3.2 Κριτήρια Εδαφικών Μετακινήσεων και Κατηγορίες Βλαβών Κτηρίων

Κατά τη διάρκεια διάνοιξης αβαθών σηράγγων συντελούνται αλλαγές της εντατικής κατάστασης μέσα στο έδαφος, με αποτέλεσμα την εκδήλωση απωλειών του εδαφικού όγκου και την εμφάνιση κατακόρυφων και οριζόντιων εδαφικών μετακινήσεων. Οι μετακινήσεις αυτές έχουν ως συνέπεια να προκληθούν στις γειτονικές κατασκευές μετακινήσεις, στροφές και παραμορφώσεις με συνέπεια, πολλές φορές, την πρόκληση βλαβών. Επομένως είναι απαραίτητη η κατά το δυνατότερο ορθότερη εκτίμηση του μεγέθους των ανωτέρω εδαφικών μετακινήσεων, καθώς και οι πιθανές συνέπειές τους στην αισθητική, τη λειτουργικότητα και την ευστάθεια των υπερκείμενων κατασκευών.

Πιο παλαιές έρευνες και μελέτες είχαν ως αντικείμενο την εκτίμηση της ανοχής των κτιρίων αποκλειστικά στις καθιζήσεις, οι οποίες αναπτύσσονται κυρίως λόγω των ιδίων φορτίσεων των κατασκευών. Στις μελέτες αυτές η ανοχή των κτιρίων στις εδαφικές μετακινήσεις (καθιζήσεις) συνδέονταν επίσης και με μεγέθη όπως η στροφή ή ο λόγος της σχετικής μετατόπισης των κατασκευών, ενώ οι οριζόντιες παραμορφώσεις του εδάφους θεωρούνταν πρακτικά αμελητέες.

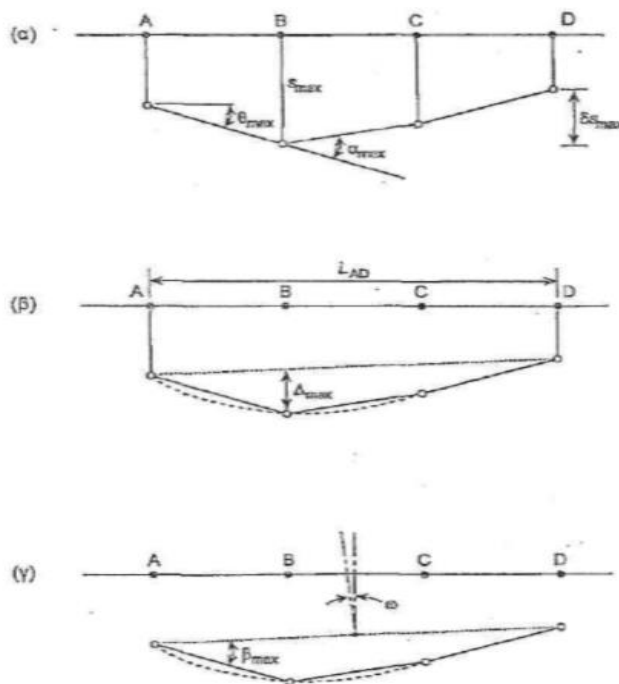
Νεώτερες έρευνες, που αφορούσαν κυρίως στην επίδραση της κατασκευής σηράγγων ή ανοικτών εκσκαφών σε υπερκείμενα κτίρια, συνέδεσαν την ανοχή των κτιρίων όχι μόνον με επιτρεπόμενα μεγέθη των προκαλούμενων κατακόρυφων εδαφικών παραμορφώσεων, αλλά και με επιτρεπόμενα μεγέθη των οριζοντίων εδαφικών παραμορφώσεων, ακόμη και με τον τύπο της παραμορφώσεως της επιφάνειας του εδάφους. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες αφορούσαν κυρίως κτίρια με φέρουσα τοιχοποιία και λιγότερες αντιστοιχούσαν σε περιπτώσεις κτιρίων με σκελετό από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Προσφάτως στη διεθνή βιβλιογραφία έχει αναγνωρισθεί ότι η επίδραση της ακαμψίας των υπερκείμενων κτιρίων στο μέγεθος και στην κατανομή των επιφανειακών εδαφικών μετακινήσεων, οι οποίες οφείλονται στις εργασίες κατασκευής σηράγγων, είναι ένα εκ των πλέον σημαντικών ζητημάτων στη διαδικασία της ορθής πρόβλεψης των πιθανών βλαβών επί αυτών των κατασκευών (Potts και Addenbrooke, 1997). Η μέχρις τώρα ακολουθούμενη πρακτική εξαρτιόνταν αποκλειστικά από τις εκτιμήσεις των εδαφικών μετακινήσεων υπό συνθήκες «ελευθέρου πεδίου», όπου δηλαδή οι υπάρχουσες ανωδομές είτε αγνοούνταν τελείως, είτε χαρακτηρίζονταν ως απολύτως εύκαμπτες, οι οποίες δεν θα ήταν δυνατόν να προκαλέσουν σημαντικές μεταβολές στα απόλυτα μεγέθη και την κατανομή των μετακινήσεων λόγω των εργασιών διάνοιξης.

Οι προσεγγιστικές μεθοδολογίες, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενες ενότητες προσφέρουν σχετικώς αξιόπιστες προβλέψεις των μετακινήσεων λαμβανομένου υπόψη και του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ της διάνοιξης αβαθών σηράγγων και της παρουσίας υπερκείμενων κατασκευών.

3.2.1 Παραμορφώσεις στις Υπερκείμενες Κατασκευές κατά την Διάνοιξη Σήραγγας

Οι βλάβες που σημειώνονται στα υπερκείμενα κτίρια κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας σε κατοικημένες περιοχές οφείλονται κυρίως στις διαφορικές καθιζήσεις της θεμελίωσής τους, παρά στην υπέρβαση μίας συγκεκριμένης απόλυτης τιμής μεμονωμένης καθίζησης. Ως επιτρεπόμενη διαφορική καθίζηση ορίζεται η τιμή της διαφορικής καθίζησης για την οποία εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η λειτουργικότητα του κτιρίου. Ο καθορισμός του μεγέθους της επιτρεπόμενης διαφορικής καθίζησης εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως α) ο τύπος της ανωδομής, β) το υλικό της κατασκευής της, γ) η ακαμψία της, οι απαιτήσεις λειτουργικότητας της, δ) η θέση της σε σχέση με άλλες κατασκευές, ε) τα μεγέθη των εκτιμώμενων μεμονωμένων καθιζήσεων, στ) ο ρυθμός ανάπτυξης των καθιζήσεων, ζ) η εκτιμώμενη κατανομή των μεμονωμένων καθιζήσεων. Οι Burland, Broms, De Mello (1977) και Wahls (1981) όρισαν τα διάφορα μεγέθη του προβλήματος ως ακολούθως (Εικόνα 3.4) :



Εικόνα 3.4 : Καθορισμός Εδαφικών μετακινήσεων και παραμόρφωσης κτηρίων. Α) Καθίζηση ϵ , διαφορική καθίζηση δs , στροφή θ , γωνιακή παραμόρφωση α, β
Μετατόπιση Δ , Λόγος σχετικής μετατόπισης Δ/L , γ) Απόκλιση θεμελίωσης ω και σχετική στροφή β (Πηγή: Burland, 1994)

Όπου :

s : καθίζηση (ολική κατακόρυφη μετακίνηση) ενός σημείου της θεμελίωσης (π.χ. Α ή Β ή C κλπ.) του κτιρίου.

δs : διαφορική καθίζηση, μεταξύ δύο σημείων της θεμελίωσης του κτιρίου.

θ : αλλαγή της κλίσης της γραμμής που συνδέει δύο σημεία αναφοράς της θεμελίωσης (π.χ. Α και Β).

α : γωνιακή παραμόρφωση σημείου θεμελίωσης

Δ : σχετική μετατόπιση δύο σημείων της θεμελίωσης σε οριζόντια μεταξύ τους απόσταση L , με αναφορά την ευθεία που τα συνδέει.

Δ/L : λόγος σχετικής μετατόπισης δύο σημείων της θεμελίωσης απέχοντα οριζοντίως απόσταση L . Με τον όρο αυτό εκφράζεται προσεγγιστικά η καμπυλότητα της καμπύλης, η οποία περιγράφει τις εκδηλωθείσες καθιζήσεις σημείων μιας θεμελίωσης.

ω : απόκλιση - στροφή της θεμελίωσης του κτιρίου ως στερεού σώματος.

β : γωνιακή στροφή δύο σημείων της θεμελίωσης σχετικά με την απόκλιση - στροφή ω της θεμελίωσης. Ισχύει ότι $\beta = \delta s/L - \omega$, όπου δs είναι η διαφορική καθίζηση μεταξύ των δύο γειτονικών σημείων της θεμελίωσης, τα οποία απέχουν μεταξύ τους απόσταση L .

ϵ_h : μέση οριζόντια παραμόρφωση, η οποία ορίζεται ως η μεταβολή δL ενός οριζοντίου μήκους L της θεμελίωσης.

3.2.2 Κριτήρια Επιτρεπόμενων Καθιζήσεων

Για να γίνει αποφυγή των βλαβών που μπορούν να επιδράσουν στην αισθητική, στη λειτουργικότητα ή ακόμα και στην ευστάθεια μιας κατασκευής έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες να εκφραστούν κριτήρια επιτρεπόμενων καθιζήσεων με τους Terzaghi (1948) και Peck (1957) να διαπιστώνουν πως κτίρια θεμελιωμένα σε κοκκώδεις σχηματισμούς μπορούν να ανεχτούν διαφορικές καθιζήσεις μεταξύ των υποστηλωμάτων τους της τάξης των 20 mm.

Δεδομένου ότι οι διαφορικές καθιζήσεις είναι το πολύ το 74% των ολικών καθιζήσεων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για συνήθη κτίρια που θεμελιώνονται με μεμονωμένα πέδιλα, η μέγιστη ανεκτή καθίζηση είναι περί τα 24 mm, ενώ για

κτίρια που θεμελιώνονται με γενική κοιτόστρωση, η μέγιστη ανεκτή καθίζηση είναι τα 40 mm.

Οι Skempton και Mac Donald (1945) κατέληξαν σε ένα κριτήριο επιτρεπόμενων καθιζήσεων το οποίο έχει εφαρμογή κυρίως σε πλαισιωτές κατασκευές. Διατύπωσαν κριτήρια για τα μεγέθη της γωνιακής στροφής (θ), της μέγιστης καθίζησης (s_{max}) και της μέγιστης διαφορικής καθίζησης (δs_{max}) τα οποία συσχέτισαν με το έδαφος έδρασης και τον τύπο θεμελίωσης. Σημειώνεται ότι η παραμόρφωση ενός φορέα εξαρτάται αρχικά από τις φορτίσεις που δέχεται (ίδια βάρη, κλπ) και επιπροσθέτως από τις καθιζήσεις.

Κριτήριο	Μεμονωμ.Πέδιλα	Γενικές Κοιτοστρώσεις
Γωνιακή Στροφή	1/300	1/300
Μέγιστη καθίζηση		
▪ Άργιλοι	3 in	3-5 in
▪ Άμμοι	2 in	2-3 in
Μέγιστη διαφορική καθίζηση		
▪ Άργιλοι	1 ^{3/4} in	
▪ Άμμοι	1 ^{1/4} in	

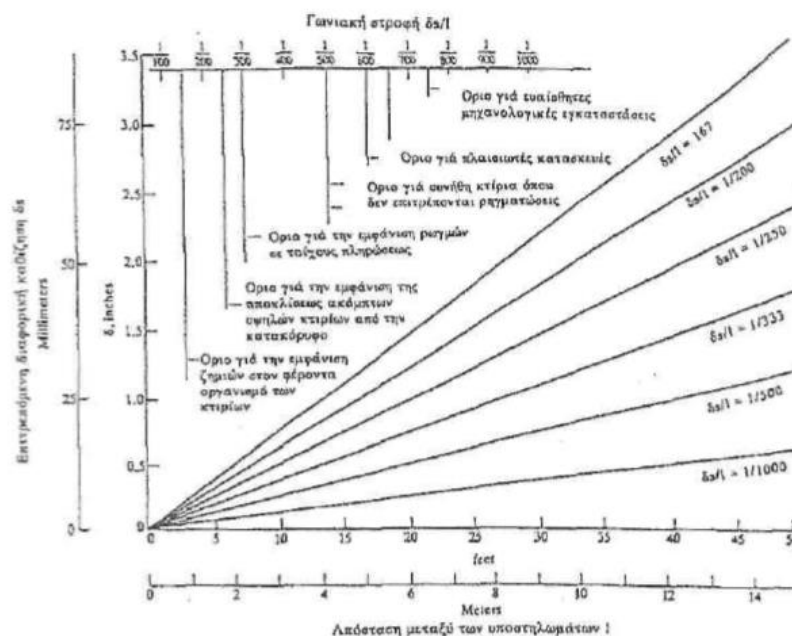
Πίνακας 3.1 : Ασφαλή όρια Καθιζήσεων και γωνιακής στροφής κατά Skempton και Mac Donald (Πηγή: Σακελλαρίου, 2008)

Προκειμένου ο οργανισμός να μην εμφανίσει βλάβη, η γωνιακή στρόφη (θ) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1/140, ενώ αν επιθυμείται να εξασφαλιστεί το κτίριο έναντι όποιων ρωγμών στους τοίχους πλήρωσης, το ανεκτό όριο για τη γωνιακή στρόφη είναι 1/400.

Ο Bjerrum (1953), στο κριτήριο που κατέληξε, οριοθέτησε την επιτρεπόμενη γωνιακή στρόφη (θ) για διάφορους τύπους κατασκευών (Πίνακας. 3.2) και πρότεινε η διαφορική καθίζηση (δs) σε αργίλους να κυμαίνεται στο 0.3 – 0.4 της μέγιστης καθίζησης (s_{max}), δηλαδή $\delta s = (0.3 - 0.4) \cdot s_{max}$, ενώ σε άμμους κυμαίνεται στο 0.4 – 1.0 της μέγιστης καθίζησης (s_{max}), δηλαδή $\delta s = (0.4 - 1.0) \cdot s_{max}$.

Είδος κατασκευής	Επιτρεπόμενη γωνιακή στροφή β
Ευαίσθητες μηχανολογικές εγκαταστάσεις	1/750
Πλαισιωτές κατασκευές	1/600
Συνήθη κτίρια, όπου δε γίνονται ανεκτές οι ρηγματώσεις σε τοίχους πλήρωσης	1/500
Συνήθη κτίρια για τα οποία επιτρέπονται μικρορηγματώσεις στους τοίχους πλήρωσης	1/300
Άκαμπτα κτίρια, με επιτρεπόμενη απόκλιση απο την κατακόρυφο	1/250
Όριο για το οποίο είναι δυνατόν να παρουσιασθούν ζημιές στο φέροντα οργανισμό	1/150
Εύκαμπτες πλινθοδομές με $H/L < 1/4$,άνευ ρηγματώσεως (H/L είναι ο λόγος του ύψους προς το μήκος του τοίχου)	1/150

Πίνακας 3.2 : Συσχέτιση του τύπου της κατασκευής και της επιτρεπόμενης γωνιακής στροφής β της θεμελίωσης του (Πηγή : Bjerum, 1953)



Εικόνα 3.5 Όρια Διαφορικών Καθιζήσεων και γωνιακών στροφών κατά Navas (Πηγή : Σακελλαρίου, 2008)

Ο Tomlinson (1980), λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες προτάσεις κριτηρίων, κατασκεύασε τον ακόλουθο πίνακα, ο οποίος συνοψίζει τα επιτρεπόμενα όρια γωνιακής στροφής και λόγου σχετικής μετατόπισης θεμελιώσεων κτιρίων με σκελετό και φέρουσες τοιχοποιίες (οπλισμένες και άοπλες), εξαιρώντας την περίπτωση μεγάλων και άκαμπτων δοκών, ή υποστυλωμάτων με περιορισμούς σε στροφή.

Τύπος κατασκευής	Τύπος ζημιάς	Επιτρεπόμενα όρια			
		Επιτρεπόμενες τιμές γωνιακής στροφής θ			
		Skempton και Mc Donald (1956)	Meyerhof (1947)	Polshin και Tokar (1957)	Bjerrum (1963)
Κτίρια με σκελετό και οπλισμένες φέρουσες τοιχοποιίες	*Βλάβη στον φέροντα οργανισμό	1/150	1/250	1/150	1/150
	*Ρηγματώσεις στους τοίχους	1/300 (συνίσταται και 1/500)	1/500	1/500	1/500
		Επιτρεπόμενες τιμές λόγου σχετικής μετατόπισης Δ/L			
		Meyerhof (1947)	Polshin και Tokar (1957)	Burland και Wroth (1974)	
Μη οπλισμένες φέρουσες τοιχοποιίες	*Ρωγμές λόγω κοίλης παραμορφώσεως του τοίχου (συνθήκες κάμψης)	1/2500	$L/H^*=0.3$, $\Delta/L=1/3333$ έως 1/2500	$L/H=1$, $\Delta/L=1/2500$ $L/H=5$, $\Delta/L=1/1250$	
	*Ρωγμές λόγω κυρτής παραμόρφωσης του τοίχου (συνθήκες κυρτώσεως)			$L/H=1$, $\Delta/L=1/5000$ $L/H=5$, $\Delta/L=1/2500$	

Πίνακας 3.3 Προτεινόμενα Όρια γωνιακής στροφής και λόγου Σχετικής μετατόπισης (Tomlinson 1980) (Πηγή : Σακελλαρίου, 2008)

Σημειώνεται ότι σύγχρονες απόψεις αποδέχονται τα παραπάνω όρια αλλά στη θέση της γωνιακής στροφής (θ) θέτουν τη σχετική στροφή (β).

3.2.3 Κατηγορίες Βλαβών Κτηρίων

Για την εκτίμηση του κινδύνου εκδήλωσης βλαβών στα κτίρια εξαιτίας εδαφικών μετακινήσεων είναι απολύτως αναγκαίο να υπάρχει μία όσο το δυνατό πιο σαφή κατάταξη αυτών των βλαβών. Ο Πίνακας, που ακολουθεί, προσφέρει την εν λόγω κατάταξη καθορίζοντας έξη κατηγορίες βλαβών από 0 έως 4 με αυξανόμενο βαθμό επικινδυνότητας.

Οι κατηγορίες ορατών βλαβών του Πίνακα 3.4 επηρεάζουν:

- i. την εξωτερική αισθητική,
- ii. την λειτουργικότητα και
- iii. την στατική ευστάθεια ενός κτιρίου.

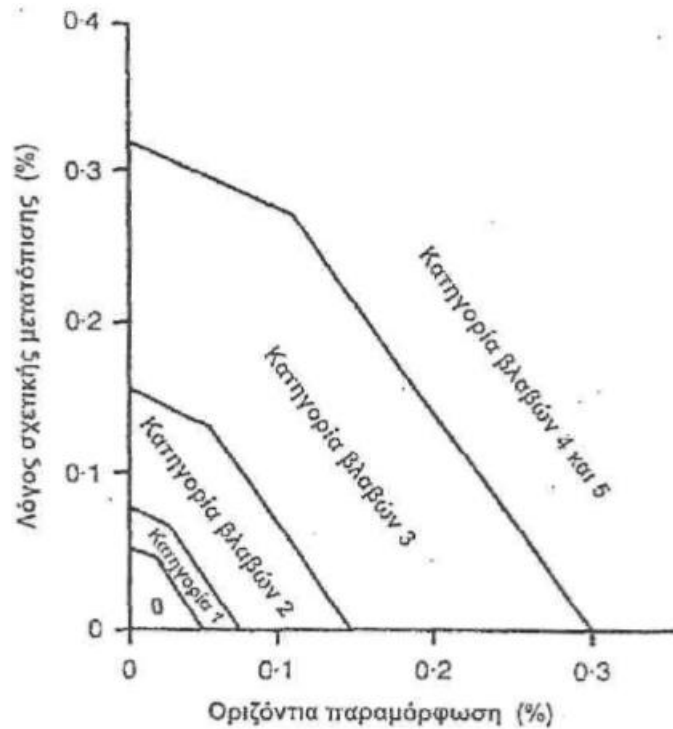
Συνήθως οι κατηγορίες βλαβών 0, 1 και 2 αφορούν την αισθητική των κτιρίων, οι 3 και 4 καθορίζουν το βαθμό λειτουργικότητας των κτιρίων και η 4 επηρεάζει τη στατική ευστάθεια και επάρκεια των κτιρίων.

Η παραπάνω διακριτοποίηση είχε αρχικώς προταθεί από τους Burland et al (1977) με βάση τα συμπεράσματα σχετικών εργασιών των Jennings και Kerrich (1952), του UK National Coal Board (1974) και των MacLeod και Littlejohn (1974). Έκτοτε έχει υιοθετηθεί με ελάχιστες τροποποιήσεις από το BRE (1981 και 1990) καθώς και από το Ινστιτούτο Δομοστατικών Μηχανικών του Ην. Βασιλείου (1978, 1989, 1994 και 2000).

Ο Πίνακας 3.4 για κάθε μία κατηγορία βλάβης δίνει το βαθμό επικινδυνότητας της, την περιγραφή της, την ευκολία επιδιόρθωσης της, καθώς και το εύρος μεταβολής της οριακής εφελκυστικής παραμόρφωσης, η οποία την προκάλεσε. Επισημαίνεται ότι τα εύρη των τιμών της οριακής εφελκυστικής παραμόρφωσης έχουν καθορισθεί από τους Boscardin και Cording (1989) με βάση σημαντικό αριθμό παρατηρήσεων από πραγματικά συμβάντα.

Ο διαχωρισμός μεταξύ των κατηγοριών βλαβών 2 και 3 είναι ιδιαιτέρως σημαντικός. Μεγάλος αριθμός μελετών σε πολλά κτίρια έχουν καταδείξει ότι η κατάταξη στην κατηγορία 2 οφείλεται σε μεγάλη ποικιλία αιτιών, εκτός των εδαφικών μετακινήσεων (π.χ. θερμοκρασιακές μεταβολές του σκελετού των κτιρίων, αλλαγές φυσικής υγρασίας κ.α.). Ωστόσο ο ακριβής καθορισμός των αιτιών που προκαλούν την εν λόγω κατηγορία βλαβών είναι ιδιαίτερα δύσκολος και στην πραγματικότητα αποτελεί συνδυασμό αιτιών που σχετίζονται με το σκελετό του κτιρίου και την εκδήλωση εδαφικών μετακινήσεων. Με βάση τα προτεινόμενα εύρη τιμών κρίσιμης εφελκυστικής παραμόρφωσης του Πίνακα 3.4, η συσχέτιση της οριζόντιας

εφελκυστικής παραμόρφωσης ϵ_h με την κατηγορία βλάβης και τον λόγο σχετικής μετατόπισης του κτιρίου Δ/L είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μέσω διαγραμμάτων, όπως του Σχ. 3.13 (Burland, 1994), το οποίο προέρχεται άμεσα από το διάγραμμα του σχήματος 3.12 για $L/H=1.0$.



Εικόνα 3.7 : Συσχέτιση κατηγορίας βλάβης με την κρίσιμη οριακή εφελκυστική παραμόρφωση και την μέγιστη σχετική μετατόπιση υπό συνθήκες κύρτωσης ($L/H = 1.0$) (Πηγή: Burland, 1994)

Οι Potts & Addenbrooke (1997) ασχολήθηκαν με την εξέταση της επίδρασης της ακαμψίας των υπερκείμενων κατασκευών και διαπίστωσαν πως αυτή επιδρά σημαντικά στις εδαφικές μετακινήσεις ενώ μειώνονται σημαντικά και οι επιφανειακές καθιζήσεις σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου.

Κατηγορία ορατών βλαβών	Συνήθης βαθμός κινδύνου	Οριακή εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{lim} (%)	Περιγραφή τυπικής βλάβης / Ευκολία επισκευής
0	Αμελητέος	0-0.05	Τριχοειδείς ρωγμές μικρότερες του 0.1 mm περίπου
1	Πολύ μικρός	0.05-0.075	Λεπτές ρωγμές οι οποίες ευκόλως αντιμετωπίζονται με βάψιμο. Η βλάβη περιορίζεται γενικώς στα "τελειώματα" εσωτερικής τοιχοποιίας. Επιθεώρηση από κοννή απόσταση είναι δυνατόν να αποκαλύψει μερικές ρωγμές σε εξωτερικά τούβλα ή εξωτερική τοιχοποιία. Τυπικά εύρη ρωγμών έως 1mm.
2	Μικρός	0.075	Ρωγμές ευκόλως πληρούμενες. Συνήθως απαιτείται βάψιμο. Επαναδιανοχθείσες ρωγμές είναι δυνατόν να καλυφθούν με κατάλληλα υλικά. Οι ρωγμές είναι ορατές εξωτερικά και μπορεί να απαιτηθεί καθαρισμός και πλήρωση για λόγους υδατοστεγανότητας. Πόρτες και παράθυρα μπορεί να παρουσιάζουν μικρή δυσκολία σε άνοιγμα/κλείσιμο. Τυπικά εύρη ρωγμών έως 5mm.
3	Μέτριος	0.15-0.30	Οι ρωγμές απαιτούν μερική αποκάλυψη (άνοιγμα) και μπορεί να επιδιορθωθούν από εξειδικευμένους τεχνίτες. Καθαρισμός των εξωτερικών τούβλων και πιθανός μικρός αριθμός τούβλων θα πρέπει να αντικατασταθεί. Πόρτες και παράθυρα δεν ανοιγοκλείνουν. Οι σωληνώσεις μπορεί να σπάσουν. Η υδατοστεγανότητα συνήθως έχει τρωθεί. Τυπικά εύρη ρωγμών μεταξύ 5mm και 15 mm. Μερικές φορές οι ανωτέρω βλάβες μπορούν να παρουσιαστούν και για ρωγμές εύρους 3mm.
4	Σοβαρός	>0.3	Εκτεταμένες εργασίες επανακατασκευής, συμπεριλαμβανομένων αντικατάστασης τμημάτων τοιχοποιίας κυρίως επάνω από πόρτες και παράθυρα. Πόρτες και παράθυρα παραμορφώνονται και το δάπεδο παρουσιάζει σημαντική κλίση [†] . Οι τοίχοι αποκλίνουν σημαντικά από τη κατακόρυφο ή εμφανίζουν φουσκώματα, μερική απώλεια στήριξης των δοκών. Σπασίμο σωληνώσεων. Τυπικά εύρη ρωγμών μεταξύ 15mm και 25mm, αλλά εξαρτάται επίσης και από το πλήθος των ρωγμών.
5	Πολύ σοβαρός		Απαιτούνται σημαντικές επιδιορθώσεις συμπεριλαμβανομένης μερικής ή πλήρους επανακατασκευής. Οι δοκοί έχουν απωλέσει τις στήριξές τους, οι τοίχοι παρουσιάζουν σημαντική κλίση και χρειάζονται υποστήριξη. Τα παράθυρα έχουν σπάσει λόγω παραμόρφωσης. Κίνδυνος αστάθειας. Τυπικά εύρη ρωγμών μεγαλύτερα των 25mm, αλλά εξαρτάται και από το πλήθος των ρωγμών.

^{*} Το εύρος της ρωγμής είναι ένας μόνο από τους παράγοντες για την εκτίμηση της κατηγορίας βλάβης και δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται σαν μοναδικό κριτήριο.

[†] Τοπικές αποκλίσεις της κλίσης ως προς την οριζόντιο ή την κατακόρυφο μεγαλύτερες του 1/100 είναι συνήθως εύκολα ορατές. Συνολικές αποκλίσεις μεγαλύτερες του 1/150 είναι ανεπιθύμητες.

Πίνακας 3.4 Κατηγορίες Βλαβών Κτηρίων με βάση την οριακή εφελκυστική παραμόρφωση και την τυπική βλάβη ή ευκολία επισκευής (Πηγή : Σακελλαρίου, 2008)

3.3 Επιβολή Τάσεων Στο Έδαφος Λόγω Εξωτερικών Φορτίων

Ένα αποτέλεσμα από την κατασκευή κατασκευών στην επιφάνεια του εδάφους είναι η επιβολή φορτίων στο έδαφος (π.χ. κατασκευή κτιρίων, φραγμάτων) ή η μείωση των ήδη επιβεβλημένων φορτίων (π.χ. εκσκαφές). Τα φορτία αυτά λαμβάνονται από τις μάζες του με την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων κατά τρόπον ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας σε όλα τα εδαφικά στοιχεία. Η χρησιμότητα της εκτίμησης των τάσεων που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω των εξωτερικώς επιβεβλημένων φορτίων είναι οι εξής :

1. Για την εκτίμηση των υποχωρήσεων είναι απαραίτητη η γνώση των παραμορφώσεων που προκαλούν στο έδαφος τα επιβεβλημένα φορτία. Οι παραμορφώσεις, όμως, εξαρτώνται από τις αναπτυσσόμενες τάσεις, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εκτίμηση των τάσεων.
2. Η γνώση των τάσεων που αναπτύσσονται στο έδαφος είναι απαραίτητη για να εκτιμηθεί κατά πόσον η υφισταμένη εντατική κατάσταση του εδάφους προσεγγίζει την κατάσταση αστοχίας καθώς όπως είναι γνωστό όλα τα υλικά αστοχούν (θραύονται), εάν η φόρτιση υπερβεί το όριο αντοχής τους.

Οι τάσεις υπολογίζονται με θεώρηση ισότροπης γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους σε πολλές περιπτώσεις δεν απέχουν σημαντικά από τις πραγματικές, παρόλο που η συμπεριφορά του εδάφους είναι έντονα μή-γραμμική. Ανάλογα με τον τύπο του θεμελίου οι περιπτώσεις φορτίσεις είναι διαφορετικές και η κάθε μία θα αναλυθεί στις παρακάτω υποενότητες. Επιπλέον σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι οι υπολογιζόμενες τάσεις διαφέρουν ανάλογα με τις συνθήκες του εδάφους . Πιο συγκεκριμένα :

1. Αν η φόρτιση του εδάφους γίνεται υπό πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες, τότε οι ελαστικές σταθερές E, ν , που υπεισέρχονται στους τύπους, είναι οι ιδιότητες του εδαφικού σκελετού και οι υπολογιζόμενες τάσεις είναι οι πρόσθετες ενεργές αλλά και ολικές τάσεις, επειδή $\Delta\sigma_{ij} = \Delta\sigma'_{ij}$.
2. Αν η φόρτιση θεωρηθεί ότι συμβαίνει υπό αστράγγιστες συνθήκες, τότε οι υπολογιζόμενες τάσεις είναι οι πρόσθετες ολικές τάσεις, ενώ, όπου αναφέρεται το μέτρο ελαστικότητας E , θα θεωρείται το μέτρο ελαστικότητας υπό αστράγγιστες συνθήκες :

$$E_u = \frac{3E}{2*(1+\nu)} \quad (3.18)$$

Όπου, ο λόγος Poisson ν , θα θεωρείται η τιμή του υπό αστράγγιστες συνθήκες : $\nu = 0.5$ Οι μεταβολές των ενεργών τάσεων μπορούν να υπολογισθούν στη συνέχεια από τις σχέσεις: $\Delta\sigma'_{ij} = \Delta\sigma_{ij} - \Delta u * \delta_{ij}$, όπου η αναπτυσσόμενη υπερπίεση πόρων δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta u = \frac{1}{3}(\Delta \sigma_{xx} + \Delta \sigma_{yy} + \Delta \sigma_{zz}) \quad (3.19)$$

3.3.1 Ορθή Δύναμη επί Ελαστικού Ημιχώρου

Η εικόνα 3.8 παρουσιάζει την περίπτωση επιβολής κατακόρυφου συγκεντρωμένου φορτίου P στην επιφάνεια ελαστικού ισότροπου ημιχώρου και ορίζει τα απαραίτητα γεωμετρικά μεγέθη. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε από τον Boussinesq το 1890 και ονομάζεται πρόβλημα του Boussinesq. Επειδή η φόρτιση και η γεωμετρία είναι αξονοσυμμετρικές, οι τάσεις που ορίζονται σε κυλινδρικές συντεταγμένες είναι ανεξάρτητες της γωνίας θ . Οι κατανομές των τάσεων δίνονται από τις σχέσεις:

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot z^3}{2 \cdot \pi \cdot R^5} \quad (3.20)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \left[\frac{3 \cdot r^2 \cdot z}{R^3} - \frac{(1-2 \cdot \nu) \cdot R}{R+z} \right] \quad (3.21)$$

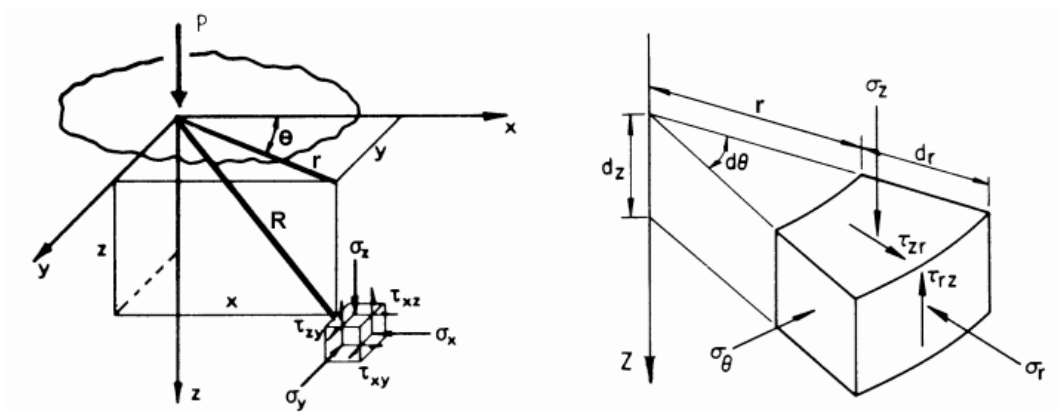
$$\sigma_{\theta\theta} = - \frac{(1-2 \cdot \nu) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \left[\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} \right] \quad (3.22)$$

$$\sigma_{rz} = \frac{3 \cdot P \cdot r \cdot z^2}{2 \cdot \pi \cdot R^5} \quad (3.23)$$

όπου $R^2 = r^2 + z^2$. Οι μετακινήσεις δίνονται από τις σχέσεις:

$$u_{rr} = \frac{P \cdot (1+\nu)}{2 \cdot \pi \cdot E \cdot R} \left[\frac{r \cdot z}{R^2} - \frac{(1-2 \cdot \nu) \cdot r}{R+z} \right] \quad (3.23)$$

$$u_{zz} = \frac{P \cdot (1+\nu)}{2 \cdot \pi \cdot E \cdot R} \left[2 \cdot (1 - \nu) + \frac{z^2}{R^2} \right] \quad (3.24)$$



Εικόνα 3.8 : Συγκεντρωμένο Φορτίο επί Ελαστικού Ημιχώρου (Πηγή : Καθβαδάς, 2005)

Από τις παραπάνω κατανομές τάσεων συμπεραίνονται τα εξής:

- Η κατακόρυφη τάση σ_{zz} είναι ανεξάρτητη των ελαστικών σταθερών E, ν , ενώ οι υπόλοιπες ορθές τάσεις εξαρτώνται μόνον από το λόγο του Poisson. Αντίθετα, οι μετακινήσεις και, συνεπώς, οι παραμορφώσεις είναι αντιστρόφως ανάλογες του μέτρου ελαστικότητας.
- Η κατακόρυφη τάση σ_{zz} (η οποία κυρίως μας ενδιαφέρει, επειδή σ' αυτήν οφείλεται το σύνολο σχεδόν της υποχώρησης του εδάφους) μειώνεται με ρυθμό αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου του βάθους ($\frac{1}{z^2}$).

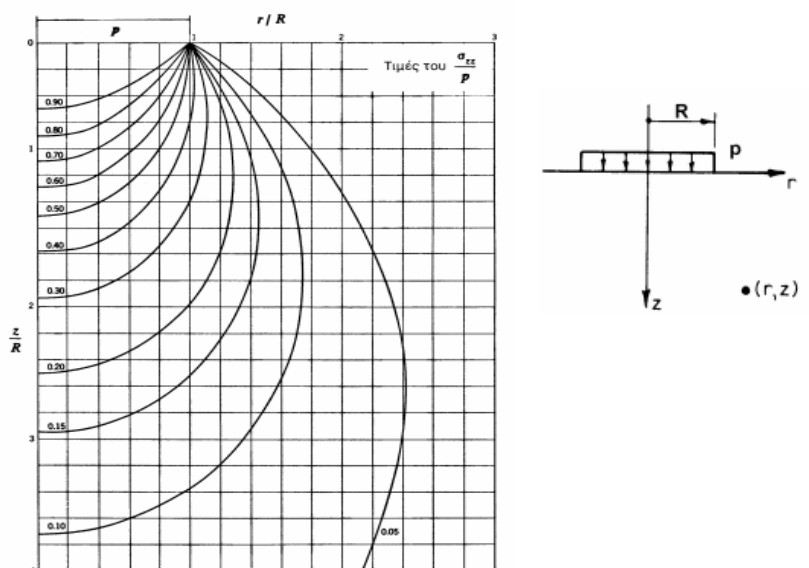
3.3.2 Ορθή Πίεση σε Κυκλική Επιφάνεια

Και στην περίπτωση αυτή η κατάσταση είναι αξονοσυμμετρική και ισχύει:

$$u_{\theta\theta} = \gamma_{r\theta} = \gamma_{\theta z} = \sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta z} = 0.$$

Το πρόβλημα δεν έχει λύση με κλειστή αναλυτική μορφή, αλλά η αρθρική επίλυσή του καταλήγει στις αδιάστατες κατανομές της πρόσθετης κατακόρυφης τάσης (σ_{zz}), που φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Η κατανομή της σ_{zz} κατά μήκος του άξονα z (δηλαδή για $r = 0$) δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{zz} = p^* \left(1 - \left[1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right]^{\frac{-3}{2}} \right) \quad (3.25)$$

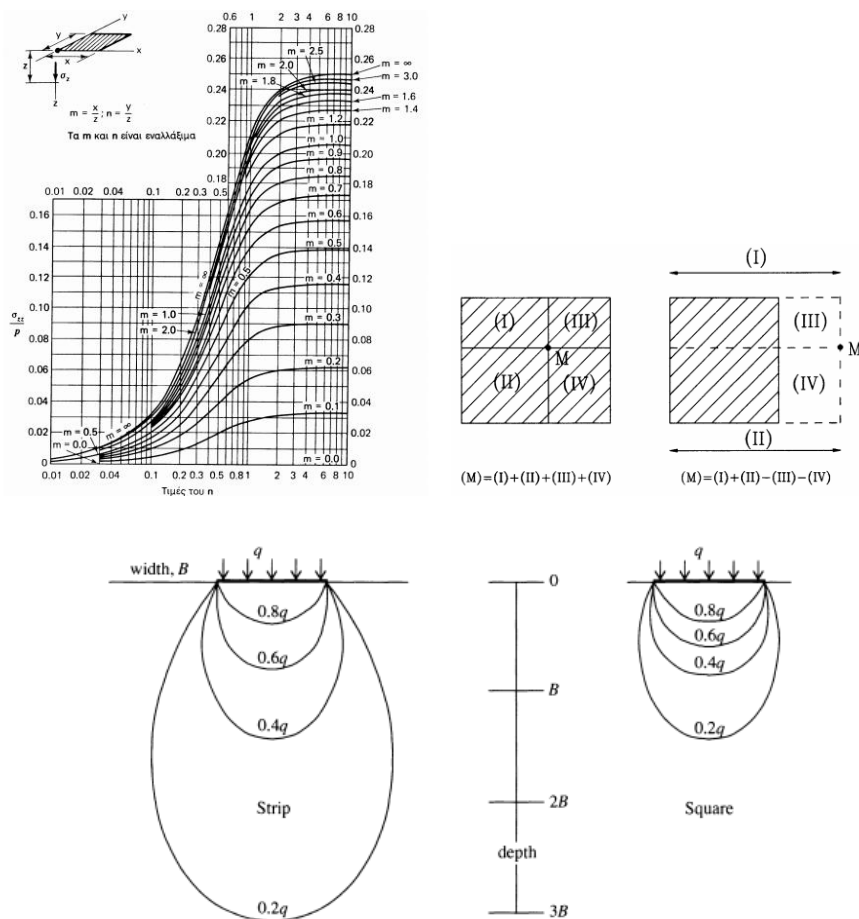


Εικόνα 3.9 : Κατανομή Τάσεων κάτω από Κυκλικό Θεμέλιο (Πηγή : Καθβαδάς, 2005)

3.3.3 Ορθή Πίεση σε Ορθογωνική Επιφάνεια

Η εικόνα 3.10 παρουσιάζει την περίπτωση επιβολής κατακόρυφης πίεσης p , ορθογωνικής κάτοψης στην επιφάνεια ελαστικού ισότροπου ημιχώρου. Το πρόβλημα δεν έχει λύση με κλειστή αναλυτική μορφή, αλλά η αριθμητική επίλυσή του καταλήγει στις κατανομές του λόγου σ_{zz}/p κάτω από τη γωνία του ορθογωνικού φορτίου ως προς τις αδιάστατες συντεταγμένες $m = x/z$, $n = y/z$ (όπου x, y οι διαστάσεις του ορθογωνίου), που επίσης φαίνονται στο Σχήμα 8.4.

Η τάση σ_{zz} σε οποιαδήποτε θέση του ημιχώρου είναι δυνατό να υπολογισθεί με την επαλληλία τεσσάρων φορτίσεων ορθογωνικής κάτοψης, στις οποίες το σημείο (M) όπου ζητούνται οι τάσεις, βρίσκεται κάτω από τη γωνία και των φορτίσεων. Σε περίπτωση που το σημείο (M) βρίσκεται στο κέντρο του θεμελίου αρκεί να υπολογιστεί η κατακόρυφη τάση στην γωνία του ενός τετάρτου και να πολλαπλασιαστεί επί 4.



Εικόνα 3.10 : Από αριστερά και αριστερόστροφα α) Τάσεις κάτω από την γωνία ορθογωνικού φορτίου β) Τάσεις κάτω από τυχόν σημείο M γ) Βολβοί Τάσεων κάτω από ορθογωνικό και τετραγωνικό θεμέλιο (Πηγή : M Καθβαδάς, 2005 και G.E Barnes, 1995)

3.3.4 Ορθή Φόρτιση σε Απειρομήκη Γραμμή

Κατά την επιβολή κατακόρυφης φόρτισης q (KN/m) σε απειρομήκη γραμμή κατά μήκος του άξονα x στην επιφάνεια ελαστικού ημιχώρου, λόγω του μεγάλου μήκους και της ομοιομορφίας της φόρτισης και του εδάφους, ισχύουν οι παραδοχές της επίπεδης παραμόρφωσης (κατά τον άξονα x). Έτσι: $u_{xx} = \varepsilon_{xx} = \sigma_{xz} = \sigma_{xy} = 0$ και $\sigma_{xx} = \nu^* (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})$. Οι υπόλοιπες τάσεις δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις (z είναι ο κατακόρυφος άξονας):

$$\sigma_{yy} = \frac{2 \cdot q}{\pi} * \frac{y^2 \cdot z}{(y^2 + z^2)^2} \quad (3.25)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{2 \cdot q}{\pi} * \frac{z^3}{(y^2 + z^2)^2} \quad (3.27)$$

$$\sigma_{yz} = \frac{2 \cdot q}{\pi} * \frac{y \cdot z^2}{(y^2 + z^2)^2} \quad (3.28)$$

Από τις ανωτέρω σχέσεις φαίνεται ότι όλες οι συνιστώσες των τάσεων (με εξαίρεση την σ_{xx}) είναι ανεξάρτητες των ελαστικών σταθερών του υλικού. Επιπλέον, η κατακόρυφη τάση σ_{zz} μειώνεται με το βάθος όπως η $1/z$ δηλαδή η μείωση της κατακόρυφης τάσης με το βάθος είναι εντονότερη στην περίπτωση του συγκεντρωμένου φορτίου παρά στην περίπτωση της απειρομήκου γραμμής.

3.3.5 Ορθή Πίεση σε Απειρομήκη Λωρίδα

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την περίπτωση επιβολής κατακόρυφης πίεσης p σε απειρομήκη λωρίδα πλάτους $2b$ κατά μήκος του άξονα x , στην επιφάνεια ελαστικού ημιχώρου και ορίζει τα απαραίτητα γεωμετρικά μεγέθη. Και στην περίπτωση αυτή ισχύουν οι παραδοχές της επίπεδης παραμόρφωσης (κατά τον άξονα x), οπότε: $u_{xx} = \varepsilon_{xx} = \sigma_{xz} = \sigma_{xy} = 0$ και $\sigma_{xx} = \nu (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})$ ενώ οι υπόλοιπες τάσεις δίνονται από τις σχέσεις:

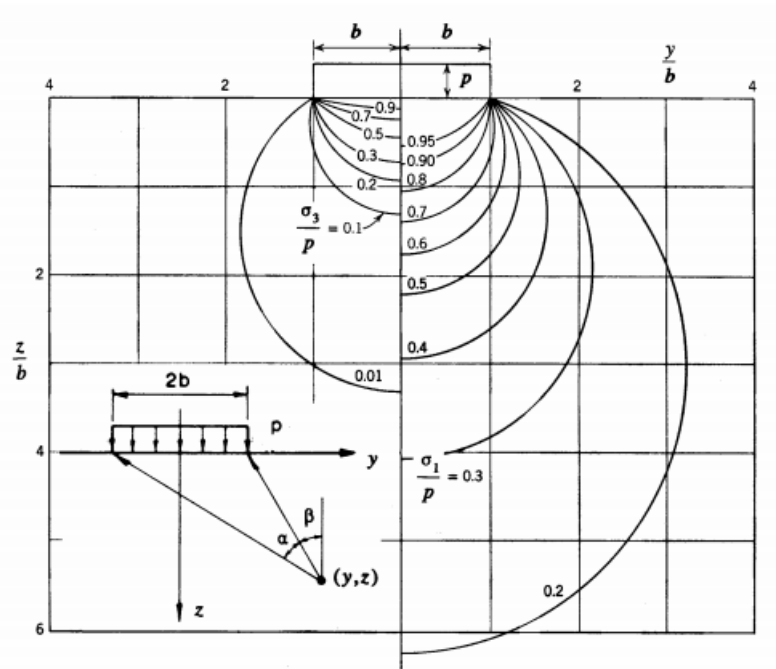
$$\sigma_{zz} = p * \left[\frac{a}{\pi} + \frac{1}{\pi} * \sin a * \cos(a + 2 * \beta) \right] \quad (3.29)$$

$$\sigma_{yy} = p * \left[\frac{a}{\pi} - \frac{1}{\pi} * \sin a * \cos(a + 2 * \beta) \right] \quad (3.30)$$

$$\sigma_{yz} = \frac{p}{\pi} * \sin a * \sin(a + 2 * \beta) \quad (3.31)$$

Και στην περίπτωση αυτή οι τάσεις μειώνονται με το βάθος. Ειδικότερα, η σ_{zz} μειώνεται με βραδύτερο ρυθμό απ' ότι στην περίπτωση πίεσης κατανεμημένης στην επιφάνεια κύκλου.

Έτσι, στην περίπτωση φόρτισης λωρίδας η σ_{zz} μειώνεται στο 10% της μέγιστης τιμής της (δηλαδή $\sigma_{zz} / p = 0.10$) σε βάθος $z \approx 12b$ κάτω από το μέσον της λωρίδας, ενώ στην περίπτωση φόρτισης κυκλικής επιφάνειας η σ_{zz} μειώνεται στο ίδιο ποσοστό σε βάθος $z \approx 4R$



Εικόνα 3.11 : Σχεδιάγραμμα που παρουσιάζει την φόρτιση Απειρομήκουσ Λωρίδας (Πηγή : Καββαδάς, 2005)

Κεφάλαιο 4 : Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα και Εφαρμογή τους στην Χάραξη Σηράγγων σε Κατοικημένες Περιοχές.

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής γίνεται ανάλυση στα βασικά χαρακτηριστικά των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων με στόχο την κατανόηση των βασικών εννοιών τους καθώς επίσης και του λογισμικού ArcMap, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 4.

4.2 Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα

Τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα (Γ.Π.Σ ή όπως είναι ευρέως γνωστά G.I.S) είναι τα επιστημονικά εργαλεία έχουν την δυνατότητα να ενσωματώσουν δεδομένα από διαφορετικές πηγές σε μία κεντρική βάση δεδομένων (Γεωβάση) από την οποία μπορεί ο χρήστης να διαμορφώσει ανάλογα και να τα αναλύσει βάση της χωρικής συνιστώσας τους. Πιο συγκεκριμένα, ο όρος Γ.Π.Σ περιγράφει κάθε πληροφοριακό σύστημα το οποίο ενσωματώνει, αποθηκεύει, διαμοιράζει και απεικονίζει γεωγραφικές πληροφορίες. Ο σημαντικότερος στόχος τους είναι η κατανόηση σχέσεων μεταξύ ασύνδετων θεωρητικά δεδομένων καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τα μοτίβα και τις τάσεις που παρουσιάζονται σε αυτά.

Σύμφωνα με τον Burrough (1994)

«Τα Γ.Π.Σ αντιπροσωπεύουν ένα ισχυρό εργαλείο για την συλλογή, αποθήκευση, ανάλυση ανά πάσα στιγμή, μετασχηματισμό και γενίκευση χωρικών στοιχείων του πραγματικού κόσμου. Ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών μπορεί να αποθηκεύσει, να διαχειριστεί και να ενσωματώσει ένα μεγάλο όγκο χωρικών στοιχείων»

Οπότε σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ένα Γ.Π.Σ μπορεί να συσχετίσει πληροφορίες χρησιμοποιώντας ως πρωτεύουσα μεταβλητή – κλειδί (key index variable) την θέση-τοποθεσία. Τοποθεσίες ή εκτάσεις στον γήινο χώρο μπορούν να καταγραφούν μπορούν να καταγραφούν με πολλούς τρόπους ωστόσο ο πιο διαδεδομένος κι αυτός που χρησιμοποιεί ένας τοπογράφος είναι ως σύνολο τρισδιάστατων συντεταγμένων x, y και z, οι οποίες αναφέρονται στο γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό ύψος αντίστοιχα.

Τα χαρακτηριστικά των Γ.Π.Σ που αναφερθήκαν παραπάνω τα καθιστούν ένα μοναδικό εργαλείο το οποίο έχει ευρύ φάσμα χρήσης σε πολλές επιστήμες και πολλές εφαρμογές όπως οι παρακάτω :

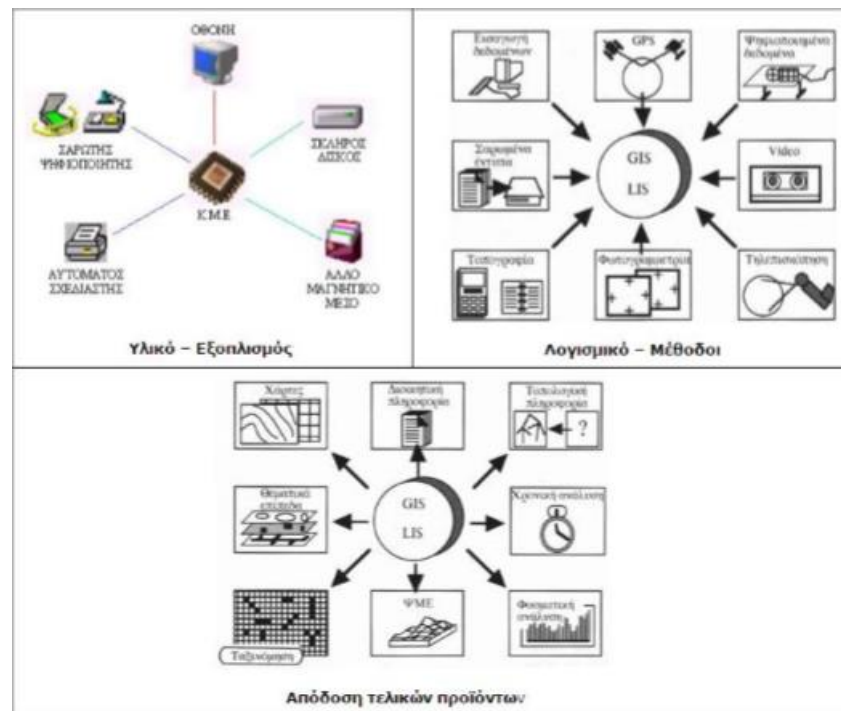
- Τοπογραφική Χαρτογράφηση : Εθνικές Υπηρεσίες Χαρτογράφησης, Ιδιωτικές Εταιρείες Χαρτογράφησης .
- Κτηματολόγιο και Υποθηκοφυλακείο.
- Υδρογραφική Χαρτογράφηση.
- Στρατιωτικοί Οργανισμοί (π.χ Γ.Υ.Σ)
- Εταιρείες Τηλεπισκόπησης και Δορυφορικές Υπηρεσίες.
- Τοπογραφήσεις φυσικών πόρων : Γεωλόγοι, Υδρολόγοι, Φυσικοί Γεωγράφοι και Εδαφολόγοι, Εκτιμητές Γης, Οικολόγοι και Βιογεωγράφοι, Μετεωρολόγοι και Κλιματολόγοι, Ωκεανογράφοι .

Οι κύριοι τύποι διαθέσιμων γεωγραφικών δεδομένων που εισάγονται στα Γ.Π.Σ προς επεξεργασία είναι τα εξής :

- Τοπογραφικοί χάρτες σε ένα ευρύ φάσμα κλιμάκων.
- Εικόνες και φωτογραφίες που προέρχονται είτε από δορυφορικές λήψεις είτε από αέρα λήψη.
- Διοικητικά σύνορα : Φυλλάδια και δεδομένα απογραφής, ταχυδρομικοί κώδικες.
- Στατιστικά δεδομένα για πληθυσμό, κάλυψη γης σε ευρύ φάσμα επιπέδων.
- Δεδομένα για επισκοπήσεις Marketing.
- Δεδομένα κοινωφελών υπηρεσιών (φυσικό αέριο, νερό, ηλεκτρικές γραμμές, καλώδια) και οι ακριβείς τους θέσεις.
- Δεδομένα πετρωμάτων, νερού, εδάφους, ατμόσφαιρας, βιολογικές δραστηριότητας, φυσικών κινδύνων και καταστροφών που συλλέγονται από ένα ευρύ φάσμα χωρικά και χρονικά επίπεδα ανάλυσης.

Κρίνεται σημαντικό να αναφερθεί ότι τα Γ.Π.Σ, ως ολοκληρωμένη έννοια (intergrated G.I.S concept), συμπεριλαμβάνουν τόσο τα δεδομένα, το λογισμικό και το μηχανικό εξοπλισμό, όσο και το ανθρώπινο δυναμικό και τις διαδικασίες που αποτελούν πρωταρχική δραστηριότητα στην επεξεργασία της πληροφορίας.

Τα γενικά στοιχεία των μηχανημάτων Η/Υ ενός Γ.Π.Σ παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1. Ο Η/Υ έχει ένα σκληρό δίσκο για αποθήκευση δεδομένων και προγραμμάτων αλλά επιπλέον αποθήκευση μπορεί να παρασχεθεί επίσης μέσω ενός δικτύου ή από ψηφιακές κασέτες, Οπτικά CD-ROMs και άλλες συσκευές όπως USB sticks.



Εικόνα 4.1 : Σχηματική αναπαράσταση τριών βασικών τμημάτων ενός Γ.Π.Σ το οποίο περιλαμβάνει το υλικό και τον εξοπλισμό για την συλλογή και προβολής της πληροφορίας, το λογισμικό και τους μεθόδους για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων και της απόδοσης της τελικής πληροφορίας-προϊόντος . (Πηγή : <http://xsomaras.somweb.gr/?p=459>)

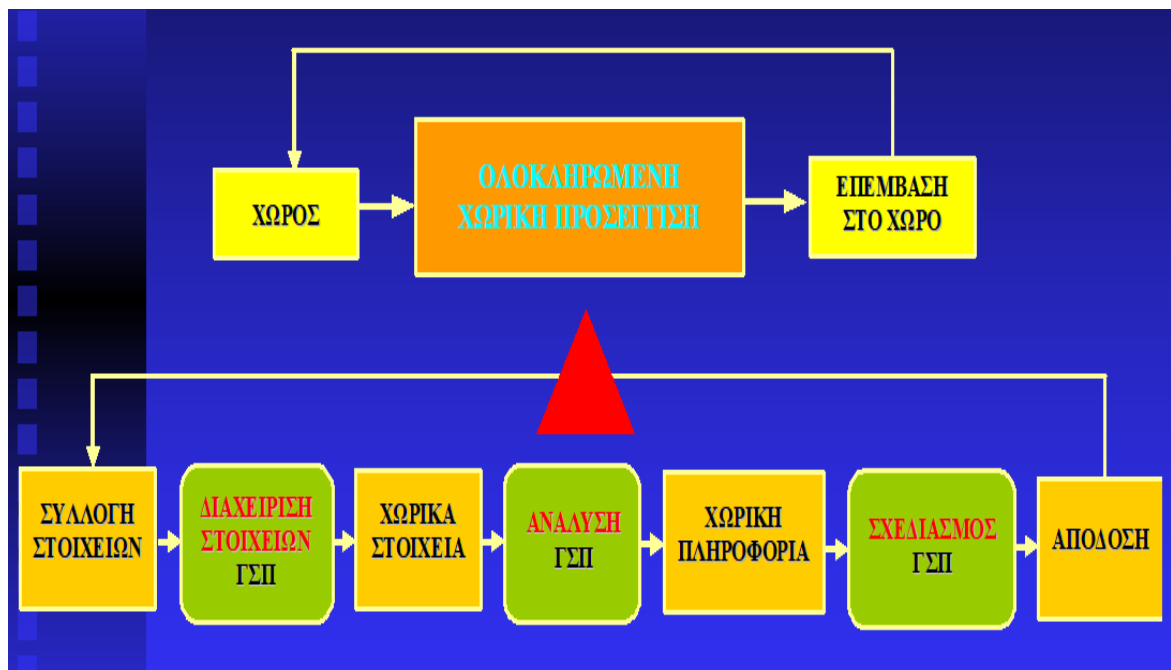
4.2.1 Ροή Εργασιών σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών

Ένα Γ.Π.Σ, ως γεωπληροφοριακό σύστημα, αποτελείται από μία αλληλουχία διαδικασιών, κατά τις οποίες λαμβάνουν μέρος οι απαραίτητες εργασίες ώστε να εξαχθεί το αποτέλεσμα που επιθυμεί ο χρήστης . Πιο συγκεκριμένα, οι επιμέρους διαδικασία με την σειρά είναι οι εξής :

1. Εισαγωγή δεδομένων : Αποτελεί την διαδικασία που είναι υπεύθυνη για την τροφοδοσία του συστήματος με δεδομένα. Αυτά έχουν συνήθως ψηφιακή δομή όπως θα περιγραφεί παρακάτω (Υποκεφάλαιο 4.2.4) και στην συνέχεια μετατρέπονται γεωγραφικές και περιγραφικές οντότητες.
2. Επεξεργασία : Πρόκειται για το σύνολο των διαδικασιών αυτών που καθιστούν τα δεδομένα κατάλληλα για περαιτέρω ανάλυση και χρήση. Συνήθως αυτό αφορά την ορθή απόδοση του συστήματος συντεταγμένων, την δημιουργία σχέσεων μεταξύ των δεδομένων, την μετάβαση από το ένα μοντέλο στο άλλο και την διόρθωση πιθανών σφαλμάτων που μπορεί να εμφανιστούν.

3. Ανάλυση : Στο στάδιο αυτό ο χρήστης-αναλυτής θέτει ερωτήσεις χωρικού και περιγραφικού τύπου και επιζητεί την απάντησή τους σύμφωνα με την δυνατότητα που προσφέρονται από τα ίδια τα δεδομένα.
4. Απόδοση : Κατά την οποία αποδίδονται τα αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί με αναλογικά μέσα, μέσω της εκτύπωσης χαρτογραφικών προϊόντων ή της απόδοσης σε ψηφιακές πλατφόρμες είτε μέσω του διαδικτύου είτε διαδραστικών χαρτών (Web-based G.I.S), είτε μέσω εσωτερικών δικτύων οργανισμών και εφαρμογών που υποστηρίζουν πολλούς χρήστες με διακριτούς ρόλους (π.χ Εταιρία ESRI GIS).
5. Έλεγχος : Τέλος όπως σε κάθε σύστημα έτσι και τα Γ.Π.Σ έχουν ορισμένους μηχανισμούς ανάδρασης (Feedback) το οποίο εξασφαλίζει την ορθότητα και ακρίβεια των πληροφοριών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω λογισμικού με διαδικασίες κανόνων επικύρωσης, κανόνων ελέγχου των συντεταγμένων και γενικά με διάφορες διαδικασίες ποιοτικών και ποσοτικών ελέγχων ανάλογα με την φύση των δεδομένων και το πλήθος τους.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι οι δυνατότητες παρουσίασης των Γ.Π.Σ επιτρέπουν στους χρήστες άμεση αντιμετώπιση τυχόν δυσκολιών και ιδιαιτεροτήτων που μπορούν να παρουσιαστούν τόσο κατά την διάρκεια των αναζητήσεων, όσο και της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων του σχεδιασμού.



Εικόνα 4.2 : Διάγραμμα ολοκληρωμένης Χωρικής Προσέγγισης (Πηγή : Διαφάνειες μαθήματος Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα Σχολή Αγρονόμων και τοπογράφων Μηχανικών)

4.2.2 Το Μοντέλο Δεδομένων

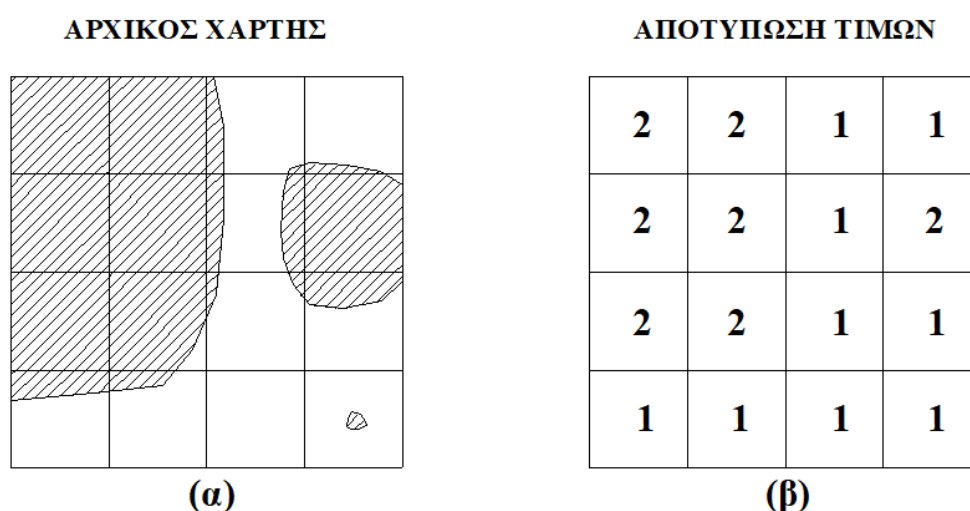
Όπως προαναφέρθηκε και προηγουμένως τα Γ.Π.Σ αποτυπώνουν χωρικά δεδομένα σε γεωγραφικό ή χαρτογραφικό ή καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεδομένα χωρικού τύπου συνδέονται με εκείνα του περιγραφικού τύπου. Αυτή η χαρακτηριστική δυνατότητα να συνδεθούν προσφέρει μία καλύτερη θεώρηση των χωρικών δεδομένων, αλλά ταυτόχρονα προσφέρει και χωρική υπόσταση στα περιγραφικά δεδομένα. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για αυτήν την λειτουργία βασίζεται στα εξής δύο σημεία.

- Στο σχεσιακό (relational) μοντέλο δεδομένων, στο οποίο τα δεδομένα πινακοποιούνται χωριστά και αργότερα συσχετίζονται με τα χωρικά δεδομένα μέσω κάποιων μοναδικών τιμών που είναι κοινές και στα δύο είδη.
- Στο αντικειμενοστραφές (object-oriented) μοντέλο δεδομένων όπου τα περιγραφικά δεδομένα όσο και τα χωρικά συγχωνεύονται σε αντικείμενα τα οποία μοντελοποιούν με κάποια άλλη φυσική απόσταση. Αυτό επιτυγχάνεται με την ύπαρξη του πίνακα δεδομένων στα Γ.Π.Σ (attribute table) και την επιλογή γεωμετρίας των δεδομένων. Για παράδειγμα (Κατηγορία = “ Κτήριο”, Χρήση = “Δημόσια Υπηρεσία ” , Γεωμετρία = “Πολύγωνο ” Εμβαδόν = “1000 τ.μ ”)

Στη σημερινή εποχή ειδικά με την εξέλιξη της τεχνολογίας των Γεωπληροφοριακών Συστημάτων το αντικειμενοστραφές μοντέλο χρησιμοποιείται περισσότερο στις εφαρμογές, λόγω των αυξημένων δυνατοτήτων του, σε σχέση με το σχεσιακό μοντέλο καθώς παρέχει την δυνατότητα στο χρήστη για εύκολη και απλοποιημένη μοντελοποίηση σύνθετων φαινομένων και αντικειμένων με χωρική διάσταση.

4.2.3 Αναπαράσταση των δεδομένων

Στην σημερινή εποχή τα πρωτογενή δεδομένα που εισέρχονται σε ένα Γ.Π.Σ είναι ψηφιακής μορφής μέσω της συλλογής τους με ψηφιακές μεθόδους αποτύπωσης του χώρου δηλαδή με συστήματα εντοπισμού Παγκόσμιας Θέσης (GPS), Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing) και επίγειες μεθόδους αποτύπωσης (Χρήση Total Station) είτε με την ψηφιοποίηση αναλογικών χαρτών (π.χ Τυπωμένοι Χάρτες Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού). Ο υπολογιστής μπορεί να αναπαραστήσει τα δεδομένα με την μορφή των δυαδικών στοιχείων 0 και 1. Αυτό σημαίνει ότι ακολουθείται η σύμβαση χρήσης της για δυαδικές αναπαραστάσεις της ηλεκτρονικής τεχνολογίας.

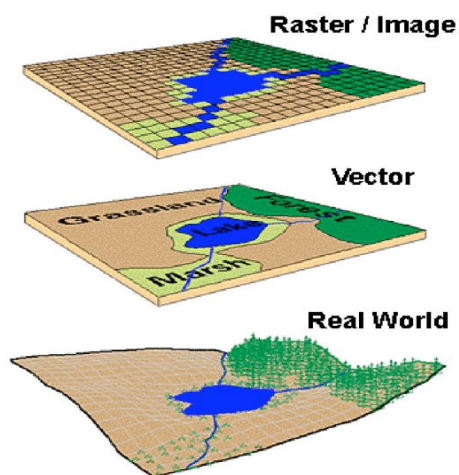


Εικόνα 4.3 : Απόδοση Εικόνας σε φαντρία με τιμές 0 και 1 με την μέθοδο του σημαντικότερου (Πηγή : Διαφάνειες μαθήματος Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα Σχολή Αγρονόμων και τοπογράφων Μηχανικών)

Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα αναπαριστούν πραγματικές οντότητες όπως για παράδειγμα δρόμους, οικοδομικά τετράγωνα, ποτάμια ανάγλυφο, κλίσεις κλπ), με ψηφιακά δεδομένα να τα συμπληρώνουν. Τα πραγματικά αντικείμενα μπορούν να χωριστούν με δύο τρόπους γεωγραφικής αναπαράστασης :

1. Τα διακριτά αντικείμενα (discrete objects) όπως για παράδειγμα ένα κτήριο, τα οποία αναπαριστούν το γεωγραφικό κόσμο με την μορφή αντικειμένων τα οποία έχουν καθορισμένα όρια μέσα στον χώρο.
2. Τα συνεχή πεδία (continuous fields) όπως για παράδειγμα οι ισοϋψείς καμπύλες ενός τοπογραφικού ανάγλυφου , αναπαριστούν τον πραγματικό κόσμο με έναν πεπερασμένο αριθμό μεταβλητών, για κάθε μία από τις οποίες προσδιορίζεται η τιμή της σε κάθε πιθανή θέση (P. Longley et al, 2010).

Τα διακριτά αντικείμενα και τα συνεχή πεδία αποτελούν δύο εννοιολογικές θεωρήσεις των γεωγραφικών φαινομένων που δεν λύνουν το πρόβλημα της ψηφιακής αναπαράστασης. Ωστόσο τα Γ.Π.Σ για να περιορίσουν το πρόβλημα έχουν αναπτύξει δύο μεθόδους αναπαράστασης χωρικών αντικειμένων που μπορούν να κωδικοποιηθούν στις βάσεις δεδομένων των υπολογιστών. Αυτές είναι η διανυσματική αναπαράσταση (vector) και η ψηφιδωτή αναπαράσταση (raster) οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κωδικοποίηση τόσο με των συνεχών όσο και των διακριτών οντοτήτων, ωστόσο κατά κύριο λόγο η διανυσματική αναπαράσταση συνδέεται με τα διακριτά αντικείμενα και η ψηφιδωτή αναπαράσταση με τα συνεχή πεδία.



Εικόνα 4.4 : Αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου σε διανυσματική (vector) και ψηφιδωτή μορφή (raster) (Πηγή : David J Saab, 2003)

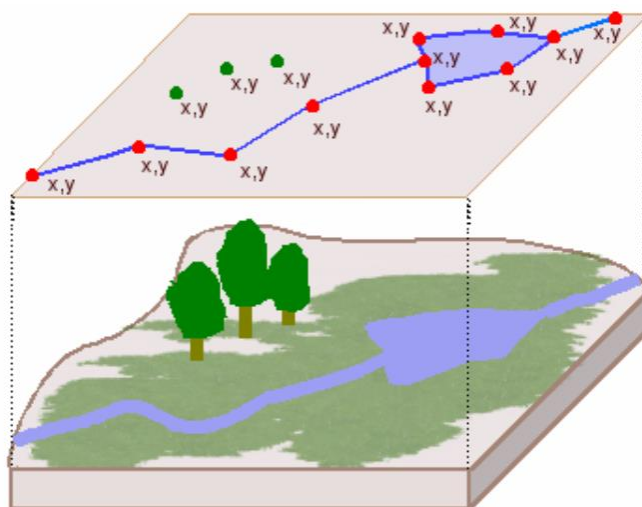
4.2.3.1 Μοντέλο Διανυσματικών Δεδομένων (Vector)

Το διανυσματικό μοντέλο χωρικών δεδομένων (vector spatial model) είναι μια αναπαράσταση γεωγραφικών δεδομένων (Χαλκιάς,2005). Βασίζεται στην υπόθεση ότι η επιφάνεια της γης αποτελείται από διακριτά αντικείμενα όπως δρόμους, κτήρια, ποτάμια, δέντρα κλπ. Αυτός ο τρόπος αναπαράστασης είναι ιδιαίτερα αποδοτικός για την αποθήκευση δεδομένων τα οποία παρουσιάζουν διακριτά όρια, όπως είναι για παράδειγμα τα οικοδομικά τετράγωνα, τα όρια διοικητικών μονάδων (π.χ. δήμων) ή οι δρόμοι (Burrough, 2000).

Συνήθως, τα δεδομένα αυτού του τύπου οργανώνονται σε επίπεδα (layers) ομοειδών αντικειμένων τα οποία έχουν κοινή χωρική αναφορά (Chang, 2003). Τα όρια αυτών των οντοτήτων καθορίζονται από ζεύγη δισδιάστατων συντεταγμένων (x,y), τα οποία αναφέρονται σε μία θέση στον πραγματικό κόσμο. Πιο συγκεκριμένα

- Οι σημειακές οντότητες ορίζονται από ένα ζεύγος (x,y).
- Οι γραμμικές οντότητες ορίζονται ως δύο ή περισσότερα ζεύγη συντεταγμένων (x,y).
- Οι πολυγωνικές οντότητες οι οποίες ορίζονται από τις γραμμές που κλείνουν με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ένα πολύγωνο.

Σε κάθε μοντέλο διανυσματικών δεδομένων οποιουδήποτε τύπου αντιστοιχείται στην κάθε οντότητα μία μοναδική αριθμητική τιμή, την οποία καθορίζει ο χρήστης ανάλογα με τις ανάγκες του και η οποία αποθηκεύεται ως εγγραφή στον πίνακα γνωρισμάτων (Attribute Table).



Εικόνα 4.5 : Μοντέλο Διανυσματικών Δεδομένων σε σχέση με με τον φυσικό Κόσμο.

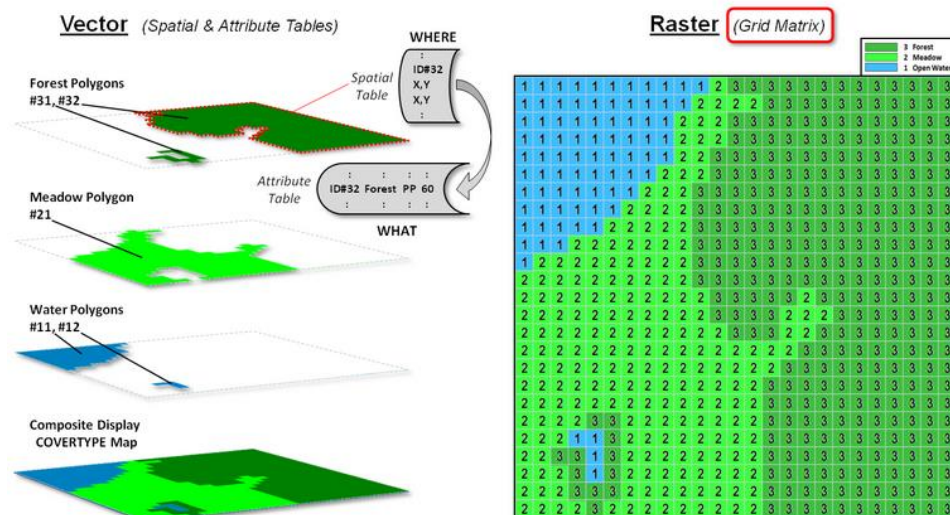
Διακρίνονται οι συντεταγμένες (x,y) (Πηγή :

<http://www.geography.hunter.cuny.edu/~jochen/GTECH351/lectures/lecture04/concepts/03%20-%20Geographic%20data%20models.html>)

4.2.3.2 Μοντέλο Ψηφιδωτών Δεδομένων (Raster)

Το ψηφιδωτό μοντέλο αναπαράστασης δεδομένων οι διάφορες οντότητες του πραγματικού κόσμου αναπαριστώνται ως ένα πλέγμα κελιών ίσου μεγέθους, στο καθένα από τα οποία ανατίθενται ορισμένα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Ένα μεμονωμένο κελί αντιπροσωπεύει ένα μικρό κομμάτι της γης συγκεκριμένων διαστάσεων ενός pixel και αποτελεί την κύρια μονάδα ανάλυσης στα Γ.Π.Σ. Ανάλογα με το μέγεθος του κάθε pixel και η διακριτική ικανότητα του χρήστη. Σε αντίθεση με τα διανυσματικά μοντέλα δεδομένων όπου τα ζεύγη (x,y), χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των σχημάτων, στο μοντέλο των ψηφιδωτών δεδομένων ορίζεται μόνο από ένα ζεύγος (x,y).

Το συγκεκριμένο ζεύγος ονομάζεται ζεύγος προέλευσης και ορίζει την θέση κάθε κελιού και συνήθως αναφέρεται στο κέντρο ή στην άκρη κάθε κελιού (pixel). Επιπλέον σε κάθε pixel δίνεται μία αριθμητική τιμή η οποία αντιπροσωπεύει κάθε είδους πληροφορίας είτε πρόκειται για γεωγραφική θέση είτε υψόμετρο είτε εάν πρόκειται για ξηρά ή θάλασσα ή δάσος κλπ.



Εικόνα 4.5 : Μοντέλο Ψηφιδωτών Δεδομένων. Διακρίνονται οι διαφορετικές τιμές στα κελιά που αποτελούν την εικόνα στα οποία ο αριθμός (3) απεικονίζει τα δάση, ο αριθμός (2) τα λιβάδια και ο αριθμός (1) το νερό . (Πηγή : <http://www.oogazone.com/2018/best-hd-vector-and-raster-gis-vector-image/>)

4.2.3.3 Χρησιμότητα στην Αναπαράσταση Οντοτήτων με την βοήθεια Ψηφιδωτών και Διανυσματικών Δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω και τα δύο μοντέλα αναπαράστασης δεδομένων είναι απαραίτητα στην αναπαράσταση γεωγραφικών πληροφοριών, ωστόσο ανάλογα με την γεωγραφική πληροφορία που υπάρχει διαθέσιμη αλλά, πιο σημαντικό, των ερωτήσεων που θέτει ο χρήστης, ενδέχεται το ένα να είναι καταλληλότερο από το άλλο. Κατά κύριο λόγο, το μοντέλο διανυσματικών δεδομένων (vector) είναι χρησιμότερο όταν υπάρχουν αντικείμενα με διακριτά όρια. Το μοντέλο ψηφιδωτών δεδομένων (raster) παρέχει την δυνατότητα αναπαράστασης διακριτών χαρακτηριστικών υπό την μορφή συνδεδεμένων κελιών με την ίδια χαρακτηριστική τιμή (Εικόνα 4.5). Τέλος η αναπαράσταση με την μέθοδο διανυσματικών δεδομένων καταλαμβάνει λιγότερο χώρο ωστόσο παρουσιάζει σφάλματα ανάλογα με την ακρίβεια που υπάρχει.

Σε αντίθεση τα συνεχή γεωγραφικά δεδομένα αναπαριστώνται στην συντριπτική τους πλειοψηφία με το μοντέλο ψηφιδωτών δεδομένων, διότι έχουν σαφώς περισσότερο καθορισμένα όρια ενώ ταυτόχρονα μπορούν να αλλάζουν συνεχώς εντός μιας εικόνας. Από την άλλη πλευρά , η αποτύπωση ενός επιφανειακού ή συνεχούς αντικειμένου στην διανυσματική μορφή μπορεί να θεωρηθεί αποδοτικότερη διότι χρειάζεται να καθοριστούν μόνο οι θέσεις των κορυφών ενός

πολυγώνου και όχι οι τιμές των ενδιάμεσων κελιών που το συνθέτουν. Υπάρχει σίγουρα δεδομένη δυσκολία για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου σε αυτή την περίπτωση ωστόσο ένας πεπειραμένος χρήστης ανάλογα με την ανάγκη που έχει επιλέγει ανάλογα.

Τέλος, ένα από τα βασικότερα κριτήρια αποτελεί η ακρίβεια των αναπαραστάσεων που ζητείται για την επιλογή μοντέλου αναπαράστασης. Για την δημιουργία μίας ακριβούς προσέγγισης μίας επιφάνειας σε ψηφιδωτή μορφή, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν αρκετά κελιά μικρών διαστάσεων, οπότε ουσιαστικά ο αριθμός των κελιών (pixel) αυξάνεται αναλογικά της ακρίβειας. Βέβαια η φαινομενική ακρίβεια της διανυσματικής αναπαράστασης αμφισβητείται, διότι πολλά γεωγραφικά φαινόμενα δεν μπορούν να εντοπιστούν με μεγάλη ακρίβεια. Έτσι, παρόλο που τα δεδομένα ψηφιδωτού τύπου με την πρώτη ματιά δεν φαίνονται ελκυστικά στην χρήση, σε αρχική φάση είναι πολύ πιο αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας ωστόσο είναι πιο δύσκολα στην επεξεργασία.

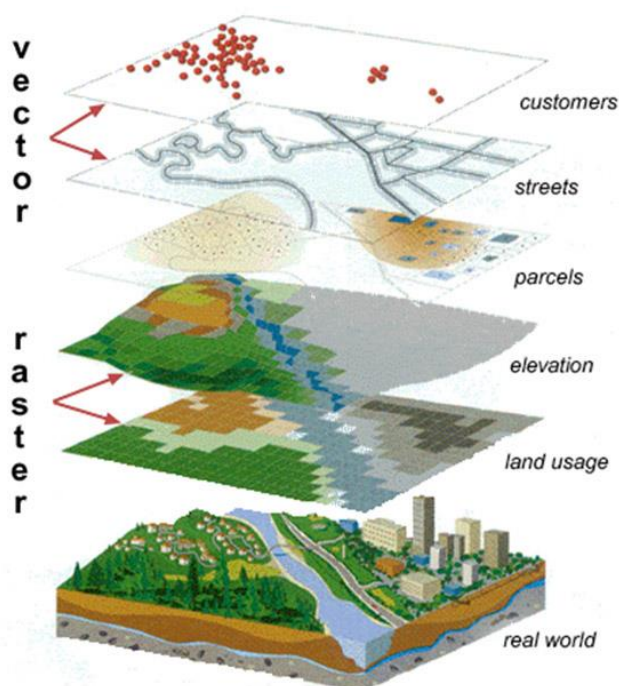
4.2.4 Θεμελιώδεις Έννοιες ενός Γεωγραφικού Πληροφοριακού Συστήματος

Σημαντικό είναι να γίνει αναφορά οι βασικές έννοιες λειτουργίας ενός Γ.Π.Σ, οι οποίες αποτελούν βασικούς μηχανισμούς που συνδράμουν στην συνολική θεώρηση και κατανόηση της ανάπτυξης του εργαλείου υποστήριξης στο επόμενο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα, ως βασικές έννοιες ενός Γ.Π.Σ είναι οι εξής :

- **Γεωγραφική θέση ή τοποθεσία (Geographic Location)** : Ως γεωγραφική θέση ορίζεται μία συγκεκριμένη θέση πάνω στην επιφάνεια της γης, η οποία καθορίζεται βάσει ενός γεωγραφικού συστήματος αναφοράς.
- **Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς (Geographical Coordinate System)** : Αποτελεί ένα σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος) το οποίο ο χρήστης ανάλογα με τις ανάγκες του αναγάγει τα δεδομένα που θα χρησιμοποιήσει.
- **Χωρική Κατανομή (Spatial Distribution)** : Αναφέρεται στην διάταξη των οντοτήτων στο χώρο και τον τρόπο που κατανέμονται στον χώρο.
- **Χωρικές Γεωγραφικές Οντότητες (Spatial Geographic Features)** : Αναφέρονται σε γεωμετρικά καθορισμένα σχήματα τα οποία έχουν συγκεκριμένη θέση στην πραγματικότητα και απεικονίζονται σε αναλογικούς χάρτες ανάλογα με αυτή. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω ότι χωρίζονται σε σημειακές, γραμμικές και πολυγωνικές οντότητες.

- **Τοπολογία (Topology)** : Αναφέρεται στο σύνολο των γεωμετρικών κανόνων που πρέπει να ακολουθεί η γεωγραφική πληροφορία, ανάλογα με την φύση της. Για παράδειγμα τα όρια ενός διοικητικού διαμερίσματος της Ελλάδος δεν πρέπει να αλληλεπικαλύπτονται με τα όρια των διπλανών διοικητικών διαμερισμάτων. Αυτοί οι κανόνες ισχύουν για πολλών ειδών οντότητες στον χώρο.
- **Μεταδεδομένα (Metadata)** : Τα μεταδεδομένα είναι δεδομένα που έχουν παραχθεί από την επεξεργασία των αρχικών δεδομένων περιέχοντας επιπρόσθετη διευκρίνιση ή περιγραφή. Ουσιαστικά, συνοψίζουν τις βασικές πληροφορίες σχετικά με τα δεδομένα, ώστε να γίνει ευκολότερη η αναζήτηση και η επεξεργασία δεδομένων.
- **Γεωβάση (Geodatabase)** : Αποτελεί βάση δεδομένων στην οποία αποθηκεύονται το σύνολο των δεδομένων είτε είναι γεωγραφικά είτε είναι περιγραφικά και τέλος επιτρέπει την επεξεργασία και ενημέρωση τους.
- **Πίνακας Ιδιοτήτων (Attribute Tables)** : Πρόκειται για αρχείο της γεωβάσης το οποίο περιέχει περιγραφικές πληροφορίες σχετικά με ένα σύνολο γεωγραφικών χαρακτηριστικών. Κάθε σειρά (row) αντιπροσωπεύει ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της οντότητας και ονομάζεται πεδίο (field). Στα διανυσματικά δεδομένα κάθε γραμμή του πίνακα αντιστοιχεί σε μία ομάδα κελιών που αντιπροσωπεύουν το ίδιο αντικείμενο. Το λογισμικό του Γ.Π.Σ δημιουργεί με την κάθε καινούργια καταχώρηση πεδία αναγνωριστικού κωδικού (ObjectID), εμβαδού (Shape_Area) και μήκους (Shape_Length). Για τα ψηφιδωτά δεδομένα τα πεδία το λογισμικό κατασκευάζει πεδία αναγνωριστικού αριθμού, χαρακτηριστικής τιμής (Value) και καταχωρήσεων (Count).
- **Κατηγορία ή κλάση χαρακτηριστικών (Feature Class)** : Αναφέρεται σε ένα σύνολο γεωγραφικών χαρακτηριστικών τα οποία έχουν τον ίδιο γεωμετρικό τύπο, ίδια χαρακτηριστικά και ίδιο σύστημα συντεταγμένων.
- **Θεματικά Επίπεδα (layers)** : Τα θεματικά επίπεδα ενός Γ.Π.Σ ουσιαστικά απεικονίζουν μία αναπαράσταση ενός γεωγραφικού συνόλου δεδομένων σε οποιοδήποτε περιβάλλον ψηφιακού χάρτη. Ουσιαστικά μπορεί να εκληφθεί ως μία φέτα (slice) της γεωγραφικής πραγματικότητας σε μία συγκεκριμένη περιοχή και θεωρείται ισοδύναμη με έναν αναλογικό χάρτη. Για παράδειγμα σε έναν γεωμορφολογικό χάρτη, τα βουνά, τα ποτάμια, οι δρόμοι, οι πόλεις, τα σύνορα των περιφερειών, τα σύνορα των κρατών κλπ θεωρούνται ξεχωριστά θεματικά επίπεδα.
- **Ερώτημα (Query)** : Αναφέρεται στο αίτημα του χρήστη να εξετάσει τον πίνακα χαρακτηριστικών με βάση τα καθορισθέντα κριτήρια που θέτει ώστε να προβάλλει συγκεκριμένες καταχωρήσεις που επιζητά ανάλογα.

- **Γλώσσα Δομημένων Ερωτημάτων (Structured Query Language) :** Αναφέρεται στην γλώσσα προγραμματισμού SQL η οποία βοηθά τον χρήστη στην καλύτερη διαχείριση των δεδομένων που καταχωρεί. Βασίζεται στην Τυπική άλγεβρα και την πλειάδα του σχεσιακού λογισμού.



Εικόνα 4.7 : Παράδειγμα αλληλοεπικάλυψης θεματικών επιπέδων διανυσματικού και ψηφιδωτού μοντέλου ώστε να υπάρχει όσο καλύτερη απεικόνιση γίνεται του πραγματικού κόσμου (

Πηγή :

<https://imaqui.eu/pemanfaatan-sig-system-information-geografis-untuk.html>)

4.3 Περιγραφή του Λογισμικού ArcGis v. 10.4 και της εφαρμογής ArcMap

Το ArcMap σε έκδοση 10.4 αποτελεί μία από τις πιο ολοκληρωμένες εφαρμογές που των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων, το οποίο το έχει αναπτύξει η εταιρεία Environmental Systems Research Institute γνωστή και από την συντομογραφία (ESRI). Το ArcGis ως οντότητα αποτελεί μία ολοκληρωμένη συλλογή από προϊόντα λογισμικού Γ.Π.Σ και μία πλατφόρμα για εργασίες χωρικής ανάλυσης, διαχείρισης δεδομένων και απεικόνισης. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για :

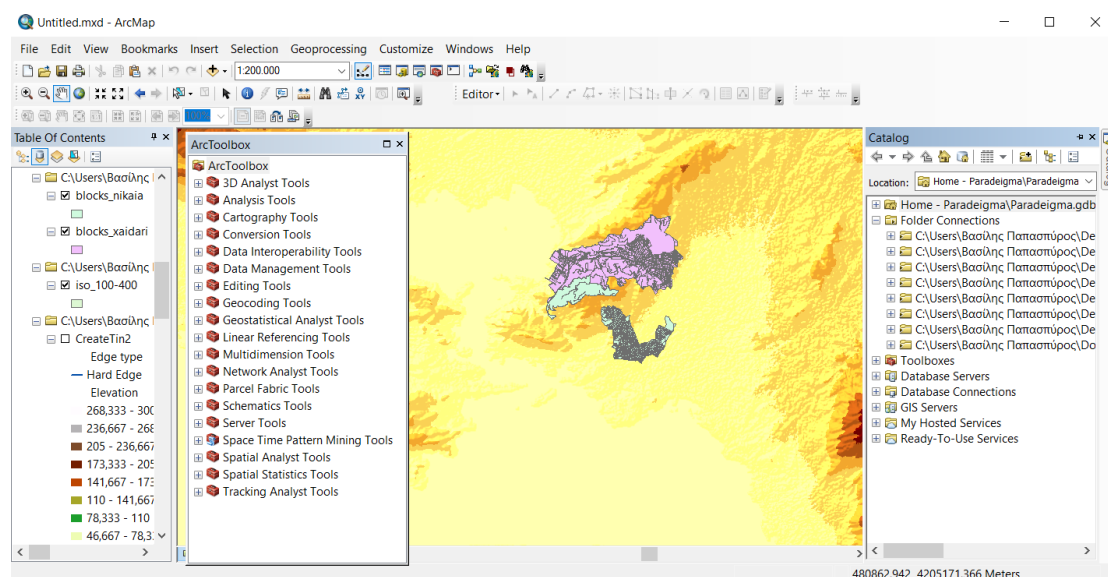
- **Διαχείριση Δεδομένων :** Χρησιμοποιείται στην διαχείριση αξιώσεων, στην διαχείριση υποθέσεων, στην διαχείριση περιοχών εξυπηρέτησης/ ευθύνης, στην διαχείριση πελατών και τέλος στην ενσωμάτωση συστημάτων.

- **Ανάλυση και Σχεδιασμό** : Κύριες λειτουργίες είναι οι προβλέψεις και η ανάλυση κινδύνου και η χωροθέτηση επιχειρήσεων ώστε να καλύπτουν όσο καλύτερα γίνεται μία πόλη ή λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς λόγω νομοθεσίας.
- **Επιχειρησιακές Διαδικασίες** : Όπως παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων από το πεδίο, καθορισμός δρομολογίων διανομών, επιθεωρήσεις κλπ.
- **Επίγνωση Καταστάσεων** : Αναφέρεται κυρίως στην υποστήριξη λήψης αποφάσεων όπως για παράδειγμα η κατασκευή εργαλείου λήψης αποφάσεων το οποίο αποτελεί στόχο της παρούσας διπλωματικής.

Όπως και η πλειάδα των λογισμικών διαφόρων χρήσεων, το ArcGIS κυκλοφορεί σε διαφορετικές εκδόσεις οι οποίες χρόνο με τον χρόνο αλλάζουν ενώ ανάλογα με την άδεια που υπάρχει διαθέσιμη μεταβάλλονται και οι δυνατότητες του προγράμματος.

Πιο συγκεκριμένα όπως και οι προηγούμενες εκδόσεις του ArcGIS έχει δημιουργηθεί με την βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού C++ και αποτελείται από ομάδα με ενοποιημένες εφαρμογές στις οποίες περιλαμβάνονται το ArcMap, ArcScene, ArcGlobe, Arc Toolbox και το Model Builder. Παρακάτω περιγράφονται ορισμένες από τις παραπάνω εφαρμογές :

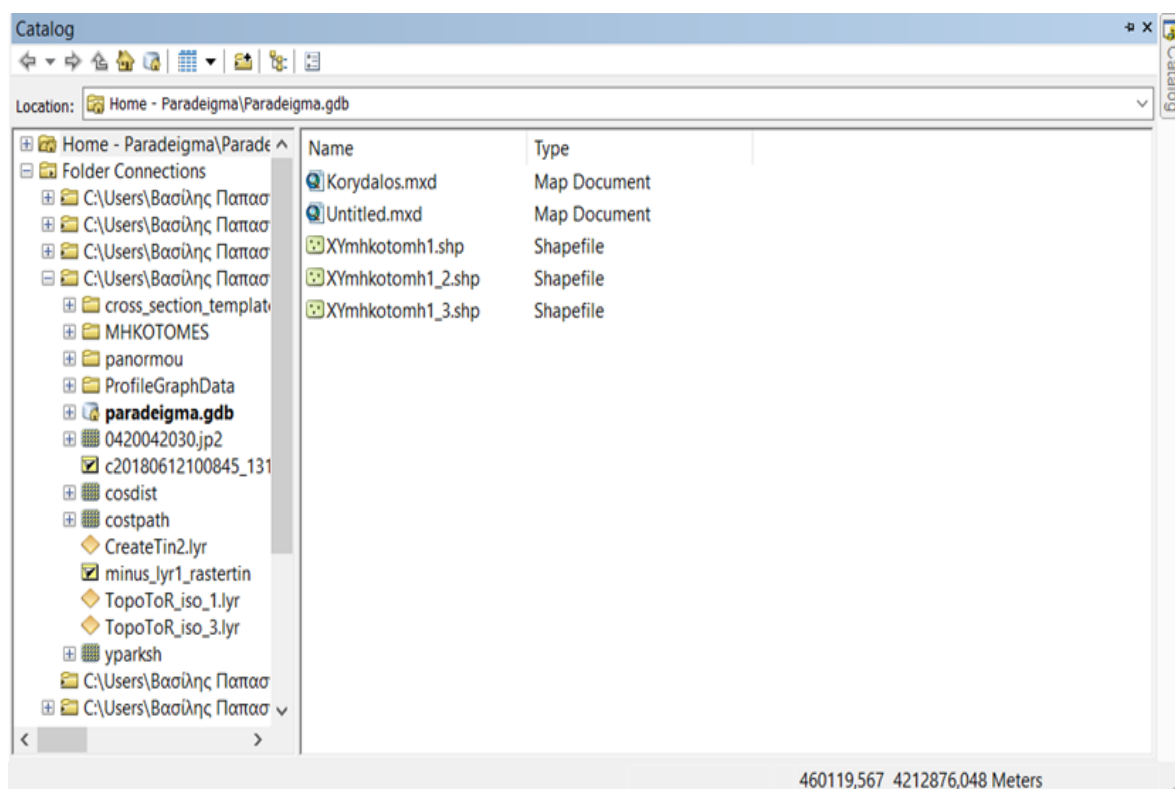
- **ArcMap** : Αποτελεί αναμφίβολα την σημαντικότερη εφαρμογή της πλατφόρμας του ArcGIS και χρησιμοποιείται κυρίως για την προβολή, επεξεργασία, ανάλυση και δημιουργία γεωχωρικών δεδομένων. Έχει την δυνατότητα να συνδεθεί άμεσα με όλες τις προαναφερθείσες εφαρμογές, με σημαντικότερη την ArcCatalog, με την οποία μπορεί να συνδεθεί με δεδομένα τα οποία βρίσκονται σε γεωβάσεις και φακέλων προέλευσης στον υπολογιστή. Επίσης συνδέεται με την Arc Toolbox, ώστε να μπορεί να έχει πρόσβαση στις εργαλειοθήκες του ArcGIS και στην οργάνωση και διαχείριση εργαλείων και με την Model Builder, με στόχο την δημιουργία, επεξεργασία και διαχείριση μοντέλων ροών εργασίας. Οι βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας του αποτελούν τα θεματικά επίπεδα πληροφοριών (layers), μέσω των οποίων γίνεται προβολή, διαμόρφωση και ανάλυση της χωρικής πληροφορίας. Γενικά η πλατφόρμα του ArcMap προσφέρει την δυνατότητα μελέτης και διευθέτησης σύνθετων χωρικών προβλημάτων για τα οποία είναι απαραίτητη η χρήση μοντέλων και σε ορισμένες περιπτώσεις και η συγγραφή προγραμματιστικού κώδικα κυρίως σε γλώσσα Python.



Εικόνα 4.8 : Παράθυρο διαλόγου ArcMap v.10.4 στην οποία αριστερά διακρίνονται οι εφαρμογές Arc Toolbox και διάφορα θεματικά επίπεδα στο Table of Contents και δεξιά το ArcCatalog από το οποίο γίνεται σύνδεση των δεδομένων

- **ArcCatalog** : Η πλατφόρμα του ArcCatalog παρέχει ένα παράθυρο σε μορφή καταλόγου όπως μαρτυρά το όνομα της ή οποία χρησιμοποιείται για την οργάνωση και διαχείριση των διαφόρων ειδών γεωγραφικών πληροφοριών του χρησιμοποιούντα στο ArcGIS (Εικόνα 4.8) Τα είδη των πληροφοριών που μπορούν να εισαχθούν και να διαχειριστούν από το ArcCatalog περιλαμβάνουν : α) Γεωβάσεις, δεδομένα ψηφιδωτού τύπου, γ) χαρτογραφικά έγγραφα, τρισδιάστατες αναπαραστάσεις, δεδομένα διανυσματικού τύπου, αρχεία θεματικών επιπέδων (layers), έτοιμα μοντέλα, εργαλειοθήκες, κώδικας γλώσσας προγραμματισμού Python, μεταδεδομένα από δημοσιευμένες υπηρεσίες. Τα περιεχόμενα αυτών των δεδομένων οργανώνονται σε “προβολή δέντρου” (tree view) η οποία διευκολύνει τον χρήστη να εργαστεί, να οργανώσει, να αναζητήσει και να διαχειριστεί τα δεδομένα .
- **Arc Toolbox** : Αποτελεί το οργανωμένο εργαλείο που παρέχει πρόσβαση στις εργαλειοθήκες του ArcGIS οι οποίες διαθέτουν εργαλεία γεωπεξεργασίας, μοντέλων και κειμένων κώδικα από την επιφάνεια χρήσης του προγράμματος. Ουσιαστικά η κάθε εργαλειοθήκη περικλείει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την εκτέλεση μίας δύσκολης και απαιτητικής εργασίας σε οποδήποτε τομέα. Το Arc Toolbox μπορεί να θεωρηθεί από πολλούς η καρδιά της επεξεργαστικής ικανότητας του ArcMap αλλά και του ArcScene και ArcGlobe.

- **Model Builder** : Είναι η εφαρμογή που έχει την δυνατότητα να κατασκευάσει, να επεξεργαστεί και να διαχειριστεί ο μοντέλα ο εκάστοτε χρήστης. Τα μοντέλα είναι ροές εργασίας (work flows) οι οποίες συνθέτουν αλληλουχίες εργαλείων γεωεπεξεργασίας, δίνοντας το αποτέλεσμα ενός εργαλείου στο αμέσως επόμενο εργαλείο ως δεδομένο εισόδου. Επίσης είναι κατά μία έννοια και γλώσσα προγραμματισμού, αφού προσφέρεται η δυνατότητα μετατροπής της ροής σε κώδικα, σε γλώσσα Python. Έτσι δίνεται η δυνατότητα σε τρίτα άτομα να χρησιμοποιήσουν τον κώδικα ώστε να τροποποιήσουν το παραγόμενο μοντέλο.
- **ArcScene** : Η εφαρμογή του ArcScene αποτελεί μία από τις τελευταίες προσθήκες στην του ArcGIS. Ουσιαστικά σε συνδυασμό με το εργαλείο 3d Analyst Tool επιτρέπει την παρουσίαση και επεξεργασία των δεδομένων σε τρισδιάστατη μορφή προσθέτοντας στις συντεταγμένες (x,y) το ύψος z . Με αυτό τον τρόπο επιτρέπει μια πιο πραγματική παρουσίαση επιφανειών του εδάφους, τα χαρακτηριστικά τους, τις ισοϋψείς τους αλλά και το υπέδαφος σε ορισμένες συγκεκριμένες εφαρμογές.



Εικόνα 4.9 : Το παράθυρο διαλόγου του εργαλείου ArcCatalog από το οποίο μπορεί ο χρήστης να διαχειριστεί τα δεδομένα που υπάρχουν διαθέσιμα. Αριστερά διακρίνεται η “δενδρική προβολή”

4.4 Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα και Βέλτιστη Χάραξη Σηράγγων

Τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου προσφέρουν πολλές δυνατότητες για την επίλυση ζητημάτων που έχουν επίκεντρο τον χώρο, χωρίς να παραμελείται η περιγραφική τους πληροφορία. Πιο συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση πραγματικών καταστάσεων και δεδομένων χρησιμοποιώντας τα Γ.Π.Σ με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα και αποτελέσματα που επίσης αφορούν τον πραγματικό κόσμο, αποτελεί το πιο καινοτόμο τομέα της επιστήμης την Γεωπληροφορικής.

Στα προηγούμενα κεφάλαια 2 και 3 έχουν τονιστεί τα βασικά σημεία της χάραξης και κατασκευής σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές, προβλήματα και περιορισμοί που υπάρχουν καθώς επίσης και την φύση των γεωκινδύνων που αντιμετωπίζουν οι επιφανειακές κατασκευές οι οποίοι είναι οι καθιζήσεις από την διάνοιξη της σήραγγας. Οπότε **στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας γίνεται προσπάθεια με την βοήθεια των Γ.Π.Σ να γίνει βέλτιστη χάραξη σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές τόσο ως προς την διαδρομή οριζοντιογραφικά όσο και για την κατά βάθος χάραξη ώστε να αποφευχθούν καθιζήσεις στην επιφάνεια και την αποφυγή κάθε είδους εμποδίων όπως υπόγεια σπήλαια, κοιλότητες, μοντελοποιώντας του προβλήματος επιλογής της διαδρομής.**

Οι εφαρμογές που παρουσιάζονται στο επόμενο Κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5) κατασκευάστηκαν ώστε να δείξουν και τις δύο πτυχές του προβλήματος (οριζόντιογραφία και μηκοτομή της χάραξης) δίνοντας έμφαση στην επιλογή της καλύτερης διαδρομής σε περιοχές και σε βάθος βάσει πολυκριτηριακής ανάλυσης ώστε να αποφευχθούν πιθανές καθιζήσεις και επηρεασμός κτηρίων της επιφάνειας αλλά και λαμβάνοντας υπόψη το κόστος καθώς όσο πιο βαθιά χαράσσεται η σήραγγα το κόστος κατασκευής αυξάνεται.

4.4.1 Μοντελοποίηση του Προβλήματος

Η πολυκριτηριακή ανάλυση που αναφέρθηκε παραπάνω έγινε μέσω της δημιουργίας, δοκιμής και σε τελικό στάδιο εκτέλεσης μοντέλων από τα δεδομένα που ήταν δυνατό να συλλεχθούν. Τα μοντέλα αποτελούν προσομοιώσεις πραγματικού κόσμου ακολουθώντας με την αφαιρετική λογική. Την αφαίρεση ακολουθεί ο μετασχηματισμός του μοντέλου το οποίο, ουσιαστικά αποφασίζεται ο τύπος του ανάλογα με το είδος του προβλήματος και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τον πραγματικό κόσμο (Κουτσόπουλος, 2009).

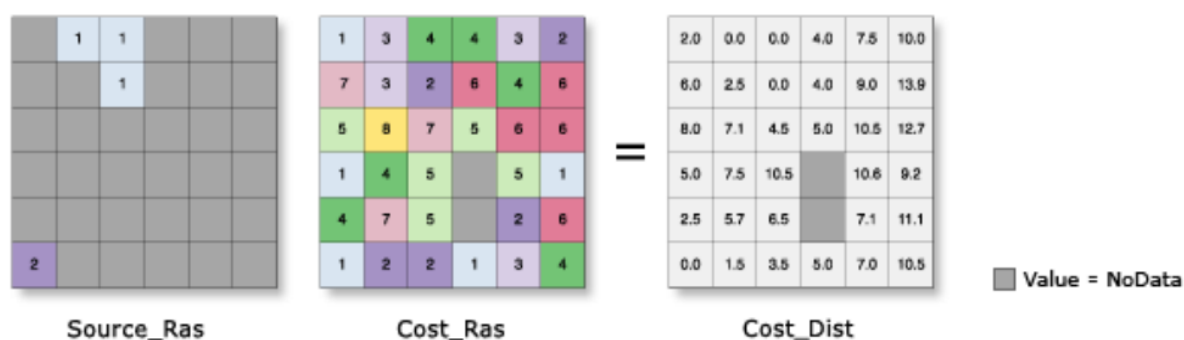
Τα μοντέλα κατασκευάστηκαν με τη βοήθεια του εργαλείου Model Builder της εφαρμογής ArcMap. Η κατασκευή των μοντέλων έγινε σταδιακά με την εισαγωγή κατάλληλων εργαλείων από την εργαλειοθήκη του ArcMap, τα όποια επεξεργάστηκαν βήμα προς βήμα τα δεδομένα που εισήχθησαν στην πλατφόρμα. Βασική διαδικασία της εκπόνησης του μοντέλου είναι η εισαγωγή δεδομένων στο εργαλείο (input) και η εξαγωγή αποτελεσμάτων (output).

4.4.2 Βασικά Χρησιμοποιούμενα Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής του εργαλείου λήψης αποφάσεων μέσω του Model Builder χρησιμοποιήθηκε ένας σημαντικός αριθμός εργαλείων από την εργαλειοθήκη Arc Toolbox τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω με την βοήθεια της πλατφόρμας Βοήθειας της ESRI τόσο κατευθείαν από την πλατφόρμα του ArcMap τόσο και από το διαδίκτυο (<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/tools.htm>). Παρακάτω γίνεται παρουσίαση αυτών των εργαλείων .

- **Προσθήκη Πεδίου (Add Field)** : Ένα πολύ βασικό εργαλείο καθώς επιτρέπει στον χρήστη να προσθέσει ένα νέο πεδίο, δηλαδή μία νέα στήλη στον πίνακα χαρακτηριστικών (Attribute Table) ενός επιλεγμένου θεματικού επιπέδου ή μίας κλάσης (Feature Class).
- **Υπολογισμός πεδίου (Calculate Field)** : Δίνει την ικανότητα στον χρήστη να υπολογίσει τις τιμές του επιλεγμένου πεδίου ενός θεματικού επιπέδου ή μιας κλάσης. Εφαρμογή σύνθετων υπολογισμών απαιτεί χρήση προγραμματισμού Python.
- **Διαδρομή ελαχίστου Κόστους (Cost Path)** : Καθορίζει την διαδρομή ελαχίστου κόστους από ένα **σημείο Προορισμού** (destination Point) σε ένα **σημείο Αφετηρίας** (Origin Point). Εκτός από την απαίτηση του εργαλείου για τον καθορισμό του προορισμού, απαιτεί επίσης ως εισαγόμενα δεδομένα (input) ψηφιδωτά σετ δεδομένων, όπως αυτά έχουν προκύψει από το εργαλείο “Cost Distance” και της γειτνίασης των κελιών με την ελάχιστη τιμή κόστους με το εργαλείο “Back Link”. Το Back Link raster είναι απαραίτητο να υπάρχει καθώς χρησιμοποιείται για να εντοπιστεί η λιγότερο δαπανηρή πορεία από τον προορισμό προς το σημείο προέλευσης πάνω στην επιφάνεια του κόστους απόστασης (cost distance raster). Η τελική διαδρομή εμφανίζεται ενώνοντας τα κέντρα των κελιών με τις ελάχιστες τιμές κόστους μεταξύ των σημείων προέλευσης και προορισμού.
- **Κόστος Απόστασης (Cost Distance)** : Βασικό εργαλείο για τον εντοπισμό της λιγότερο δαπανηρής διαδρομής καθώς δημιουργεί ένα ψηφιδωτό θεματικό επίπεδο, (σε μετέπειτα φάση χρησιμοποιείται από το εργαλείο Cost Path)

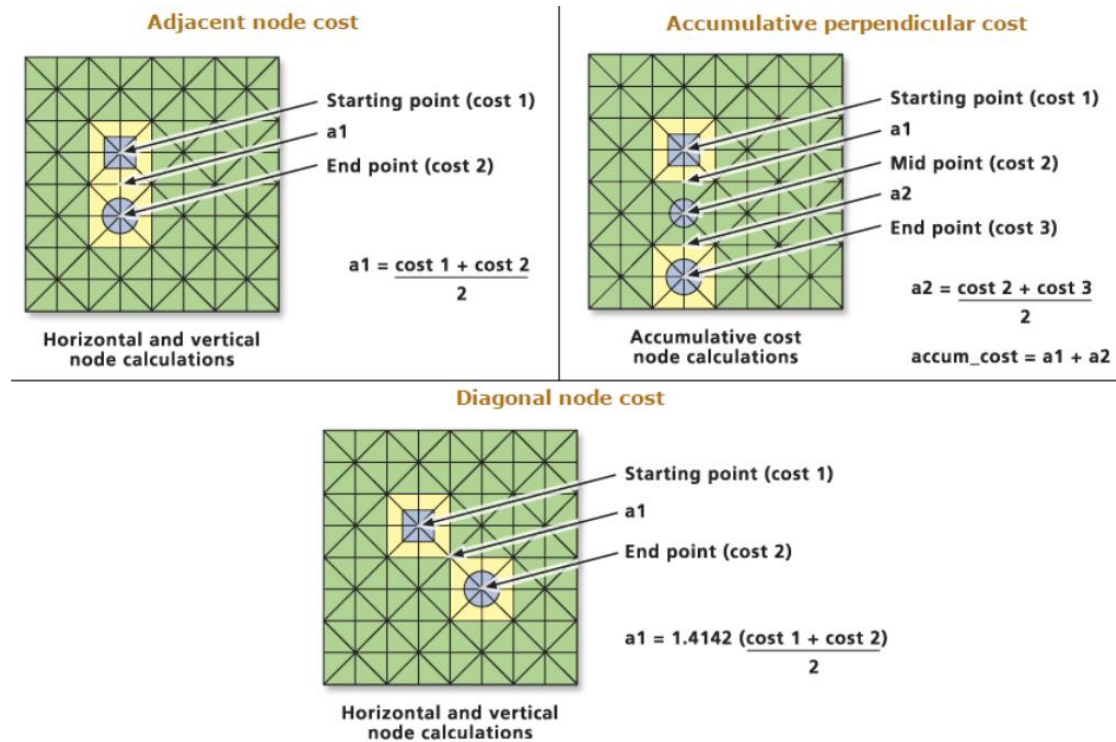
όπου κάθε κελί παίρνει μία τιμή συσσωρευτικού κόστους για το πλησιέστερο κελί (source cell). Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται θεωρεί το κέντρο κάθε κελιού ως κόμβο και το ενώνει με τους γειτονικούς κόμβους με πολλαπλές συνδέσεις. Τα εισαγόμενα δεδομένα αποτελούν τα σημεία προέλευσης (origin points) και το ψηφιδωτό που έχει παραχθεί από το εργαλείο σταθμισμένους κόστους (Weighted Overlay). Το κόστος που δίνεται σε κάθε κελί αντιπροσωπεύει το κόστος ανά μονάδα απόστασης για την μετακίνηση μέσω του συγκεκριμένου κελιού. Η τελική τιμή που λαμβάνει το κάθε κελί προέρχεται από τον πολλαπλασιασμό του μεγέθους του με την τιμή του κόστους. Επιπλέον, το κόστος μετακίνησης από τον κόμβο ενός κελιού στον επόμενο εξαρτάται από την σχετική χωρική τους κατεύθυνση αλλά και τον τρόπο σύνδεσής τους.



Εικόνα 4.10 : Από αριστερά προς τα δεξιά. (α) Ανάθεση τιμών στο ψηφιδωτό της επιφάνειας προέλευσης, η οποία συμβολίζεται με την τιμή 1, και του σημείου προορισμού που συμβολίζεται με τον αριθμό 2. (β) Υπέρθυση αυτού του ψηφιδωτού με το ψηφιδωτό κόστους. (γ) Τελικό ψηφιδωτό, το οποίο περιέχει τις συσσωρευτικές τιμές κόστους ανά κελί. (Πηγή : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-distance.htm>)

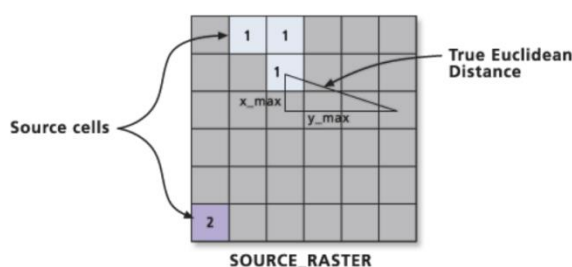
Όσον αφορά την εικόνα του συσσωρευμένου κόστους οι τελικές τιμές προκύπτουν από μία επαναληπτική διαδικασία ξεκινώντας από τα κελιά προέλευσης. Ουσιαστικά, στην πρώτη επανάληψη αναγνωρίζονται τα κελιά προέλευσης στα οποία ανατίθεται η μηδενική τιμή και στην συνέχεια συνεχίζει στα γειτονικά κελιά, στα οποία αντιστοιχείται μία τιμή κόστους. Στην συνέχεια κατασκευάζεται μία λίστα με τις τιμές των κοστών από την οποία επιλέγεται η μικρότερη τιμή και "γράφεται" στο παραγόμενο ψηφιδωτό. Αμέσως μετά αρχίζει η δεύτερη επανάληψη. Η διαδικασία τελειώνει όταν ανατεθούν τιμές σε όλα τα κελιά.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι τρεις περιπτώσεις υπολογισμού του συσσωρευτικού κόστους.



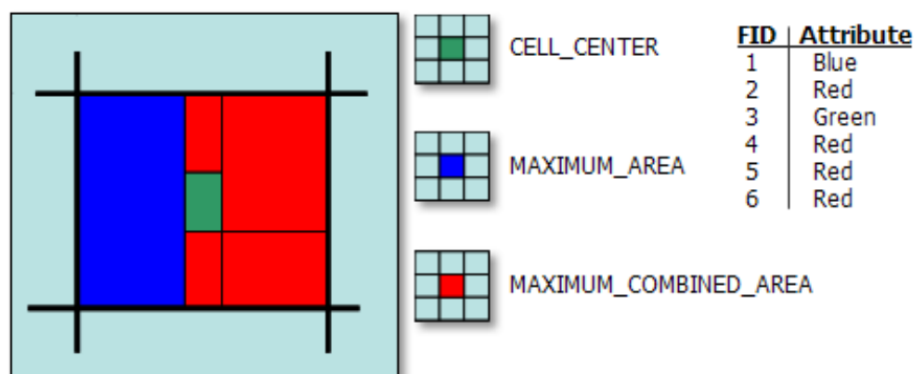
Εικόνα 4.11 : Οι τρεις διαφορετικές περιπτώσεις υπολογισμού του συσσωρευτικού κόστους μαζί με τους τύπους που χρησιμοποιούνται (Πηγή : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-the-path-distance-tools-work.htm>)

- Υπολογισμός Ευκλείδειας Απόστασης (Euclidean Distance) :** Το συγκεκριμένο εργαλείο περιγράφει την σχέση κάθε κελιού με ένα ή πολλά σημεία προορισμού, βάσει της τυπικής ευθείας απόστασης. Ως δεδομένα παίρνει τα σημεία προέλευσης και υπολογίζει την απόσταση τους από το γειτονικό κελί. Για κάθε κελί, η απόσταση από κάθε σημείο προέλευσης καθορίζονται υπολογίζοντας την υποτείνουσα με τις μέγιστες τιμές (x,y) του ArcMap ως τα δύο άλλα σκέλη του τριγώνου. Η μικρότερη απόσταση που προσδιορίζεται προς μία πηγή, είναι μικρότερη από την καθορισμένη μέγιστη απόσταση , η τιμή εκχωρείται στην θέση των κελιών στο ψηφιδωτού εξόδου.



Εικόνα 4.12 : Καθορισμός της μέγιστης ευκλείδειας απόστασης (Πηγή : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-euclidean-distance-analysis.htm>)

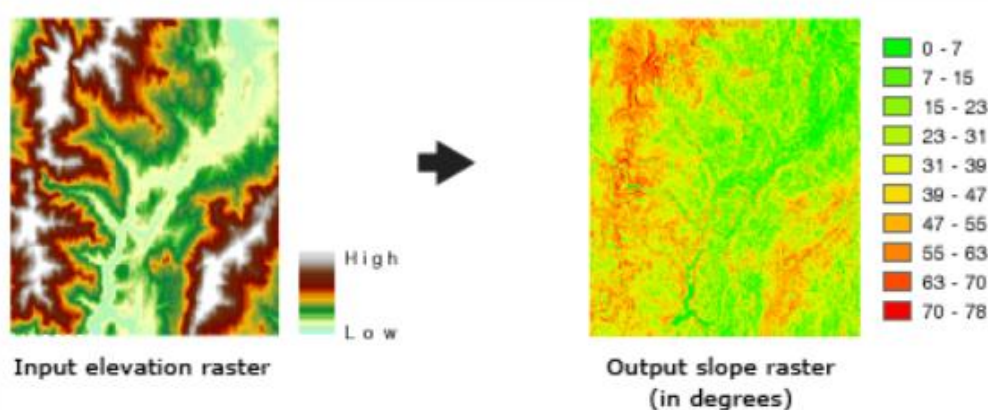
- **Μετατροπή Πολυγωνικών Οντοτήτων σε ψηφιδωτά δεδομένα (Polygon to Raster)** : Το συγκεκριμένο εργαλείο μετατρέπει τις πολυγωνικές οντότητες σε ψηφιδωτά δεδομένα (Raster). Το ψηφιδωτό δημιουργείται ανά κελί, αντιστοιχίζοντας μία τιμή σε καθένα ανάλογα με το χαρακτηριστικό του πίνακα ιδιοτήτων που έχει οριστεί προηγουμένως. Η ανάθεση της τιμής γίνεται με την βοήθεια τριών μεθόδων. Α) Της κεντρικής ανάθεσης (Cell_Center), Β) της μέγιστης συνδυαζόμενης επιφάνειας (Maximum_Combined_Area) και Γ) της μέγιστης επιφάνειας (Maximum_Area). Με την κεντρική ανάθεση, το κάθε κελί λαμβάνει την τιμή από το πολύγωνο που καλύπτει το κέντρο του κελιού, στην ανάθεση μέγιστης επιφάνειας λαμβάνει την τιμή του πολυγώνου που καλύπτει την μέγιστη επιφάνεια του και κατά την μέγιστη συνδυαζόμενη επιφάνεια παίρνει την τιμή του πολυγώνου που καλύπτει την μέγιστη επιφάνεια, ενώ έχει πρώτα ενωθεί με πολύγωνα του ίδιου κελιού που παρουσιάζει την ίδια τιμή στον πίνακα ιδιοτήτων. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η κεντρική ανάθεση τιμών.



Εικόνα 4.13 : Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από μετατροπή πολυγωνικών οντοτήτων σε ψηφιδωτά δεδομένα και με τις τρεις μεθόδους ανάθεσης τιμών. (Πηγή : <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/conversion/how-polygon-to-raster-works.htm>)

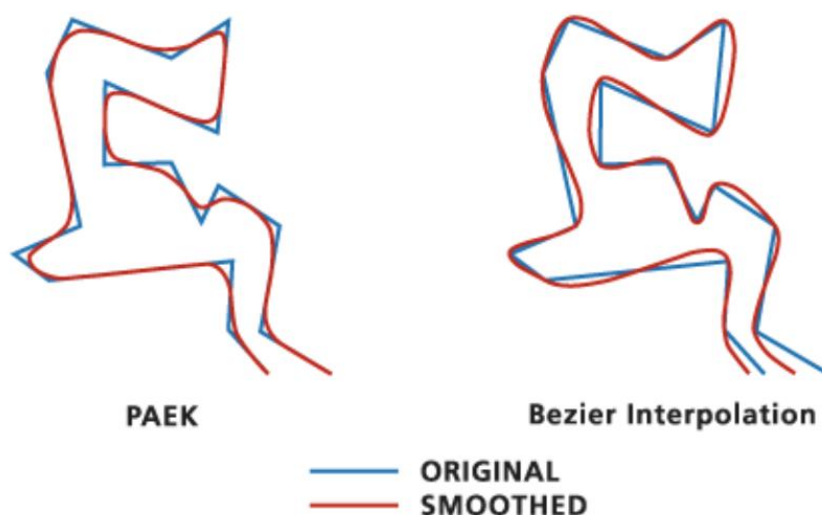
- **Αναγωγή σε προβολικό σύστημα (Project)** : Με αυτό το εργαλείο γίνεται προβολή χωρικών δεδομένων από ένα σύστημα συντεταγμένων σε ένα άλλο. Αρκετά από τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν έπρεπε να γίνουν μετασχηματισμοί των συντεταγμένων σε ΕΓΣΑ 87 (EPSG 2100). Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι το εργαλείο αυτό είναι διαφορετικό από αυτό της γεωαναφοράς με το οποίο μετακινείται μία εικόνα ή σε διανυσματικά δεδομένα σε σχέση με μία εικόνα αναφοράς με προκαθορισμένο σύστημα αναφοράς.

- **Μετατροπή ψηφιδωτών δεδομένων σε πολυγωνικές οντότητες (Raster to Polygon) :** Μετατρέπει ψηφιδωτά δεδομένα σε διανυσματικές πολυγωνικές οντότητες.
- **Μετατροπή ψηφιδωτών δεδομένων σε γραμμικές οντότητες (Raster to Polyline) :** Μετατρέπει ψηφιδωτά δεδομένα σε διανυσματικές γραμμικές οντότητες.
- **Επαναταξινόμηση Δεδομένων (Reclassify) :** Έχει την δυνατότητα να επαναταξινομεί δεδομένα μιας πολυφασματικής εικόνας τις τιμές μιας πολυφασματικής εικόνας. Οι διαθέσιμες μέθοδοι ταξινόμησης στο πρόγραμμα ArcMap είναι αρκετές και η επιλογή της κατάλληλης έγκειται στην διακριτική ευχέρεια του χρήστη με στόχο την καλύτερη απεικόνιση της πληροφορίας. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στα θεματικά επίπεδα που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι η μέθοδος βελτιστοποίησης Jenks, η οποία ελαχιστοποιεί την μέγιστη απόκλιση κάθε κλάσης από την μέση τιμή της, ενώ παράλληλα η μέγιστη απόκλιση από τις μέσες τιμές των υπόλοιπων κλάσεων μεγιστοποιείται.
- **Επιλογή Χωρικών Οντοτήτων (Select) :** Έχει την δυνατότητα να εξαγει και να αποθηκεύει σε ένα νέο θεματικό επίπεδο, χωρικές οντότητες από μία κλάση ή θεματικό επίπεδο.
- **Υπολογισμός Κλίσης (Slope) :** Υπολογίζει τον ρυθμό της μέγιστης μεταβολής στην κατακόρυφη διεύθυνση από κάθε κελί προς τα οχτώ γειτονικά του, ενός συνόλου ψηφιδωτών δεδομένων. Ουσιαστικά γίνεται προσαρμογή ενός συστήματος κελιών 3x3 στις τιμές του άξονα Z (υψόμετρο), ο οποίος λαμβάνεται από ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους δημιουργώντας ένα νέο ψηφιδωτό επίπεδο με την κλίση σε μοίρες ή σε ποσοστό ανύψωσης.



Εικόνα 4.14 : Μετατροπή ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) σε ένα ψηφιδωτό επίπεδο με την κλίση σε μοίρες ή ποσοστό ανύψωσης (Πηγή : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>)

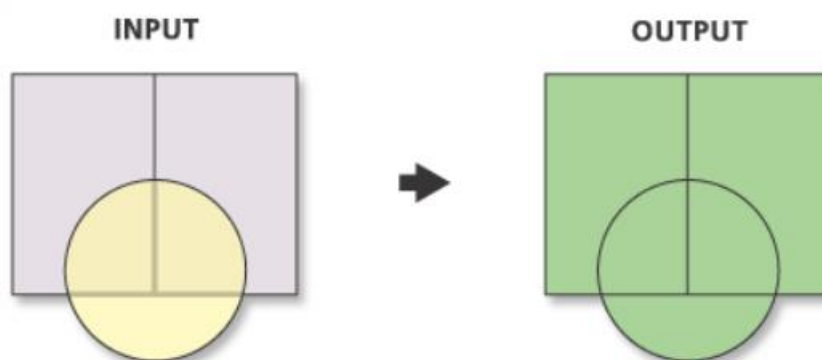
- **Εξομάλυνση Γραμμικού Στοιχείου (Smooth Line)** : Έχει την δυνατότητα να εξομαλύνει μία γραμμή για να βελτιώσει αισθητικά την ποιότητα ενός παραγόμενου χάρτη αλλά και της ίδιας της γραμμής. Πρόκειται για ένα είδος γενίκευσης ενός χάρτη, με την βοήθεια δύο διαφορετικών αλγορίθμων. Α) Του PAEK (Polynomial Approximation with Exponential Kernel) ή στην ελληνική γλώσσα Πολυωνυμική Προσέγγιση με Εκθετική συνάρτηση Kernel και Β) Τον αλγόριθμο παρεμβολής Bezier. Με τον PAEK δημιουργούνται εξομαλυμένες γραμμές μία παραμετρική τεχνική συνεχούς μέσου όρου από τις συντεταγμένες όλων των σημείων της γραμμής. Η τελική γραμμή δεν είναι απαραίτητο ότι θα περνάει από όλες τις κορυφές της αρχικής γραμμής. Ο αλγόριθμος παρεμβολής Bezier κατασκευάζει μία καινούργια γραμμή με κατάλληλο τρόπο ώστε να περνάει από τις κορυφές της αρχικής γραμμής με εξομαλυμένο τρόπο. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η PAEK, διότι αποτελεί πιο σταθερή μέθοδο και παράγει τις περισσότερες φορές αποτέλεσμα που προσομοιάζει καλύτερα την εισαγόμενη γραμμή.



Εικόνα 4.15 : Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των δύο αποτελεσμάτων εξομάλυνσης στην ίδια πολυγωνική γραμμή. (Πηγή : <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/cartography/smooth-line.htm>)

- **Μετατροπή Τοπογραφικών Δεδομένων σε Ψηφιδωτά (Toro to Raster)** : Ουσιαστικά πρόκειται για μία μέθοδο παρεμβολής επιφανείας που έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για την δημιουργία υδρολογικά ορθών υψομετρικών μοντέλων (DEM). Τα απαραίτητα στοιχεία για την λειτουργία του προγράμματος είναι οι ισοϋψείς καμπύλες ως γραμμικές οντότητες, οι σημειακές οντότητες με την υψομετρική πληροφορία και το πολύγωνο που ορίζει την περιοχή μελέτης.

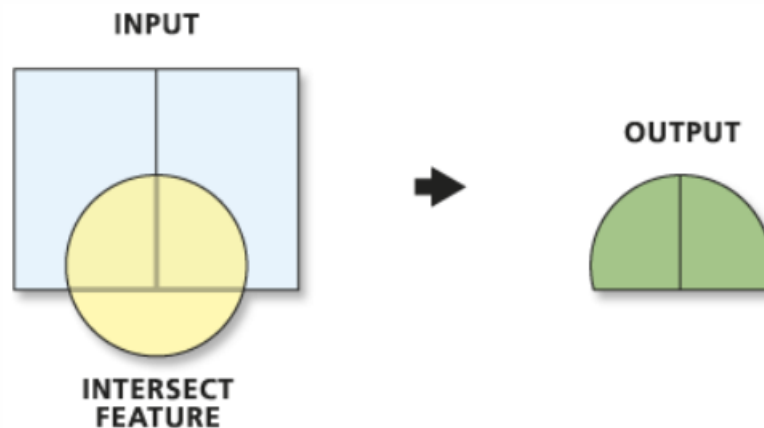
- **Ένωση Θεματικών Επιπέδων (Union)** : Με τη γεωμετρική ένωση (union) συνδυάζονται δύο ή περισσότερα επίπεδα κι όλες οι οντότητές τους (ασχέτως αν επικαλύπτονται ή όχι) μεταφέρονται στο παραγόμενο επίπεδο. Στην λειτουργία αυτή, όλα τα επίπεδα τα οποία συνδυάζονται θα πρέπει να περιέχουν πολύγωνα. Το παραγόμενο επίπεδο λαμβάνει τις περιγραφές και από τα δύο (ή περισσότερα) επίπεδα επεξεργασίας. Στο επίπεδο υπέρθεσης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν όλες τις οντότητες ή επιλεγμένες οντότητες. Σημειώνεται επίσης ότι, καθώς μετά από αυτήν τη λειτουργία διαμορφώνονται νέες οντότητες, με γεωμετρία διαφορετική από των δεδομένων εισόδου, επιβάλλεται ο επαναυπολογισμός των γεωμετρικών ιδιοτήτων (π.χ. έκταση) στο παραγόμενο επίπεδο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη λειτουργία ένωσης θεματικών επιπέδων το παραγόμενο επίπεδο έχει πολλαπλάσιες οντότητες από αυτές των δεδομένων εισόδου. Ο αριθμός των οντοτήτων αυτών δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί πριν την εφαρμογή της λειτουργίας, καθώς σχετίζεται με την πολυπλοκότητα των δεδομένων εισόδου. Μια άλλη παράμετρος η οποία επηρεάζει το πλήθος των οντοτήτων του παραγόμενου επιπέδου είναι και η τοπολογική συνέπεια των δεδομένων, δηλαδή η ταύτιση των κοινών ορίων στα επίπεδα εισαγωγής.



Εικόνα 4.14 : Η λειτουργία του εργαλείου Ένωσης(Union) (Πηγή : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/analysis-toolbox/union.htm>)

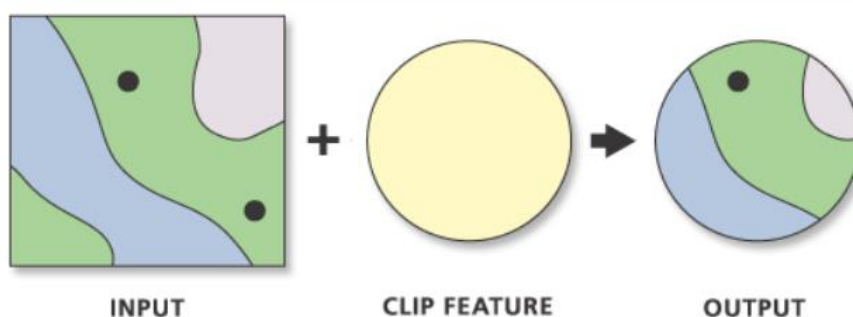
- **Τομή Θεματικών Επιπέδων (Intersect)** : Με αυτήν τη λειτουργία, έπειτα από την υπέρθεση δύο (ή περισσότερων) επιπέδων, διατηρούνται στο παραγόμενο επίπεδο μόνο οι οντότητες (ή τμήματα αυτών) οι οποίες βρίσκονται στον κοινό χώρο εμφάνισης των επιπέδων (γεωμετρική τομή των επιπέδων). Συνήθως, το επίπεδο υπέρθεσης περιέχει πολύγωνα έτσι ώστε, να ορίζεται η περιοχή τομής. Σημειώνεται ότι, καθώς το παραγόμενο επίπεδο «κληρονομεί» τις περιγραφές και από τα δύο

επίπεδα επεξεργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαδικασίες κατάτμησης συνόλου δεδομένων μεγάλου μεγέθους.



Εικόνα 4.15 : Η λειτουργία του εργαλείου Τομής Θεματικών Επιπέδων (Intersect). (Πηγές : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/analysis-toolbox/intersect.htm>)

- **Αποκοπή (Clip)** : Στην λειτουργία αυτή χρησιμοποιείται ένα επίπεδο ως επίπεδο αποκοπής, έτσι ώστε, να αποκοπούν οι οντότητες από ένα άλλο επίπεδο (επίπεδο επεξεργασίας), στα όρια των οντοτήτων του επιπέδου αποκοπής. Θα πρέπει να υπάρχει βεβαιότητα για το ποιο είναι το επίπεδο επεξεργασίας και ποιο το επίπεδο των ορίων αποκοπής, καθώς οι οντότητες (και οι αντίστοιχες περιγραφές) που διατηρούνται στο παραγόμενο, είναι αυτές του επιπέδου επεξεργασίας. Η λειτουργία αποκοπής είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν επιθυμούμε τη δημιουργία βάσης χωρικών δεδομένων στα όρια της περιοχής μελέτης (ή περιοχής ενδιαφέροντος) και έχουμε διαθέσιμα δεδομένα από μια ευρύτερη περιοχή.



Εικόνα 4.17 : Η λειτουργία του εργαλείου Αποκοπής (Clip). (Πηγή : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/analysis-toolbox/clip.htm>)

- **Σταθμισμένη Υπέρθεση (Weighted Overlay)** : Αποτελεί το σημαντικότερο εργαλείο που χρησιμοποιείται για την εκπόνηση της διπλωματικής καθώς γίνεται εισαγωγή διαφορετικά θεματικά επίπεδα σε μορφή ψηφιδωτών δεδομένων και εκτέλεση πολυκριτηριακής ανάλυσης όπου κάθε θεματικό επίπεδο αποτελεί ένα κριτήριο. Για κάθε θεματικό επίπεδο επιλέγεται το χαρακτηριστικό πεδίο που ενδιαφέρει τον χρήστη από το πίνακα ιδιοτήτων του, του οποίου οι τιμές αντιστοιχούνται με εκείνες μιας σταθμισμένης κλίμακας. Η κλίμακα αυτή ανάλογη σε μία ποιοτική διαβάθμιση του κόστους από τιμή σε τιμή και οι τιμές κάθε θεματικού επιπέδου αντιστοιχούνται σε αυτήν την κλίμακα. Στην συνέχεια τοποθετούνται βάρη επιρροής (influence) σε κάθε θεματικό επίπεδο, τα οποία καθορίζουν και το τελικό αποτέλεσμα.
- **Σταθμισμένο Άθροισμα (Weighted Sum)** : Αυτό το εργαλείο επιτρέπει μία υπέρθεση θεματικών επιπέδων σε μορφή raster, με πολλαπλασιασμό την τιμή του κάθε κελιού με το επιλεγόμενο βάρος, αθροίζοντας τις τελικές τιμές. Το εργαλείο εκτελείται ανά κελί διότι ο υπολογισμός και η ανάθεση τιμής γίνεται ξεχωριστά σε καθένα από αυτά.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρακτικό κομμάτι της εργασίας όπου θα γίνει χρησιμοποίηση των παραπάνω εργαλείων.

Κεφάλαιο 5 : Εκπόνηση Βέλτιστης Χάραξης Αβαθούς Σήραγγας σε κατοικημένες Περιοχές σε Περιβάλλον ArcMap

5.1 Εισαγωγή

Στο πέμπτο κατά σειρά κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής παρουσιάζονται αναλυτικά οι δύο εφαρμογές που εκπονήθηκαν, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από το εργαλείο που αναπτύχθηκε. Οι δυνατότητες του αναπτυχθέντος εργαλείου μέσα από την ανάπτυξη και εφαρμογή της μεθοδολογίας επίλυσης του προβλήματος.

5.2 1^η Εφαρμογή : Βέλτιστη Οριζοντιογραφική Χάραξη Σήραγγας σε Κατοικημένες Περιοχές

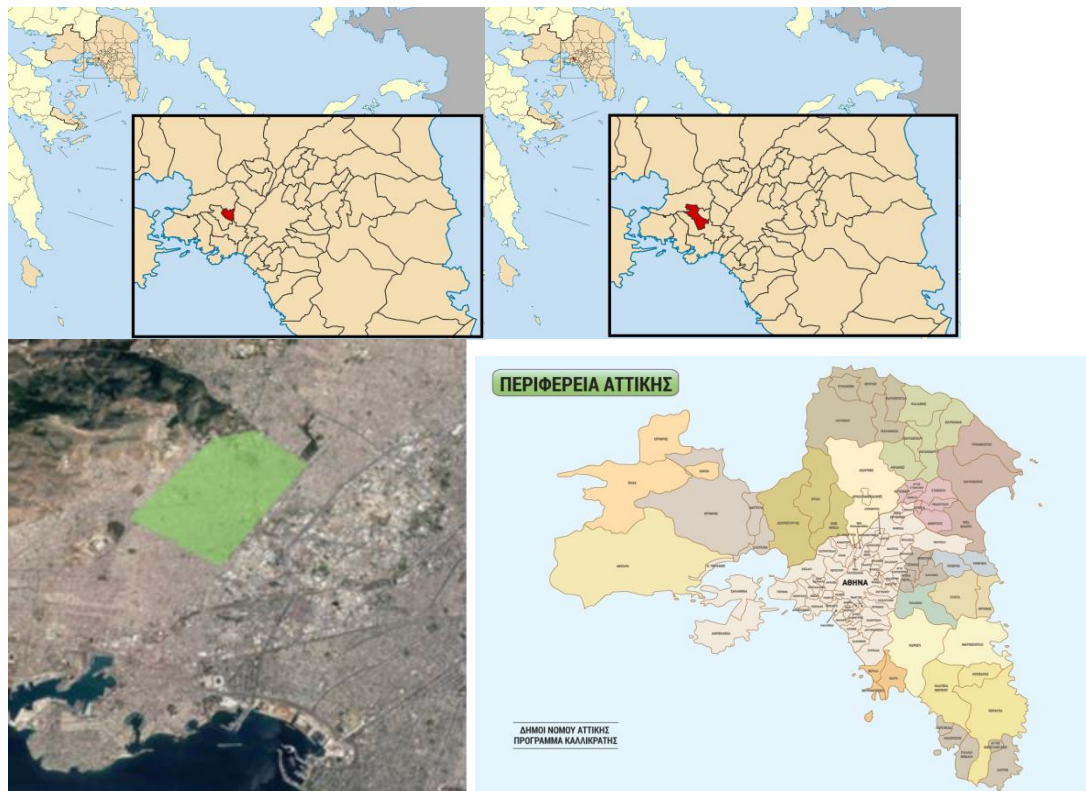
5.2.1 Γενικό Πλαίσιο της Περιοχής Μελέτης

Η πρώτη εφαρμογή που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής είναι η βέλτιστη οριζόντια χάραξη σήραγγας μέσα σε κατοικημένη περιοχή. Πιο συγκεκριμένα όπως είχε αναφερθεί και στο εδάφιο 2.2 της παρούσας διπλωματικής ο σχεδιασμός χάραξης μιας σήραγγας χωρίζεται σε οριζόντια και κατά βάθος χάραξη. Είναι σημαντικό να ορισθούν κριτήρια για την εκπόνηση της διαδικασίας που θα αναλυθούν παρακάτω ώστε να επιτύχει το σκοπό του το εργαλείο λήψης αποφάσεων.

Η περιοχή που επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης είναι αυτής των δήμων Αγίας Βαρβάρας και του Κορυδαλλού (Εικόνα 5.1), επιλογή που έγινε λόγω των διαθέσιμων διαδομένων που βρέθηκαν ως προς τα χαρακτηριστικά τους. Οι δήμοι Κορυδαλλού και Αγίας Βαρβάρας διοικητικά ανήκουν στην περιφέρεια Αττικής και πιο συγκεκριμένα στον δυτικό τομέα Αττικής, ενώ γεωγραφικά κατατάσσονται στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Στερεάς Ελλάδος.

Στις συγκεκριμένες περιοχές βρίσκεται σε εξέλιξη το έργο της επέκτασης της Γραμμής 3 από την Αγία Μαρίνα προς τον Πειραιά, μήκους 7,5 χλμ με 5 σταθμούς. Το άνοιγμα των νέων σταθμών αναμένεται να γίνει τμηματικά με τους σταθμούς της Αγίας Βαρβάρας, του Κορυδαλλού και της Νίκαιας να είναι οι πρώτοι που θα δοθούν στο κοινό. Με την ολοκλήρωσή της, αναμένεται να εξυπηρετούνται

καθημερινά 132.000 νέοι επιβάτες, ενώ ο συνολικός χρόνος από το Λιμάνι έως το Αεροδρόμιο θα διανύεται με το Μετρό σε μόλις 44 λεπτά.



Εικόνα 5.1 : Από Αριστερά και Δεξιόστροφα α) Δήμος Αγίας Βαρβάρας (Πηγή : Wikipedia,2019) β) Δήμος Κορυδαλλού (Πηγή : Wikipedia,2019) γ) Περιοχή μελέτης (Πηγή : Προσωπικό Αρχείο,2019) δ) Καλλικρατικοί Δήμοι της Περιφέρειας Αττικής (Πηγή : <https://www.printcenter.com.gr/xartes-ellados.html>)

5.2.2 Συλλογή και Διαχείριση των Δεδομένων

Έπειτα από τον ορισμό της περιοχής μελέτης ακολούθησε ο καθορισμός των απαραίτητων δεδομένων, τα οποία είναι απαραίτητα για την εκπόνηση της διαδικασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία επιλογής δεδομένων και ορισμού των χρησιμοποιούμενων κριτηρίων αποτελεί αμφίδρομη διαδικασία. Τα απαραίτητα δεδομένα παρουσιάζονται παρακάτω :

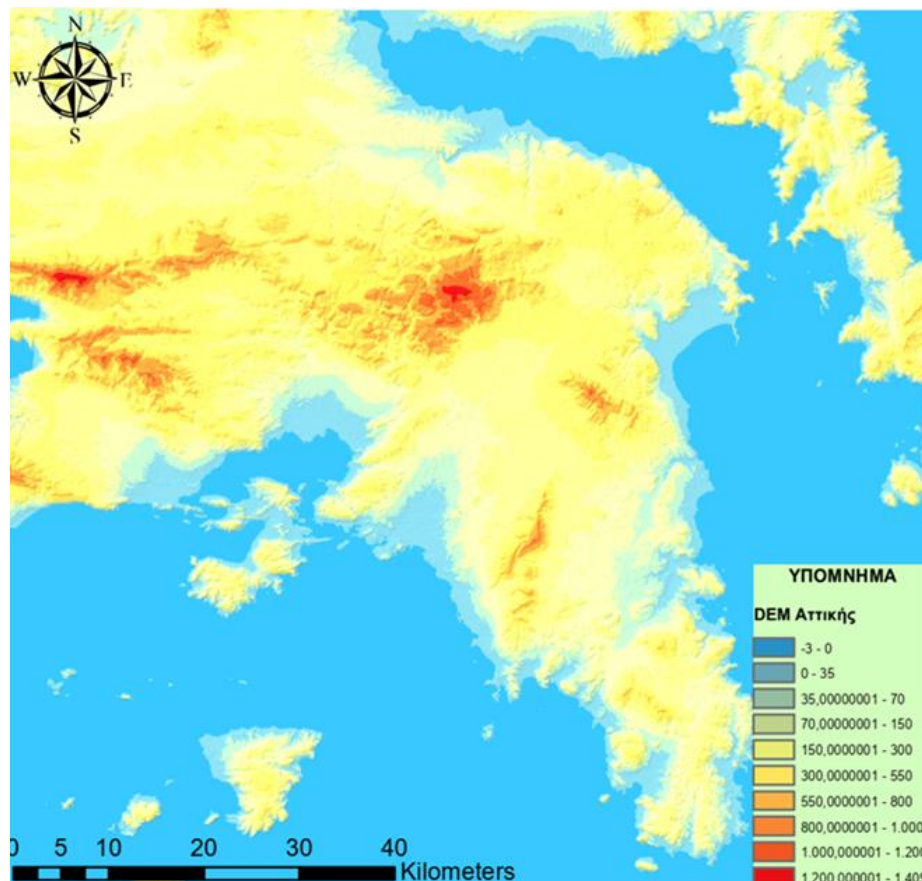
- Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μελέτης με στόχο την συλλογή υψομετρικής Πληροφορίας
- Γεωλογικός Χάρτης Αττικής με στόχο τον ορισμό εδαφικών κατηγοριών καθώς επίσης και του εντοπισμού Ρηγμάτων και Πιθανών ρηγμάτων.
- Διανυσματικά δεδομένα με τα οικοδομικά τετράγωνα της περιοχής.

Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ

- Σημειακά Δεδομένα τα οποία δείχνουν την θέση δημόσιων Κτηρίων.
- Διανυσματικά Δεδομένα με καταγραφή των Ποταμών και των Ρεμάτων της Ελλάδος.
- Τα όρια των Καλλικρατικών Δήμων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για γεωαναφορά λόγω ότι είχαν έτοιμο υπόβαθρο σε ΕΓΣΑ 87.

Τα διανυσματικά δεδομένα με εξαίρεση τα εδαφολογικά ελήφθησαν από την ανοιχτή σελίδα γεωχωρικών δεδομένων www.geodata.gov σε μορφή αρχείων shp. (Shapefiles).

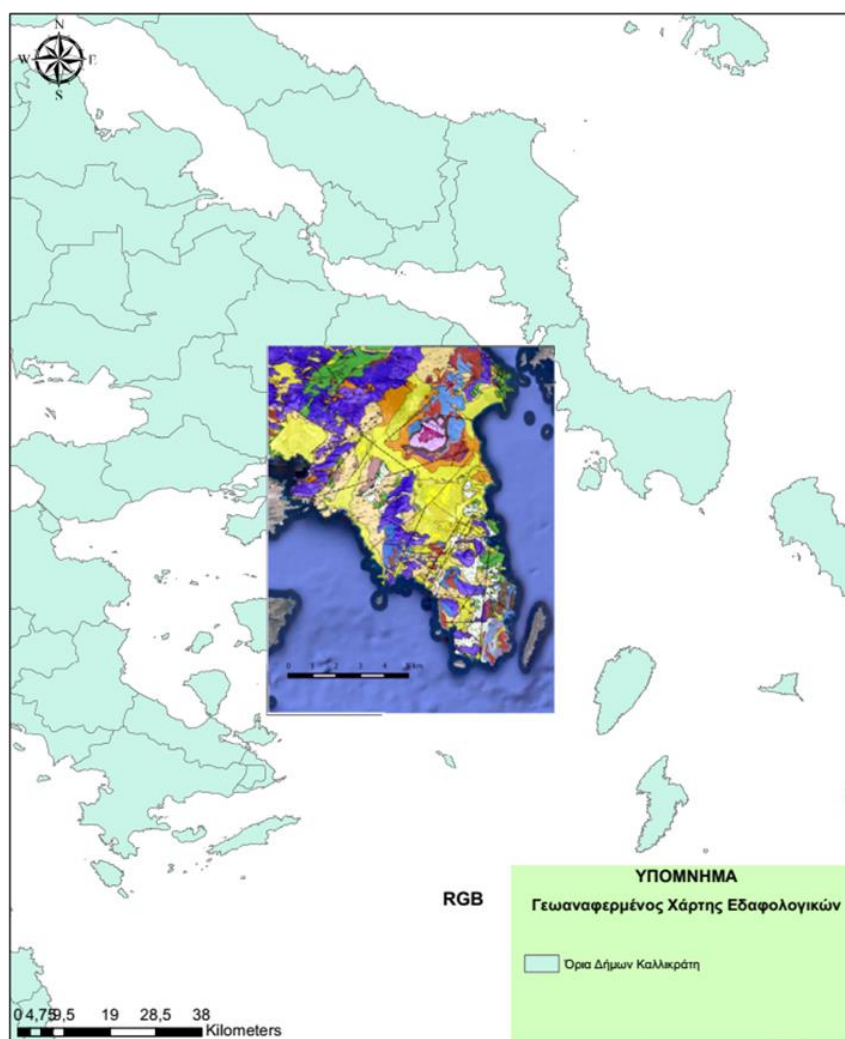
Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους αποκτήθηκε από την ιστοσελίδα γεωχωρικών δεδομένων σε μορφή geotiff <https://earthexplorer.usgs.gov/> των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής από τον δορυφόρο ASTER ο οποίος δίνει ακρίβεια εικονοψηφίδας (Pixel) 25m, αποτελώντας την πηγή με την καλύτερη ακρίβεια όσο αφορά τα ελεύθερα δεδομένα. Στην συνέχεια έγινε αλλαγή συστήματος αναφοράς του ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ 87 από WGS 84 .



Εικόνα 5.2 : Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (D.E.M) της Αττικής που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των κλίσεων

Τα γεωλογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης αποκτήθηκαν με την μορφή εικόνας tiff από το Ινστιτούτο Γεωλογικών Μελετών (Ι.Γ.Μ.Ε). Για να μπορέσει να γίνει η αξιοποίηση τους αρχικά η εικόνα έπρεπε να γεωαναφερθεί με σωστό τρόπο ώστε να ταιριάζει με το υπάρχων υπόβαθρο σε σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ 87.

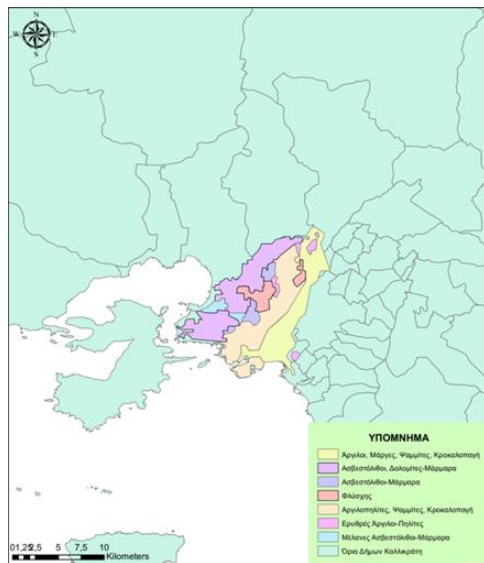
Η Γεωαναφορά έγινε με το Εργαλείο Georeferencing του Arc.Map και την βοήθεια Control Points (σημεία ελέγχου) μεταξύ εικόνας και των πολυγωνικών δεδομένων για τους Καλλικρατικούς Δήμους. Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία για την διαδικασία της γεωαναφοράς ο βέλτιστος αριθμός σημείων ορίζεται σε 4-5 σε χαρακτηριστικές περιοχές ώστε να καλύπτουν ομοιόμορφα ολόκληρη την περιοχή. Στην συγκεκριμένη διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν 6 σημεία σε έξι χαρακτηριστικές περιοχές με στο σφάλμα της γεωαναφοράς (RMS) να είναι στα 14 μέτρα το οποίο είναι εξαιρετικό για τόσο μεγάλη περιοχή.



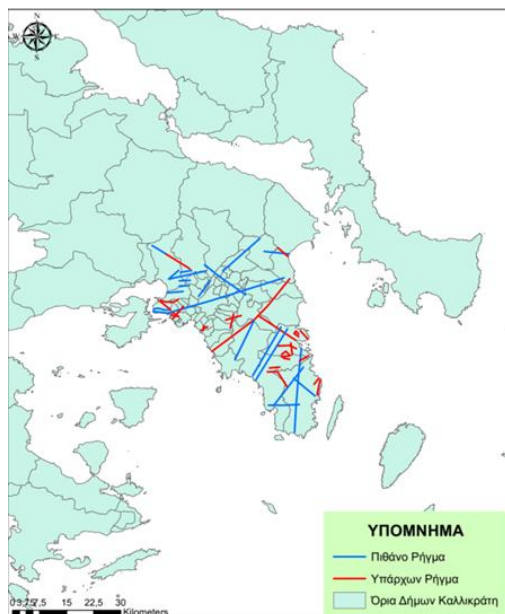
Εικόνα 5.3 : Γεωαναφερμένος Χάρτης Εδαφολογικών στοιχείων

Από τον παραπάνω γεωαναφερμένο Χάρτη έγινε η ψηφιοποίηση των εδαφολογικών χαρακτηριστικών για μεγάλο μέρος της δυτικής Αττικής στο οποίο ανήκει και η περιοχή μελέτης. Επιπλέον έγινε ψηφιοποίηση των υπαρχόντων ρηγμάτων και των θέσεων των πιθανών ρηγμάτων ως περιοχές αυξημένης επικινδυνότητας για την κατασκευή Σηράγγων.

Στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης υπάρχουν αργιλοπηλίτες ενώ όσο μεταφερόμαστε προς τα δυτικά το είδος του εδάφους γίνεται ασβεστολιθικό . Όσον αφορά τα ρήγματα εντοπίζεται μόνο ένα πιθανό ρήγμα στο νότιο άκρο της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 5.4 : Ψηφιοποιημένος Χάρτης Εδαφικών ζωνών στην Περιοχή Μελέτης



Εικόνα 5.5 : Ψηφιοποιημένος Χάρτης Υπαρχόντων Ρηγμάτων και Πιθανόν Ρηγμάτων στην περιοχή της Νότιας και Δυτικής Αττικής

Έπειτα την συλλογή τους και την σύνδεση του προγράμματος ArcMap με τον φάκελο προέλευσης τους (πρόγραμμα ArcCatalog), τα δεδομένα τοποθετήθηκαν σε μία βάση χωρικών δεδομένων (geodatabase), με σκοπό την καλύτερη διαχείριση του όγκου πληροφοριών και τον σαφή ορισμό των σχέσεων μεταξύ τους. Η διαδικασία, η ανάλυση της οποίας ακολουθεί, χρησιμοποίησε όλα τα δεδομένα από την συγκεκριμένη βάση.

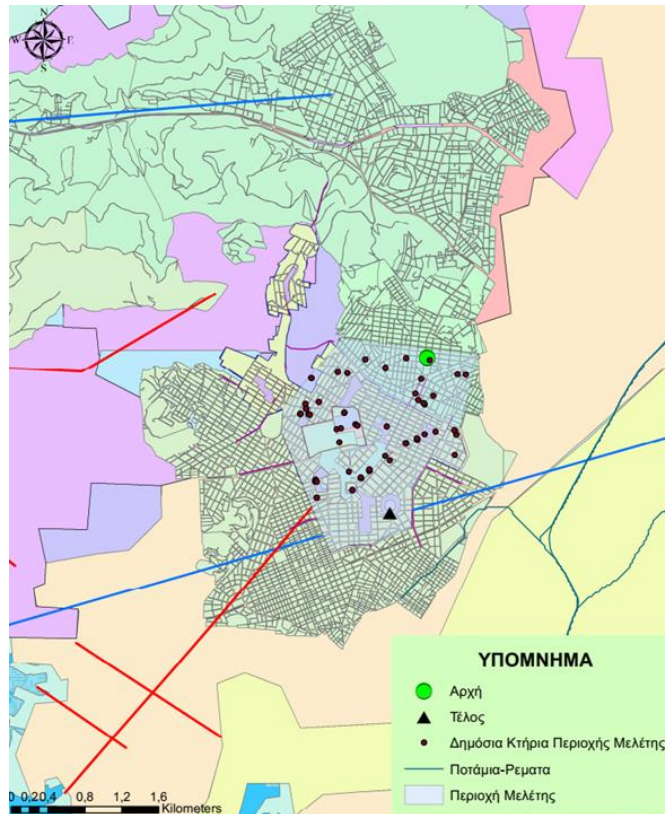
5.2.3 Διαμόρφωση Κριτηρίων

Με σκοπό την βέλτιστη χάραξη της σήραγγας, δημιουργήθηκαν θεματικά επίπεδα, το καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα κριτήριο στην διαδικασία της επιλογής της διαδρομής που θα ακολουθήσει η σήραγγα. Για να επιτευχθεί η βέλτιστη χάραξη της σήραγγας οριζοντιογραφικά πρέπει να οριστούν διαφορετικά βάρη σε κάθε θεματικό επίπεδο ώστε στο τέλος να προκύψει ένα τελικό σύνολο δεδομένων που θα μεταφράζει το συνολικό σταθμισμένο κόστος της διέλευσης της Σήραγγας στην περιοχή μελέτης.

Τα κελιά με τις χαμηλότερες τιμές κόστους αποτελούν τις κατάλληλες περιοχές για την διέλευση της σήραγγας. Η έννοια «Κόστος» χρησιμοποιείται όχι για να δώσει οικονομική έννοια στην προσέγγιση του προβλήματος, αλλά ως μέσο ποιοτικής εκτίμησης της βέλτιστης χάραξης, όπως προκύπτει από τα κριτήρια. Τα επιλεχθέντα κριτήρια του τελικού σταθμισμένου κόστους ορίστηκαν ως εξής :

- Η αποφυγή των δημοσίων κτηρίων παντός τύπου όσο είναι δυνατό καθώς και των κτηρίων ειδικών χρήσεων.
- Αποφυγή των εδαφών που χαρακτηρίζονται ως φλύσχος καθώς συνήθως τα στρώματα του είναι τεκτονικά καταπονημένα με αποτέλεσμα έντονες αποσαθρώσεις.
- Αποφυγή τελείως ενεργών ρηγμάτων και αποφυγή όσο είναι δυνατόν των θέσεων πιθανών ρηγμάτων.
- Αποφυγή μεγάλων επιφανειακών κλίσεων.
- Η ελάχιστη Απόσταση (Ευκλείδεια Απόσταση), συνεπώς το ελάχιστο δυνατό μήκος διαδρομής.

Παρακάτω γίνεται παρουσίαση της τελικής ψηφιοποιημένης περιοχής μελέτης με εμφανή τα δημόσια κτήρια, τα ποτάμια-ρέματα, τους γεωλογικούς σχηματισμούς, τα υπάρχοντα και τα πιθανά ρήγματα.



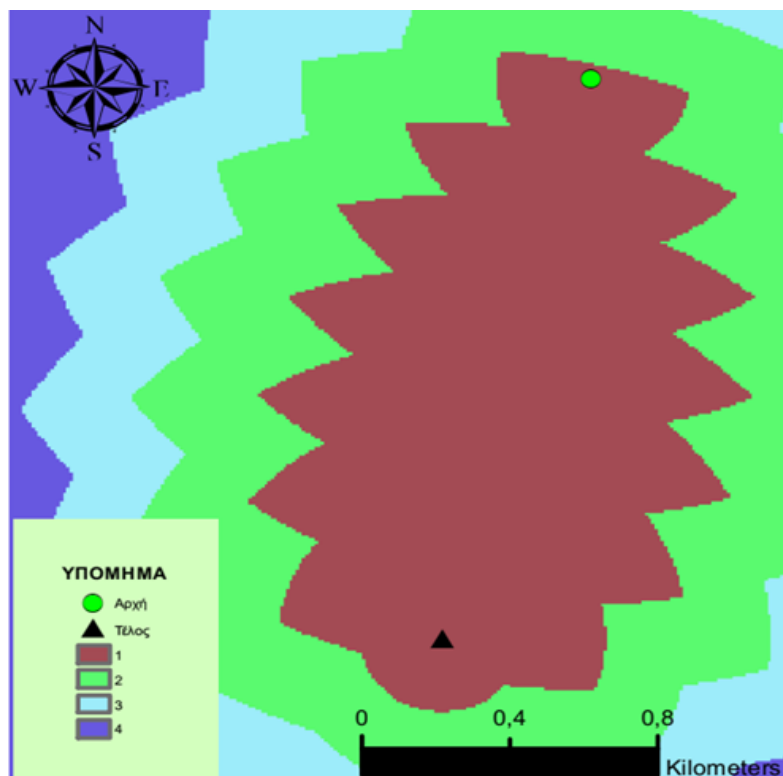
Εικόνα 5.6 : Χάρτης Τελικής ψηφιοποιημένης Περιοχής στην οποία διακρίνονται η Αφετηρία και ο Προορισμός της χάραξης

5.2.4 Δημιουργία Μοντέλου και εκπόνηση της διαδικασίας

Με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο ροής εργασιών μέσω του εργαλείου Model Builder ώστε να γίνει εξαγωγή της τελικής διαδρομής της σήραγγας. Λόγω ότι πολλά από τα διανυσματικά και ψηφιδωτά δεδομένα ήταν μεγάλης έκτασης και περιείχαν μεγάλη πληροφορία, για να μειωθεί η ανάγκη σε επεξεργαστική ισχύ χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο environment, με το οποίο ορίστηκε η έκταση στην οποία θα συντελούνται όλες οι διαδικασίες.

Το μοντέλο σε αρχική φάση διαμόρφωσε, κατάλληλα τα δεδομένα για να εισαχθούν στην αλληλουχία των εργαλείων, σε δεύτερη φάση υπολόγισε τα ψηφιδωτά των θεματικών επιπέδων των κριτηρίων και σε τρίτη φάση όρισε το συνολικό κόστος και την τελική διαδρομή. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι έχουν γίνει παραδοχές και απλοποιήσεις ώστε να ευκολυνθεί η διαδικασία και η προσεγγιστική χάραξη να είναι όσο το δυνατόν καλύτερη. Η διαδικασία για την κατασκευή του μοντέλου που ακολουθήθηκε είναι η εξής :

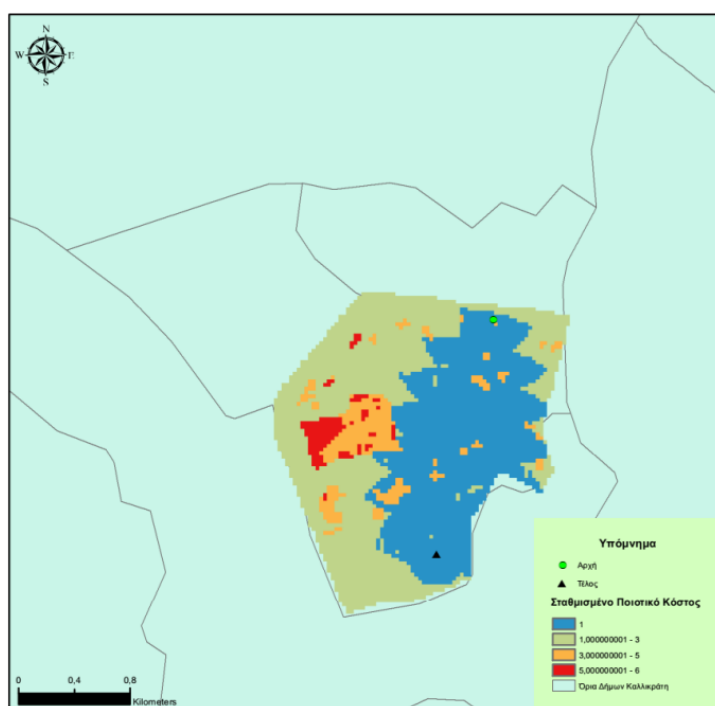
- Ορίσθηκαν σημεία Αφετηρίας και Προορισμού εντός της περιοχής μελέτης, τα οποία ταιριάζουν στις θέσεις τον υπό κατασκευή σταθμών της Αγίας Βαρβάρας και του Κορυδαλλού.
- Έγινε προβολή των σημείων αυτών με το εργαλείο Project στο ΕΓΣΑ 87.
- Υπολογίστηκε η ευκλείδεια Απόσταση και για τα δύο σημεία με το εργαλείο Euclidean Distance.
- Τα αποτελέσματα τους εισαχθήκανε στο εργαλείο Weighted Sum από το οποίο εξάχθηκε η Σταθμισμένη ευκλείδεια Απόσταση και για τα δύο σημεία για καλύτερη γραμμική συμπεριφορά της προκύπτουσας χάραξης. Παρόλο που το μετέπειτα εργαλείο σταθμισμένου κόστους συνυπολογίζει το σημείο εκκίνησης δεν συμπεριλαμβάνει ταυτόχρονα τις τιμές του σημείου προορισμού, έτσι υπάρχει μία λιγότερο γραμμική συμπεριφορά της προκύπτουσας χάραξης. Στην συνέχεια έγινε επαναταξινόμηση των τιμών με το εργαλείο Reclassify για την καλύτερη απόδοση του μετέπειτα εργαλείου της σταθμισμένης υπέρθεσης.



Εικόνα 5.7 : Το Σταθμισμένο Άθροισμα της ευκλείδειας απόστασης μεταξύ σημείου Αφετηρίας και σημείο Προορισμού

- Στην συνέχεια έγινε ο υπολογισμός των κλίσεων του εδάφους από το DEM με το εργαλείο Slope και στην συνέχεια Reclassify, επαναταξινομήθηκε σε 10 κλάσεις. Η κάθε κλάση εκφράζει την ανύψωση του εδάφους σε μούρες.

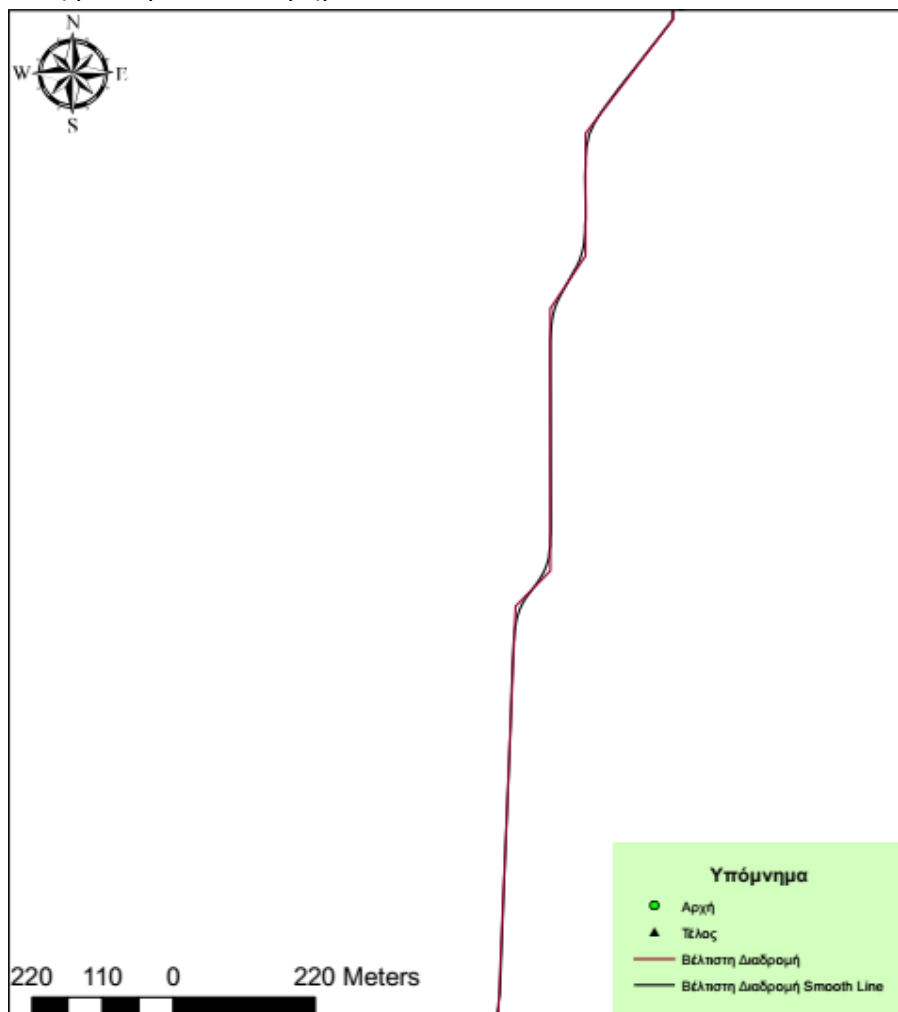
- Για να εντοπιστούν οι κατάλληλες περιοχές που μπορεί να χαραχθεί η σήραγγα χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο σταθμισμένης υπέρθεσης (Weighted Overlay), ώστε να βρεθεί το σταθμισμένο Ποιοτικό Κόστος. Τα εισαγόμενα δεδομένα είναι τα ψηφιδωτά από όλα τα θεματικά επίπεδα που επιζητά ο μηχανικός να υπερθέσει ώστε να εξάγει το σταθμισμένο Ποιοτικό Κόστος τους. Το συγκεκριμένο εργαλείο αποτελεί την «καρδιά» της διαδικασίας καθώς ανάλογα με τα βάρη που θα δοθούν στο κάθε θεματικό επίπεδο θα δημιουργηθούν ψηφιδωτά αρχεία που η κάθε εικονοψηφίδα τους έχει μία συγκεκριμένη τιμή. Ανάλογα με αυτήν την τιμή, παίρνει την τελική της μορφή η τελική χάραξη με την βοήθεια των παρακάτω εργαλείων. Τα θεματικά επίπεδα που εισέρχονται στο συγκεκριμένο εργαλείο έχουν μετατραπεί σε ψηφιδωτά με τα εργαλεία Polygon to Raster για τις πολυγωνικές οντότητες και με το Polyline to Raster για τα γραμμικά.



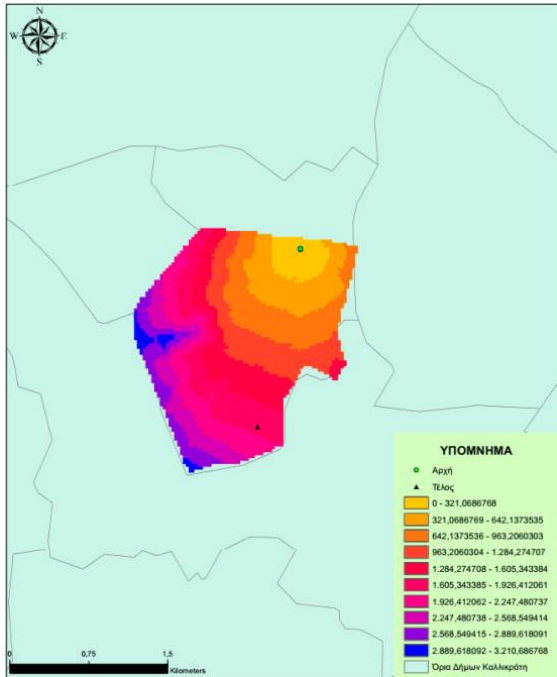
Εικόνα 5.8 : Το σταθμισμένο Ποιοτικό Κόστος στην περιοχή μελέτης έπειτα από την υπέρθεση όλων των χρησιμοποιούμενων θεματικών επιπέδων

- Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν τα θεματικά επίπεδα του κόστους απόστασης και της διαδρομής σε μορφή raster με τα εργαλεία, Cost Distance και Cost Path. Τα συγκεκριμένα εργαλεία δέχτηκαν το σταθμισμένο ψηφιδωτό Ποιοτικού Κόστους και το σημείο εκκίνησης, και το σημείο προορισμού με τις ελάχιστες τιμές Κόστους (Backlink raster) αντίστοιχα . Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το Κόστος Απόστασης.

- Στην συνέχεια η διαδρομή της σήραγγας μετατράπηκε σε πολυγωνική μορφή με το εργαλείο Raster to Polyline διότι η γραμμική αναπαράσταση προσεγγίζει καλύτερα την φυσική υπόσταση του άξονα της σήραγγας που χαράχθηκε.
- Τέλος έγινε εξομάλυνση της διαδρομής με το εργαλείο Smooth Line με στόχο την ρεαλιστικότερη απεικόνιση της Διαδρομής. Κατά γενική ομολογία η χάραξη μία σήραγγας δεν γίνεται να υλοποιηθούν αρθρώσεις γωνιών. Έτσι με αυτό το εργαλείο και με την χρησιμοποίηση του αλγορίθμου ΡΑΕΚ που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ορίστηκε επιτρεπόμενο όριο για την μετακίνηση των κορυφών της πολυγωνικής γραμμής στα 40 μέτρα (λόγω κυρίως του μεγάλου μεγέθους της εικονοψηφίδας) και την αντικατάσταση τους με καμπυλωτά τμήματα.

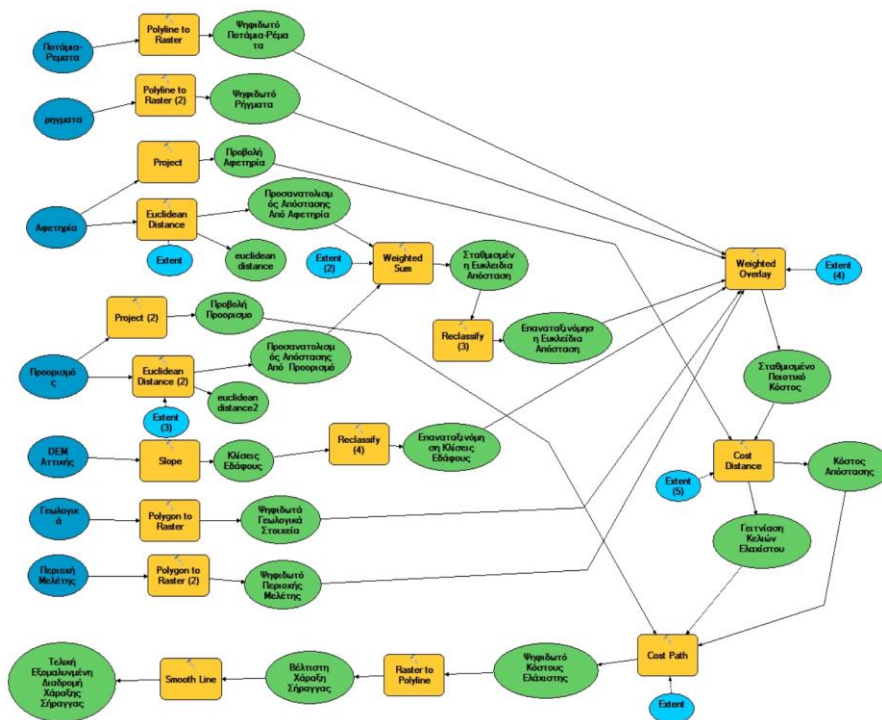


Εικόνα 5.9 : Απεικόνιση της διαφοράς μεταξύ την πολυγωνικής γραμμής και της εξομαλυμένης μορφής της βέλτιστης χάραξης.



Εικόνα 5.10 : Το παραγόμενο θεματικό επίπεδο του Κόστους Απόστασης από το εργαλείο Cost Distance

Το μοντέλο που προέκυψε από την εφαρμογή των παραπάνω εργαλείων, απεικονίζεται παρακάτω ως διάγραμμα ροής όπου με μπλε ελλείψεις συμβολίζονται τα εισαγόμενα θεματικά επίπεδα (input), ως κίτρινα ορθογώνια τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία και τέλος ως πράσινες ελλείψεις τα εξαγόμενα αποτελέσματα (output).



Εικόνα 5.11: Το διάγραμμα ροής όπως αυτό κατασκευάστηκε στο εργαλείο Model Builder

Επιπλέον από το διάγραμμα ροής εξάχθηκε και ο κώδικας προγραμματισμού σε γλώσσα Python (Script) που χρησιμοποιεί το Arc.Map ώστε να πραγματοποιήσει όλη την διαδικασία.

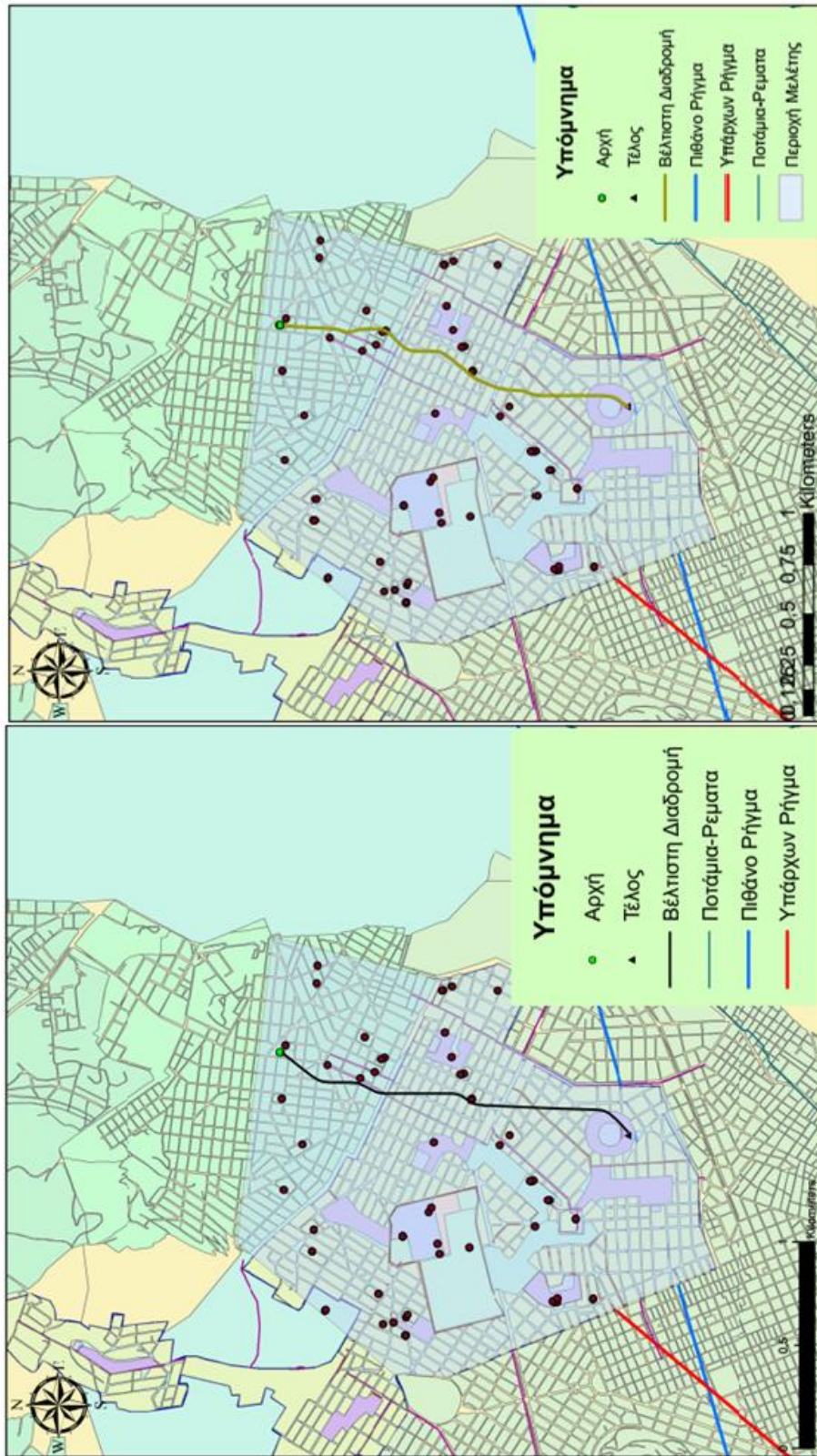
5.2.5 Αποτελέσματα του Μοντέλου

Το αποτέλεσμα του παραπάνω μοντέλου προέκυψε μία τελική εξομαλυμένη διανυσματική γραμμή η οποία παρουσιάζει την χάραξη της σήραγγας λαμβάνοντας υπόψη όλα τα προκαθορισθέντα κριτήρια. Η τελική χάραξη όπως αναφέρθηκε και παραπάνω προέκυψε από τον καθορισμό των βαρών στο εργαλείο της υπέρθεσης. Κατασκευάστηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις με διαφορετικά βάρη. Σημειώνεται πως το άθροισμα των βαρών πρέπει να είναι ίσο με την μονάδα (100%).

Στην Εικόνα 5.12 φαίνονται οι δύο διαφορετικές χαράξεις του άξονα της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα στην εικόνα α) παρουσιάζεται η χάραξη με κατανομή βαρών 20% στην συντομότερη διαδρομή, 30% στην αποφυγή χάραξης κάτω από δημόσια κτήρια ή κτήρια ειδικών χρήσεων, 15% στην επιλογή αργιλικών ή σχιστολιθικών σχηματισμών για την κατασκευή της σήραγγας, 5% στην αποφυγή ρεμάτων ή ποταμών καθώς στην περιοχή δεν υπάρχουν μεγάλα ποτάμια ή ρέματα, 15% την μη επιθυμητή πορεία σε υπάρχοντα και πιθανά ρήγματα με μεγαλύτερο βάρος στα υπάρχοντα και τέλος 15% στις κλίσεις του εδάφους με φυσικά οι μικρότερες κλίσεις να είναι οι περισσότερο επιθυμητές.

Αντίθετα στην δεύτερη εφαρμογή το μεγαλύτερο βάρος δόθηκε στην συντομότερη διαδρομή με 40%, ενώ στα υπόλοιπα κριτήρια 20% δόθηκε στην επιλογή κατάλληλου εδάφους (αργιλικοί και σχιστολιθικοί σχηματισμοί), από 15% στην αποφυγή δημοσίων κτηρίων, από 10% στην αποφυγή ρηγμάτων παντός τύπου και στην επιλογή μικρότερων επιφανειακών κλίσεων και τέλος 5% για την αποφυγή ποταμών και ρεμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί πως ο μηχανικός ορίζει την σημασία κάθε κριτηρίου βάσει της δικής του λογικής, της βιβλιογραφίας, των διαθέσιμων στοιχείων για την περιοχή μελέτης και των υπαρκτών περιορισμών στην διαδικασία.



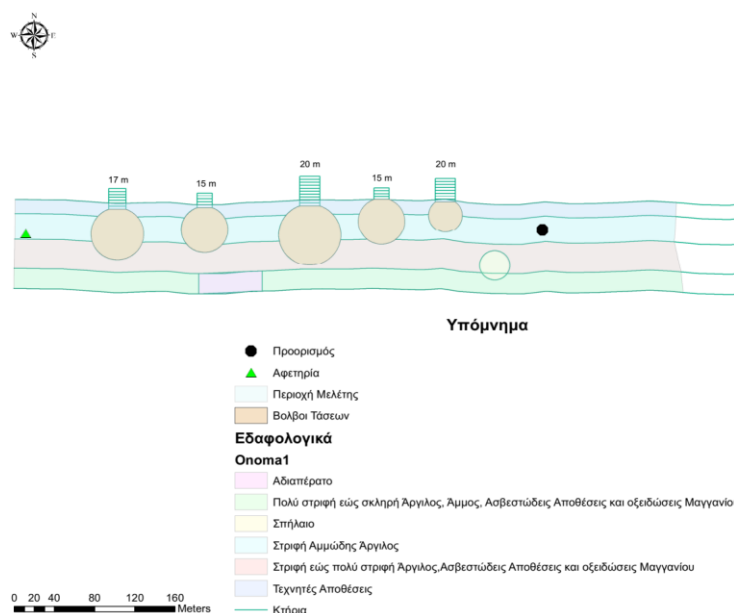
Εικόνα 5.12 : Απεικόνιση των δύο διαφορετικών διαδρομών της χάραξης σήραγγας σε κατοικημένες περιοχές από τα ίδια σημεία Αφετηρίας και Προορισμού . Από Αριστερά προς τα Δεξιά α) Βέλτιστη Διαδρομή 1 β) Βέλτιστη Διαδρομή 2

5.3 2^η Εφαρμογή : Βέλτιστη Κατά Βάθος Χάραξη Σήραγγας σε Κατοικημένες Περιοχές

5.3.1 Γενικό Πλαίσιο της Περιοχής Μελέτης

Η δεύτερη εφαρμογή, με την οποία πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική αφορά την κατά βάθος χάραξη σήραγγας σε κατοικημένες περιοχές λαμβάνοντας υπόψη γεωτεχνικά και δομοστατικά κριτήρια. Η χάραξη της σήραγγας κάτω από το έδαφος αποτελεί την σημαντικότερη εργασία της σηραγγοποιίας καθώς συνήθως πολλές φορές πρέπει να γίνουν αλλαγές στην διαδρομή που θα ακολουθηθεί είτε λόγω εμποδίων που δεν έχουν προβλεφθεί. Επιπλέον σε βαριά κατοικημένες περιοχές όπως της Αγίας Βαρβάρας και του Κορυδαλλού, όπου μελετώνται το βάθος της χάραξης εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους όσο και από τις επιφανειακές κατασκευές και τις τάσεις που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση των θεμελιώσεων και του εδάφους.

Η περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι ένα κομμάτι 500 μέτρων από την τελική οριζοντιογραφική χάραξη που προέκυψε από την πρώτη εφαρμογή με τελικό στόχο την προσέγγιση σε ικανοποιητικό βαθμό της βέλτιστης χάραξης κάτω από την επιφάνεια του εδάφους η οποία θα παρουσιαστεί στα παρακάτω εδάφια σε μορφή γεωλογικής μηκοτομής η οποία θα κατασκευαστεί στο πρόγραμμα ArcMap.



Εικόνα 5.13 : Περιοχή μελέτης για την Κατά Βάθος Χάραξη Σήραγγας στην περιοχή Αγίας Βαρβάρας- Κορυδαλλού

5.3.2 Συλλογή και Διαχείριση Δεδομένων

Στην συνέχεια έπειτα τον καθορισμό της περιοχής μελέτης ακολούθησε ο ορισμός των απαραίτητων δεδομένων και η συλλογή τους. Τα απαραίτητα δεδομένα ώστε να επιτευχθεί η πραγματοποίηση του μοντέλου βέλτιστης χάραξης της διαδρομής καθορίστηκαν ως εξής :

- Γραμμικά διανυσματικά δεδομένα που να καθορίζει την επιφάνεια και τα ύψη της επιφάνειας του εδάφους ώστε να λειτουργήσει ως υπόβαθρο για τα υπόλοιπα δεδομένα.
- Δεδομένα που έχουν ληφθεί από γεωτρήσεις (boreholes) ώστε να καθοριστούν οι εδαφικές στρώσεις κάτω από την επιφάνεια και τα γεωλογικά τους χαρακτηριστικά (c , γ , ϕ).
- Δεδομένα επιφανειακών κατασκευών.
- Δεδομένα που να παρουσιάζουν τους βολβούς τάσεων όπως έχουν οριστεί στο εδάφιο 3.3 καθώς επίσης και την φόρτιση τους.

Λόγω της έλλειψης πραγματικών δεδομένων για τα παραπάνω προαπαιτούμενων έγιναν ορισμένες παραδοχές ώστε να γίνει δυνατόν να δουλέψει το υπό κατασκευή εργαλείο λήψης αποφάσεων.

Τα κτήρια και οι μορφή τους είναι κατασκευασμένα για την εξήγηση της λειτουργίας του μοντέλου και δεν είναι υπαρκτά στην πραγματικότητα. Η κατακόρυφη φόρτιση κάθε ορόφου λήφθηκε 200 (KN/m), το ύψος κάθε ορόφου θεωρείται περίπου 3 μέτρα ανά προσέγγιση. Οι διαστάσεις του (L, B) όπου B είναι το πλάτος κτηρίου και L το μήκος . Από τα κτήρια της μηκοτομής μόνο το πέμπτο κατά σειρά θεωρήθηκε ως τετραγωνικό (L=B). Επίσης όσον αφορά την θεμελίωση του θεωρήθηκε ότι για όλες τις περιπτώσεις πρόκειται και κοιτοστρώσεις.

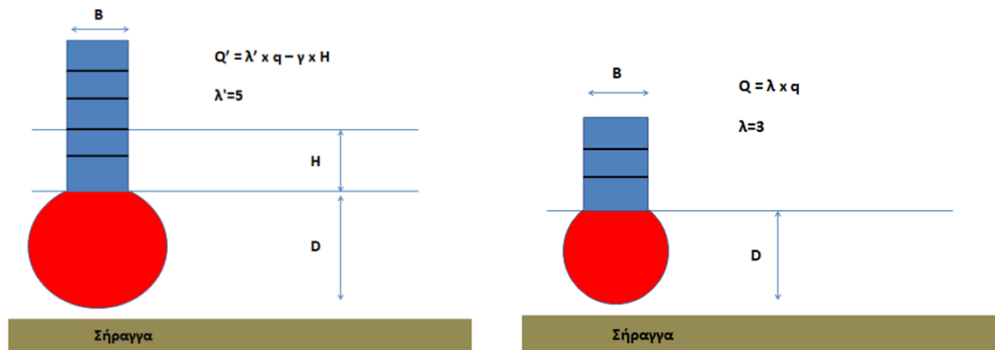
Όσον αφορά τις τάσεις και την κατακόρυφη φόρτιση τους στο έδαφος, από την θεωρία αποφασίστηκε να θεωρηθεί το βάθος $3*B$ (όπου B το πλάτος κτηρίου) το μέγιστο βάθος επιρροής των τάσεων από την θεμελίωση κτηρίων με διαφορετικό μήκος και πλάτος ενώ για τετραγωνικό κτήριο θεωρήθηκε το βάθος $1,5*B$ ως μέγιστο βάθος επιρροής των τάσεων. Για τον υπολογισμό της κατακόρυφης φόρτισης από το κτήριο χρησιμοποιήθηκε η σχέση :

$$Q' = \lambda' * q - (\gamma * H) \quad (5.1)$$

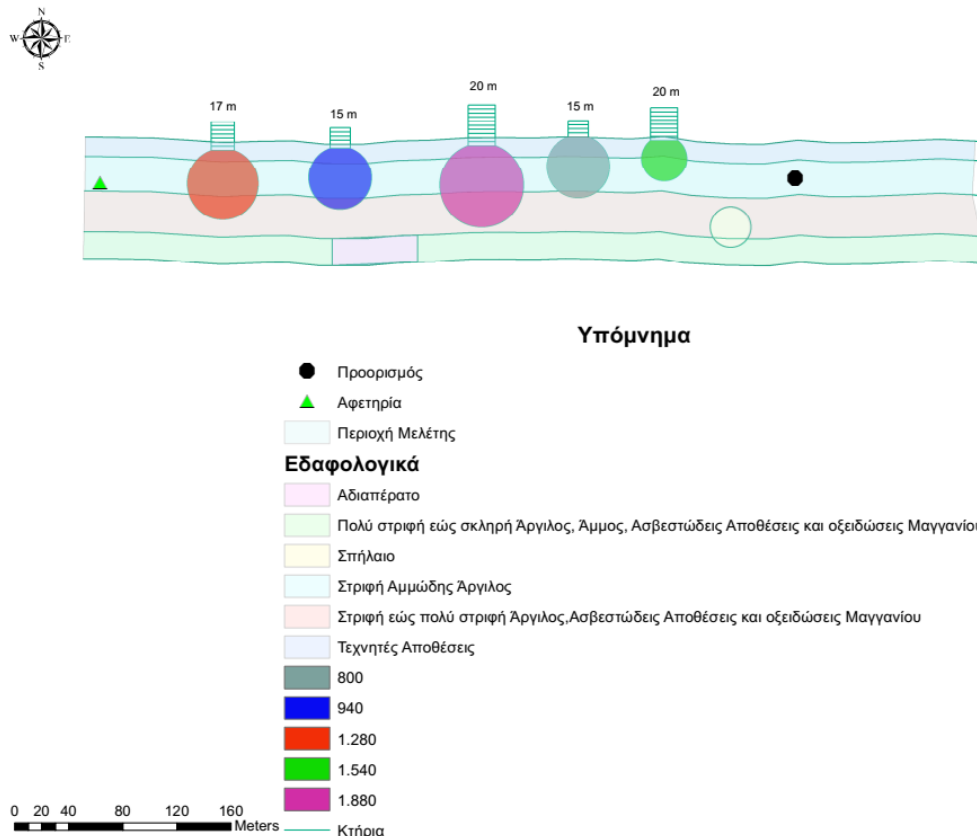
Όπου :

- Q' : Η συνολική κατακόρυφη φόρτιση από το κτήριο στο έδαφος.
- λ' : Ο αριθμός των ορόφων κάθε κτηρίου.

- q : Η φόρτιση κάθε ορόφου (200 KN/m).
- H : Η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ επιφάνειας του εδάφους και θεμελίωσης του κτηρίου.



Εικόνα 5.14 : Από Αριστερά και Δεξιόστροφα α) Βολβός Τάσεων από φόρτιση του εδάφους κτηρίου με 2 υπόγεια (β) Βολβός Τάσεων από φόρτιση του εδάφους κτηρίου χωρίς υπόγειο



Εικόνα 5.15 : Τιμές Φορτίσεων των Βολβών Τάσεων λόγω των Κτηρίων της Επιφάνειας

Τα εδαφολογικά δεδομένα λόγω έλλειψης πραγματικών δεδομένων για την περιοχή λήφθηκαν από τα ελεύθερα δεδομένα της Μετρό ΑΕ τα οποία όμως αφορούν

παραπλήσιο τμήμα και όχι το τμήμα μελέτης. Ωστόσο λόγω της φύσης του εδάφους (αργιλικό) όπως παρουσιάστηκε στην πρώτη εφαρμογή γίνεται η υπόθεση ότι ταιριάζουν στην περιοχή ως ένα ποσοστό.

Τέλος η επιφάνεια του εδάφους λήφθηκε από την οριζοντιογραφική χάραξη με την βοήθεια του εργαλείου Polyline to Points, το οποίο μετατρέπει τη γραμμή σε σημεία. Στην συνέχεια με την εφαρμογή των Windows «Σημειωματάριο» αντιστρέφονται οι δύο στήλες του πίνακα που δείχνουν την θέση και το ύψος κάθε σημείου για να ταιριάζουν σε δυσδιάστατες συντεταγμένες (x,y) όπως σε μία γεωλογική μηκοτομή. Τέλος τα σημεία μετατρέπονται ξανά σε γραμμή με την εντολή points to polyline.

Έπειτα την συλλογή όλων των απαιτούμενων δεδομένων και την αρχική τους επεξεργασία, μέσω του εργαλείου ArcCatalog, έγινε σύνδεση του προγράμματος ArcMap, με τον φάκελο προέλευσης τους και ακολούθησε η εισαγωγή τους στην γεωβάση που χρησιμοποιήθηκε και κατά την πρώτη εφαρμογή για την καλύτερη διαχείριση τους.

5.3.3 Διαμόρφωση Κριτηρίων

Με σκοπό την χάραξη της σήραγγας κάτω από την επιφάνεια του εδάφους με όσο μεγαλύτερο ρεαλισμό μέσω της εκπονούμενης διαδικασίας, όπως και στην πρώτη εφαρμογή, κατασκευάστηκαν θεματικά επίπεδα το καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα κριτήριο στην επιλογή της τελικής διαδρομής. Όπως και προηγουμένως το βασικό εργαλείο για την λειτουργία όλης της διαδικασίας είναι το εργαλείο της σταθμισμένης υπέρθεσης (Weighted Overlay), στο οποίο ορίστηκαν διαφορετικά βάρη στα διαφορετικά θεματικά επίπεδα. Έτσι προέκυψε το τελικό σύνολο δεδομένων σε ψηφιδωτή μορφή (raster), που απεικονίζει το συνολικό ποιοτικό κόστος της διέλευσης της διαδρομής μέσω από το κάθε κομμάτι της περιοχής μελέτης. Η τελική χάραξη ορίζεται ως το σύνολο των διαδοχικών κελιών με το χαμηλότερο κόστος. Τα βασικά κριτήρια που ορισθήκανε για την καλύτερη χάραξη της διαδρομής είναι τα εξής :

- Αρχικά η επίτευξη της συντομότερης δυνατής διαδρομής βάσει του κανόνα της ευθύτητας.
- Η αποφυγή όσο είναι δυνατών των περιοχών που βρίσκονται μέσα στα όρια των βολβών τάσεων που δημιουργούνται από τα κτήρια της περιοχής.
- Η αποφυγή των εμποδίων που έχουν ορισθεί ως αδιαπέρατο έδαφος ή ως σπήλαιο ως εν δυνάμει εμπόδια για την χάραξη.

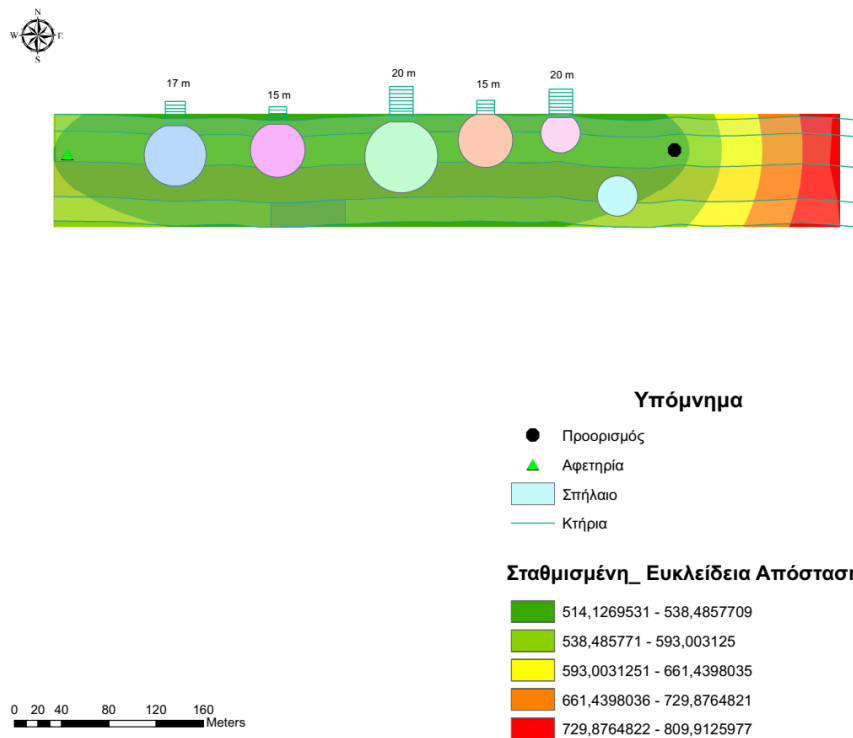
- Επιλογή κατάλληλου εδαφικού υλικού καθώς το αρχικό στρώμα αποτελείται από τεχνητές αποθέσεις και το τελευταίο στρώμα δεν είναι βέλτιστο να επιλεγεί καθώς πρέπει να γίνει πιο βαθιά χάραξη.

5.3.4 Δημιουργία Μοντέλου και εκπόνηση της Διαδικασίας

Με βάση τα προαναφερθέντα στο προηγούμενο εδάφιο κριτήρια δημιουργήθηκε ακόμη ένα μοντέλο εργασιών στα πλαίσια της συγκεκριμένης εφαρμογής με το εργαλείο Model Builder του προγράμματος ArcMap. Σε αρχική φάση διαμορφώθηκαν κατάλληλα τα δεδομένα ώστε να γίνει εισαγωγή τους στην αλληλουχία εργαλείων. Σε δεύτερη φάση, παράχθηκαν τα θεματικά επίπεδα με τα εφαρμοσμένα κριτήρια και στην Τρίτη και τελευταία φάση ορίστηκε το συνολικό ποιοτικό κόστος και η τελική χάραξη της διαδρομής της σήραγγας σε διανυσματική μορφή.

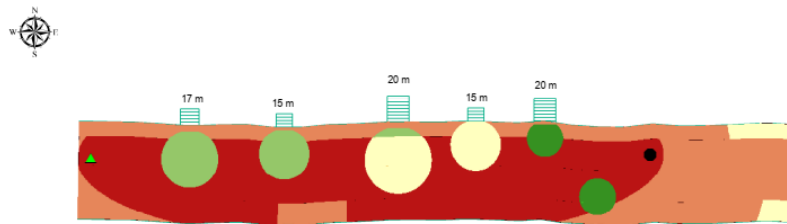
Τα βήματα της διαδικασίας, όπως διαγράφονται μέσω του διαγράμματος ροής του μοντέλου είναι τα εξής :

- Ορίσθηκαν σημεία Αφετηρίας και Προορισμού εντός της περιοχής μελέτης, τα οποία προσομοιάζουν τους δύο υπόγειους σταθμούς.
- Υπολογίστηκε η ευκλείδεια Απόσταση και για τα δύο σημεία με το εργαλείο Euclidean Distance. Το εύρος της επεξεργασίας των δεδομένων είναι αυτό της περιοχής μελέτης.
- Τα αποτελέσματα τους εισαχθήκανε στο εργαλείο Weighted Sum από το οποίο εξάχθηκε η Σταθμισμένη ευκλείδεια Απόσταση (Εικόνα 5.16) και για τα δύο σημεία για καλύτερη γραμμική συμπεριφορά της προκύπτουσας χάραξης. Στην συνέχεια έγινε επαναταξινόμηση των τιμών με το εργαλείο Reclassify για την καλύτερη απόδοση του μετέπειτα εργαλείου της σταθμισμένης υπέρθεσης.
- Στην συνέχεια έγινε εισαγωγή των θεματικών επιπέδων με τα εδαφολογικά στοιχεία, της ψηφιοποιημένης περιοχής μελέτης, των βολβών τάσεων και του σπηλαίου.
- Με το εργαλείο Union έγινε ένωση του πολυγώνου που ορίζει την περιοχή μελέτης με εκείνα που περιλαμβάνουν τους βολβούς τάσεων και του σπηλαίου ώστε να ορισθεί η περιοχή επιτρεπόμενης χάραξης.



Εικόνα 5.16 : Σταθμισμένο Άθροισμα Ευκλείδειας Απόστασης Αφετηρίας και Προορισμού

- Μετατροπή του διανυσματικού θεματικού επιπέδου “Επιτρεπόμενες περιοχές χάραξης” και του επιπέδου με τις εδαφολογικές στρώσεις σε ψηφιδωτά με την βοήθεια του εργαλείου Polygon to Raster. Στην συνέχεια και για τα δύο καινούργια παραγόμενα θεματικά εργαλεία ακολούθησε επαναταξινόμηση των τιμών τους για την καλύτερη λειτουργία του εργαλείου σταθμισμένης υπέρθεσης.
- Έπειτα έγινε εξαγωγή του Σταθμισμένου Ποιοτικού Κόστους Χάραξης (Εικόνα 5.17) με την βοήθεια του εργαλείου Weighted Overlay (σταθμισμένη υπέρθεση). Τα ψηφιδωτά που χρησιμοποιήθηκαν με διαφορετικά βάρη είναι αυτά επιτρεπόμενων περιοχών χάραξης, των εδαφολογικών στοιχείων και της σταθμισμένης ευκλείδειας απόστασης αφετηρίας και προορισμό. Κατασκευάστηκαν δύο διαφορετικές υπερθέσεις επιπέδων με διαφορετικά βάρη τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω. Οι κατηγορίες χωρίζονται σε 5 ζώνες με τις ζώνες με τις μικρότερες τιμές να είναι οι πιο κατάλληλες για την χάραξη της σήραγγας.

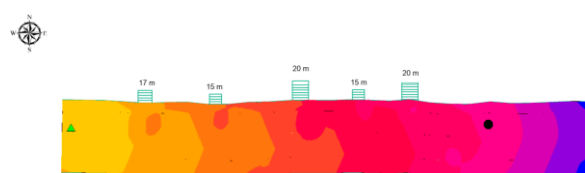


Σταθμισμένο Ποιοτικό Κόστος

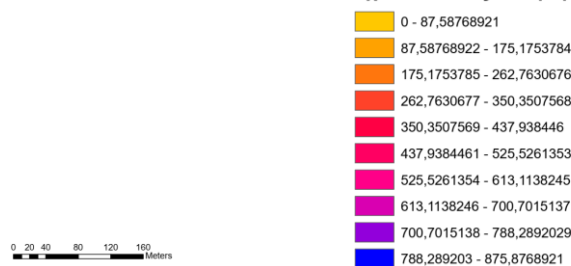


Εικόνα 5.17 : Το Σταθμισμένο Ποιοτικό Κόστος όπως αυτό προέκυψε από την υπέρθεση των χρησιμοποιούμενων θεματικών επιπέδων

- Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν τα θεματικά επίπεδα του κόστους απόστασης και της διαδρομής σε μορφή raster με τα εργαλεία, Cost Distance Και Cost Path. Τα συγκεκριμένα εργαλεία δέχτηκαν το σταθμισμένο ψηφιδωτό Ποιοτικού Κόστους και το σημείο εκκίνησης, και το σημείο προορισμού με το ψηφιδωτό με την γειτνίαση κελιών ελαχίστου κόστους (Backlink raster) αντίστοιχα.

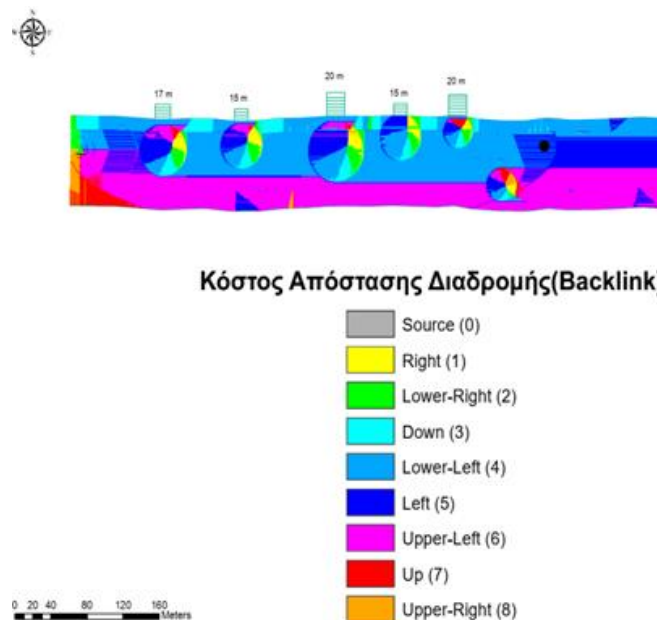


Ελάχιστο Κόστος Διαδρομής



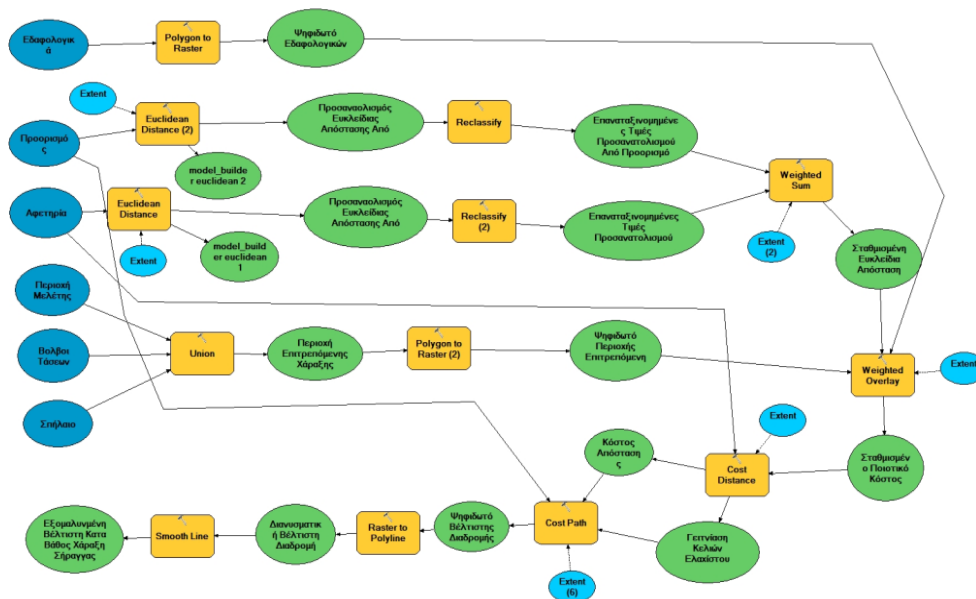
Εικόνα 5.18 : Το ελάχιστο Κόστος Διαδρομής στην δεύτερη εφαρμογή

- Η διαδρομή της σήραγγας μετατράπηκε σε γραμμική μορφή με το εργαλείο Raster to Polyline για την καλύτερη γραμμική αναπαράσταση της του άξονα της σήραγγας που σχεδιάστηκε από το εργαλείο λήψης αποφάσεων.
- Τέλος έγινε εξομάλυνση της διαδρομής με το εργαλείο Smooth Line με στόχο την ρεαλιστικότερη απεικόνιση της διαδρομής. Όπως και με την πρώτη εφαρμογή στη χάραξη μία σήραγγας δεν γίνεται να υλοποιηθούν αρθρώσεις γωνιών. Έτσι με την βοήθεια του συγκεκριμένου εργαλείου και με την χρησιμοποίηση του αλγορίθμου ΡΑΕΚ που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ορίστηκε επιτρεπόμενο όριο για την μετακίνηση των κορυφών της πολυγωνικής γραμμής στα 50 μέτρα (λόγω κυρίως του μεγάλου μεγέθους της εικονοψηφίδας) και την αντικατάστασή τους με καμπυλωτά τμήματα.



Εικόνα 5.19 : Το Θεματικό επίπεδο που παρουσιάζει την Γειτνίαση Κελιών Ελαχίστου Κόστους (Backlink raster)

Το μοντέλο που προέκυψε από την εφαρμογή των παραπάνω εργαλείων, απεικονίζεται παρακάτω (Εικόνα 5.20) ως διάγραμμα ροής όπου με μπλε ελλείψεις συμβολίζονται τα εισαγόμενα θεματικά επίπεδα (input), ως κίτρινα ορθογώνια τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία και τέλος ως πράσινες ελλείψεις τα εξαγόμενα αποτελέσματα (output).



Εικόνα 5.20 : Το διάγραμμα ροής όπως αυτό κατασκευάστηκε στο εργαλείο Model Builder για την δεύτερη εφαρμογή

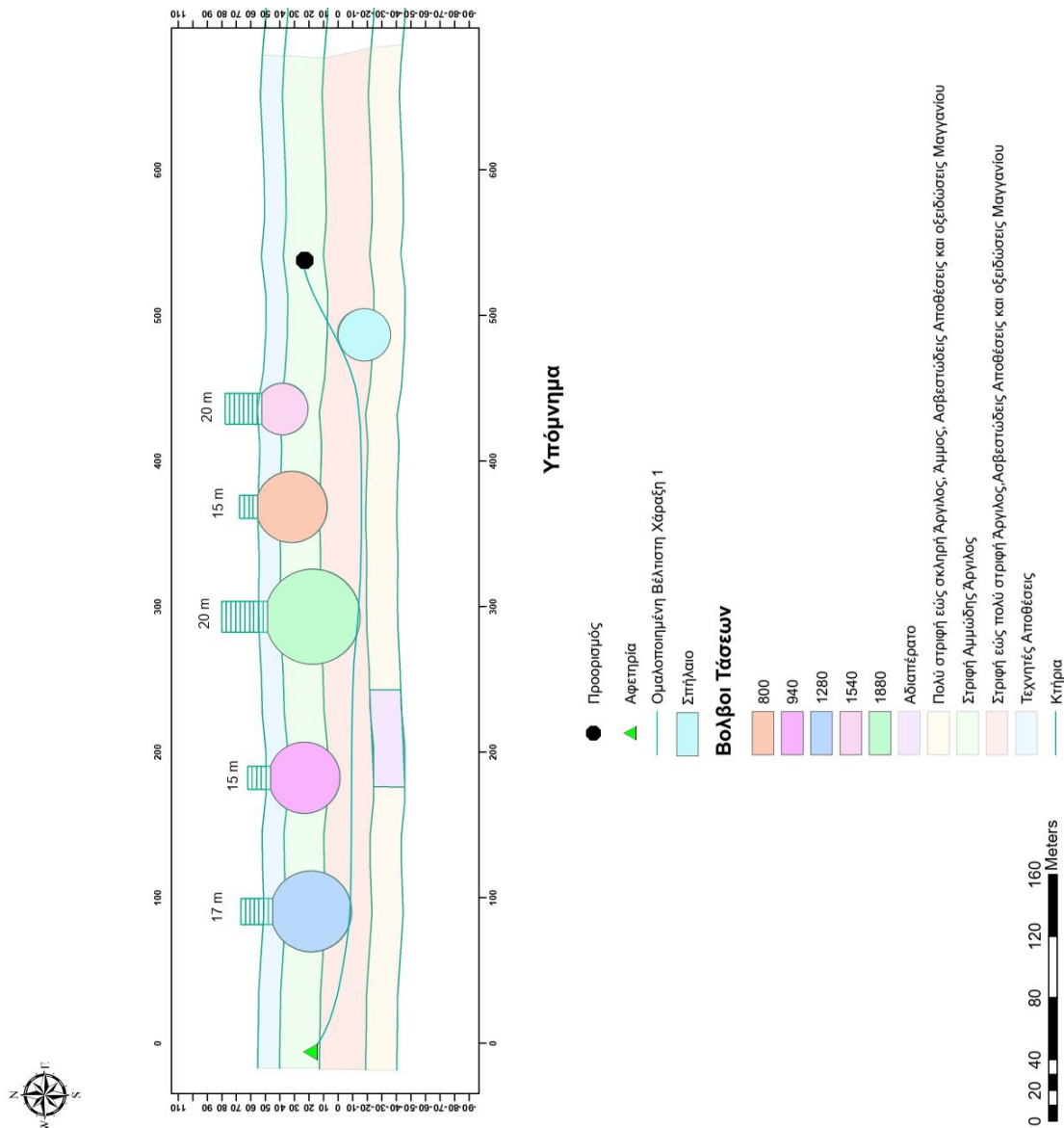
Από το διάγραμμα ροής εξάχθηκε και ο κώδικας προγραμματισμού σε γλώσσα Python (Script) που χρησιμοποιεί το ArcMap ώστε να μπορέσει να ξαναεκτελέσει όλη την διαδικασία όποτε είναι επιθυμητό.

5.3.5 Αποτελέσματα του Μοντέλου

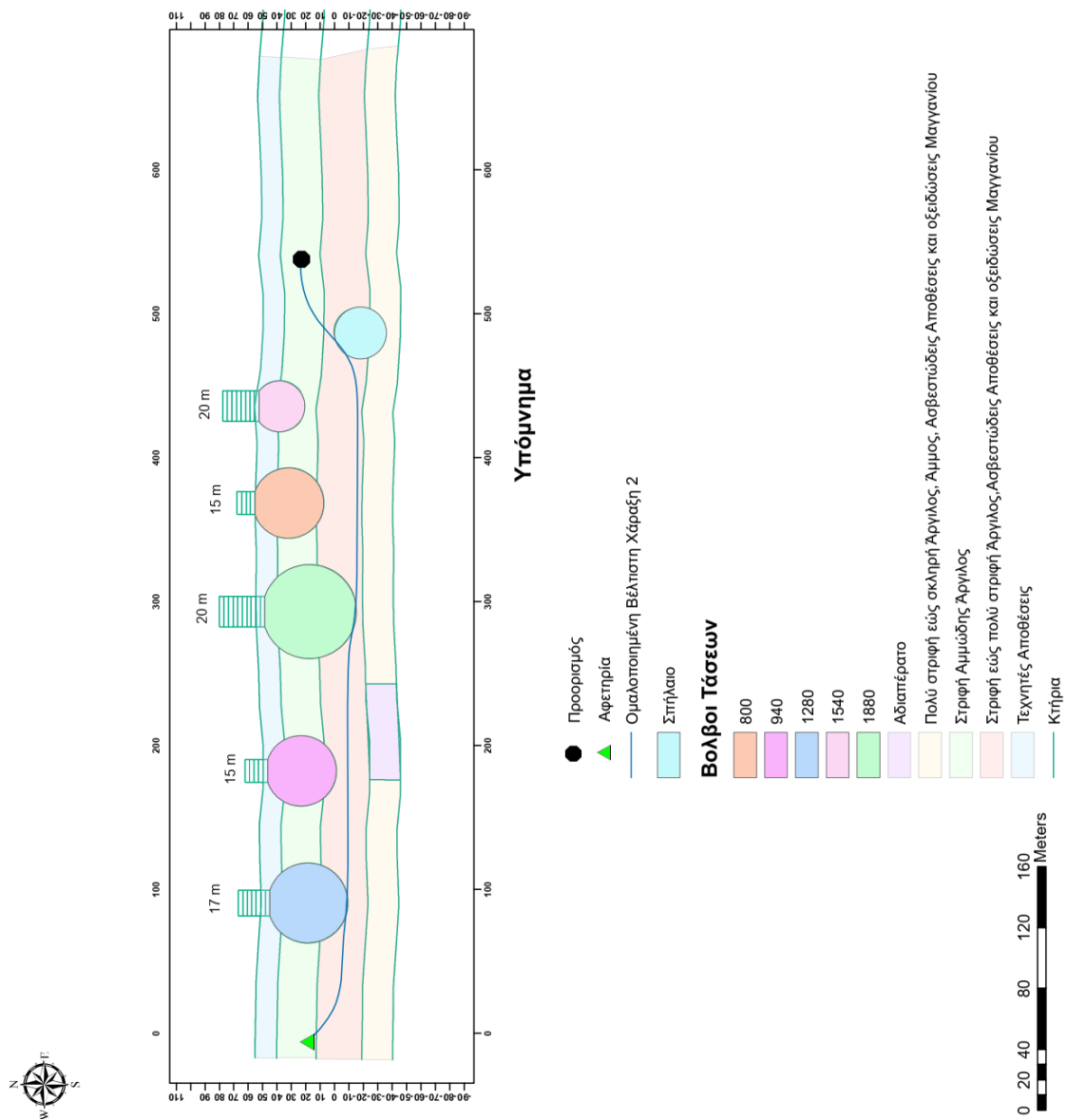
Ως αποτέλεσμα της χρησιμοποίησης του παραπάνω μοντέλου προέκυψε μία τελική εξομαλυμένη διανυσματική διαδρομή του άξονα της σήραγγας κάτω από το έδαφος, βάσει των κριτηρίων που ορίστηκαν. Ωστόσο, όπως και στην πρώτη εφαρμογή, το εργαλείο της σταθμισμένης υπέρθεσης εκτελέστηκε δύο διαφορετικές φορές στα βάρη με στόχο την εξαγωγή εναλλακτικών διαδρομών.

Πιο συγκεκριμένα στην εικόνα 5.21 και 5.22 διακρίνονται δύο διαφορετικές διαδρομές χάραξης που προέκυψαν από διαφορετικές κατανομές βαρών. Στην πρώτη εικόνα το μεγαλύτερο βάρος αντιστοιχίζεται στο θεματικό επίπεδο των βολβών τάσεων και την αποφυγή τους με 50% , στην συντομότερη διαδρομή με 30% και τέλος στα εδαφολογικά στοιχεία της περιοχής 20%. Στην δεύτερη πιθανή χάραξη τα βάρη που επιλέχθηκαν ήταν πιο ισοβαρή με 35% βάρος στο επίπεδο με την συντομότερη διαδρομή μεταξύ αφετηρίας και προορισμού, 35% στην αποφυγή των βολβών τάσεων, και τέλος 30% στην επιλογή κατάλληλου εδαφικού υλικού.

Οι παραπάνω προκύπτουσες εναλλακτικές δρομολογήσεις του άξονα της σήραγγας υπογραμμίζουν το γεγονός ότι ο εκάστοτε μηχανικός, βάσει των δικών του κριτηρίων μπορεί να καθορίσει το αποτέλεσμα με μια διαφορετική στάθμιση. Η τελική γεωλογική μηκοτομή προέκυψε με την βοήθεια του εργαλείου Data Frame.



Εικόνα 5.21 : Βέλτιστη Ομαλοποιημένη κατά Βάθος Χάραξη υπόγειας Σήραγγας όπως προέκυψε έπειτα την χρήση του Model Builder για το πρώτο θεματικό επίπεδο που προέκυψε από την σταθμισμένη υπέρθεση



Εικόνα 5.22 : Βέλτιστη Ομαλοποιημένη κατά Βάθος Χάραξη υπόγειας Σήραγγας όπως προέκυψε έπειτα την χρήση του Model Builder για το δεύτερο θεματικό επίπεδο που προέκυψε από την σταθμισμένη υπέρθεση

Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα και Πιθανές Μελλοντικές Προεκτάσεις

6.1 Συμπεράσματα και Αποτίμηση της Εργασίας

Κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάστηκαν και αποτιμήθηκαν οι πιθανοί κίνδυνοι που αφορούν την χάραξη μιας σήραγγας σε κατοικημένες περιοχές. Οι πιθανοί κίνδυνοι είχαν την μορφή εμποδίων στην χάραξη (π.χ. ρήγματα, δημόσια κτήρια) όσο και είδη γεωκινδύνων όπως είναι τα είδη των εδαφών και γεωλογικές συνθήκες. Στο Κεφάλαιο 5 αναπτύχθηκαν μέθοδοι προσδιορισμού των περιοχών προς αποφυγή, όπως είχαν καθοριστεί, εντός των ορίων της περιοχής μελέτης με την βοήθεια του λογισμικού ArcMap και παρουσιάστηκε πόσο μπορεί να επηρεάσουν στην τελική χάραξη μιας σήραγγας.

Ο προσδιορισμός αυτών των περιοχών κατέστη δυνατός με την εφαρμογή μιας αυθαίρετης κλίμακας σταθμισμένου κόστους, της οποίας οι τιμές αντιστοιχήθηκαν με τις τιμές των επιλεχθέντων κριτηρίων από διαφορετικά θεματικά επίπεδα, και στην συνέχεια με το εργαλείο της σταθμισμένης υπέρθεσης (Weighted Overlay) προέκυψαν οι κατάλληλες περιοχές για την χάραξη. Με αυτόν τον τρόπο έγινε προσπάθεια ανάπτυξης ενός εργαλείου υποστήριξης λήψης αποφάσεων κατά την χάραξη μιας σήραγγας σε κατοικημένες περιοχές και οριζοντιογραφικά και κατά βάθος με βασική εστίαση στην πρώτη εφαρμογή την αποφυγή δημοσίων κτηρίων και επιλογή της βέλτιστης διαδρομής, ενώ στην δεύτερη την αποφυγή των βολβών των τάσεων στο έδαφος από την ύπαρξη κτηρίων και την αποφυγή εμποδίων (π.χ σπήλαια).

Σύμφωνα με τους αρχικούς υποστόχους που είχαν καθοριστεί αρχικά γίνεται η αποτίμηση του ποσοστού επιτυχίας του αναπτυγμένου εργαλείου. Πιο συγκεκριμένα αρχικοί υποστόχοι της εργασίας ήταν : α) Ο ορισμός βασικών γεωκινδύνων που πιθανών να αντιμετωπιστούν με έμφαση στο είδος του εδάφους (καθιζήσεις) και την αποφυγή των βολβών τάσεων από τα κτήρια της επιφάνειας. β) Κατηγοριοποίηση των κτηρίων στις κατοικημένες περιοχές ανάλογα με την χρήση του και τις ιδιαιτερότητες του ώστε κάτω από σημαντικά κτήρια είτε πολιτιστικά είτε κοινωφελούς σημασίας να μην υπάρχει κίνδυνος λόγω καθιζήσεων. γ) Ανάπτυξη μεθοδολογίας εκτίμησης περιοχών γεωκινδύνων. δ) Βελτιστοποίηση επεξεργασίας και διαχείρισης δεδομένων. ε) Επιτάχυνση διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Όλοι οι παραπάνω υποστόχοι συνθέτουν τον βασικό στόχο της εργασίας που είναι η βέλτιστη χάραξη σήραγγας σε κατοικημένες περιοχές λαμβάνοντας υπόψη γεωτεχνικά και δομοστατικά κριτήρια.

Όσον αφορά τους υποστόχους εκπληρώθηκαν όλοι σε πολύ υψηλό βαθμό ειδικά στην πρώτη εφαρμογή με την οριζοντιογραφική χάραξη. Πιο συγκεκριμένα, μέσω του ArcMap, επιτεύχθηκε η αποτελεσματική αποθήκευση, διαχείριση και επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων παντός τύπου σε βάσεις δεδομένων, καθώς και η μοντελοποίηση της χάραξης αγωγού που αποφεύγει αυτόματα δημόσια κτήρια, ρήγματα, αυξημένες κλίσεις και μη συνεκτικά εδάφη, βάσει μιας ποιοτικής κλίμακας που καθορίζεται από τον εκάστοτε χρήστη. Ως αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτής προέκυψε η διανυσματική χάραξη της σήραγγας, η οποία ανάλογα με τα κριτήρια προσφέρει εξαγωγή εναλλακτικών διαδρομών.

Ωστόσο, η έλλειψη αρκετών κρίσιμων λεπτομερών δεδομένων, λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας οδήγησε σε αρκετές παραδοχές ειδικά στην κατά βάθος χάραξη της σήραγγας ενώ επιπλέον δεν κατέστη δυνατόν τον μαθηματικό ορισμό μιας ποσοτικής κλίμακας για την εκτίμηση των κατάλληλων περιοχών. Εκτός των υποστόχων που δεν επιτεύχθηκαν απολύτως κατά την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής, παρουσιάστηκαν και περιορισμοί λειτουργικής φύσης οι οποίοι συνοψίζονται στους παρακάτω :

- Απαίτηση μεγάλης υπολογιστικής ισχύς, ώστε το εργαλείο να μπορέσει να προσπελάσει όλες τις διαδικασίες σε περίπτωση περίπλοκων συνδέσεων δεδομένων-εργαλείων.
- Απαίτηση μεγάλου όγκου δεδομένων, δημιουργώντας προβλήματα στην εύρεση των προαπαιτούμενων θεματικών επιπέδων.
- Απλοποίηση της διαδικασίας χάραξης σηράγγων καθώς δεν έχουν συμπεριληφθεί στην μελέτη οι τάσεις που μπορούν να δεχτούν καθώς επίσης και άλλοι σημαντικοί γεωκίνδυνοι.
- Ύπαρξη προβλήματος με την ακρίβεια των δεδομένων, καθώς το ψηφιακό μοντέλο εδάφους δίνει ακρίβεια εικονοψηφίδας 25 μέτρων και η ακρίβεια των γεωαναφορών είναι της τάξης των 15 μέτρων με το υπάρχον υπόβαθρο.

6.2 Μελλοντικές προεκτάσεις της μεθοδολογίας και του εργαλείου υποστήριξης λήψης αποφάσεων.

Στην σημερινή εποχή ολοένα αυξάνεται η ανάγκη χρήσης των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων για την υποστήριξη λήψης αποφάσεων που έχουν να κάνουν με οποιουδήποτε είδους χάραξη μεγάλου μήκους ειδικά μέσα σε κατοικημένες περιοχές. Το σκοπό αυτό προσπαθεί να εκπληρώσει ως κάποιο βαθμό η παρούσα διπλωματική, με την βελτιστοποίηση της χάραξης σηράγγων σε

κατοικημένες περιοχές. Φυσικά το συγκεκριμένο εργαλείο βρίσκεται σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης και επιδέχεται σημαντικές βελτιώσεις και ως προς την πληρότητα των δεδομένων του αλλά και της επεξεργασίας τους σε ένα Γ.Π.Σ . Καταληκτικά μελλοντικές προοπτικές για εφαρμογή του εργαλείου λήψης αποφάσεων παρουσιάζονται παρακάτω :

- Περαιτέρω ανάπτυξη του υπάρχοντος εργαλείου, το οποίο με τη συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων μεγάλου όγκου και την επεξεργασία του, να έχει την δυνατότητα με μία αυτόματη διαδικασία να υπολογίσει την απαραίτητη ποσοτική κλίμακα των περιοχών προς αποφυγή και τις πιθανότητες εμφάνισης βασικών κινδύνων στην κάθε πιθανή χάραξη.
- Σύνδεση του εργαλείου με τα συστήματα επιτόπιων μετρήσεων του πεδίου κατά την διάρκεια διάνοιξης μίας σήραγγας σε κατοικημένες περιοχές, ώστε με την παραμικρή αλλαγή στις υπάρχουσες συνθήκες (είτε εδαφολογικές είτε λόγω ύπαρξης εμποδίου παντός φύσεως), να γίνεται άμεση επαναχάραξη του συγκεκριμένου τμήματος). Έτσι η διαδικασία της χάραξης-εκσκαφής θα γίνει σημαντικά πιο γρήγορη και πιο ασφαλής ως προς τις επιφανειακές κατασκευές.
- Ως συνέχεια της παραπάνω εφαρμογής, είναι δυνατόν να γίνει σύνδεση του εργαλείου με κάποιο σύστημα εντοπισμού παγκόσμιας θέσης (π.χ G.P.S, GLONASS, GALILEO).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Albrecht, J. (2015), “Geographic data models”, <http://www.geography.hunter.cuny.edu/~jochen/GTECH361/lectures/lecture05/concepts/03%20-%20Geographic%20data%20models.html> (πρόσβαση 19/1/2019)
2. A. Mouratidis (2008) The “Cut-and-Cover” and “Cover-and-Cut” Techniques in Highway Engineering Vol. 13, Bund. F EJGE
3. ArcGIS Resource Center (2012), “ArcGIS Help Library”, [http://help.arcgis.com/EN/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/Welcome to the ArcGIS Help Library](http://help.arcgis.com/EN/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/Welcome%20to%20the%20ArcGIS%20Help%20Library) (πρόσβαση 20/1/2019)
4. Barnes, G. (2005), Εδαφομηχανική : Αρχές και Εφαρμογές, Αθήνα : Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
5. Boscardin M. D., Coeding E.G. (1989), “Building response to excavation – induced settlement” J. of Geot. Eng., ASCE, Vol. 115, No 1, Jan. 1989, pp. 1-21
6. Burland, J. B., Wroth, C. P. (1974), “Allowable and differential settlement of structures, including damage and soil – structure interaction”, Proceedings, Conference on Settlement of Structures, Cambridge University, Cambridge, England, 1974, pp. 611-65.
7. Burrough, P. (1986), Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assesment, Oxford: Oxford University Press.
8. J.N.Franzius, D.M.Potts, J.B.Burland (2006) The response of surface structures to tunnel construction, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering 159 Issue GEI.
9. Mair, R., & Taylor, R. (1993). Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. Geotechnique (43), pp. 315-320.
10. Marathon Data Systems (2008), “Προϊόντα ArcGIS”, <http://www.marathondata.gr/arcgis.htm> (πρόσβαση 20/1/2019).
11. O'Reilly, M. Evaluating and predicting ground settlements caused by tunneling. London Clay Tunneling '88, (pp. 231-241). London, IMM.
12. O'Reilly, M., & New, B. (1982). Settlements above tunnels in the united Kingdom - their magnitude and prediction. Tunnelling '82, (pp. 173-181). London. IMM.
13. Robbins. (2009), Tunnel Boring Machines, Appendix D.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αργιαλάς Δ. (1998), Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση, Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
2. Δημακόπουλος Α, (2010), Μελέτη των καθιζήσεων λόγω διάνοιξης δίδυμης σήραγγας μετρό Θεσσαλονίκης στο τμήμα Αγία Σοφία – Πανεπιστήμιο, Αθήνα : Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (Ε.Μ.Π)
3. Καβαδδός, Μ. (2005), Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
4. Καβαδδός, Μ (2005), Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων, Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
5. Κουτσόπουλος, Κ. (2009), Πραγματεία Ανάλυσης Χώρου-Τόμος Α : Θεωρία, Αθήνα : Εκδόσεις Παπασωτηρίου
6. Σακελλαρίου Μ. (2008), Γεωτεχνική Μηχανική, Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
7. Σοφιανός Α. (2018), Τεχνικές διάνοιξης Σηράγγων, Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
8. Σοφιανός Α, (2015), Υποστήριξη υπογείων έργων, Αθήνα : Εκδόσεις Κάλλιπος
9. Σωμαράς, Χ. (2013), “ Τι είναι τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα ”, <http://xsomaras.somweb.gr/?p=469> (πρόσβαση 21/1/2019)
10. Τσουγκράνης Σ. (2015), Ανάπτυξη εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων σε περιβάλλον Γεωγραφικών Πληροφορικών Συστημάτων για την αποφυγή γεωκινδύνων κατά την χάραξη αγωγών μεγάλου μήκους, Αθήνα : Διπλωματική Εργασία (Ε.Μ.Π)
11. Φώτης Γ, (2010), “ Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα”, Αθήνα : Εκδόσεις Γκόβοστη
12. Wikipedia Project (2019), “Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα”, https://el.wikipedia.org/wiki/Σύστημα_Γεωγραφικων_Πληροφοριών (πρόσβαση 17/1/2019)
13. Wikipedia Project (2019), “ Δήμος Αγίας Βαρβάρας”, https://el.wikipedia.org/wiki/Αγία_Βαρβάρα_Αττικής (πρόσβαση 12/2/2019)
14. Wikipedia Project (2019), “ Δήμος Κορυδαλλού” , https://el.wikipedia.org/wiki/Κορυδαλλός_Αττικής (πρόσβαση 12/2/2019)

