



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΠΡΟΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

ΡΩΣΣΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΠΕΝΑΡΔΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

Αθήνα 2023

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
EXTENDED ABSTRACT	ii
1.Εισαγωγή	1
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	1
1.2. Κατασκευή των σηράγγων τα τελευταία χρόνια.....	4
1.3 Σημασία και οφέλη των έργων σηράγγων.....	5
1.4 Αντικείμενο και σκοπός.....	5
2. Συμβατική μέθοδος διάνοιξης και μέτρα υποστήριξης	7
2.1 Συμβατική μέθοδος διάνοιξης.....	7
2.2 Μέτρα υποστήριξης σηράγγων.....	11
3. Τεχνικογεωλογική συμπεριφορά και γεωτεχνική ταξινόμηση σχηματισμών ...18	
3.1 Συσχέτιση της γεωλογίας με τη συμπεριφορά των σηράγγων.....	18
3.2 Μέτρο ελαστικότητας.....	18
3.3 Μοναξονική αντοχή άρρηκτου πετρώματος σ_{ci}	20
3.4 Ειδικό βάρος γ_s	21
3.5 Δείκτης γεωλογικής αντοχής GSI	22
3.6 Σύστημα RMR (Bieniawski).....	24
3.7 Εμβαδόν διατομής της σήραγγας	27
3.8 Ύψος υπερκειμένων Η.....	27
4. Κόστος κατασκευής σηράγγων	29
4.1 Εισαγωγή στο κόστος των κατασκευών.....	29
4.2 Κόστος κατασκευής των σηράγγων.....	29

4.3 Τιμολόγηση Ελληνικών σηράγγων.....	36
5. Νευρωνικά δίκτυα.....	46
5.1 Εισαγωγή.....	46
5.2 Ιστορική αναδρομή.....	46
5.3 Βιολογικό νευρωνικό δίκτυο.....	47
5.4 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	50
5.5 Αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων.....	52
5.6 Σύγχρονες εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων.....	52
6. Ανάπτυξη μοντέλων τεχνητών νευρωνικών δικτύων με σκοπό την εκτίμηση του κόστους της άμεσης και τελικής επένδυσης.....	54
6.1 Εισαγωγή.....	54
6.2 Δεδομένα ανάλυσης.....	55
6.3 Εισαγωγή δεδομένων και παραμετροποίηση.....	57
6.4 Ανάπτυξη των μοντέλων.....	61
7. Συμπέρασμα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	82
7.1 Συμπεράσματα/Περιορισμοί.....	82
7.2 Μελλοντική εργασία/Προτάσεις.....	85
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	86
Ελληνική βιβλιογραφία.....	87
Ηλεκτρονική βιβλιογραφία.....	88

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Μοναξονική αντοχή άρρηκτων πετρωμάτων.....	20
Πίνακας 3.2 Ειδικό βάρος κυριότερων πετρωμάτων.....	21
Πίνακας 4.1 Η συνεισφορά της έρευνας πεδίου στη μείωση υπέρβασης του κόστους(Πηγή: Paraskevoroulou and Batsis,2020)	32
Πίνακας 4.2 Έργα προϋπολογισμού 0 – 1.500.000€.....	43
Πίνακας 4.3 Έργα προϋπολογισμού 1.500.000 – 6.000.000€	43
Πίνακας 4.4 Έργα προϋπολογισμού 6.000.000 – 10.000.000€	44
Πίνακας 4.5 Έργα προϋπολογισμού πάνω από 10.000.000€	44
Πίνακας 6.1 Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων 40 έργων σηράγγων.....	56
Πίνακας 6.2 Υπολογισμός NRMSE για το 1 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	62
Πίνακας 6.3 Υπολογισμός NRMSE για το 2 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	64
Πίνακας 6.4 Υπολογισμός NRMSE για το 3 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	65
Πίνακας 6.5 Υπολογισμός NRMSE για το 4 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	67
Πίνακας 6.6 Υπολογισμός NRMSE για το 5 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	68
Πίνακας 6.7 Υπολογισμός NRMSE για το 6 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	70
Πίνακας 6.8 Υπολογισμός NRMSE για το 7 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	71
Πίνακας 6.9 Υπολογισμός NRMSE για το 8 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	72

Πίνακας 6.10 Υπολογισμός NRMSE για το 9 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	74
Πίνακας 6.11 Υπολογισμός NRMSE για το 10 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	76
Πίνακας 6.12 Υπολογισμός NRMSE για το 11 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	77
Πίνακας 6.13 Υπολογισμός NRMSE για το 12 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	78
Πίνακας 6.14 Υπολογισμός NRMSE για το 13 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	80
Πίνακας 6.15 Υπολογισμός NRMSE για το 14 ^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	81
Πίνακας 7.1 Συγκεντρωτικός πίνακας μοντέλων ΤΝΔ.....	82
Πίνακας 7.2 Προτεινόμενα μοντέλα προς χρήση.....	83
Πίνακας 7.3 Όρια τιμών μεταβλητών όπου τα μοντέλα προτείνονται για χρήση.....	84

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Ροή εργασιών κατά της εκσκαφή μίας σήραγγας με τη μέθοδο NATM. (Bai Yun ,2018).....	9
Σχήμα 2.2 Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης κατά τη φάση εκσκαφής της διατομής.(Καββαδάς, 2014).....	10
Σχήμα 3.1 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης πετρώματος (Τσουτρέλης et al,2000).	19
Σχήμα 3.2 Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI.....	23
Σχήμα 3.3 Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Geological Strength Index) για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχης (Μαρίνος Β. 2007).....	23
Σχήμα 3.4 Τιμή του δείκτη R1.	24
Σχήμα 3.5 Τιμή του δείκτη R2.	25
Σχήμα 3.6 Τιμή του δείκτη R3.	25
Σχήμα 3.7 Τιμή του δείκτη R4.	25
Σχήμα 3.8 Τιμή του δείκτη R5.	26
Σχήμα 3.9 Τιμή του δείκτη R6.	26
Σχήμα 3.10 Πίνακας τελικής κατάταξης ποιότητας βραχώμαζας ανάλογα με την τελική τιμή του RMR σε κατηγορίες.....	26
Σχήμα 3.11 Τυπική διατομή οδικής σήραγγας (Alexandris .A)	27
Σχήμα 3.12 Κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις περιμετρικά μίας κυκλικής σήραγγας (Rocscience).....	10
Σχήμα 5.1 Ο Νευρώνας (https://becominghuman.ai).....	48
Σχήμα 5.2 Λεπτομέρεια σύναψης	48
Σχήμα 5.3 Το δυναμικό δράσης ενός νευρώνα όπως εμφανίζεται σε έναν παλμογράφο κατόπιν κατάλληλου ερεθισμού με τη βοήθεια μικροηλεκτροδίων (http://kelifos.physics.auth.gr/COURSES/neural/K3.pdf).....	49
Σχήμα 5.4 Μοντέλο τεχνητού νευρώνα (Θεοδόση – Κοκκίνου, 2013).....	51

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Ευπαλίνειο όρυγμα στο Πυθαγόρειο Σάμου (Σοφιανός, 1987).....	2
Εικόνα 1.2 Σήραγγα Malpas στη διώρυγα του Μιντί.....	2
Εικόνα 1.3 Σήραγγα Warring μήκους 2030 μέτρων που κατασκευάστηκε για τη σιδηροδρομική ένωση Λίβερπουλ και Μάντσεστερ (Σοφιανός, 2018).....	3
Εικόνα 1.4 Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής – TBM (Σοφιανός, 2018).....	4
Εικόνα 2.1 Διάτρηση οπών με διατρητικό μηχάνημα για ανατίναξη του μετώπου (https://tunnelingonline.com).....	7
Εικόνα 2.2 Τυπική διατομή στο μέτωπο εκσκαφής με συμβατική μέθοδο διάνοιξης σηράγγων (N. Charman, 2017).....	9
Εικόνα 2.3 Χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος περιμετρικά της εκσκαφής.....	12
Εικόνα 2.4 Ανάλυση παραμορφώσεων από ήλους κοινούς και DB (Σοφιανός, 2015).	12
Εικόνα 2.5 Εγκατάσταση μεταλλικού πλέγματος κατά τη β φάση εκσκαφή.....	13
Εικόνα 2.6 Τοποθέτηση μεταλλικού πλαισίου.....	15
Εικόνα 2.7 Μεταλλότυπος έγχυσης σκυροδέματος πριν την είσοδό του στη σήραγγα.....	16
Εικόνα 2.8 Μεταλλότυπος έγχυσης σκυροδέματος κατά τη φάση κατασκευής.....	17
Εικόνα 4.1 Διάγραμμα συνεισφοράς του κόστους σε έργα σηράγγων (Efron and Read, 2012).	30
Εικόνα 4.2 Παράγοντες που δύναται να έχουν σημαντική επιρροή στη μείωση του κόστους (Efron and Read, 2012).....	31
Εικόνα 4.3 Κόστος/m ³ συναρτήσει του γεωλογικού δείκτη GSI (Benardos and Paraskevopoulou, 2013).	33
Εικόνα 4.4 Κόστος/km συναρτήσει της διαμέτρου σε έργα σηράγγων (Benardos and Paraskevopoulou 2013).....	34

Εικόνα 4.5 Κόστος/km συναρτήσει του μήκους σηράγγων (Benardos and Paraskevoudou 2013).....	34
Εικόνα 4.6 Εγνατία Οδός. Κατανομή συνολικού κόστους σηράγγων μέχρι τα τέλη του 2003 (Λαμπρόπουλος, 2005).	35
Εικόνα 4.7 Εγνατία Οδός Κόστος/km της εκσκαφής και της υποστήριξης συναρτήσει του γεωλογικού δείκτη GSI (Paraskevoudou and Boutsis 2020).....	36
Εικόνα 6.1 Δημιουργία αρχείου txt.....	57
Εικόνα 6.2 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό.....	58
Εικόνα 6.3 Επιλογή της μεθόδου Multilayer Perceptron.....	59
Εικόνα 6.4 Ρυθμίσεις για την παραμετροποίηση του μοντέλου.....	59
Εικόνα 6.5 Επιλογή του ποσοστού εκπαίδευσης του μοντέλου.....	60
Εικόνα 6.6 Εικόνα 6.6: Δομή των νευρώνων του 1 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	61
Εικόνα 6.7 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 1 ^{ου} μοντέλου.....	62
Εικόνα 6.8 Εικόνα 6.6: Δομή των νευρώνων του 2 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	63
Εικόνα 6.9 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 2 ^{ου} μοντέλου.....	63
Εικόνα 6.10 Εικόνα 6.6: Δομή των νευρώνων του 3 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	64
Εικόνα 6.11 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 3 ^{ου} μοντέλου.....	65
Εικόνα 6.12 Εικόνα 6.6: Δομή των νευρώνων του 4 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	66
Εικόνα 6.13 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 4 ^{ου} μοντέλου.....	66
Εικόνα 6.14 Εικόνα 6.6: Δομή των νευρώνων του 5 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	67
Εικόνα 6.15 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 5 ^{ου} μοντέλου.....	68
Εικόνα 6.16 Δομή των νευρώνων του 6 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	69
Εικόνα 6.17 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 6 ^{ου} μοντέλου.....	69
Εικόνα 6.18 Δομή των νευρώνων του 7 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	70

Εικόνα 6.19 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 7 ^{ου} μοντέλου.....	71
Εικόνα 6.20 Εικόνα 6.6: Δομή των νευρώνων του 8 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	72
Εικόνα 6.21 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 8 ^{ου} μοντέλου.....	72
Εικόνα 6.22 Εικόνα 6.6: Δομή των νευρώνων του 9 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	73
Εικόνα 6.23 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 9 ^{ου} μοντέλου.....	74
Εικόνα 6.24 Δομή των νευρώνων του 10 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	75
Εικόνα 6.25 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 10 ^{ου} μοντέλου.....	75
Εικόνα 6.26 Δομή των νευρώνων του 11 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	76
Εικόνα 6.27 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 11 ^{ου} μοντέλου.....	77
Εικόνα 6.28 Εικόνα 6.6: Δομή των νευρώνων του 12 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	78
Εικόνα 6.29 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 12 ^{ου} μοντέλου.....	78
Εικόνα 6.30 Εικόνα 6.6: Δομή των νευρώνων του 13 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	79
Εικόνα 6.31 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 13 ^{ου} μοντέλου.....	79
Εικόνα 6.32 Εικόνα 6.6: Δομή των νευρώνων του 14 ^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.....	80
Εικόνα 6.33 Χαρακτηριστικά σφάλματα του 14 ^{ου} μοντέλου.....	81

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη για άμεση και ασφαλή μεταφορά ανθρώπων και αγαθών τα τελευταία χρόνια έχουν οδηγήσει τον κατασκευαστικό κλάδο στο σχεδιασμό και τη δημιουργία ολοένα και περισσότερων σηράγγων. Οι σήραγγες οι οποίες μειώνουν δραματικά το χρόνο μεταφοράς ανθρώπων και εμπορευμάτων είναι έργα σύνθετα με πολύ μεγάλο κόστος. Είναι συνεπώς επιτακτική ανάγκη για άμεση κοστολόγηση μελλοντικών σηράγγων με τρόπο άμεσο και ακριβή.

Η ανάπτυξη των Υ/Η και της υπολογιστής ισχύς τους έχουν οδηγήσει στη δημιουργία τεχνητών νευρωνικών δικτύων οι οποίοι μιμούνται τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Στην παρούσα διπλωματική έγινε χρήση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων με σκοπό την προκοστολόγηση της άμεσης και της μόνιμης υποστήριξης των σηράγγων.

Αρχικά γίνεται μία εισαγωγή αναλύοντας τις κατασκευές των σηράγγων από την αρχαιότητα έως και σήμερα. Στη συνέχεια αναλύονται τα γεωλογικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των σηράγγων και επεξηγείται η συμβατική μέθοδος διάνοιξης. Σε επόμενο κεφάλαιο αναλύεται το κόστος των τεχνικών έργων με ιδιαίτερη έμφαση στα έργα σηράγγων παραθέτοντας τα ανάλογα τιμολόγια που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα έως και σήμερα. Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται ο ρόλος των βιολογιών και τεχνητών νευρωνικών δικτύων και πως η ραγδαία αύξηση των υπολογιστών οδήγησε στη χρήση τους σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δημιουργία μοντέλων τεχνητών νευρωνικών δικτύων με δεδομένα από 40 σήραγγες που κατασκευάστηκαν σε Ελλάδα και εξωτερικό τα τελευταία 30 χρόνια. Η ανάπτυξη των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε με το λογισμικό WEKA μέσω του αλγορίθμου multilayer perceptron (MLP).

Τέλος ακολουθεί η σύγκριση των μοντέλων ΤΝΔ οι περιορισμοί στη χρήση τους καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων με σκοπό τη μελλοντική χρήση από μηχανικούς, κατασκευαστικές εταιρίες καθώς και το υπουργείο υποδομών και μεταφορών.

EXTENDED ABSTRACT

TUNNEL CONSTRUCTION COST

The estimation of tunnel construction costs is a subject of study in engineering that presents numerous challenges and complexities. Factors such as geological conditions, overburden, water presence, as well as secondary considerations including site organization, logistics, and material accessibility, collectively contribute to the overall costs. Notably, geological and geotechnical characteristics of formations have been identified as the most significant factors impacting costs due to their unpredictability and potential for substantial budget escalation.

This notion is supported by the findings of a study conducted by Efron and Read (2012), wherein contractors, designers, experts, and cost estimators highlighted geology and excavation type as the primary drivers of cost variation. Conversely, the depth of excavation was found to exert a comparatively lesser influence on costs. Moreover, respondents emphasized the importance of pre-construction site investigations as a means to achieve cost reduction.

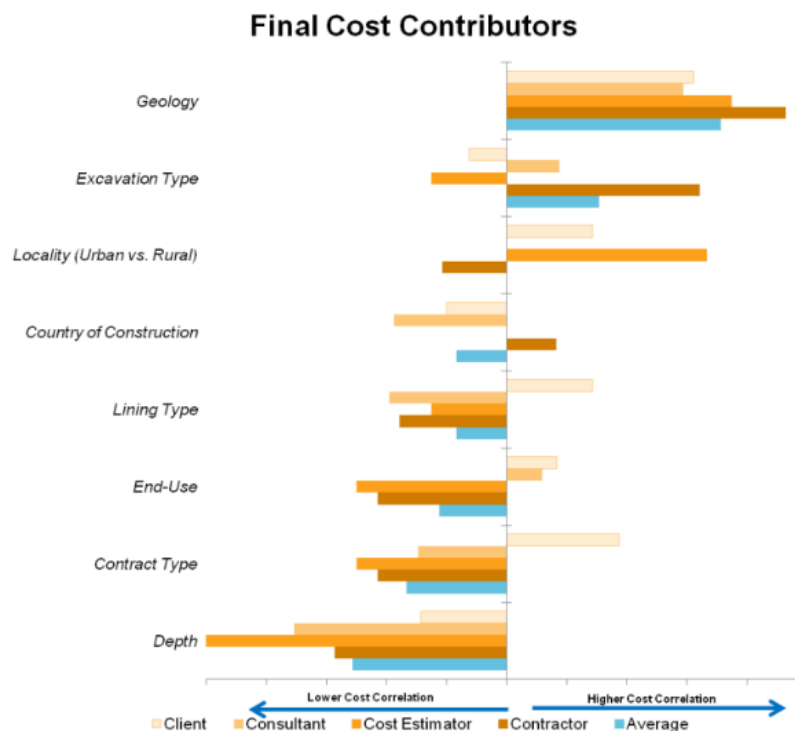


Figure 1. Final cost contributors in tunnelling projects (Efron and Read 2012).

ANALYSIS

The development of electronic computers and their computational power has led to the creation of artificial neural networks (ANNs) that emulate the functioning of the human brain. The ANNs have the ability, through the utilization of appropriate databases and user parameterizations, to undergo training and subsequently predict the values sought by the user. In this research, the purpose is to evaluate artificial neural network models (ANN models) to predict the cost of immediate and permanent tunnel support. For this purpose, 14 models were created, each differing in the input variables used, in order to examine the most important variables required to obtain the most accurate cost estimation.

Within the framework of this thesis, data from 40 different tunnels constructed in Greece and abroad during the period 1990-2015 using the conventional tunnelling method were collected. This database includes project-specific data such as Uniaxial Compressive Strength (UCS), modulus of elasticity of the unconsolidated rock, average overburden height, Geological Strength Index (GSI), Rock Mass Rating (RMR), tunnel length and area, and specific gravity (γ) of the geological formation. All the aforementioned parameters are presented as a function of the cost of the direct and final investment of the tunnel, without considering factors such as excavation costs, operating and standing costs, and the inflation factor.

In order to compare the generated models, the Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) was calculated for each artificial neural network model (ANN model). First, the root mean square error was calculated, and then the result was normalized to allow for meaningful comparisons with the international literature.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{X}_{obs}}, \quad \bar{X}_{obs} = \text{The average of the forecast value.}$$

Table 1: Data summary table of 40 tunnel projects.

Work	GSI	RMR	σ_{ci} (MPa)	E (MPa)	γ (kN/m ³)	L(m)	Area(m ²)	H (m)	Cost of temporary and final lining (€)
1	35	40	20	800	21	570	98	95	3.519.749
2	25	31	15	350	21	300	98	82	2.039.450
3	20	24	5	350	21	323	98	85	2.114.589
4	15	25	5	280	20	34	98	100	269.837
5	15	18	10	140	21	292	125	27	4.173.450
6	20	28	15	230	21	152,5	125	75	2.666.185
7	20	27	15	190	21	75	125	68	1.567.225
8	10	18	5	150	21	102	125	36	2.651.521
9	45	46	45	15000	20	61	130	89	798.110
10	30	35	30	3000	20	741	130	135	9.097.173
11	20	29	20	800	20	237	130	175	4.127.740
12	20	23	25	1400	24	476	133	110	3.357.828
13	15	22	20	800	24	151	133	118	1.891.882
14	50	45	60	12000	21	840	120	132	4.412.190
15	35	30	30	2000	21	340	120	45	2.286.490
16	25	25	20	400	23	259	130	55	2.100.790
17	30	30	30	1400	23	970	130	105	6.866.370
18	60	60	70	13000	21	1400	125	257	6.698.890
19	35	30	40	2400	21	270	125	95	1.720.964
20	40	40	55	2000	20	160	120	73	1.372.100
21	70	60	120	9100	22	1803	130	314	6.659.740
22	45	35	45	3450	22	1395	130	246	6.594.910
23	25	30	35	700	22	244	133	125	2.226.850
24	15	14	5	450	22	85	133	53	1.170.751
25	50	50	55	2880	21	1542	130	285	6.927.820
26	70	62	140	25100	25	1790	125	248	5.528.530
27	35	32	50	3480	25	349	125	146	2.108.564
28	30	37	35	2200	23	330	133	87	2.436.740
29	40	35	55	5800	24	124	133	124	991.427
30	40	41	60	4300	22	345	120	101	1.369.870
31	20	24	20	560	26	102	112	89	2.240.442
32	55	64	90	7050	25	180	130	147	720.853
33	60	61	110	6430	22	455	125	228	1.519.794
34	45	45	60	5200	25	215	133	195	1.142.201
35	25	30	40	1200	25	94	130	56	1.170.641
36	75	78	130	28800	24	786	125	214	3.952.968
37	65	65	100	17900	27	653	98	234	3.737.980
38	40	48	70	8600	22	332	98	180	2.516.279
39	30	32	50	2290	21	557	110	75	4.867.890
40	35	33	45	3000	24	249	133	133	2.236.390

The WEKA software was employed for the development of the artificial neural network (ANN) models, with the Multilayer Perceptron (MLP) algorithm being

selected as the method of choice. For each model, the optimal number of hidden neurons was determined, along with the necessary parameterizations, through a rigorous testing process.

To train the models, an 80-20 split was utilized. This means that out of the 40 tunnel projects, 80% of the data was allocated for training purposes, while the remaining 20% was used for extracting the predicted values, which were subsequently compared with the actual values of the projects.

The procedure followed for the 1st ANN model is outlined below, with the analysis being conducted in a similar manner for the remaining models. In the 1st artificial neural network model all the input variables will be introduced.

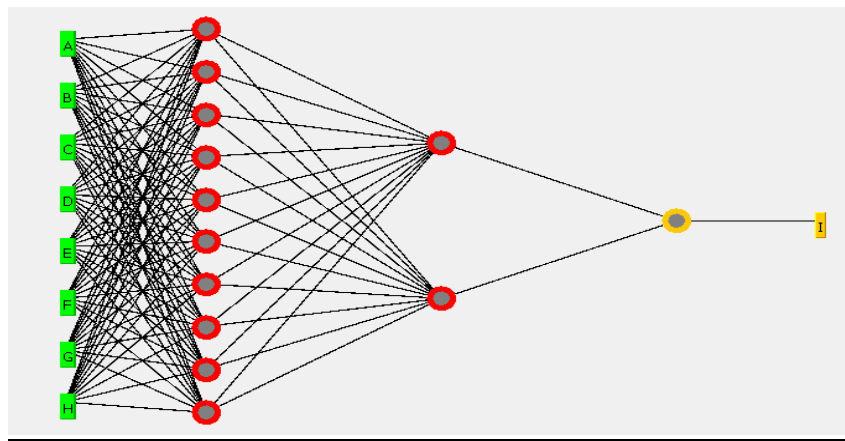


Figure 3: Structure of the neurons in the 1st model of the AI model.

Figure 3 shows that the 8-10-2-1 structure is followed. Therefore the model where created in the software has 8 input variables , 10 nodes and 2 nodes in the 2 hidden layers and 1 output variable the cost. The correlation coefficient of variables (correlation coefficient) is then displayed by the software and takes values from -1 to 1. It is natural that the values are sought to be as close to unity as possible. The program then displays the different types of errors as shown in Figure 4.

```

=== Summary ===

Correlation coefficient           0.9476
Mean absolute error             480317.3515
Root mean squared error        622473.3598
Relative absolute error         30.5026 %
Root relative squared error     32.8168 %
Total Number of Instances      8

```

Figure 4: Characteristic errors in the Figure 4.

Table 2 shows the actual cost, the model's forecast cost, the price deviation and the NRMSE of the model.

Table 2: NRMSE calculation for the 1st artificial neural network model.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	2.515.279,00	2.670.635,00	155.356,00
2	1.369.870,00	1.769.842,00	399.972,00
3	2.226.850,00	2.624.888,00	398.038,00
4	6.927.820,00	7.468.802,00	540.982,00
5	1.372.100,00	1.362.498,00	9.602,00
6	1.170.641,00	1.859.737,00	689.096,00
7	4.867.890,00	3.535.227,00	1.332.663,00
8	2.286.490,00	2.403.317,00	116.827,00
NRMSE		0,20	

Table 3 shows the NRMSE error for each of the 14 models.

Table 3: Summary table of ANN models.

Model	Input variables	Architecture	NRMSE	RAE (%)
1	GSI, σ_{ci} , H, γ , RMR,L, Area, E	8-10-2-1	0,20	30,5
2	L, Area, E	3-2-1	0,17	33
3	σ_{ci} , L, Area, E	4-10-1	0,17	29,1
4	σ_{ci} , H, L, Area, E	5-3-1	0,22	28,9
5	GSI, σ_{ci} , H, L, Area, E	6-2-2-1	0,20	27,4
6	H, L, RMR	3-2-1	0,20	27
7	σ_{ci} , H, L, RMR	4-2-1	0,17	33,2
8	σ_{ci} , H, γ , L, RMR	5-3-1	0,19	34,7
9	σ_{ci} , H, γ , L, RMR, E	6-3-1	0,19	32,8
10	σ_{ci} , Area, L	3-2-2-1	0,14	27,9
11	GSI, σ_{ci} ,L	3-2-1	0,17	32,5
12	GSI, σ_{ci} , H,L	4-2-1	0,17	30
13	GSI, L, E	3-2-1	0,16	28,5
14	Area, RMR, E, L	4-2-1	0,16	29,8

CONCLUSIONS AND PROPOSALS

Based on the analysis presented in aggregated Table 3, the following conclusions can be drawn:

- The variable of uniaxial compressive strength (σ_{ci}), followed by the elastic modulus (E) and the area of the cross section (A) demonstrated a significant impact on the cost prediction ability of the models, resulting in a reduction of the Normalized Root Mean Square Error (NRMSE).
- The overburden height (H) and specific gravity (γ) exhibited no positive effect on the effectiveness of the models, which is consistent with the findings of Efron and Read (2012).
- Models utilizing fewer input variables performed equally well or better than models incorporating more or all input variables.

For future utilization of the models, the following recommendations are suggested:

- Construction of a comprehensive database encompassing a wide range of tunnel projects, where all variables influencing costs are meticulously recorded. This will substantially enhance the reliability of the models, leading to more accurate cost estimations.
- Development of models employing deep neural networks. It is recommended to utilize software tools such as Python and Matlab for this purpose, as they offer advanced capabilities in deep learning techniques.
- Incorporation of the drilling factor with Tunnel Boring Machines (TBM) to quantify its impact on cost estimation. This involves capturing the number of projects where TBM technology is utilized.

In summary, it is proposed that the developed models be employed by construction companies, design offices, and public services, such as the artificial offices of municipalities, the Ministry of Infrastructure and Transport, and ERGOSE SA. The utilization of these models will enhance cost estimation accuracy, support optimal project planning, and facilitate informed decision-making processes.

Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η κατασκευή των σηράγγων αποτελεί από την αρχαιότητα έργα μεγάλης σημασίας για συγκοινωνιακούς σκοπούς, για τη μεταφορά του ύδατος ή ακόμα και για τη μεταφορά στρατιωτών.

Οι πρώτες υπόγειες στοές που έχουν ανακαλυφθεί ξεκίνησαν το 10.000 π.Χ. και είχαν ως στόχο την εξόρυξη κονδύλων πυριτόλιθου για την κατασκευή πολεμικού εξοπλισμού. Ακολούθησαν οι εξορύξεις χαλκού και σιδήρου μερικές χιλιάδες χρόνια αργότερα ενώ στη σημερινή Αυστρία το 1.000 π.Χ. ξεκίνησε η εκμετάλλευση των αλατωρυχείων (Σοφιανός, 2018).

Η αρχαιότερη σήραγγα στην Ελλάδα σχεδιάστηκε από τον Ευπαλίνο τον 6^ο αιώνα π.Χ. στη Σάμο για την ανάγκη υδροδότησης της πόλης. Είχε μήκος 1 χιλιόμετρο ενώ κατά τη φάση διάνοιξης ανοίχτηκε ταυτόχρονα και από τα δύο μέτωπα τα οποία συναντήθηκαν στη μέση. Οι Ρωμαίοι ήταν οι πρώτοι που κατασκεύαζαν θολωτές σήραγγες με επένδυση από λίθους. Τον 4^ο αιώνα π.Χ. με σκοπό την αποστράγγιση της λίμνης Albanus κατασκεύαζαν σήραγγα μήκους 2210 μέτρων. Η πρώτη μεγάλη οδική σήραγγα κατασκευάστηκε από τους Ρωμαίους το 36 π.Χ. ανάμεσα στη Νάπολη και το Pozzuoli. Είχε μήκος 1450 μέτρα, ύψος 9 μέτρα και πλάτος 7.5 μέτρα. Παράλληλα άρχισαν να κατασκευάζονται αποστραγγιστικές σήραγγες όπως για παράδειγμα της λίμνης Fucinos μήκους 5500 μέτρων και εμβαδού διατομής 12.5 m². Το αξιοσημείωτο με αυτή τη διάνοιξη είναι ότι χρησιμοποιήθηκε σαν επένδυση λαξευτή πέτρα όπου το έδαφος δεν ήταν σταθερό.

Συνεπώς από την αρχαιότητα η υποστήριξη της σήραγγας αποτελούσε αντικείμενο μελέτης για τους μηχανικούς. Οι εργάτες που δούλευαν στις σήραγγες κατά τη Ρωμαϊκή αυτοκρατορία ήταν κατά κύριο λόγο σκλάβοι. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να διανοίγονται πολύ γρήγορα οι σήραγγες αλλά χωρίς ιδιαίτερες καινοτομίες λόγω της αφθονίας σε αριθμό εργατών. Λόγω των μεγάλων αναγκών της εποχής για μεταφορά εμποριών και του στρατού άρχισε να υπάρχει διαχωρισμός στην τεχνική σηράγγων για οδικούς και μεταλλευτικούς σκοπούς. Τους επόμενους αιώνες δεν παρατηρήθηκε ευρεία χρήση οδικών σηράγγων ενώ τα υπόγεια έργα αποτελούνταν κυρίως από ορυχεία.



Εικόνα 1.1: Ευπαλίνειο όρυγμα στο Πυθαγόρειο Σάμου (Σοφιανός, 1987).

Ο ερχομός της βιομηχανικής εποχής δημιούργησε μεγάλες ανάγκες για μεταφορά υλικών σε σύντομο χρονικό διάστημα και σε μεγάλες ποσότητες. Η μεταφορά των αγαθών μέχρι τότε γινόταν συνήθως με τη βοήθεια πλωτών μέσων. Δημιουργήθηκε συνεπώς η ανάγκη για κατασκευή διωρύγων ώστε να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος μεταφοράς. Το 1680 στη διώρυγα Μιντί στη θέση Malpas χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως μέσο εκσκαφής η πυρίτιδα. Η σήραγγα είχε μήκος 157 μέτρα με διαστάσεις 8.2×6.7 μέτρων. Οι Γάλλοι μηχανικοί την ίδια περίοδο άρχισαν να εφαρμόζουν σε υπόγειες διώρυγες την τεχνική της ασίδας στο θόλο για την καλύτερη κατανομή των φορτίων.



Εικόνα 1.2: Σήραγγα [Malpas](#) στη διώρυγα του Μιντί.

Η πρώτη σιδηροδρομική σήραγγα διανοίχτηκε στη Γαλλία το 1826 ενώ τέσσερα χρόνια αργότερα κατασκευάζονται δύο σήραγγες για τη σιδηροδρομική ένωση του

Λίβερπουλ με το Μάντσεστερ. Τα επόμενα χρόνια αρχίζει η κατασκευή σιδηρόδρομων σε Βέλγιο, Γερμανία, ΗΠΑ και Ελβετία. Η πρώτη αλπική σήραγγα ήταν αυτή του Frejus με συνολικό μήκος 13.8 χιλιόμετρα στα σύνορα Ιταλίας και Γαλλίας ενώ ξεκίνησε το 1857 και παραδόθηκε το 1871. Ένα χρόνο αργότερα ξεκίνησε η κατασκευή της σήραγγας του Gotthard στην Ελβετία η οποία διανοίχτηκε με χρήση δυναμίτη ως μέσο εκσκαφής. Είχε μήκος 15 χιλιομέτρων ενώ το μέγιστο ύψος υπερκειμένων άγγιζε τα 1800 μέτρα (Maidl B., 2013).

Η πρώτη δίδυμη σήραγγα κατασκευάστηκε στις Άλπεις με σκοπό την ένωση της Ιταλίας με την Ελβετία. Έχει μήκος 19.8 χιλιόμετρα με το μέγιστο ύψος υπερκειμένων να φτάνει τα 2100 μέτρα. Λόγω των υψηλών πιέσεων το πέτρωμα εμφάνισε σύνθλιψη και εφαρμόστηκε η χρήση μεταλλικών πλαισίων. Ήταν η πρώτη φορά στην επιστήμη των σιδηρόδρομων που συσχετίστηκε η απομείωση των πιέσεων σε σχέση με τη σύγκλιση.



Εικόνα 1.3: Σήραγγα Wapping μήκους 2030 μέτρων που κατασκευάστηκε για τη σιδηροδρομική ένωση Λίβερπουλ και Μάντσεστερ (Σοφινός, 2018).

Έκτοτε έχουν κατασκευαστεί χιλιάδες σήραγγες δεκάδων χιλιομέτρων μήκους με μηχανικά μέσα. Στην Ελλάδα η μεγαλύτερη σήραγγα που κατασκευάστηκε είναι η

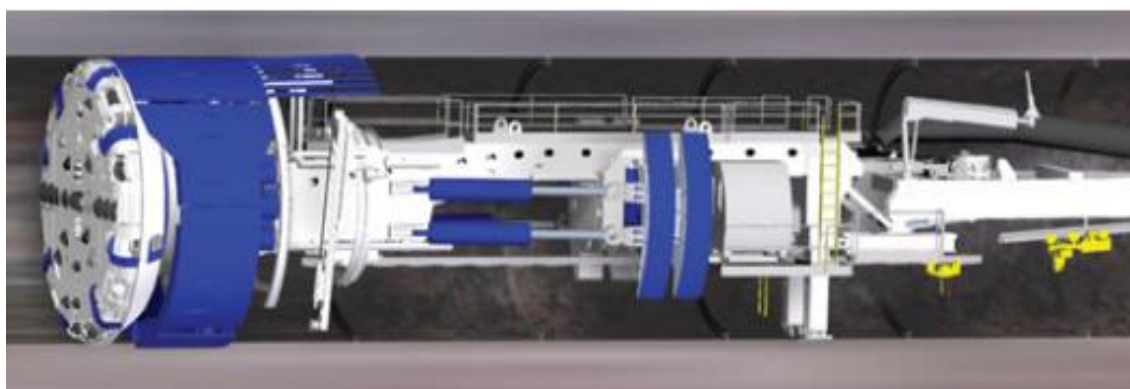
σήραγγα του Καλλιδρόμου η οποία έχει μήκος 9.3 χιλιόμετρα και έχει ως σκοπό την απομείωση του χρόνου στη σιδηροδρομική σύνδεση Αθήνας – Θεσσαλονίκης.

1.2 Κατασκευή των σηράγγων τα τελευταία χρόνια

Τα τελευταία χρόνια η κατασκευή των σηράγγων έχει εξελιχθεί σημαντικά με αποτέλεσμα να μειώνονται σημαντικά τα ατυχήματα κατά την κατασκευή, το κόστος αλλά και ο χρόνος κατασκευής.

Μετά το 2^ο παγκόσμιο πόλεμο αναπτύχθηκε η επιστήμη της βραχομηχανικής ενώ άρχισαν να ποσοτικοποιούνται οι γεωλογικοί και γεωτεχνικοί παράμετροι ενός έργου. Έως τότε η επιστήμη των σηράγγων βασιζόταν κυρίως στην εμπειρία των εργατών και όχι σε μία γενικότερη επιστήμη της μηχανικής η οποία να βασίζεται σε μαθηματικά μοντέλα. Η συνεισφορά του Karl Terzaghi σε γεωλογικές και γεωτεχνικές έρευνες ήταν τεράστια καθώς ο ίδιος συνέστησε την έρευνα πεδίου, τη γεωλογική χαρτογράφηση μετώπου και τη δημιουργία προγραμμάτων έρευνας του υπεδάφους.

Η διάνοιξη των σηράγγων γίνεται πλέον με συμβατικούς μεθόδους διάνοιξης καθώς και από μηχανή ολομέτωπης διάτρησης (Tunnel Boring Machine TBM). Η διάνοιξη με TBM χρησιμοποιείται κυρίως σε αστικές περιοχές για την αποφυγή των έντονων δονήσεων από τις ανατινάξεις, ενώ με τη βελτίωση της τεχνολογίας είναι δεδομένο ότι θα χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο και σε διάνοιξη σηράγγων σε ορεινές περιοχές.



Εικόνα 1.4: Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής – TBM (Σοφιανός, 2018).

1.3 Σημασία και οφέλη των έργων σιράγγων

Λόγω της αστικοποίησης τις τελευταίες δεκαετίες και της ανάγκης για αμεσότερη και πιο ασφαλή μεταφορά ανθρώπων και αγαθών τα υπόγεια έργα αποτελούν σημαντικό κομμάτι του κατασκευαστικού κλάδου.

Οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες ή έργα μετρό μειώνουν σημαντικά τους χρόνους μετακίνησης και αποτελούν έργα εθνικής σημασίας. Η μείωση του χρόνου μεταφοράς των αγαθών και ανθρώπων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε έργα σιράγγων κυρίως σε χώρες όπου έχουν έντονο ορεινό ανάγλυφο όπως η Ελλάδα. Αυτό οδηγεί με τη σειρά του στη ραγδαία αύξηση του εμπορίου, στη σημαντική αύξηση του ΑΕΠ, καθώς και στη μείωση των ανθρωποωρών μετακίνησης.

Οι σήραγγες αποτελούν επίσης έναν πολύ ασφαλή κλάδο των μεταφορών καθώς δεν είναι πολλές οι φορές που οδηγεί έχουν κινδυνεύσει από κατολισθήσεις, απότομους γκρεμούς, οδόστρωμα με κακή πρόσφυση λόγω βροχής κτλ..

Η εξοικονόμηση του χώρου για άλλες χρήσεις είναι επίσης υψίστης σημασίας η οποία επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερο βαθμό με την εκμετάλλευση των υπόγειων χώρων. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί και στην προστασία χλωρίδας και πανίδας αναπτύσσοντας ένα πιο οικολογικό σύστημα μεταφοράς.

Επιπροσθέτως η συνεισφορά των έργων σιράγγων στην περιβαλλοντολογική αποτύπωση είναι τεράστια καθώς η μείωση του χρόνου μεταφοράς οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης έχει πολλαπλά οφέλη για το περιβάλλον μέσω της μείωσης της εκπομπής ρύπων διοξειδίου του άνθρακα.

1.4 Αντικείμενο και σκοπός

Κατά τη μελέτη και κατασκευή μίας σήραγγας το τελικό κόστος είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν. Το τελικό κόστος εξαρτάται από μία σειρά από παραμέτρους οι οποίες αποτελούν τη μέθοδος εκσκαφής, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος ή του εδάφους εκσκαφής, το μήκος της σήραγγας, το υπερκείμενο ύψος και το εμβαδόν της διατομής.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής θα μελετηθεί εάν κάποιες από τις παραπάνω μεταβλητές στο πλαίσιο της προμελέτης μπορούν να αγνοηθούν ώστε να εκτιμηθεί το κόστος της άμεσης και μόνιμης υποστήριξης της σήραγγας. Το κόστος των εργατικών,

των μηχανημάτων, Η/Μ εγκαταστάσεων και πιθανόν έκτακτων εξόδων δε θα ληφθεί υπόψιν ώστε να εστιαστεί η σημαντικότητα της γεωλογίας στο τελικό εκτιμώμενο κόστος. Η εκτίμηση του κόστους θα γίνει με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης συγκεντρώθηκαν τα παρακάτω στοιχεία για 40 διαφορετικές σήραγγες που κατασκευάστηκαν στην Ευρώπη από το 1993 έως και το 2017.

- GSI
- RMR
- σ_{ci} (MPa)
- E (MPa)
- L (m)
- γ (kN/m³)
- A (m²)
- Κόστος άμεσης και τελικής επένδυσης

Τα παραπάνω δεδομένα αναφέρονται αποκλειστικά σε σήραγγες που διανοίχτηκαν με συμβατική μέθοδο διάνοιξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Συμβατική μέθοδος διάνοιξης και μέτρα υποστήριξης.

2.1 Συμβατική μέθοδος διάνοιξης.

Η συμβατική μέθοδος διάνοιξης βασίζεται στην εκσκαφή του σχηματισμού με χρήση εκρηκτικών ή μηχανικών μέσων όπως εκσκαφείς. Στην αρχαιότητα η εκσκαφή γινόταν από εργάτες με φτυάρια και άλλα εργαλεία ενώ τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί εξελιγμένα μηχανήματα κοπής αλλά και αποδοτικά εκρηκτικά ανάλογα με τη γεωλογία του έργου.



Εικόνα 2.1: Διάτρηση οπών με διατρητικό μηχάνημα για ανατίναξη του μετώπου
(<https://tunnelingonline.com>).

Η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος συμβατικής διάνοιξης είναι η μέθοδος NATM.

Η "Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunnelling Method – NATM) αναπτύχθηκε στα τέλη του 1950 από τους Αυστριακούς Ladislaus von Rabcewicz, Leopold Müller και Franz Pacher. Η ονομασία NATM προτάθηκε από τον Rabcewicz το 1962 ώστε να διαφοροποιηθεί από την παλιά Αυστριακή μέθοδο.

Αν και οι τεχνικές που προτείνει η μέθοδος NATM ήταν ήδη γνωστές, πλέον αυτές καταγράφονται και ενοποιούνται. Η βασική διαφοροποίηση από τις παλαιότερες

μεθόδους ήταν ότι η κύρια υποστήριξη είναι η ίδια η βραχόμαζα και όχι κάποια βαριά μέτρα υποστήριξης που πιθανόν να απαιτούνται. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μειωθεί πολύ το πάχος της υποστήριξης και να χρησιμοποιηθεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αντί της τοιχοποιίας από τούβλο.

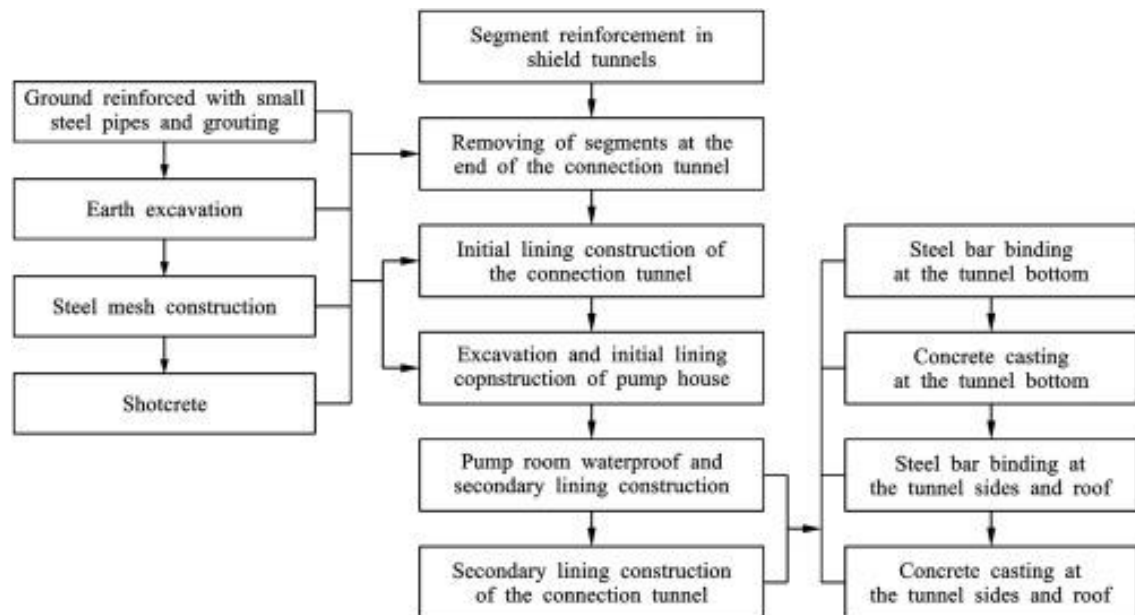
Ο Müller και ο Fecker (1978) δημοσιεύσαν 22 αρχές της NATM οι οποίες συνοψίζοντας αναφέρουν :

- Η βραχόμαζα προσφέρει την κύρια υποστήριξη κατά την εκσκαφή της σήραγγας. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει δρα συμπληρωματικά (1^η αρχή).
- Η αντοχή της βραχόμαζας θα πρέπει να διατηρείται. Η χαλάρωση της βραχόμαζας έχει αρνητικές συνέπειες στην αντοχή της (2^η και 3^η αρχή).
- Η υποστήριξη δεν πρέπει να τοποθετείται ούτε πολύ νωρίς αλλά ούτε και καθυστερημένα (6^η αρχή).
- Μετρήσεις των μετακινήσεων μετά την τοποθέτηση της πρώτης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος (8^η αρχή).
- Η μέθοδος χρησιμοποιεί λεπτή στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος (10^η αρχή).
- Η ενίσχυση της υποστήριξης δεν επιτυγχάνεται με μεγαλύτερη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος αλλά με μεταλλικά πλαίσια και αγκύρια βράχου (11^η αρχή).
- Κλείσιμο του ανάστροφου τόξου ώστε να λειτουργεί η σήραγγα σαν σωλήνας (14^η και 15^η αρχή).
- Ολομέτωπη εκσκαφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν είναι εφικτό (16^η αρχή).

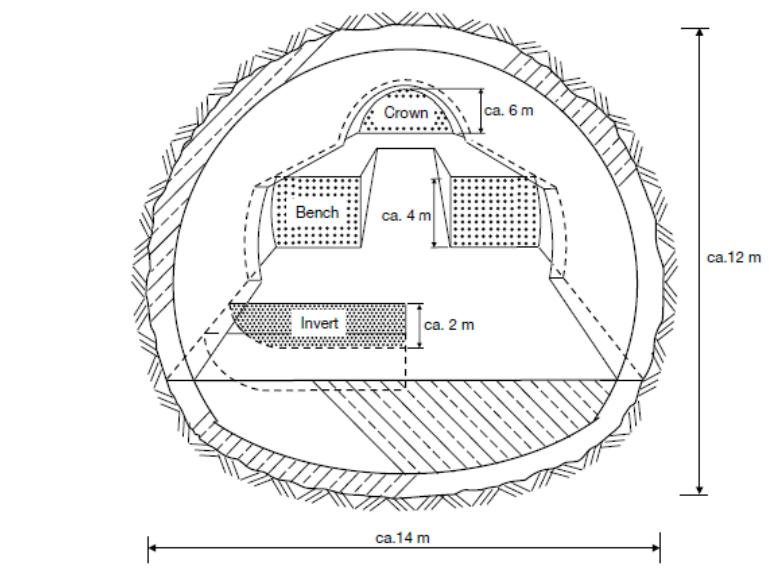
Είναι σκόπιμο να τονιστεί ότι εάν μία από τις παρακάτω προτάσεις ισχύει τότε η μέθοδος δεν ακολουθεί τις αρχές της NATM. Δεν είναι NATM εάν :

- Χρησιμοποιείται μηχανήματα TBM για την εκσκαφή.
- Χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα στοιχεία για την άμεση υποστήριξη.
- Δεν υπάρχει καθόλου υποστήριξη.
- Η πίεση της βραχόμαζας υποστηριχθεί πλήρως από τα μέτρα υποστήριξης.

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η ροή των εργασιών κατά της εκσκαφή μίας σήραγγας με τη μέθοδο NATM ενώ στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται μια τυπική διατομή στο μέτωπο εκσκαφής όπως συνηθίζεται κατά τη μέθοδο NATM.



Σχήμα 2.1: Ροή εργασιών κατά της εκσκαφή μίας σήραγγας με τη μέθοδο NATM. (Bai Yun, 2018).



Εικόνα 2.2: Τυπική διατομή στο μέτωπο εκσκαφής με συμβατική μέθοδο διάνοιξης σηράγγων (N. Charman, 2017).

Η μέθοδος NATM έγινε ευρέως αποδεκτή από το σύνολο της βιομηχανίας και οι περισσότερες σήραγγες κατασκευάστηκαν με βάση τις αρχές της. Υπήρχαν όμως και επικριτές της μεθόδου όπως ο γεωτεχνικός μηχανικός Kalman Kovari. Ο βασικός αντίλογος του Kovari ήταν ότι η NATM δεν είναι μέθοδος που πρέπει να χρησιμοποιείται αυτούσια σε κάθε έργο αλλά κάποιες αρχές που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το στάδιο κατασκευής και μελέτης όπως αναφέρει το 1993 σε μία διάλεξη του στο Salzburg της Αυστρίας.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM

- 1) Ευελιξία. Τα μέτρα υποστήριξης προκύπτουν από τις εδαφικές συνθήκες.
- 2) Ασφάλεια. Δυνατότητα να αντιμετωπιστούν απρόσμενες εδαφικές συνθήκες.
- 3) Οικονομία. Τα μέτρα υποστήριξης προκύπτουν από το γεωλογικό μοντέλο σε σχέση με τα μηχανήματα TBM που σχεδιάζονται για τις δυσμενέστερες συνθήκες που θα συναντηθούν και επομένως σε μεγάλο μήκος της σήραγγας υπερδιαστασιολογούνται.
- 4) Προσαρμοστικότητα. Βελτιστοποίηση των μηχανημάτων και του εργατικού προσωπικού έτσι ώστε να πραγματοποιούνται πολλές εργασίες ταυτόχρονα.

Μειονεκτήματα της μεθόδου NATM

- 1) Δύσκολος συντονισμός τόσων εργασιών παράλληλα.
- 2) Χαμηλότερη παραγωγικότητα σε σχέση με τα μηχανήματα TBM
- 3) Αίσθημα κινδύνου στους εργαζομένους όταν δεν τοποθετούνται μεταλλικά πλαίσια.

2.2 Μέτρα υποστήριξης σιράγγων.

Τα μέτρα της υποστήριξης μίας σήραγγας έχουν ως στόχο τη συγκράτηση της σήραγγας από καταπτώσεις και συγκλίσεις σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Η επιλογή τους γίνεται από το μελετητή αλλά πολλές φορές δεν εφαρμόζεται με ακρίβεια καθώς κατά τη φάση του έργου μπορεί να διαπιστωθούν διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες από τις αναμενόμενες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε ένα έργο σιράγγων το

τελικό κόστος να διαφέρει σημαντικά από το αρχικά εκτιμώμενο κόστος των μέτρων υποστήριξης.

Η προσωρινή υποστήριξη αποσκοπεί στην άμεση ανάληψη των φορτίων, στον περιορισμό των συγκλίσεων καθώς και στην συγκράτηση της βραχώμαζας ώστε να αποφευχθούν καταπτώσεις κατά τη φάση κατασκευής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα πιο βασικά μέτρα προσωρινής υποστήριξης που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές των σηράγγων.

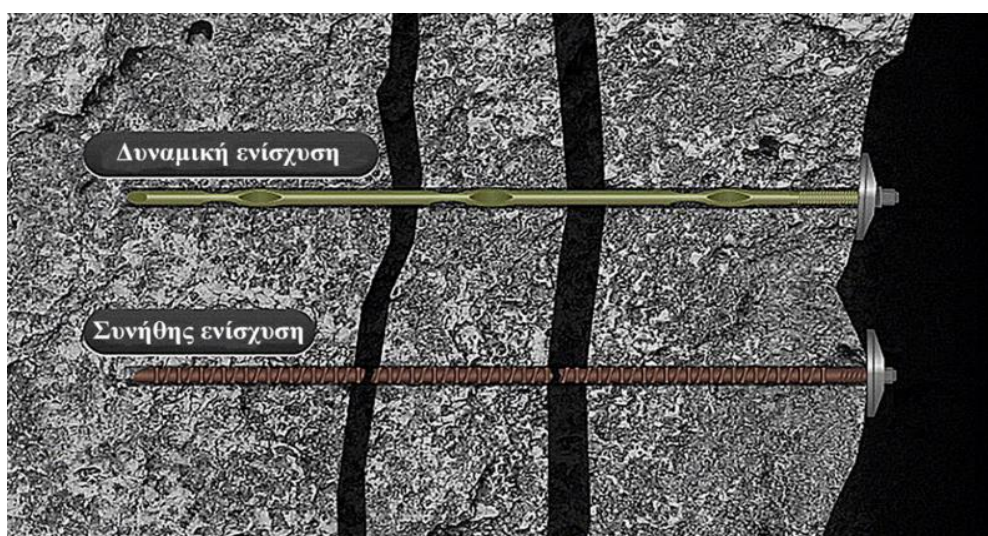
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα : Η χρήση του αποσκοπεί κυρίως στην άμεση συγκράτηση τεμαχών μετά την εκσκαφή και στον περιορισμό των συγκλίσεων. Συνήθως αποτελείται από σκυρόδεμα C25/30 με χρήση επιταχυντή και το πάχος του μπορεί να κυμαίνεται από 10 εκ. έως και 1 μέτρο σε ακραίες συνθήκες.



Εικόνα 2.3: Χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος περιμετρικά της εκσκαφής.

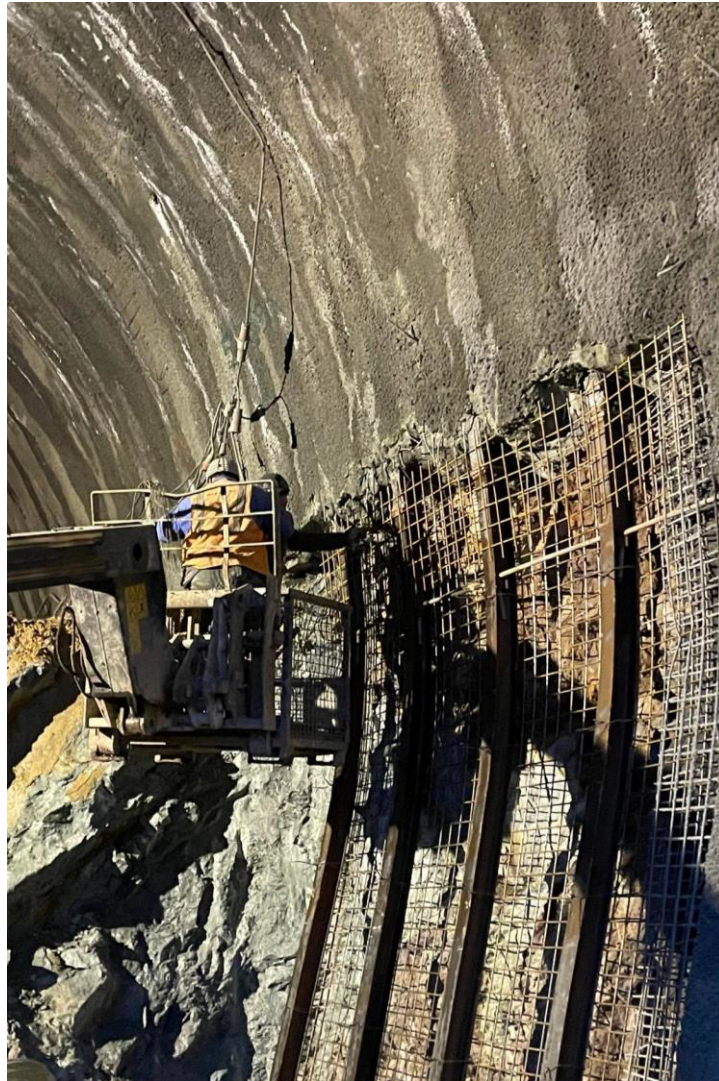
Αγκύρια : Τα αγκύρια τα οποία μπορεί να είναι παθητικά ή ενεργητικά έχουν ως στόχο ανάλογα τη δομή του σχηματισμού να συγκρατήσουν το σχηματισμό αυξάνοντας τη

φέρουσα ικανότητα του μηχανισμού της άμεσης υποστήριξης. Επίσης αυξάνουν τη διατμητική αντοχή του πετρώματος καθώς δεν αφήνουν τις ασυνέχειες μεταξύ των τεμαχών να ολισθήσουν. Τέλος μειώνουν τη σύγκλιση των τοιχωμάτων καθώς εφελκύνονται όσο μετακινούνται (παθητικά αγκύρια). Τα αγκύρια τύπου swellex τα οποία είναι τα πλέον διαδεδομένα αναλαμβάνουν τα φορτία άμεσα καθώς δεν απαιτείται ενεμάτωση με τσιμέντο το οποίο αργεί να πήξει.



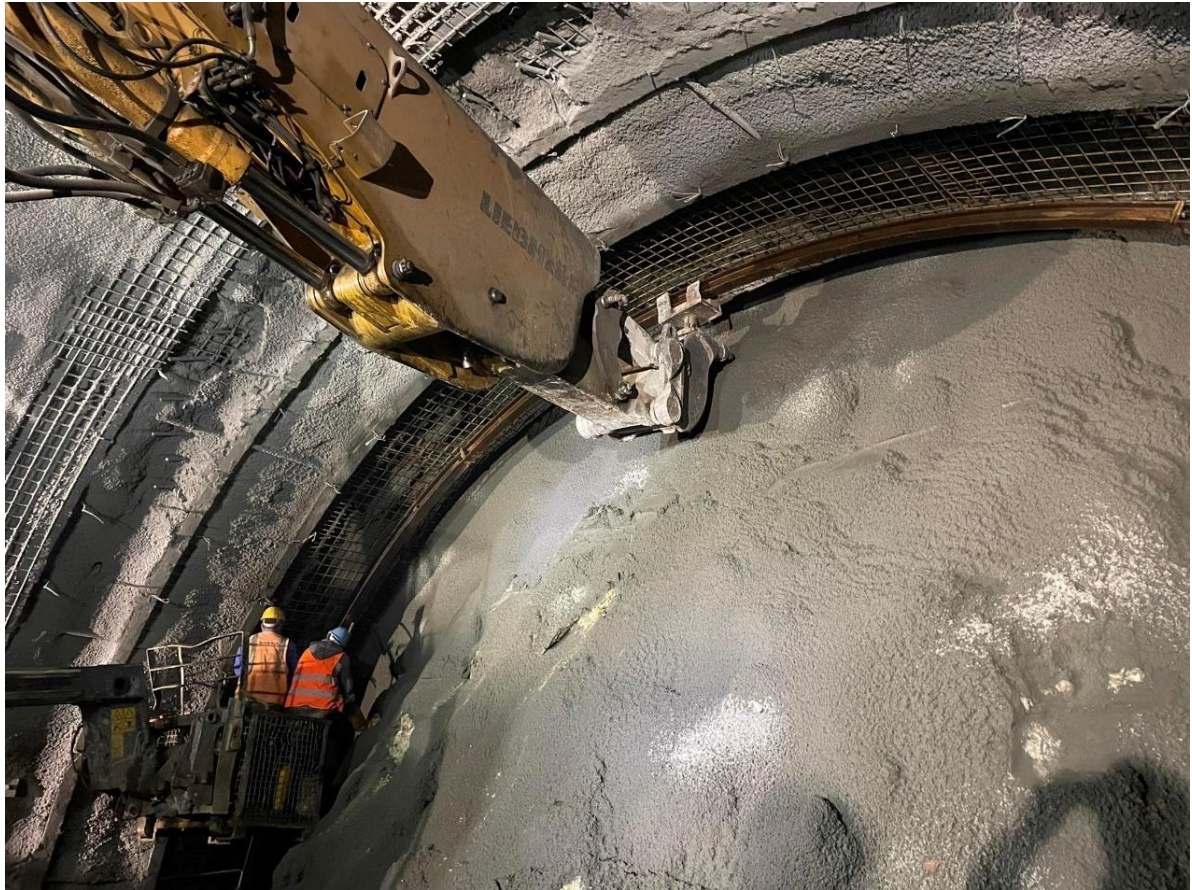
Εικόνα 2.4: Ανάλυση παραμορφώσεων από ήλους κοινούς και DB (Σοφιανός, 2015).

Μεταλλικά πλέγματα : Τα μεταλλικά πλέγματα τα οποία συνήθως έχουν διάμετρο $\Phi 8$ (mm) έχουν ως στόχο την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η τοποθέτηση τους γίνεται κατά κανόνα σε δύο στρώσεις, με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ανάμεσα τους αλλά και μετά τη δεύτερη στρώση. Η χρήση μεταλλικών ιών στο σκυρόδεμα αποτελεί την εναλλακτική λύση του μεταλλικού πλέγματος. Η χρήση ιών στο σκυρόδεμα αυξάνει σημαντικά την ταχύτητα προχώρησης καθώς δεν απαιτείται να εγκατασταθεί το πλέγμα αλλά με αρνητικές συνέπειες ως προς την αντοχή καθώς δεν μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως την εφελκυστική αντοχή που συνεισφέρει το μεταλλικό πλέγμα.



Εικόνα 2.5: Εγκατάσταση μεταλλικού πλέγματος κατά τη β φάση εκσκαφής.

Χαλύβδινα πλαίσια : Έχουν ως κύρια λειτουργία την παραλαβή κατακόρυφων φορτίων ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται ως δοκάρια όταν υπάρχουν δοκοί προπορείας ή spiling. Συνήθως χρησιμοποιούνται πλαίσια τύπου HEB120 έως HEB200. Σε σπανιότερες περιπτώσεις η έδραση τους αποτελείται από μεγαλύτερη επιφάνεια (ελεφαντοπόδαρα) ώστε να κατανεμηθεί πιο ομοιόμορφα η αναλαμβανόμενη πίεση. Λειτουργούν μαζί με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως σύμμικτη κατασκευή αυξάνοντας τη δυσκαμψία του και την πλαστιμότητά του.



Εικόνα 2.6: Τοποθέτηση μεταλλικού πλαισίου.

Μόνιμη Υποστήριξη : Η μόνιμη υποστήριξη έχει ως στόχο την παραλαβή των φορτίων σε όλη τη διάρκεια του έργου. Τέτοια φορτία είναι το βάρος τη βραχώμαζας, υδατικές πιέσεις, επιπλέον φορτία σε περίπτωση ερπυσμού, σεισμικά φορτία, καταναγκασμοί όπως αύξηση της θερμοκρασίας λόγω πυρκαγιάς κ.λ.π.. Η μόνιμη υποστήριξη τοποθετείται μετά την άμεση υποστήριξη και αφού έχουν μηδενιστεί οι συγκλίσεις κατά τη φάση κατασκευής. Τα φορτία που αναλαμβάνει η άμεση υποστήριξη δεν λαμβάνονται υπόψιν αφού θεωρείται ότι λίγα χρόνια μετά την κατασκευή του έργου δεν έχει φέρουσα ικανότητα λόγω του ρευστοποιητή στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και πιθανής διάβρωσης των αγκυρίων και των πλαισίων.

Η τελική επένδυση αποτελείται συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και επικάλυψη οπλισμών μεγαλύτερη των 5 εκ. Η έγχυση του σκυροδέματος γίνεται μέσω ενός μεταλλότυπου που μετακινείται με το φορείο τοποθέτησης.

Η τελική επένδυση δύναται να είναι και άοπλη υπό ορισμένες συνθήκες όπως (Σοφιανός 2018) :

- Δεν απαιτείται στεγανό σκυρόδεμα.
- Η διατομή είναι πλήρως σε θλίψη.
- Η επένδυση είναι εκτός της ζώνης κύκλου παγετού-απόψυξης.
- Η πίεση από τη βραχομάζα είτε απουσιάζει είτε είναι ελαφριά αλλά ομοιόμορφη.
- Οι τάσεις συρρίκνωσης στον δακτύλιο υπερκαλύπτονται από τη συμπίεση.
- Δεν υπάρχουν ζώνες έκπλυσης στη βραχομάζα.
- Δεν αναμένονται σημειακές φορτίσεις στην επένδυση.
- Δεν αναμένεται μακροπρόθεσμη ασύμμετρη συμπεριφορά της βραχομάζας γύρω από το άνοιγμα.



Εικόνα 2.7: Μεταλλότυπος έγχυσης σκυροδέματος πριν την είσοδό του στη σήραγγα.



Εικόνα 2.8 Μεταλλότυπος έγχυσης σκυροδέματος κατά τη φάση κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Τεχνικογεωλογική συμπεριφορά και γεωτεχνική ταξινόμηση σχηματισμών.

3.1 Συσχέτιση της γεωλογίας με τη συμπεριφορά των σπηραγγων.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 η μηχανική διάνοιξη σπηραγγων βασίζεται στην άμεση και ασφαλή υποστήριξη του μετώπου με στόχο την αποφυγή συγκλίσεων και καταπτώσεων. Η συμπεριφορά των σπηραγγων εξαρτάται από τη γεωλογία της περιοχής. Στη συνέχεια γίνεται κατηγοριοποίηση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των σπηραγγων

-Στοιχεία φυσικών ιδιοτήτων

- σ_{ci} (MPa)
- E (MPa)
- γ (kN/m³)

-Στοιχεία γεωτεχνικής ταξινόμησης

- GSI
- RMR

-Στοιχεία γεωμετρικών χαρακτηριστικών

- L (m)
- Area (m²)
- H (m)

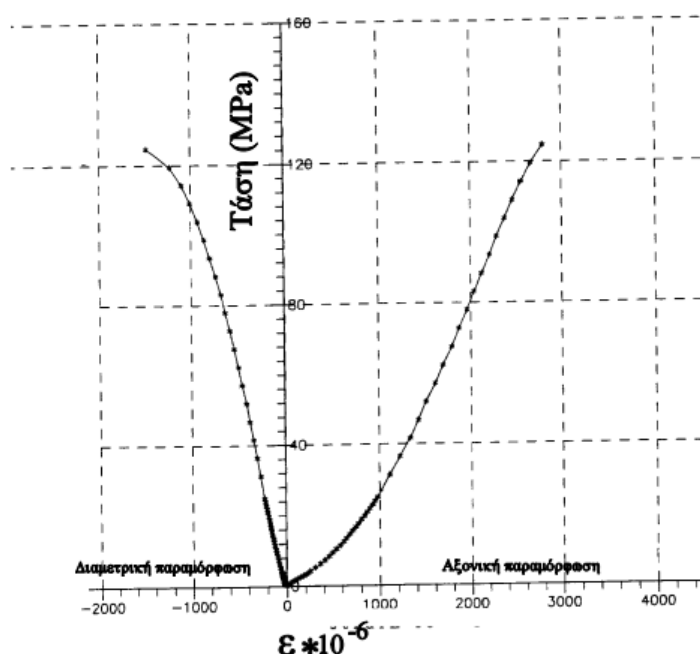
Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των παραπάνω ιδιοτήτων και πως αυτά επιδρούν τελικά στη συμπεριφορά της βραχώμαζας και άρα στο τελικό κόστος των σπηραγγων.

3.2 Μέτρο Ελαστικότητας

Η βραχώμαζα αποτελείται από την παρουσία ασυνεχειών στη δομή της οι οποίες οφείλονται σε φορτίσεις που έχει δεχτεί στο παρελθόν. Τέτοιες φορτίσεις συνήθως αποτελούν τεκτονικά φαινόμενα τα οποία έχουν επιδράσει στο αρχικά άρρηκτο πέτρωμα. Οι μη κερματισμένες βραχώμαζες οι οποίες δεν έχουν καταπονιστεί από τεκτονικά φαινόμενα μπορεί να θεωρηθεί ότι η συμπεριφορά τους είναι

ελαστοπλαστική ενώ μία βραχόμαζα με ασυνέχειες εμφανίζει ανισότροπη συμπεριφορά. Το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος συμβολίζεται ως E_i (intact) ενώ της βραχόμαζας E_m (mass).

Κατά τη μελέτη ενός υπογείου έργου αφού γίνουν οι απαιτούμενες γεωτρήσεις, δείγματα θα δοθούν στο εργαστήριο ώστε να υπολογιστούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Μία σωστή δειγματοληψία οφείλει να περιέχει δείγμα από όσο το δυνατόν πιο άρρηκτο πέτρωμα. Συνεπώς στους αναλυτικούς υπολογισμούς των σηράγγων ο μελετητής θα πρέπει να γνωρίζει το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος το οποίο προκύπτει από το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Σοφιανός, 2018).



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πετρώματος (Τσουτρέλης et al., 2000).

Η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας προκύπτει από την εμπειρική σχέση :

$$E = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \text{ alog} \left(\frac{RMR-10}{40} \right) \text{ (MPa)}$$

όπου η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη σ_{ci} μετράται σε MPa ενώ το RMR λαμβάνει τιμές από 0 έως 100.

Όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας τόσο καλύτερη είναι η συμπεριφορά της βραχόμαζας και συνεπώς τα μέτρα υποστήριξης να είναι λιγότερα με θετικό αντίκτυπο στο τελικό κόστος.

3.3 Μοναξονική αντοχή άρρηκτου πετρώματος σ_{ci}

Η μέγιστη τάση που μπορεί να αναλάβει το πέτρωμα σε θλίψη συμβολίζεται ως σ_{ci} ή UCS. Μετά το πέρας της μέγιστης τάσης το πέτρωμα είτε αστοχεί ψαθυρά, είτε αναλαμβάνει επιπλέον φορτία αφού όμως έχει παραμορφωθεί σημαντικά. Γενικά τα πετρώματα όπως και το σκυρόδεμα εμφανίζουν αρκετά μεγάλη αντοχή σε θλίψη με τιμές μεγαλύτερες ακόμα και των 250 MPa. Η αντοχή του πετρώματος σε ανεμπόδιστη θλίψη προκύπτει από τη δοκιμή μοναξονικής θλίψης από το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές ανεμπόδιστης θλίψης ακέραίου πετρώματος.

Πίνακας 3.1: Μοναξονική αντοχή άρρηκτων πετρωμάτων. (Attewel and Farmer, 1976)

Βαθμός	Κατάταξη πετρώματος	Αντοχή σε μοναξονική θλίψη (MPa)	Παραδείγματα
R6	Εξαιρετικά υψηλής αντοχής	>250	Υγής βασάλτης, γνεύσιος, γρανίτης, χαλαζίτης
R5	Πολύ υψηλής αντοχής	100-250	ψαμμίτης, βασάλτης, γάββρος, γνεύσιος, ασβεστόλιθος, μάρμαρο
R4	Υψηλής αντοχής	50-100	Ασβεστόλιθος, μάρμαρο, φυλλίτης, ψαμμίτης, σχιστόλιθος
R3	Μέσης αντοχής	25-50	Αργιλικός σχηματισμός, ιλύλιθος, λιγνίτης, αργιλικός σχιστόλιθος
R2	Χαμηλής αντοχής	5-25	Ορυκτό άλας
R1	Πολύ χαμηλής αντοχής	1-5	Αποσαθρωμένα και διαβρωμένα πετρώματα
R0	Εξαιρετικά χαμηλής αντοχής	0.25-1	Βαθύ αυλάκι με σκαρπέλο

Η βραχώμαζα λόγω των ασυνεχειών που έχει και των κενών στη δομή της δεν παρουσιάζει σχεδόν ποτέ την ίδια αντοχή σε θλίψη όπως ένα άρρηκτο πέτρωμα. Συνεπώς η αντοχή σε θλίψη της βραχώμαζας μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση :

$$\sigma_{cm} = \frac{\sigma_{ci}}{50} \exp\left(\frac{GSI}{26.5}\right)$$

Όσο μεγαλύτερο το σ_{ci} τόσο μεγαλύτερη η αντοχή της βραχώμαζας και συνεπώς τα μέτρα υποστήριξης θα είναι λιγότερα μειώνοντας τελικά το κόστος του έργου.

3.4 Ειδικό βάρος γ_s

Το ειδικό βάρος ενός πετρώματος προκύπτει από το λόγο του βάρους των στερεών προς το βάρος του ίδιου όγκου αποσταγμένου νερού σε θερμοκρασία 4°C.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

Πίνακας 3.2: Ειδικό βάρος κυριότερων πετρωμάτων. (Souping P., Jincai Z. (2007).

Ορυκτό	Ειδική βαρύτητα (kN/m ³)
Ασβεστίτης	2.7
Ανδεδσίτης	2.67
Βιοτίτης	2.7-3.2
Δολομίτης	2.8
Ολιβίνης	3.2-4.4
Χλωρίτης	2.6-3

Όσο μεγαλύτερο είναι το ειδικό βάρος τόσο μεγαλύτερα είναι και τα φορτία λόγω πίεσης υπερκειμένων γαιών. Συνεπώς ένα μεγαλύτερο ειδικό βάρος θα οδηγήσει σε ελαφρώς μεγαλύτερη ανάγκη για πιο βαριά μέτρα υποστήριξης και συνεπώς μεγαλύτερο τελικό κόστος κατασκευής .

3.5 Δείκτης γεωλογικής αντοχής (GSI)

Ο δείκτης GSI ο οποίος εισήχθη για πρώτη φορά από τους Hoek, Wood and Shah (1992) εκφράζει ποσοτικά την ποιότητα της βραχώμαζας μέσα από ένα πεδίο παρατήρησης. Η ποιότητα της βραχώμαζας βάσει του δείκτη GSI εξαρτάται από τον αριθμό των ασυνεχειών αλλά και την ποιότητα τους ενώ λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 100. Ο δείκτης επεκτάθηκε και σε ασθενείς βραχώμαζες Hoek, Marinos and Benissi (1998), Marinos and Hoek (2000) για τον φλύσχη, Hoek and Marinos 2005, V. Marinos 2007.

Το σύστημα ταξινόμησης GSI δημιουργήθηκε για να είναι συμβατό με το RMR. Το GSI πλεονεκτεί στο γεγονός ότι είναι αρκετά πιο εύκολο στον εκτίμηση του ενώ είναι πιο ακριβές για βραχώμαζες με $RMR < 40$ καθώς δεν εμφανίζονται απότομες μεταβολές στην τιμή του. Κατά την κατασκευή μίας σήραγγας σε κάθε βήμα προχώρησης είναι σκόπιμο να γίνεται εκτίμηση του GSI ώστε να αποφασίζεται ο τύπος της διατομής της άμεσης υποστήριξης. Η εκτίμηση του GSI κατά τη φάση της μελέτης δεν μπορεί να γίνει με ακρίβεια αλλά μπορεί μέσα από τις γεωτρήσεις να γίνει μία αρχική εκτίμηση που θα κυμανθεί. Με την αύξηση του βάθους λόγω του κλεισίματος των ασυνεχειών και της μειωμένης αποσάθρωσης λόγω καιρικών συνθηκών το GSI αυξάνεται. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται ιδιαίτερα σε βραχώμαζες όπως η μολάσσα όπου λόγω της σχάσης η επιφανειακή στρώση στα πρώτα 10 μέτρα είναι πλήρως αποσαθρωμένη. Ο φλύσχος λόγω της ιδιαιτερότητας του να εμφανίζει εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυόλιθου με διαφορετικά πάχη κάθε φορά και διαφορετικό βαθμό διάτμησης εκτιμάται στο γεωλογικό δείκτη GSI από διαφορετικό πίνακα (Μαρίνος, 2007). Στα σχήματα 2 και 3 παρουσιάζονται οι πίνακες του γεωλογικού δείκτη GSI για βραχώμαζες και φλύσχη αντίστοιχα.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΟΓΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχώδους (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακριβεία. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθηνείς επιπέδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πριναίς εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώδους. Η διατηρητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένιση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώδεις ανήκουν στις μέτριες έως τις κατώτερες με γωνιώδη νερό τότε μετριοποιούνται προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων. ΔΟΜΗ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσπασθαιμένες επιφάνειες ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθαιμένες και εδωδιμένες επιφάνειες ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίου αποσπασθαιμένες και εδωδιμένες επιφάνειες ΠΤΟΧΗ Επιφάνειες ολισθηρές, πολύ αποσπασθαιμένες με σημαντική επιρροή από υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βραχόκοκκα ΠΟΛΥ ΠΤΟΧΗ Επιφάνειες ολισθηρές, πολύ αποσπασθαιμένες με μεγάλο αριθμό υλικό πλήρωσης	ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ					
		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (συνολική επιφάνεια στρώσης)	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγιείς, μη αποσπασθαιμένες επιφάνειες ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθαιμένες και εδωδιμένες επιφάνειες ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίου αποσπασθαιμένες και εδωδιμένες επιφάνειες ΠΤΟΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με σημαντική επιρροή από υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βραχόκοκκα ΠΟΛΥ ΠΤΟΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθαιμένες με μεγάλο αριθμό υλικό πλήρωσης ή επιρροής	80	70	60	50
INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή αστριωτός βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση		90				N/A	N/A
BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχώδης με πολύ καλό αλληλοκλειδίωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών			70				
VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχώδης με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών			60				
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πυκνωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας			50				
DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχώδης με πτωχό αλληλοκλειδίωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστραγγυλιωμένων τεμαχίων			40				
LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατηρημένη ασθενής βραχώδης. Η σχετικότητα επικρατεί έναντι αποσπασθαιμένων άλλων οικογενών ασυνεχειών εμπόδιζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων			30				
						20	
							10
		N/A	N/A				

Σχήμα 3.2: Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI (Hoek and Brown, 1997)

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ ΟΠΩΣ Ο ΦΛΥΣΧΗΣ (B. Marinos, 2007)		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ (συνολική επιφάνεια στρώσης)	ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ				
Ετερογενείς βραχώδεις εννοούνται εδώ αυτές που εναλλάσσονται στρώματα σφαιρικών διαστρωμένων λιθολογικών τύπων με σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά αντοχής τους. Για τον φίλο αυτής οι εναλλαγές αναφέρονται κυρίως σε φασμίτες και ιαλλώδους. Σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζονται και αρχικά σχιστόλιθους. Βασίζονται στην περιγραφή της λιθολογικής σύνταξης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών (κυρίως της στρώσης) της βραχώδους επιλέξετε το κατάλληλο πεδίο του πίνακα. Η επιλογή της δομής πρέπει να καθορίζεται με βάση την τεκτονική διαταραχή (αδιατάρακτη, μέτρια διαταραγμένη, πολύ πτωχώνια - διαταραγμένη, αποδυναμωμένη, διατηρημένη), την αναλογία φασμιτών και ιαλλώδους και την εστιασμένη εντατική στρωματοποίηση τους. Στους τύπους IV και V όταν το μέγεθος των τριγωνίων του φασμίτη είναι μεγάλο (~50 cm) προτιμάται η οδήγηση της τιμής GSI κατά 5 μονάδες. Από τον τύπο IV και στους επόμενους τύπους το επίπεδο στρώσης διακρίνεται μέσα στη μόδα του ιαλλώδους. Επιλέξετε τη θέση στο πεδίο που περιγράφει τις συνθήκες και επιλέξετε τη μέση τιμή του GSI από τις κορυφές. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών π.χ. από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI =35. Ο καθορισμός της δομής κοβάς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κριθεί με βάση δύο γενικών πεδίων προς κάθε κατεύθυνση. Τονίζουμε ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από ανακλαστικές αστάθειες στον οριζόντιο επίπεδο επιφάνειας. Η αντοχή φασμιτών βραχωδών μενεται από τη παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να λαμβάνει υπόψη με μικρή μετατόπιση προς το δεξιά στις στήλες της μέτρησης και πολύ μικρές καταστάσεις ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.			ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, υγιείς, μη αποσπασθαιμένες επιφάνειες ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθαιμένες και εδωδιμένες επιφάνειες ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίου αποσπασθαιμένες και εδωδιμένες επιφάνειες ΠΤΟΧΗ Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με σημαντική επιρροή από υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βραχόκοκκα ΠΟΛΥ ΠΤΟΧΗ Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσπασθαιμένες με μεγάλο αριθμό υλικό πλήρωσης ή επιρροής	80	70	60	50
ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ							
ΤΥΠΟΣ I. Αδιατάρακτος, μεσοστρωματιώδης έως παχοστρωματιώδης φασμίτης με αποδοτικές πολύ λεπτούς υμένες ιαλλώδους. Σε ορθές οριζοντιές ή προνήν ο μηχανισμός αστάθειας λόγω έλλειψης πλευρικού παρεμβολισμού (χαλαρή δομή) έχει κινηματικό χαρακτήρα που ελέγχεται από τα επίπεδα στρώσης, τότε δεν εφαρμόζεται ο δείκτης GSI	ΤΥΠΟΣ II. Αδιατάρακτος συμπαγής ιαλλώδης με αποδοτικές λεπτές εντράσεις φασμιτών		I	II	N/A	N/A	
ΤΥΠΟΣ III. Μέτρια διαταραγμένος φασμίτης με λεπτές εντράσεις ιαλλώδους	ΤΥΠΟΣ V. Μέτρια διαταραγμένος ιαλλώδης με εντράσεις φασμιτών		III	IV	V	VI	
ΤΥΠΟΣ IV. Μέτρια διαταραγμένη βραχώδης που αποτελείται από εναλλαγές φασμίτη και ιαλλώδους σε ίσες περίπου αναλογίες	ΤΥΠΟΣ VI. Μέτρια διαταραγμένος ιαλλώδης με αραιές εντράσεις φασμιτών		N/A	N/A	N/A	N/A	
ΤΥΠΟΣ VII. Έντονα διαταραγμένη - πτωχώνια βραχώδης, η οποία διατηρεί τη δομή της και αποτελείται από εναλλαγές φασμίτη και ιαλλώδους σε ίσες περίπου αναλογίες	ΤΥΠΟΣ VIII. Έντονα διαταραγμένη- πτωχώνια βραχώδης, η οποία διατηρεί τη δομή της και δεν έχει παραμορφωθεί- διατηρείται σε μεγάλο βαθμό και αποτελείται από ιαλλώδη ή και αρχικά σχιστόλιθους με εντράσεις φασμίτη		N/A	N/A	40	VII	VIII
ΤΥΠΟΣ IX. Αποδυναμωμένη βραχώδης που απαντάται συνήθως σε μεγάλες ζώνες στρωμάτων ή και έντονης αποδυνάμωσης. Στον τύπο αυτό απαντώνται κυρίως φωβηρά γεωλογικά με διαταραγμένο ιαλλώδη υλικό ανώμαλο	ΤΥΠΟΣ X. Τεκτονικά παραμορφωμένος, έντονα πτωχώνιος, διατηρημένος, ιαλλώδης ή αρχικός σχιστόλιθος με κερματισμό και παραμορφωμένα φασμιτικά τεμάχια που διαμορφώνουν σφαιρικό σχηματισμό. Οι στρώσεις του φασμίτη παραμένουν παράλληλες με αυτές του ιαλλώδους		N/A	N/A	30	IX	X
ΤΥΠΟΣ XI. Τεκτονικώς ισχυρά διατηρημένος ιαλλώδης ή αρχικός σχιστόλιθος σε χαλαρή δομή με θύλακες αρχίλους. Λεπτά στρώματα φασμίτη έχουν μετατραπεί σε κερματισμένα πολύ μικρά βραχώδη τεμάχια. Ορισκό η συμπεριφορά των γεωλογικών μπορεί να προσομοιωθεί με εδαφικά			N/A	N/A			XI

Σχήμα 3.3: Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Geological Strength Index) για ετερογενείς βραχώδεις όπως ο φλύσχος (Marinos B. 2007).

Όσο μεγαλύτερος ο δείκτης GSI τόσο καλύτερη η συμπεριφορά της βραχώμαζας και συνεπώς λιγότερα μέτρα υποστήριξης, μειώνοντας τελικά το κόστος της σήραγγας.

3.6 Σύστημα RMR (Bieniawski)

Το σύστημα RMR (Rock Mass Rating) το οποίο παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Bieniawski το 1976 και τροποποιήθηκε στην τελική του μορφή το 1989 αποσκοπεί στην ταξινόμηση της βραχώμαζας μέσα από μία σειρά ιδιοτήτων ενώ τα τελευταία χρόνια τείνει να αντικατασταθεί από το GSI.

$$RMR = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6$$

Κάθε μία παράμετρος βαθμολογείται ξεχωριστά ενώ το άθροισμα τους δίνουν την τιμή RMR η οποία λαμβάνει τιμές από 0 έως 100 (Souping P.,2007).

- Δείκτης R1: Αντοχή του άρρηκτου βράχου (σ_{ci}).
- Δείκτης R2: Δείκτης ποιότητας της βραχώμαζας RQD.
- Δείκτης R3: Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών.
- Δείκτης R4: Κατάσταση των επιφανειών και των ασυνεχειών.
- Δείκτης R5: Συνθήκες υπόγειου νερού.
- Δείκτης R6: Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης της σήραγγας.

Αντοχή του συμπαγούς πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σ_{ci})	
Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Βαθμολογία R1
>250	15
100-250	12-15
50-100	7-12
25-50	4-7
5-25	2-4
1-5	1-2
<1	0

Σχήμα 3.4: Τιμή του δείκτη R1.

Δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (RQD)	
RQD (%)	Βαθμολογία R2
>90	20
75-90	17-20
50-75	13-17
25-50	8-13
<25	3

Σχήμα 3.5: Τιμή του δείκτη R2.

Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών	
Απόσταση (m)	Βαθμολογία R3
>2	20
0.6-2	15-20
0.2-0.6	10-15
0.06-0.2	8-10
<0.06	5

Σχήμα 3.6: Τιμή του δείκτη R3.

Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών	
Κατάσταση επιφανειών ασυνεχειών	Βαθμολογία R4
Πολύ τραχείες, χωρίς εξαλλοίωση	30
Ελαφρώς τραχείες, ελαφρά εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης <1mm	25
Ελαφρώς τραχείες, πολύ εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης <1mm	20
Λείες ή γυαλιστερές (slickensided), υλικό πλήρωσης 1-5mm	10
Υλικό πλήρωσης πάχους άνω των 5mm	0

Σχήμα 3.7: Τιμή του δείκτη R4.

Παρουσία υπόγειου νερού	
Παρουσία υπόγειου νερού	Βαθμολογία R5
Καθόλου νερό	15
Παρουσία υγρασίας	10
Υγρές επιφάνειες	7
Στάγδην	4
Με ροή	0

Σχήμα 3.8: Τιμή του δείκτη R5.

Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου	
Προσανατολισμός ασυνεχειών	Δείκτης R6
Πολύ ευμενής	0
Ευμενής	-2
Αδιάφορος	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-15

Σχήμα 3.9: Τιμή του δείκτη R6.

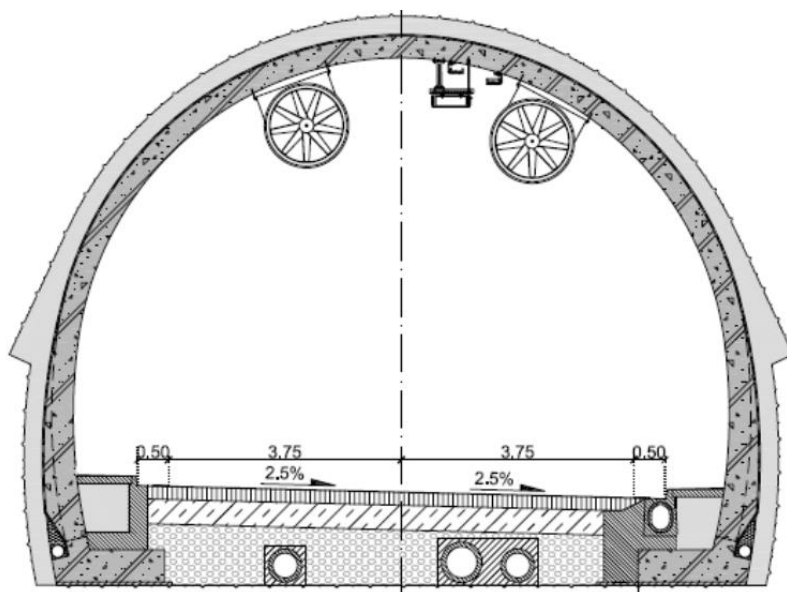
Κατάταξη βραχόμαζας		
Περιγραφή Βραχόμαζας	Κατηγορία Βραχόμαζας	Τιμές του δείκτη RMR
Πολύ καλή	I	81-100
Καλή	II	61-80
Μέτρια	III	41-60
Φτωχή	IV	21-40
Πολύ φτωχή	V	0-20

Σχήμα 3.10: Πίνακας τελικής κατάταξης ποιότητας βραχόμαζας ανάλογα με την τελική τιμή του RMR σε κατηγορίες.

Ένας μικρός δείκτης RMR οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η βραχόμαζα έχει φτωχά χαρακτηριστικά και συνεπώς απαιτούνται πολλά μέτρα υποστήριξης τα οποία τελικά θα ανεβάσουν σημαντικά το κόστος.

3.7 Εμβαδόν διατομής της σήραγγας

Οι διατομές των σηράγγων από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα λόγω της ικανότητας της βραχώμαζας να αναλαμβάνει υψηλά θλιπτικά φορτία είναι καμπυλωτές. Με αυτόν τον τρόπο δεν επιβαρύνονται από εφελκυστικά φορτία. Τα τελευταία χρόνια οι διατομές στα οδικά και σιδηροδρομικά τούνελ είναι πεταλοειδούς μορφής. Το εμβαδόν της διατομής παίζει καθοριστικό ρόλο στην ευστάθεια της σήραγγας αφού μία μικρότερη διατομή εξασφαλίζει μεγαλύτερη ευστάθεια.



Σχήμα 3.11: Τυπική διατομή οδικής σήραγγας (Alexandris .A).

Διατομές μεγάλου εμβαδού οδηγούν απαιτούν πολλά μέτρα υποστήριξης καθώς αναμένονται μεγαλύτερες συγκλίσεις. Αυτό συμβαίνει διότι η διαταραχή στη βραχώμαζα όταν ανοίγεται διατομή με μεγάλη ακτίνα είναι πολύ μεγαλύτερη με αυξανόμενες πιθανότητες καταπτώσεων. Συνεπώς και τα μέτρα υποστήριξης θα είναι πολύ μεγαλύτερα με αρνητικό αντίκτυπο στο τελικό κόστος.

3.8 Ύψος υπερκειμένων Η

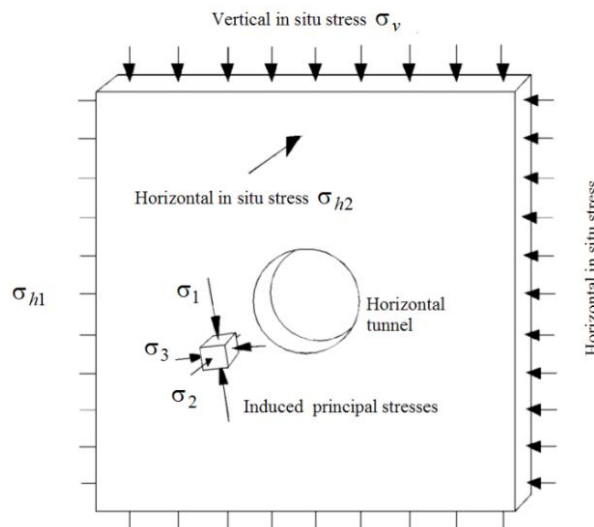
Η πίεση που ασκείται κατά την εκσκαφή μίας σήραγγας εξαρτάται κυρίως από το υπερκείμενο ύψος πετρωμάτων και εδαφών. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος των υπερκειμένων τόσο μεγαλύτερη η κατακόρυφη και οριζόντια κύρια τάση που ασκείται κατά τη φάση εκσκαφής. Η ορθή κύρια τάση εξαρτάται από το ειδικό βάρος του άνωθεν υλικού και από το υπερκείμενο ύψος.

$$\sigma_h = \gamma \cdot H$$

Η οριζόντια κύρια τάση εξαρτάται από το ύψος των υπερκειμένων, το ειδικό βάρος των υπερκειμένων πετρωμάτων και εδαφών καθώς και από το συντελεστή οριζόντιας πίεσης K_0 . Ο συντελεστής K_0 λαμβάνει τιμές συνήθως μεταξύ 0.4 και 1 ενώ δεν αποκλείονται μεγαλύτερες ή και μικρότερες τιμές. Όταν οι τεκτονικές πιέσεις δεν επηρεάζουν το πέτρωμα οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0.6 και 1 ενώ σε αποσαθρωμένες βραχώμαζες λαμβάνει τιμές 0.4 έως και 0.7. Γενικότερα για να λάβει τιμές μεγαλύτερης της μονάδας πρέπει το τεκτονικό πεδίο να είναι θλιπτικό και είναι σύνηθες σε χώρες όπως η Νότια Αφρική, ο Καναδάς κ.λπ.

$$\sigma_h = \gamma \cdot H \cdot K_0$$

Όσο μεγαλύτερο το βάθος τόσο μεγαλύτερες και οι πιέσεις που ασκούνται και θα πρέπει να αναλάβει η υποστήριξη της σήραγγας. Στα μεγάλα βάθη όμως θα είναι μεγαλύτερες και οι πλευρικές πιέσεις με αποτέλεσμα η βραχώμαζα να είναι πιο συμπαγής με αποτέλεσμα να μην αναμένονται διατμητικές αστοχίες στη στέψη και αποκολλήσεις τεμαχών.



Σχήμα 3.12: Κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις περιμετρικά μίας κυκλικής σήραγγας (Rocscience).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι μεγάλο ύψος υπερκειμένων οδηγεί σε μεγάλες πιέσεις και συνεπώς σε αυξανόμενη ανάγκη για περισσότερα μέτρα υποστήριξης με μεγάλη επιβάρυνση στο τελικό κόστος της σήραγγας.

Κεφάλαιο 4^ο : Κόστος κατασκευής σηράγγων.

4.1 Εισαγωγή στο κόστος των κατασκευών.

Η εκτίμηση του κόστους ενός τεχνικού έργου αποτελεί τον πιο καθοριστικό παράγοντα κατά τη φάση σχεδιασμού. Η σύνταξη τους κόστους ενός τεχνικού έργου εξαρτάται από τη φύση και το μέγεθος του έργου καθώς και από διάφορους παράγοντες οι οποίοι δεν είναι εύκολο πάντα να ποσοτικοποιηθούν. «Για τον υπολογισμό του κόστους ενός έργου απαιτείται η κατάτμηση του σε επιμέρους δραστηριότητες και εργασίες και η εκτίμηση των μέσων-εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση των δραστηριοτήτων. Το κόστος κάθε δραστηριότητας είναι το σύνολο της αξίας των υλικών, της εργασίας του προσωπικού και των μηχανημάτων» (Πολύζος, 2017). Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικοί παράγοντες που επιδρούν σημαντικά στο τελικό κόστος κατασκευής.

- Η εξειδίκευση και η υπευθυνότητα των εργαζομένων.
- Η ποιότητα των μηχανημάτων και των υλικών που χρησιμοποιούνται.
- Η οργάνωση και η διάταξη του εργοταξίου.
- Η χρηματοδότηση και η ρευστότητα κατά τη φάση κατασκευής.
- Ο πληθωρισμός.
- Ο σωστός προγραμματισμός εργασιών στο έργο
- Εργατικά ατυχήματα

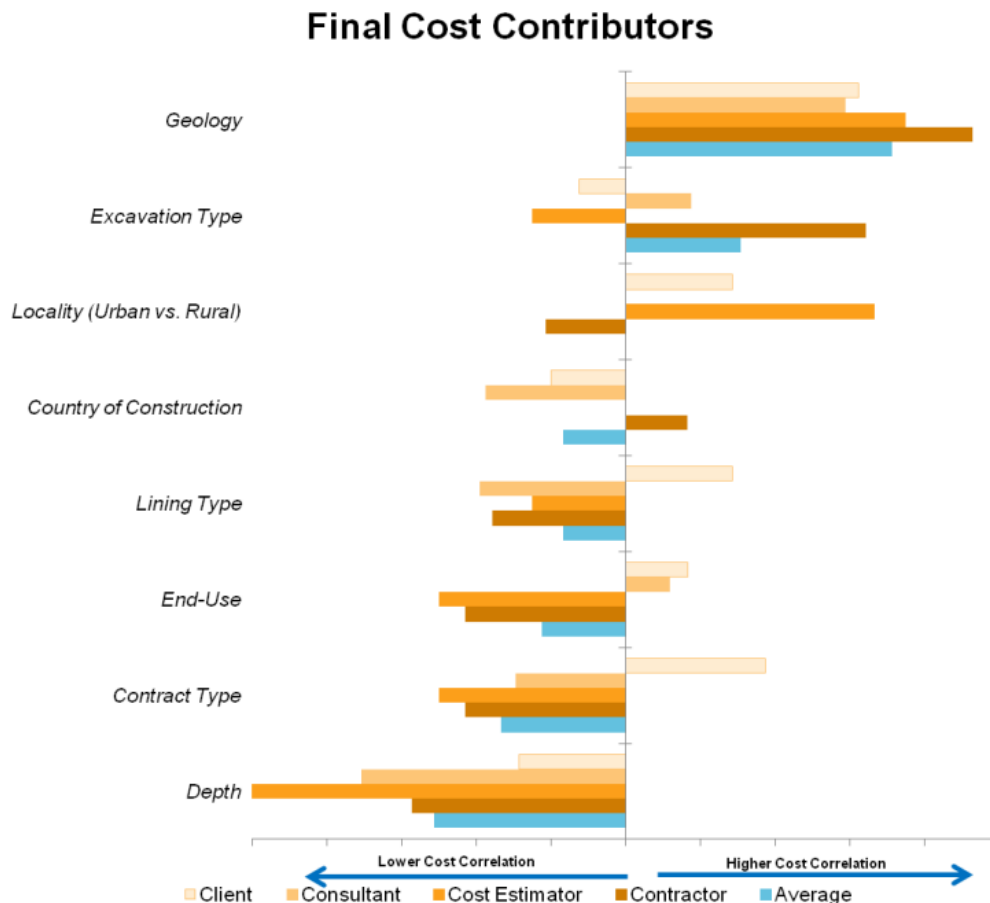
Για τον υπολογισμό του κόστους εκτός από την ανάλυση των εργασιών είναι σκόπιμο ο μελετητής να λάβει υπόψιν του και το χρονοδιάγραμμα του έργου. Μεγάλα τεχνικά έργα που διαρκούν για χρόνια πρέπει να αντιμετωπίζονται δυναμικά ως προς το κόστος καθώς το κόστος κάθε εργασίας ή λειτουργίας ενός μηχανήματος μεταβάλλονται χρονικά.

4.2 Κόστος κατασκευής των σηράγγων.

Το κόστος κατασκευής οδικών και σιδηροδρομικών σηράγγων εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων όπως είναι η γεωλογία της περιοχής, ο τύπος εκσκαφής, τα χαρακτηριστικά της διατομής, το υπερκείμενο ύψος, τα μέτρα υποστήριξης κ.λπ..

Το 2012 από τους Efron και Read πραγματοποιήθηκε ένα ερωτηματολόγιο σε εργολάβους, εμπειρογνώμονες, συμβούλους, πελάτες και εκτιμητές κόστους σε σχέση

με βασικούς παράγοντες κόστους που σχετίζονται με έργα σήραγγας. Βάσει των απαντήσεων από τους ενδιαφερόμενους η γεωλογία είναι η πιο σημαντική μεταβλητή προσδιορισμού του κόστους, ενώ στη δεύτερη θέση έρχεται ο τύπος εκσκαφής.

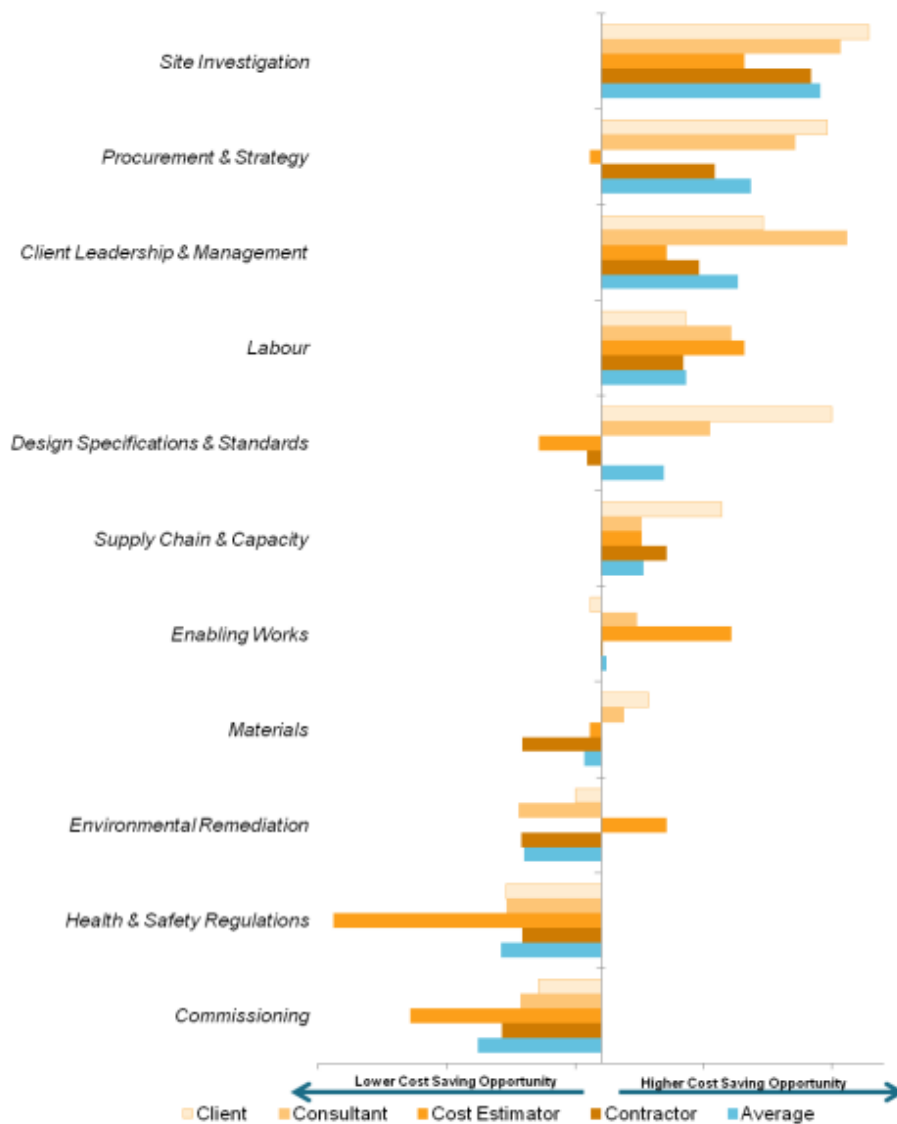


Εικόνα 4.1: Διάγραμμα συνεισφοράς του κόστους σε έργα σιράγγων (Efron and Read, 2012).

Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι το βάθος φαίνεται να είναι αυτό που επηρεάζει λιγότερο το κόστος με τον τύπο του συμβολαίου και την τελική χρήση του έργου να ακολουθούν.

Στην ίδια μελέτη από τους Efron και Read παρουσιάστηκαν βάσει ερωτηματολογίου στους ίδιους ενδιαφερόμενους οι παράγοντες οι οποίοι είναι ικανοί να μειώσουν το σημαντικά το τελικό κόστος.

Cost Reduction Opportunities



Εικόνα 4.2: Παράγοντες που δύναται να έχουν σημαντική επιρροή στη μείωση του κόστους (Efron and Read, 2012).

Από την παραπάνω εικόνα προκύπτει ότι η έρευνα πεδίου (site investigation) είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που μπορεί να μειώσει το κόστος ενώ η διαχείριση και στρατηγική ακολουθούν. Το commissioning και οι κανονισμοί ασφαλείας φαίνεται να επηρεάζουν λιγότερο τον προϋπολογισμό ειδικότερα από την πλευρά των εργολάβων.

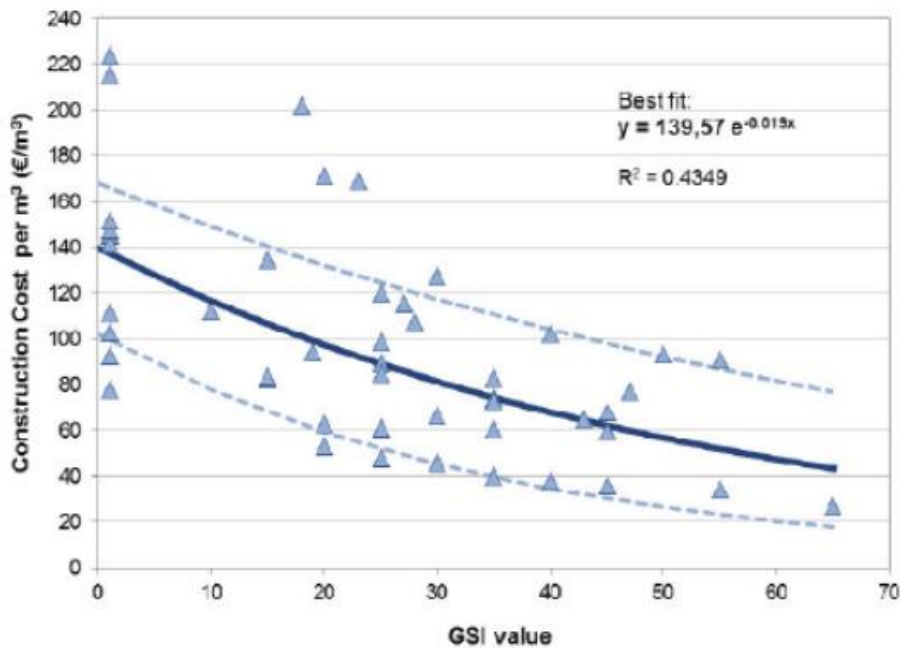
Βάσει ερευνών σε πολλά έργα σηράγγων οι Παρασκευοπούλου και Μπάτσης (2020) δημοσίευσαν έναν πίνακα που παρουσιάζει την επίδραση της έρευνας πεδίου συναρτήσει της υπέρβασης του κόστους.

Πίνακας 4.1: Η συνεισφορά της έρευνας πεδίου στη μείωση υπέρβασης του κόστους (Paraskevopoulou and Batsis, 2020).

Ground Investigation Expenditure (%)	Construction Cost Overrun Estimation (%)	Construction Cost Overrun (2019 Price in Million £)
1.87	66	7849
2	60	7135
3	45	5351
4	34	4043
5	25	2973
6	18	2140
7	14	1665
11	8	951

Από την πίνακα 4.1 συμπεραίνεται ότι η αύξηση του κόστους στην έρευνα πεδίου έχει σημαντικό οικονομικό όφελος καθώς μειώνει την υπέρβαση του κόστους έως και 60%. Αυτό συμβαίνει λόγω της γεωλογικής αβεβαιότητας που υπάρχει στα έργα σιράγγων. Όταν αυξάνεται για παράδειγμα ο αριθμός των γεωτρήσεων και των δοκιμών μηχανικών χαρακτηριστικών μειώνεται δραματικά η πιθανότητα να υπάρξουν αστοχίες κατά την μελέτη και την κατασκευή με θετική επίδραση στο κόστος. Το γεγονός αυτό απαιτεί μεγαλύτερα κεφάλαια στο αρχικό στάδιο του έργου και συνεπώς αυξημένη αρχική ρευστότητα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τα γεωλογικά χαρακτηριστικά αποτελούν την πιο σημαντική παράμετρο προσδιορισμού του κόστους. Στο παρελθόν έχουν γίνει αρκετές έρευνες ώστε να εκτιμηθεί το κόστος συναρτήσει γεωλογικών και γεωτεχνικών παραμέτρων. Ένα διάγραμμα συσχέτισης του κόστους και του γεωλογικού δείκτη GSI παρουσιάστηκε από τους Παρασκευοπούλου και Μπενάρδο (2013) το οποίο δείχνει ότι σήραγγες με υψηλότερες τιμές GSI έχουν μικρότερο κόστος ανά κυβικό μέτρο.



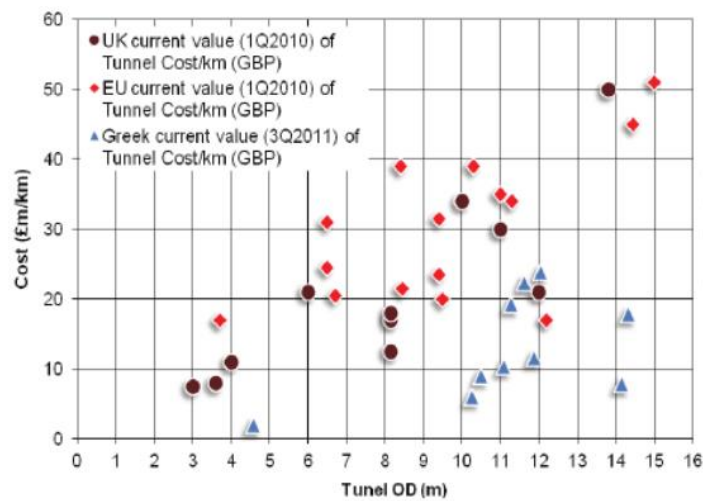
Εικόνα 4.3: Κόστος/ m^3 συναρτήσει του γεωλογικού δείκτη GSI (Benardos and Paraskevopoulou, 2013).

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το κόστος των σηράγγων με πτωχά γεωλογικά χαρακτηριστικά όπου το GSI κυμαίνεται από 10-20 είναι κοντά στα 100 ευρώ ανά κυβικό μέτρο με μεγάλη όμως διασπορά τιμών. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι σχηματισμοί με χαμηλό δείκτη GSI είναι πολύ πιθανό να εμφανίσουν αστοχίες και καταπτώσεις με δυσμενή επίπτωση στον προϋπολογισμό. Αντιθέτως σχηματισμοί βραχώδης με δείκτη GSI που μεγαλύτερο του 50 έχουν πολύ μικρότερη διασπορά στο ως προς το τελικό κόστος με τιμή περίπου 50 ευρώ το κυβικό.

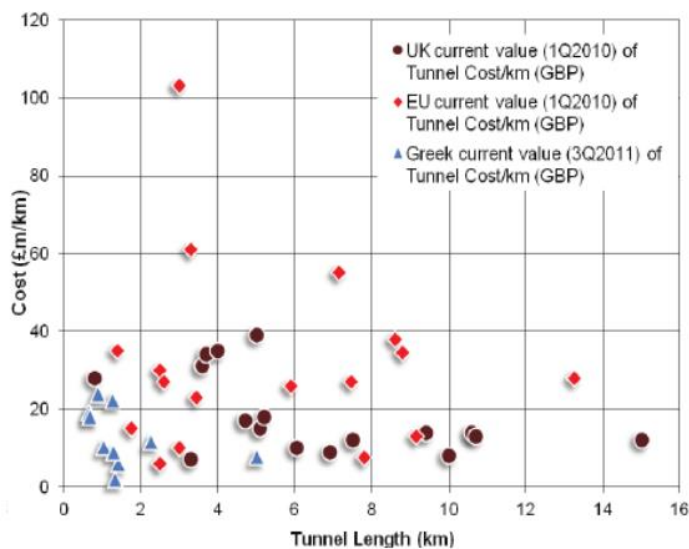
Δύο ακόμα παράγοντας που επηρεάζουν τον τελικό προϋπολογισμό είναι το μήκος και το εμβαδόν της διατομής μίας σήραγγας. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του μετώπου τόσο περισσότερα μέτρα υποστήριξης θα απαιτηθούν ώστε να μην υπάρχουν αστοχίες και συγκλίσεις. Εν αντιθέσει με το εμβαδόν της διατομής, μελέτες έχουν δείξει ότι σήραγγες με μεγάλο μήκος έχουν μικρότερο κόστος ανά μέτρο σε σχέση με μικρότερες σε μήκος σήραγγες. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι κάποια κόστη είναι σταθερά ανεξάρτητα από το μήκος της σήραγγα καθώς και στο γεγονός ότι το εργοτάξιο προσαρμόζεται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη εργασία και οργάνωση. Στην επιστήμη της οικονομίας αυτό αναφέρεται

ως οικονομία κλίμακας και δείχνει την τάση να μειώνεται το κόστος όταν αυξάνεται το μέγεθος της παραγωγής.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα κόστους συναρτήσει του εμβαδόν διατομής και του μήκους της σήραγγας όπως παρουσιάστηκαν από τους Παρασκευοπούλου και Μπενάρδο (2013) βασισμένα σε εργασία HM Treasure (2010). Τα διαγράμματα αυτά βασίστηκαν σε σήραγγες που κατασκευάστηκαν σε Ηνωμένο Βασίλειο, Ευρώπη και Ελλάδα.



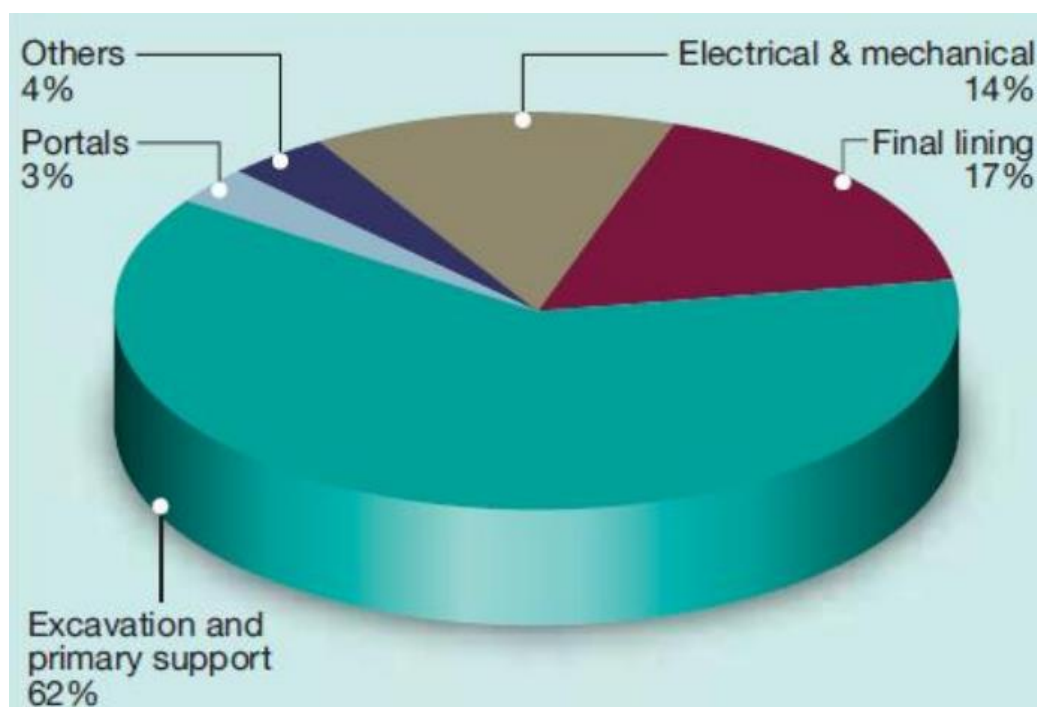
Εικόνα 4.4: Κόστος/km συναρτήσει της διαμέτρου σε έργα σιηράγγων (Benardos and Paraskevopoulou 2013).



Εικόνα 4.5: Κόστος/km συναρτήσει του μήκους σιηράγγων (Benardos and Paraskevopoulou 2013).

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.4 φαίνεται η αύξηση του κόστους συναρτήσει του εμβαδού διατομής ενώ είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον ότι το κόστος ανά χιλιόμετρο εκτοξεύεται για διατομές μεγαλύτερες των 14m². Στο διάγραμμα της εικόνας 4.5 όπως αναφέρθηκε προηγουμένως διακρίνεται ότι η αύξηση του μήκους οδηγεί σε μικρότερο κόστος ανά χιλιόμετρο ενώ παρουσιάζει ενδιαφέρον το γεγονός ότι για σήραγγες άνω των 9 χιλιομέτρων η διασπορά μεταξύ του κόστους ελαττώνεται σημαντικά.

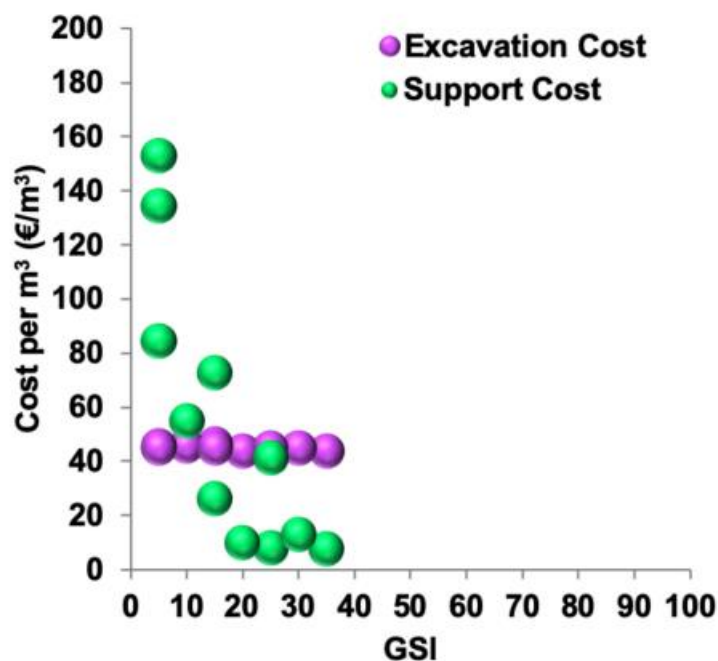
Τις τελευταίες δεκαετίες πραγματοποιήθηκαν πολλές έρευνες για την ανάλυση του κόστους σηράγγων σε επί μέρους κατηγορίες όπως είναι η προσωρινή και τελική επένδυση, το κόστος εκσκαφής, ο Η/Μ εξοπλισμός κλπ.. Μία τέτοια μελέτη πραγματοποιήθηκε από τον Λαμπρόπουλο (2005) για τις σήραγγες της Εγνατίας οδού συνολικού μήκους 100 χιλιομέτρων. Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζεται ο καταμερισμός του κόστους βάσει των παραπάνω σηράγγων.



Εικόνα 4.6: Εγνατία Οδός. Κατανομή συνολικού κόστους σηράγγων μέχρι τα τέλη του 2003 (Λαμπρόπουλος, 2005).

Όπως είναι κατανοητό η εκσκαφή καθώς και τα μέτρα της άμεσης υποστήριξης αποτελούν το μεγαλύτερο κόστος στα έργα σηράγγων. Το ποσοστό αυτό μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 75% για κακής ποιότητας σχηματισμό (Λαμπρόπουλος 2005). Είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι το κόστος εκσκαφής παραμένει σταθερό ανεξάρτητα με τα

χαρακτηριστικά της βραχώμαζας και η υποστήριξη είναι αυτή που θα μεταβληθεί ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού. Αυτό γίνεται κατανοητό από το διάγραμμα της εικόνας 4.7.



Εικόνα 4.7: Κόστος/km της εκσκαφής και της υποστήριξης συναρτήσει του γεωλογικού δείκτη GSI (Paraskevoπούλου and Boutsis 2020).

Από το διάγραμμα της εικόνας 4.7 προκύπτει σύμφωνα με τους Παρασκευοπούλου και Μπούτση (2020) ότι το κόστος/m³ της υποστήριξης μειώνεται με την αύξηση του γεωλογικού δείκτη GSI ενώ το κόστος/m³ λόγω της εκσκαφής είναι σταθερό ανεξάρτητο του δείκτη GSI.

4.3 Τιμολόγηση Ελληνικών σηράγγων.

Η προκοστολόγηση των σηράγγων στην Ελλάδα βασίζεται στα Ενιαία Τιμολόγια Εργασιών για τις δημοπρατήσιες έργων Οδοποιίας και Υδραυλικών σύμφωνα με την απόφαση Αρ.Δ17α/01/93/ΦΝ.437 που δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ 1556 Β' / 18.10.2004, το Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., κατ' εξουσιοδότηση του Ν. 3263/2004 (άρθρο 8).

Σύμφωνα με το Ν. 3263/2004 (άρθρο 8) ισχύει το σύστημα ανάθεσης των έργων με βάση την χαμηλότερη οικονομική προσφορά. Στόχος των Νέων Ενιαίων Τιμολογίων (NET) είναι η κατά ενιαίο τρόπο κατάρτιση των προϋπολογισμών των έργων σε ολόκληρη την επικράτεια. Οι τιμές των NET δεν βασίσθηκαν σε κάποιο σύστημα αναλύσεων τιμών, αλλά προσδιορίσθηκαν από Επιτροπή Διευθυντών Κατασκευαστικών Διευθύνσεων του ΥΠΕΧΩΔΕ, με βάση στοιχεία τιμών προσφοράς δημοπρατηθέντων έργων, έρευνα αγοράς και υπολογισμούς. Οι τιμές αυτές προσδιορίσθηκαν κατ' αρχήν το 2004 (κατά την αρχική έκδοση των NET) και στην συνέχεια επικαιροποιήθηκαν ορισμένες εξ αυτών κατά τις βελτιώσεις - συμπληρώσεις των NET που έγιναν τον Αύγουστο του 2007 (όλων των κατηγοριών έργων), τον Μάιο του 2008 (ΟΔΟ) και τον Φεβρουάριο του 2009 (ΥΔΡ, ΛΙΜ) (Παρασκευοπούλου 2011). Η κατασκευή των σηράγγων γίνεται βάσει των τιμολογίων Οδοποιίας και Υδραυλικών έργων.

Κατά τη διαδικασία προκοστολόγησης ο μελετητής καλείται να επιλέξει την τιμή μονάδας που πρόκειται να επιλεγεί από την κατηγορία των χωματοουργικών η οποία όμως αποτελείται από πολλές ασάφειες. Είναι συνεπώς στην κρίση του μελετητή η τιμή της μονάδας που θα επιλέξει μεταβάλλοντας σημαντικά το τελικό κόστος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το Ενιαίο τιμολόγιο Οδοποιίας σε χωματοουργικά έργα όπου αφορά τη διαδικασία εκσκαφής των χωματοουργικών σε μία σήραγγα.

Άρθρο Α-1 ΕΚΣΚΑΦΕΣ ΧΑΛΑΡΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

(Αναθεωρείται με το άρθρο ΟΔΟ-1110)

Εκσκαφή, με την μεταφορά σε οποιαδήποτε απόσταση, φυτικών γαιών, λύος, τύρφης και λοιπών επιφανειακών ακατάλληλων εδαφών οποιουδήποτε βάθους και πλάτους, σύμφωνα με τη μελέτη, είτε για την έδραση επιχωμάτων και εξυγιαντικών στρώσεων είτε για το διαχωρισμό τους από τα υπόλοιπα, κατάλληλα για την κατασκευή επιχωμάτων, προϊόντα ορυγμάτων. Στην τιμή μονάδας περιλαμβάνονται:

- η προσέγγιση των μεταφορικών μέσων και μηχανημάτων, και η εκσκαφή με κάθε μέσον,

- η εκρίζωση, η κοπή και η απομάκρυνση θάμνων και δένδρων οποιασδήποτε διαμέτρου (πλην εκείνων που θα παραδοθούν προς εκμετάλλευση),
- η απομάκρυνση και αποστράγγιση των υδάτων και η μόρφωση παρειών και σκάφης,
- η διαλογή των προϊόντων εκσκαφής,
- οι κάθε είδους φορτοεκφορτώσεις και μεταφορές με οποιοδήποτε μέσο και σε οποιαδήποτε απόσταση, είτε για προσωρινή απόθεση, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως φυτικές γαίες στο έργο είτε για απόρριψη σε επιτρεπόμενες θέσεις εφόσον αυτά κριθούν ακατάλληλα για φυτικά, ή πλεονάζοντα,
- οι τυχόν ενδιάμεσες φορτοεκφορτώσεις και μετακινήσεις, αν τυχόν καταληφθεί ο απαιτούμενος χώρος των προσωρινών αποθέσεων από την εκτέλεση των υπολοίπων εργασιών, καθώς και διαμόρφωσή τους σε σειρά και η διαφύλαξή τους μέχρι να χρησιμοποιηθούν στο έργο. Σε περίπτωση πλεοναζόντων ή ακατάλληλων προϊόντων στην τιμή περιλαμβάνεται, εκτός από τη μεταφορά τους, και η διαμόρφωσή τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ΕΤΕΠ 02-01-02-00 και των περιβαλλοντικών όρων του έργου. Επιμέτρηση με λήψη αρχικών και τελικών διατομών.

Άρθρο Α-2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΚΣΚΑΦΕΣ ΣΕ ΕΔΑΦΟΣ ΓΑΙΩΔΕΣ-ΗΜΙΒΡΑΧΩΔΕΣ

(Αναθεωρείται με το άρθρο ΟΔΟ-1123Α)

Γενικές εκσκαφές, με την μεταφορά σε οποιαδήποτε απόσταση, εδαφών γαιωδών και ημιβραχωδών οποιασδήποτε συστάσεως, ανεξαρτήτως βάθους, πλάτους και κλίσεως πρανών, σε νέο έργο ή για επέκταση ή συμπλήρωση ή διαπλάτυνση υπάρχοντος, ανεξαρτήτως της θέσης εργασίας και των δυσχερειών που προκαλεί (κοντά ή μακριά, χαμηλά ή υψηλά σχετικά με το υπάρχον έργο), για οποιοδήποτε σκοπό και με οποιοδήποτε εκσκαπτικό μέσο, εν ξηρώ ή με παρουσία νερών, σύμφωνα με την ΕΤΕΠ 02-02-01-00. Με το άρθρο αυτό τιμολογούνται επίσης οι ακόλουθες εκσκαφές σε εδάφη ανάλογης σκληρότητας: - ανοιχτών τάφρων για το τμήμα τους πλάτους μεγαλύτερου των 5,00 m μετά της μόρφωσης των πρανών και του πυθμένα τους, - για τη δημιουργία αναβαθμών προς αγκύρωση των επιχωμάτων,

ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΟ ΤΙΜΟΛΟΓΙΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ4.0 σελ. 13 - τριγωνικών τάφρων μετά της μόρφωσης των πρανών, όταν αυτές κατασκευάζονται στη συνέχεια των γενικών εκσκαφών της οδού, - για τον καθαρισμό οχετών ύψους και πλάτους μεγαλύτερου των 5,00 m, - τεχνικών Cut and Cover μετά των μέτρων προσωρινής και μόνιμης αντιστήριξης των πρανών των εκσκαφών εφόσον δεν αποζημιώνονται με άλλο άρθρο αυτού του τιμολογίου - για τη δημιουργία στομίων σηράγγων και Cut and Cover Στην τιμή μονάδας περιλαμβάνονται:

- η προσέγγιση μηχανημάτων και μεταφορικών μέσων, η εκσκαφή με οποιοδήποτε μέσο και υπό οποιοσδήποτε συνθήκες,
- η αποστράγγιση των υδάτων, η μόρφωση των παρειών, των πρανών και του πυθμένα της σκάφης και ο σχηματισμός των αναβαθμών,
- η διαλογή, φύλαξη, φορτοεκφόρτωση σε οποιοδήποτε μεταφορικό μέσο και η μεταφορά των προϊόντων σε οποιαδήποτε απόσταση για τη χρησιμοποίηση των κατάλληλων στο έργο (π.χ. κατασκευή επιχωμάτων) ή για απόρριψη των ακατάλληλων ή πλεοναζόντων σε επιτρεπόμενες τελικές ή προσωρινές θέσεις,
- η εναπόθεση σε τελικές ή ενδιάμεσες θέσεις, η επαναφόρτωση από τις θέσεις των προσωρινών αποθέσεων και η εκφόρτωση σε τελικές θέσεις, καθώς και η διάστρωση και διαμόρφωση των χώρων απόθεσης σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς όρους ,
- η αντιστήριξη των πρανών εκσκαφή όπου τυχόν αυτή απαιτείται, καθώς και η εκθάμνωση κοπή, εκρίζωση και απομάκρυνση δένδρων, ανεξαρτήτως περιμέτρου κορμού, σε οποιαδήποτε απόσταση,
- η αντιμετώπιση πάσης φύσεως δυσχερειών που προκύπτουν από τη σύγχρονη κυκλοφορία, όπως περιορισμένα μέτωπα και όγκοι εκσκαφών κλπ.,
- η συμπύκνωση της σκάφης των ορυγμάτων κάτω από τη "στρώση έδρασης οδοστρώματος" μέχρι του βάθους που λαμβάνεται υπόψη στον καθορισμό της Φέρουσας Ικανότητας Έδρασης (Φ.Ι.Ε), όπως αυτή ορίζεται στην μελέτη, σε βαθμό συμπύκνωσης που να αντιστοιχεί σε ξηρά φαινόμενη πυκνότητα ίση κατ' ελάχιστο με το 90% της πυκνότητας που επιτυγχάνεται εργαστηριακά κατά την τροποποιημένη δοκιμή Proctor (Proctor Modified κατά ΕΛΟΤ EN 13286-2),

- οι πάσης φύσεως σταλίες του μηχανικού εξοπλισμού και των μεταφορικών μέσων,
- η επανεπίχωση (με προϊόντα εκσκαφών) των θεμελίων και τάφρων εκτός του σώματος της οδού, που οι εκσκαφές τους αποζημιώνονται με το άρθρο αυτό, όταν δεν υπάρχει απαίτηση συμπύκνωσης. Επισημαίνεται ότι η τιμή είναι γενικής εφαρμογής ανεξάρτητα από την εκτέλεση της εργασίας σε μια ή περισσότερες φάσεις που υπαγορεύονται από το πρόγραμμα εκτέλεσης του έργου ή άλλους τοπικούς περιορισμούς,

Επισημαίνεται ότι η τιμή είναι γενικής εφαρμογής ανεξάρτητα από την εκτέλεση της εργασίας σε μια ή περισσότερες φάσεις που υπαγορεύονται από το πρόγραμμα εκτέλεσης του έργου ή άλλους τοπικούς περιορισμούς.

Η αποξήλωση ασφαλοταπήτων, στρώσεων οδοστρωσίας σταθεροποιημένων με τσιμέντο, πλακοστρώσεων, δαπέδων από σκυρόδεμα, κρασπεδορείθρων και στερεών έδρασης και εγκιβωτισμού τους, καθώς και πάσης φύσεως κατασκευών που βρίσκονται εντός του όγκου των γενικών εκσκαφών, επιμετρώνται και τιμολογούνται ιδιαίτερα με βάση τα οικεία άρθρα του παρόντος τιμολογίου.

Επιμέτρηση με λήψη αρχικών και τελικών διατομών και μέχρι τα όρια εκσκαφής των ενγκεκριμένων συμβατικών σχεδίων και σύμφωνα με το πρωτόκολλο χαρακτηρισμού. Διευκρινίζεται ότι ουδεμία αποζημίωση καταβάλλεται στον Ανάδοχο για τις επί πλέον των προβλεπομένων από τη μελέτη εκσκαφές εκτός εάν έχει δοθεί ειδική εντολή από την Υπηρεσία.

Άρθρο Α-3 ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΚΣΚΑΦΕΣ ΣΕ ΕΔΑΦΟΣ ΒΡΑΧΩΔΕΣ

Γενικές εκσκαφές, βραχωδών εδαφών, περιλαμβανομένων γρανιτικών και κροκαλοπαγών, ανεξαρτήτως βάθους, ύψους και κλίσεως πρανών, σε νέο έργο ή για επέκταση ή συμπλήρωση υπάρχοντος, ανεξαρτήτως της θέσης εργασίας και των δυσχερειών προσπέλασης, με οποιοδήποτε εκσκαπτικό μέσο, με ή χωρίς κανονική ή περιορισμένη χρήση εκρηκτικών (μετά από έγκριση της Υπηρεσίας και με ευθύνη του Αναδόχου, λαμβανομένων υπόψη των ισχυόντων περιορισμών ή και απαγόρευσης χρήσης εκρηκτικών λόγω γειννίας με κτίσματα, πυλώνες και υποσταθμούς της ΔΕΗ,

εγκαταστάσεις Ο.Κ.Ω., στρατιωτικές εγκαταστάσεις κλπ), με την μεταφορά των προϊόντων σε οποιαδήποτε απόσταση, σύμφωνα με την ΕΤΕΠ 02-02-01- 00.

Με το άρθρο αυτό τιμολογούνται επίσης οι ακόλουθες βραχώδεις εκσκαφές:

- ανοιχτών τάφρων για το τμήμα τους πλάτους μεγαλύτερου των 5,00 m, με την μόρφωση των πρανών και του πυθμένα τους,
- για τη δημιουργία αναβαθμών προς αγκύρωση των επιχωμάτων
- τριγωνικών τάφρων με την μόρφωση των πρανών, όταν αυτές διαμορφώνονται συγχρόνως με τις γενικές εκσκαφές της οδού
- τεχνικών Cut & Cover

Στην τιμή μονάδας περιλαμβάνονται:

- η όρυξη με οποιοδήποτε μέσο ή και υπό οποιοσδήποτε συνθήκες,
- η απομάκρυνση και αποστράγγιση των υδάτων, η μόρφωση των παρειών, των πρανών και του πυθμένα της σκάφης και ο σχηματισμός των αναβαθμών
- η διάνοιξη διατηρημάτων γόμωσης,
- η προμήθεια, μεταφορά, τοποθέτηση, πυροδότηση εκρηκτικών υλών με όλες τις απαιτούμενες εργασίες για ασφαλή έκρηξη και όλα τα απαιτούμενα υλικά (εκρηκτικές ύλες, θρυαλίδες, πυροκροτητές, επιβραδυντές κ.λ.π.)
- η διαλογή, φύλαξη, φορτοεκφόρτωση σε οποιοδήποτε μεταφορικό μέσο και η μεταφορά των προϊόντων σε οποιαδήποτε απόσταση για τη χρησιμοποίησή τους στο έργο (π.χ. κατασκευή επιχωμάτων) ή για απόρριψη των πλεοναζόντων σε επιτρεπόμενες τελικές,
- η εναπόθεση σε τελικές ή ενδιάμεσες θέσεις, η επαναφόρτωση από τις θέσεις προσωρινών αποθέσεων και η εκφόρτωση σε τελικές θέσεις, καθώς και η διάστρωση και διαμόρφωση των αποθέσεων σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς όρους του έργου
- η καθαίρεση κατασκευών από άοπλο σκυρόδεμα που βρίσκονται εντός της ζώνης των γενικών εκσκαφών.

- η τυχόν απαιτούμενη αντιστήριξη των πρανών εκσκαφής καθώς και η εκθάμνωση, κοπή, εκρίζωση και απομάκρυνση δένδρων, ανεξαρτήτως περιμέτρου, σε οποιαδήποτε απόσταση.
- η αντιμετώπιση πάσης φύσεως δυσχερειών που προκύπτουν από τη σύγχρονη κυκλοφορία, όπως περιορισμένα μέτωπα και όγκοι εκσκαφών κλπ.
- η προσκόμιση, η αποκόμιση και οι πάσης φύσεως σταλίες του απαιτούμενου μηχανικού εξοπλισμού και μεταφορικών μέσων
- η επανεπίχωση (με προϊόντα εκσκαφών) θεμελίων και τάφρων εκτός του σώματος της οδού, που οι εκσκαφές τους αποζημιώνονται με το άρθρο αυτό, όταν δεν υπάρχει απαίτηση συμπύκνωσης,

Επισημαίνεται ακόμη ότι η τιμή είναι γενικής εφαρμογής, ανεξάρτητα από την εκτέλεση της εργασίας σε μια φάση ή περισσότερες, που υπαγορεύονται από το πρόγραμμα εκτέλεσης του έργου ή άλλους τοπικούς περιορισμούς.

Χρήση εκρηκτικών επιτρέπεται υπό την προϋπόθεση ότι έχουν ληφθεί οι απαραίτητες εγκρίσεις για τη χρήση των εκρηκτικών και δεν απαγορεύεται η χρήση τους από τους περιβαλλοντικούς όρους του έργου.

Επιμέτρηση με λήψη αρχικών και τελικών διατομών και μέχρι τα όρια εκσκαφής των εγκεκριμένων συμβατικών σχεδίων και σύμφωνα με το πρωτόκολλο χαρακτηρισμού. Όπως και στην περίπτωση γενικών εκσκαφών γαιών-ημιβράχου, ουδεμία αποζημίωση καταβάλλεται στον Ανάδοχο για τις επί πλέον εκσκαφές εκτός εάν έχει δοθεί ειδική εντολή από την Υπηρεσία.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πίνακες χωματοουργικών για έργα προϋπολογισμού από 0 € έως και > 10.000.000 € σύμφωνα με την αναθεώρηση του Β' Τριμήνου 2008.

Πίνακας 4.2: Έργα προϋπολογισμού 0 – 1.500.000€.

α/α	α/α Τιμολογ.	Είδος Εργασίας	Άρθρο	Μονάδα	Ποσότητα	Τιμή Μονάδας	Δαπάνη	
			Αναθεώρησης				Μερική	Ολική
		Ομάδα Α: Χωματοουργικά						
		Εκσκαφές						
1	A-1	Εκσκαφή ακατάλληλων εδαφών	ΟΔΟ-1110	m ³		0,36*		
2	A-2	Εκσκαφή σε έδαφος γαιώδες - ημιβραχώδες	ΟΔΟ-1123Α	m ³		0,70*		
	A-3	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες						
3	A-3.1	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες με χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		2,65*		
4	A-3.2	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες με ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		4,42*		
5	A-3.3	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες χωρίς χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		7,59*		

Πίνακας 4.3: Έργα προϋπολογισμού 1.500.000 – 6.000.000€.

α/α	α/α Τιμολογ.	Είδος Εργασίας	Άρθρο	Μονάδα	Ποσότητα	Τιμή Μονάδας	Δαπάνη	
			Αναθεώρησης				Μερική	Ολική
		Ομάδα Α: Χωματοουργικά						
		Εκσκαφές						
1	A-1	Εκσκαφή ακατάλληλων εδαφών	ΟΔΟ-1110	m ³		0,31*		
2	A-2	Εκσκαφή σε έδαφος γαιώδες - ημιβραχώδες	ΟΔΟ-1123Α	m ³		0,61*		
	A-3	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες						
3	A-3.1	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες με χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		2,31*		
4	A-3.2	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες με ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		3,85*		
5	A-3.3	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες χωρίς χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		6,60*		

Πίνακας 4.4: Έργα προϋπολογισμού 6.000.000 – 10.000.000€.

α/α	α/α Τιμολογ.	Είδος Εργασίας	Άρθρο	Μονάδα	Ποσότητα	Τιμή Μονάδας	Δαπάνη	
			Αναθεώρησης				Μερική	Ολική
		Ομάδα Α: Χωματοργικά						
		Εκσκαφές						
1	A-1	Εκσκαφή ακατάλληλων εδαφών	ΟΔΟ-1110	m ³		0,29*		
2	A-2	Εκσκαφή σε έδαφος γαιώδες - ημιβραχώδες	ΟΔΟ-1123Α	m ³		0,58*		
	A-3	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες						
3	A-3.1	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες με χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		2,20*		
4	A-3.2	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες με ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		3,68*		
5	A-3.3	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες χωρίς χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		6,30*		

Πίνακας 4.6: Έργα προϋπολογισμού πάνω από 10.000.000€.

α/α	α/α Τιμολογ.	Είδος Εργασίας	Άρθρο	Μονάδα	Ποσότητα	Τιμή Μονάδας	Δαπάνη	
			Αναθεώρησης				Μερική	Ολική
		Ομάδα Α: Χωματοργικά						
		Εκσκαφές						
1	A-1	Εκσκαφή ακατάλληλων εδαφών	ΟΔΟ-1110	m ³		0,28*		
2	A-2	Εκσκαφή σε έδαφος γαιώδες - ημιβραχώδες	ΟΔΟ-1123Α	m ³		0,55*		
	A-3	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες						
3	A-3.1	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες με χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		2,10*		
4	A-3.2	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες με ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		3,50*		
5	A-3.3	Όρυξη σε έδαφος βραχώδες χωρίς χρήση εκρηκτικών	ΟΔΟ-1133Α	m ³		6,00*		

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ότι η ταξινόμηση του εδάφους σε ακατάλληλα, γαιώδη – ημιβραχώδη και βραχώδη συσχετίζεται με την κρίση του μελετητή αφού η γεωλογία των υπογείων έργων είναι πολύ σύνθετη και δεν κατηγοριοποιείται εύκολα. Συνεπώς το κόστος εξαρτάται από την επιλογή των παραπάνω τιμών και για αυτό δε θα συμπεριληφθεί στην ανάλυση των δεδομένων καθώς είναι μία αρκετά μεταβαλλόμενη μεταβλητή.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής τα οικονομικά δεδομένα των σηράγγων που συγκεντρώθηκαν αφορούν το κομμάτι της άμεσης και της μόνιμης υποστήριξης. Επιπλέον έξοδα όπως το κόστος εκσκαφής, το ημερομίσθιο του προσωπικού, το κόστος κτήσης και λειτουργίας των μηχανημάτων, οι αποσβέσεις, ο Η/Μ εξοπλισμός, η διαμόρφωση στομίων κ.λπ. δε λήφθηκαν υπόψιν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

5.1 Εισαγωγή

Η κατασκευή έργων σηράγγων ξεκίνησε πριν χιλιάδες χρόνια με αναφορές να γίνονται στη ρωμαϊκή αυτοκρατορία , στη Μεσοποταμία καθώς και στην ελληνική επικράτεια. Ο σωστός προγραμματισμός και η οργάνωση αυτών των έργων αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης κατά το πέρασμα των αιώνων με διάφορα μοντέλα πρόβλεψης να έχουν προταθεί. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι ένα τέτοιο μοντέλο και αναπτύχθηκε τα τελευταία μόλις χρόνια με την εξέλιξη των υπολογιστών. Η δομή των νευρωνικών δικτύων είναι αρκετά σύνθετη και στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει προσπάθεια επεξήγησης της λειτουργία τους.

5.2 Ιστορική αναδρομή

Το 1943 όπου οι McCulloch και Pitts παρουσίασαν τη λειτουργία του πρώτου μοντέλου νευρωνικού δικτύου. Η βασική αρχή ήταν ο μεγάλος αριθμός νευρώνων όπου συνδέονται και επικοινωνούν μεταξύ τους. Προσομοίωσαν λοιπόν τον τρόπο λειτουργίας των νευρώνων, με αυτή του ηλεκτρικού ρεύματος. Μερικά χρόνια αργότερα , το 1947 οι ίδιοι επιστήμονες αναβάθμισαν τον τρόπο λειτουργίας του μοντέλου ώστε να αναγνωρίζει σχήματα. Πλέον στο εξελιγμένο αυτό μοντέλο ο νευρώνας μπορεί να βρίσκεται αποκλειστικά είτε σε κατάσταση ηρεμίας είτε να πυροδοτεί καθώς και ότι το δίκτυο μπορεί να έχει πολλές εισόδους άλλα μία έξοδο.

Ο J. VonNeumann αξιοποίησε τις εργασίες των McCulloch και Pitts ως παράδειγμα για τις υπολογιστικές μηχανές με στόχο τη δημιουργία τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Το 1949 ο D. Hebb εισάγει τον κανόνα μάθησης Hebb στο βιβλίο του με τίτλο «The Organization of behavior» (Θεοδήση - Κοκκίνου, 2013). Το μοντέλο του Hebb έχει ως βασική ιδέα τις συνδέσεις μεταξύ των μονάδων του συστήματος, δηλαδή τους νευρώνες (Θεοδήση - Κοκκίνου, 2013). Μερικά χρόνια αργότερα , το 1957 ο F. Rosenblatt παρουσιάζει το πρώτο μοντέλο αισθητήρα (Perceptron) ενώ ταυτόχρονα κατασκευάζει το πρώτο δίκτυο hardware για πολλαπλές και διαφορετικές λειτουργίες. Η διαφοροποίηση σε αυτό το μοντέλο είναι ότι είχε δύο επίπεδα , ένα εισόδου και ένα εξόδου , με την κατεύθυνση του σήματος να γίνεται αποκλειστικά από την είσοδο στην έξοδο.

Η ανάγκη για να μειωθεί η ηχώ στις τηλεφωνικές κλήσεις οδήγησε τους Widrow και Hoff στην ανάπτυξη των μοντέλων Adaline και Madaline. Τα επόμενα 20 χρόνια οι περιορισμοί στη λειτουργία των ήδη υπάρχων μοντέλων απέτρεψαν πολλούς επιστήμονες να ασχοληθούν με την εξέλιξη τους. Το 1982 ο Hopfield απέδειξε με μαθηματικό τρόπο ότι ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποθηκευτικός χώρος. Την περίοδο αυτή αναπτύχθηκε η ιδέα της διόρθωσης του σφάλματος (error correction learning) κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης. Με βάση τον παραπάνω κανόνα σημασία έχει η απόκλιση της τιμής που δίνει σαν έξοδο το μοντέλο που έχει δημιουργηθεί σε σχέση με την αναμενόμενη τιμή το οποίο ονομάζεται και σφάλμα δικτύου.

Τέσσερα χρόνια αργότερα οι McClelland και Rumelhart παρουσίασαν τον αλγόριθμο εκπαίδευσης πολύ-επίπεδων δικτύων, ή αλλιώς αλγόριθμος εκπαίδευσης οπισθοδρόμησης (backpropagation, BP) όπου δημοσιεύεται στο βιβλίο τους “Parallel Distributed Processing”. Η ιδέα πίσω από αυτόν τον αλγόριθμο είναι ότι σε σύγκριση με το μοντέλο Perceptron οι επίπεδοι νευρώνες είναι πολυάριθμοι και όχι μόνο η είσοδος και η έξοδος. Το 1990 η επιστήμη της στατιστικής εδραιώθηκε στο χώρο των νευρωνικών δικτύων καθώς προέκυψε ένα νέο επίπεδο, η στατιστική μηχανική μάθηση. Στα τέλη του 20^{ου} αιώνα έκαναν την εμφάνισή τους τα υβριδικά μοντέλα τα οποία εμπεριέχουν τη λογική της ασάφειας ενώ παράλληλα ο Amari επινόησε τον αλγόριθμο απότομης καθόδου.

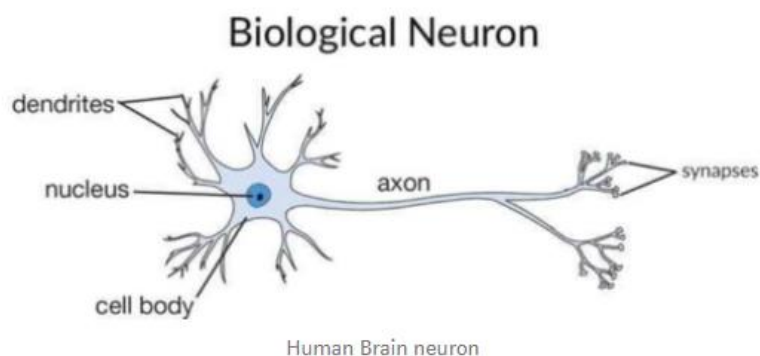
Από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα επιστήμες όπως η λογαριθμική ανάλυση και οι πιθανότητες βρίσκουν ευρεία χρήση στη βελτίωση της λειτουργίας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Η λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου και η αλληλουχία λειτουργίας των βιολογικών νευρώνων έχει εστιάσει την προσοχή των επιστημόνων με αποτέλεσμα η χρήση των νευρωνικών δικτύων να αποκτά ευρεία χρήση σε όλο και περισσότερες επιστήμες.

5.3 Βιολογικό νευρωνικό δίκτυο

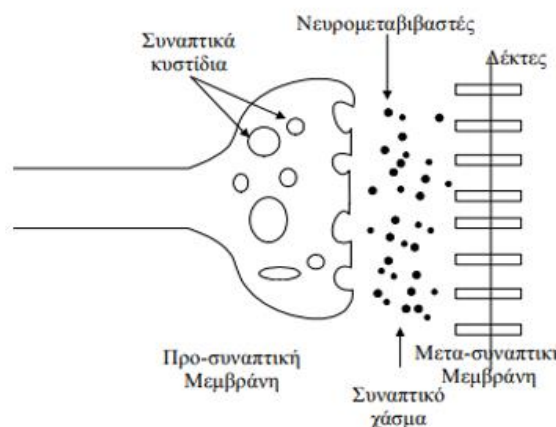
Η πηγή έμπνευσης των επιστημόνων για την ανάπτυξη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι η λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου και συγκεκριμένα το βιολογικό νευρωνικό δίκτυο. Πριν αναφερθεί η λειτουργία των ΤΝΔ είναι σκόπιμο να παρουσιαστεί η δομή των ανθρώπινων νευρώνων και πως αυτοί αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Εκτιμάται ότι ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελείται από έναν πολύ

μεγάλο αριθμό νευρώνων όπου προσεγγίζει τον αριθμό 10^{10} . Κάθε νευρώνας αποτελεί ένα είδος κυττάρου, απαρτίζοντας το ανθρώπινο κεντρικό νευρικό σύστημα. Κάθε νευρώνας συνδέεται με έναν άλλον, με τις συνδέσεις αυτές να ονομάζονται συνάψεις. Ο αριθμός των νευρώνων στον άνθρωπο μειώνονται με τα χρόνια καθώς και από την κατανάλωση αλκοόλ σε αντίθεση με τις συνάψεις όπου υπάρχει μία ισορροπία. Κάθε νευρώνας στέλνει ηλεκτρικά σήματα σε επόμενους νευρώνες μέσω των συνάψεων ενώ ο επόμενος νευρώνας επεξεργάζεται το σήμα και στη συνέχεια το μεταδίδει.

Η δομή ενός νευρώνα δε διαφέρει από τη δομή του κυττάρου. Συνεπώς αποτελείται από το κυρίως σώμα, τον πυρήνα, τους δενδρίτες, τον άξονα και τις συνάψεις. Σήματα εισόδου λαμβάνονται από τους δενδρίτες και αυτοί με τη σειρά τους πυροδοτούν ένα σήμα εξόδου μέσω του άξονα τα οποία ονομάζονται συνοπτικά βάρη.

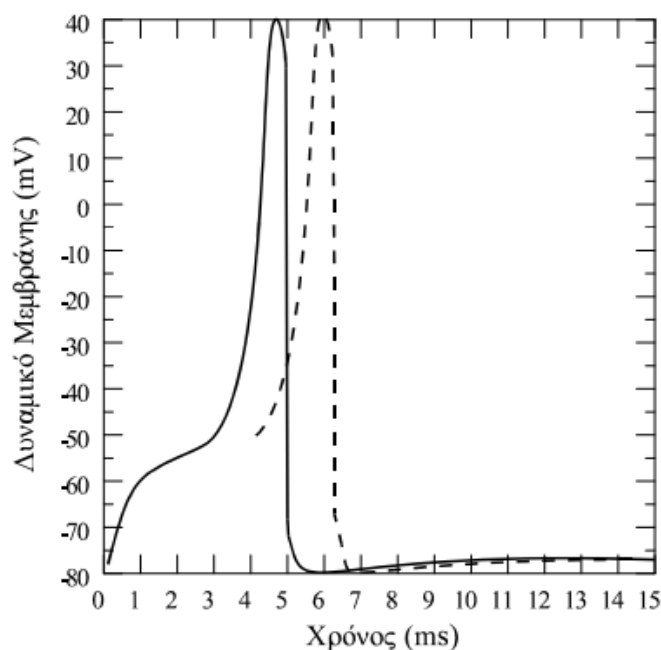


Σχήμα 5.1: Ο Νευρώνας (<https://becominghuman.ai>).



Σχήμα 5.2: Λεπτομέρεια σύναψης (<http://kelifos.physics.auth.gr/COURSES/neural/K3.pdf>).

Η δημιουργία του ηλεκτρικού σήματος μερικών μόνο mV έχει απασχολήσει στο παρελθόν πολλούς επιστήμονες. Όπως κατά τη λειτουργία ενός πυκνωτή εμφανίζεται μία διαφορά δυναμικού έτσι ακριβώς συμβαίνει μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας της μεμβράνης ενός κυττάρου. Η δημιουργία αρνητικού δυναμικού στην επιφάνεια οφείλεται στην αδυναμία των πρωτεϊνών να περάσουν από τη μεμβράνη. Σε φυσιολογικές συνθήκες ισορροπίας το «δυναμικό ηρεμίας» προσεγγίζει την τιμή -70 mV. Οι μικρές τρύπες που υπάρχουν σε όλη την επιφάνεια της μεμβράνης δίνει τη δυνατότητα στα άτομα αλλά και στα ιόντα να τη διαπερνούν. Οι πρωτεΐνες που εμπεριέχονται μέσα στη μεμβράνη του κυττάρου διευκολύνουν την κίνηση των ιόντων στην εσωτερική και εξωτερική πλευρά της μεμβράνης και ως και του τούτου αυτά κινούνται σε αντίθετη φορά. Όλη αυτή η κίνηση των συγκεντρωμένων ιόντων δημιουργεί το ηλεκτρικό σήμα που μεταδίδεται στο κύτταρο. Οι Hodgkin και Huxley το 1952 παρουσίασαν αναλυτικά τον παραπάνω μηχανισμό.



Σχήμα 5.3: Το δυναμικό δράσης ενός νευρώνα όπως εμφανίζεται σε έναν παλμογράφο κατόπιν κατάλληλου ερεθισμού με τη βοήθεια μικροηλεκτροδίων (<http://kelifos.physics.auth.gr/COURSES/neural/K3.pdf>).

Όπως είναι φανερό στο σχήμα 5.3 υπάρχει μία απότομη αλλαγή στην καμπύλη του δυναμικού της μεμβράνης σε συνάρτηση με το χρόνο δημιουργώντας μία πραγματική

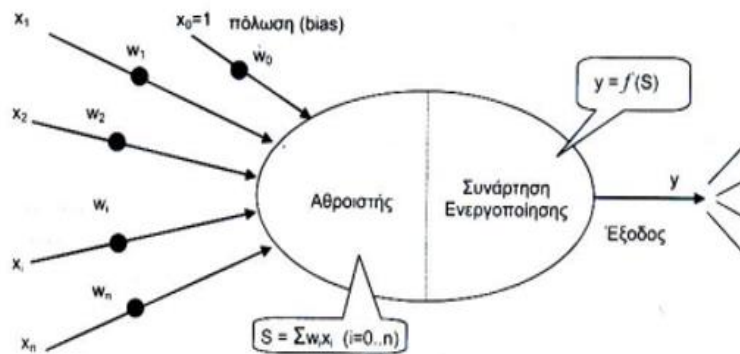
εκκένωση. Είναι αντιληπτό ότι για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα το φορτίο στο εσωτερικό του νευρώνα μπορεί να γίνει θετικό και ακαριαία σχεδόν να ξαναγίνει αρνητικό. Η παραπάνω καμπύλη προκύπτει από το άθροισμα των σημάτων που φτάνουν σε έναν νευρώνα. Κατά την περίοδο αποκατάστασης η καμπύλη μειώνεται με το χρόνο και δεν μπορεί να διεγερθεί ξανά.

Αν το άθροισμα των σημάτων ξεπεράσει μία δεδομένη τιμή που ονομάζεται κατώφλι τότε επιτυγχάνεται διέγερση του νευρώνα και αυτός πυροδοτεί. Η συνάρτηση κατωφλίου ή αλλιώς συνάρτηση Heaviside καθορίζει αν το σήμα θα είναι θετικό ή αρνητικό. Αν υπάρξει διέγερση ένας σταθερός παλμός μεταφέρεται από το νευρώνα προς τους άλλους γειτονικούς νευρώνες χωρίς να ελαττωθεί καθόλου η ένταση του. Μετά τον παλμό ο νευρώνας επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση ενώ υπό τις κατάλληλες συνθήκες μπορεί να ενεργοποιηθεί πάλι.

5.4 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Οι πολύπλοκες διεργασίες του ανθρώπινου νευρικού συστήματος είναι αντικείμενο μελέτης ακόμα και σήμερα από πολλούς επιστήμονες με στόχο όχι μόνο την κατανόησή τους, αλλά και την προσπάθεια αποτύπωσής τους μέσα από τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Τα ΤΝΔ λειτουργούν με ελαφρώς διαφοροποιημένο τρόπο από ότι τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα. Σήματα εισόδου, x_1, x_2, \dots, x_n τα οποία δέχεται ο τεχνητός νευρώνας τροποποιεί συναρτήσει συναπτικών βαρών w_1, w_2, \dots, w_n . Τα συναπτικά βάρη έχουν αντίστοιχη λειτουργία με τις συνάψεις του βιολογικού νευρωνικού δικτύου.

Η μεταφορά δεδομένων συνεπώς ελέγχεται από τα συναπτικά βάρη τα οποία εκπαιδεύονται ελέγχουν την επιρροή μεταξύ δύο νευρώνων. Έπειτα, στον αθροιστή S γίνεται η άθροιση των σταθμισμένων εισόδων και ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου παράγοντα του κατωφλίου και στην τρίτη φάση εφαρμόζεται η συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) ένα είδος φίλτρου, το οποίο και διαμορφώνει την τελική τιμή του σήματος εξόδου(Θεοδόση-Κοκκίνου, 2013; Τσουχνίκα, 2007).

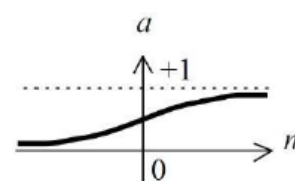
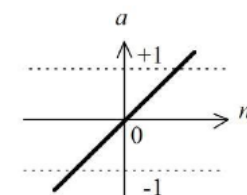
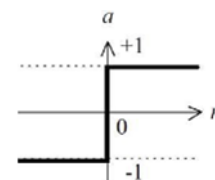
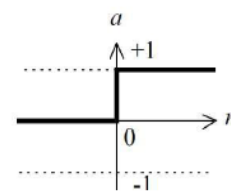


Σχήμα 5.4: Μοντέλο τεχνητού νευρώνα (Θεοδόση – Κοκκίνου, 2013).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν ένα ΤΝΔ.

$u_k = \sum_{j=0}^n w_{kj} * x_j$ και η $y_k = \varphi(u_k)$, όπου $\varphi(u_k)$ η συνάρτηση ενεργοποίησης. Η έξοδος ενός νευρώνα καθορίζεται αποκλειστικά από τη συνάρτηση ενεργοποίησης συναρτήσει του τοπικού πεδίου u . Τα βασικά είδη συναρτήσεων είναι:

- Η βηματική συνάρτηση 0/1 (step function)
- Η βηματική συνάρτηση -1/1 (sgn)
- Η γραμμική συνάρτηση όπου b = κλίση της ευθείας
- Σιγμοειδής συνάρτηση (sigmoid)



5.5 Αρχιτεκτονική νευρωνικών δικτύων

Η αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων παίζει καθοριστικό ρόλο, αφού είναι αυτή που καθορίζει τον τύπο και τη διάταξη των νευρώνων. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες βασικές ανάλογα με την αρχιτεκτονική τους (Θεοδόση – Κοκκίνου 2013; Τσουχνίκα, 2007):

- Τα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης ενός επιπέδου (feedforward) τα οποία αποτελούν την πιο απλή μορφή ενός δικτύου. Το σήμα που εισέρχεται από τους νευρώνες δεν επιδέχεται καμία επεξεργασία και μεταφέρεται στο επίπεδο εξόδου.
- Τα πολυεπίπεδα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (multilayer feedforward). Η δομή τους βασίστηκε στα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης ενός επιπέδου με την κύρια διαφορά τους να εντοπίζεται στη ροή της πληροφορίας αφού οι νευρώνες αλληλοεπιδρούν αποκλειστικά με τους νευρώνες των γειτονικών επιπέδων.
- Τα αναδρομικά δίκτυα (recurrent neural network) τα οποία για κάθε στοιχείο μίας αλληλουχίας να εκτελούν την ίδια εργασία και υπάρχει τουλάχιστον ένας βρόγχος ανάδρασης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αυτοανάδραση αφού η έξοδος του κάθε νευρώνα ανατροφοδοτεί την είσοδο των άλλων νευρώνων του ίδιου επιπέδου ή ακόμα και τη δική του.

5.6 Σύγχρονες εφαρμογές νευρωνικών δικτύων

Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάγκη για ακριβής πρόβλεψη σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους έχει αυξήσει το ενδιαφέρον για τη χρήση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Η ταχεία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς και η ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής τους ισχύς έχει καθιερώσει τα ΤΝΔ ως την πλέον υποσχόμενη μέθοδο για την άμεση πρόβλεψη και μελέτη σε διάφορους τομείς. Η χρήση των νευρωνικών δικτύων εγγυάται αμεσότητα, ευκολία και αξιοπιστία προς τη χρήση συναρτήσει του hardware. Οι κυριότεροι κλάδοι που βρίσκουν εφαρμογή είναι οι εξής (Haykin S.,2009) :

- Ιατρική όπως για παράδειγμα η απόκριση του ανθρώπινου οργανισμού σε δοσολογίες και νέα φάρμακα.
- Αυτοκινητοβιομηχανία όπως για παράδειγμα στο αυτόματο παρκάρισμα.

- Βιολογία όπως για παράδειγμα στο DNA και στην κατανόηση της δομής του εγκεφάλου.
- Μεταφορές και Logistics όπως για παράδειγμα στην επικρατέστερη διαδρομή ενός φορτηγού.
- Στρατιωτική βιομηχανία όπως για παράδειγμα στην ανίχνευση στόχων και στην καθοδήγηση βαλλιστικών πυραύλων.
- Ρομποτική όπως για παράδειγμα η αναγνώριση φωνής.
- Κατασκευαστική βιομηχανία όπως για παράδειγμα η πρόβλεψη των μηχανικών χαρακτηριστικών ή του κόστους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : Ανάπτυξη μοντέλων τεχνητών νευρωνικών δικτύων με σκοπό την εκτίμηση του κόστους της άμεσης και τελικής επένδυσης.

6.1 Εισαγωγή

Για την ανάπτυξη τεχνικών νευρωνικών δικτύων με σκοπό την προκοστολόγηση των σηράγγων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό μηχανικής μάθησης WEKA το οποίο αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Waikato της Νέας Ζηλανδίας. Το λογισμικό είναι γραμμένο σε Java και έχει σημαντικές δυνατότητες όπως παλινδρόμηση, ομαδοποίηση ταξινόμηση και εξόρυξη δεδομένων. Είναι πολύ φιλικό προς το χρήστη λόγω των γραφικών απεικόνισής. Αυτό το κάνει ιδιαίτερα δημοφιλές στο χώρο των μηχανικών καθώς δε χρειάζεται ο χρήστης να έχει γνώσεις προγραμματισμού για να το χρησιμοποιήσει.

Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο λογισμικό είναι η ευκολία στην παραμετροποίηση των ρυθμίσεων και η δυνατότητα επιλογής πολλών διαφορετικών αλγορίθμων για τη δημιουργία των ΤΝΔ. Από την πληθώρα αλγορίθμων που διατίθεται για τον χρήστη επιλέχθηκε ο αλγόριθμος Multilayer Perceptron (MLP) ο οποίος μπορεί να έχει πολλά κρυμμένα επίπεδα κατά τη δημιουργία του μοντέλου.

Για τη σύγκριση των μοντέλων που δημιουργήθηκαν υπολογίστηκε για κάθε ΤΝΔ το Normalized Root Mean Square Error (NRMSE). Αρχικά υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και στη συνέχεια έγινε κανονικοποίηση του αποτελέσματος ώστε να είναι συγκρίσιμο με τη διεθνή βιβλιογραφία. Ο δείκτης NRMSE όταν προσεγγίζει τη μηδενική τιμή πρακτικά δείχνει ότι το μοντέλο έχει πολύ μικρό σφάλμα και το ΤΝΔ πρόβλεψε με επιτυχία την πραγματική τιμή. Η κανονικοποίηση στοχεύει στο γεγονός ότι κάθε τεχνικό έργο έχει διαφορετική αβεβαιότητα και συνεπώς διαφορετικό RMSE. Θα ήταν συνεπώς χρήσιμο να μπορεί να γίνει σύγκριση της προβλεψιμότητας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων που κατασκευάστηκαν στο σύνολο του κατασκευαστικού τομέα.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{obs}}$$

Όπου $\bar{x}_{obs} = H$ μέση τιμή των τιμών πρόβλεψης

Για να θεωρηθεί ένα μοντέλο αξιόπιστο δεν αρκεί το σφάλμα να είναι μικρό. Ένα μοντέλο ΤΝΔ πρέπει να μπορεί να προσαρμόζεται σε διαφορετικές τιμές δεδομένων. Αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων εκπαίδευσης.

6.2 Δεδομένα ανάλυσης

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής συγκεντρώθηκαν δεδομένα για 40 διαφορετικές σήραγγες ή τμήματα αυτών που κατασκευάστηκαν στην Ελλάδα και στο εξωτερικό. Η διάνοιξη αυτών των έργων έγινε με τη συμβατική μέθοδο διάνοιξης κυρίως σε ορεινά ή πεδινά τμήματα και λιγότερο αστικό περιβάλλον.

Τα δεδομένα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Στοιχεία γεωτεχνικής ταξινόμησης → GSI, RMR
- Στοιχεία φυσικών ιδιοτήτων → γ , σ_{ci} , E
- Στοιχεία γεωμετρικών χαρακτηριστικών → H, L, Area
- Στοιχεία οικονομικά → τελικό κόστος άμεσης και τελικής επένδυσης

Οι τιμές των γεωτεχνικών ταξινομήσεων, φυσικών ιδιοτήτων, του υπερκείμενου ύψους (H), αλλά και του εμβαδού της διατομής (Area) αποτελούν το μέσο όρο κατά το μήκος L όπου μελετήθηκαν. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς δεν ήταν γνωστά τα οικονομικά δεδομένα κάθε φορά που άλλαζε μία από τις παραπάνω τιμές.

Το τελικό κόστος αφορά το κόστος όλων των υλικών της άμεσης και της μόνιμης υποστήριξης για όλο το μήκος μελέτης (L). Συνεπώς δε λαμβάνονται υπόψιν κόστη όπως η εκσκαφή, το ανθρώπινο δυναμικό και η απόσβεση των μηχανημάτων.

Τα οικονομικά μεγέθη προκύπτουν από τον τελικό προϋπολογισμό της άμεσης και τελικής επένδυσης μετά την κατασκευή ενώ παράλληλα τα στοιχεία της γεωτεχνικής ταξινόμησης συμπληρώθηκαν κατά τη φάση κατασκευής των έργων. Εν αντιθέσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι φυσικές ιδιότητες ήταν γνωστές κατά τη φάση μελέτης.

Πίνακας 6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων 40 έργων σηράγγων.

Έργο	GSI	RMR	σ_{ci} (MPa)	E (MPa)	γ (kN/m ³)	L(m)	Εμβαδόν Διατομής(m ²)	H (m)	Κόστος άμεσης και τελικής επένδυσης (€)
1	35	40	20	800	21	570	98	95	3.519.749
2	25	31	15	350	21	300	98	82	2.039.450
3	20	24	5	350	21	323	98	85	2.114.589
4	15	25	5	280	20	34	98	100	269.837
5	15	18	10	140	21	292	125	27	4.173.450
6	20	28	15	230	21	152,5	125	75	2.666.185
7	20	27	15	190	21	75	125	68	1.567.225
8	10	18	5	150	21	102	125	36	2.651.521
9	45	46	45	15000	20	61	130	89	798.110
10	30	35	30	3000	20	741	130	135	9.097.173
11	20	29	20	800	20	237	130	175	4.127.740
12	20	23	25	1400	24	476	133	110	3.357.828
13	15	22	20	800	24	151	133	118	1.891.882
14	50	45	60	12000	21	840	120	132	4.412.190
15	35	30	30	2000	21	340	120	45	2.286.490
16	25	25	20	400	23	259	130	55	2.100.790
17	30	30	30	1400	23	970	130	105	6.866.370
18	60	60	70	13000	21	1400	125	257	6.698.890
19	35	30	40	2400	21	270	125	95	1.720.964
20	40	40	55	2000	20	160	120	73	1.372.100
21	70	60	120	9100	22	1803	130	314	6.659.740
22	45	35	45	3450	22	1395	130	246	6.594.910
23	25	30	35	700	22	244	133	125	2.226.850
24	15	14	5	450	22	85	133	53	1.170.751
25	50	50	55	2880	21	1542	130	285	6.927.820
26	70	62	140	25100	25	1790	125	248	5.528.530
27	35	32	50	3480	25	349	125	146	2.108.564
28	30	37	35	2200	23	330	133	87	2.436.740
29	40	35	55	5800	24	124	133	124	991.427
30	40	41	60	4300	22	345	120	101	1.369.870
31	20	24	20	560	26	102	112	89	2.240.442
32	55	64	90	7050	25	180	130	147	720.853
33	60	61	110	6430	22	455	125	228	1.519.794
34	45	45	60	5200	25	215	133	195	1.142.201
35	25	30	40	1200	25	94	130	56	1.170.641
36	75	78	130	28800	24	786	125	214	3.952.968
37	65	65	100	17900	27	653	98	234	3.737.980
38	40	48	70	8600	22	332	98	180	2.516.279
39	30	32	50	2290	21	557	110	75	4.867.890
40	35	33	45	3000	24	249	133	133	2.236.390

6.3 Εισαγωγή δεδομένων και παραμετροποίηση.

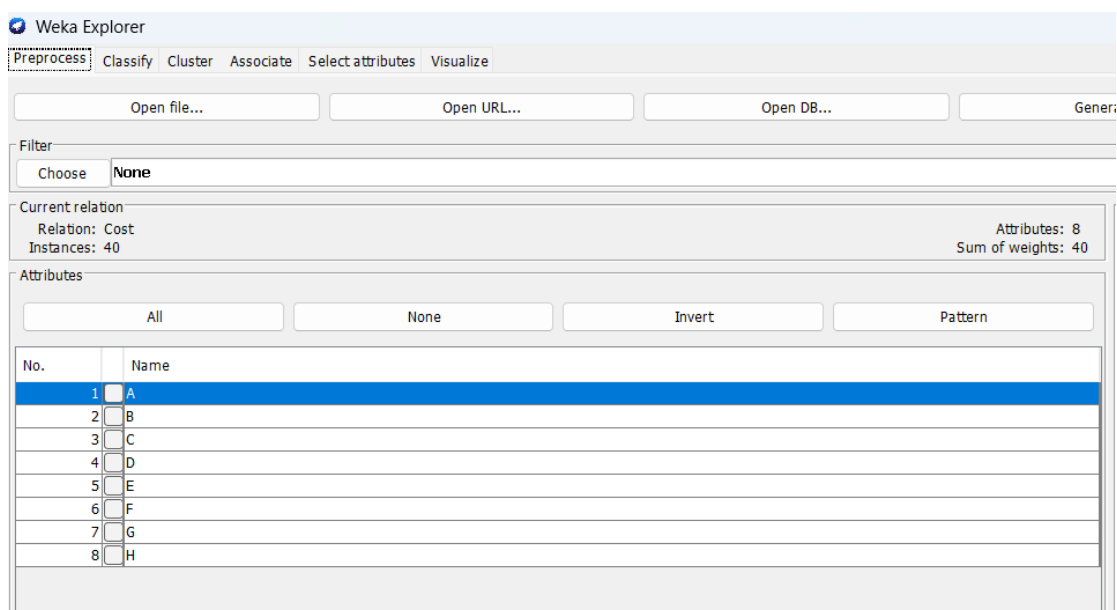
Αρχικά ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα σε ένα φύλλο Microsoft excel. Κάθε στήλη αντιπροσωπεύει μία μεταβλητή όπως για παράδειγμα η μονοαξονική θλιπτική αντοχή ή το GSI της βραχώμαζας. Η τελευταία στήλη αντιπροσωπεύει την εξαρτημένη μεταβλητή την οποία επιθυμεί ο χρήστης να εξάγει το πρόγραμμα σαν τιμή εξόδου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η εξαρτημένη μεταβλητή ταυτίζεται με το κόστος. Με στόχο να ερευνηθεί ποιες τελικά μεταβλητές είναι οι σημαντικότερες για την πρόβλεψη του κόστους θα αναπτυχθούν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με διαφορετικές μεταβλητές εισόδου κάθε φορά.

Στη συνέχεια, αφού μετατραπεί το αρχείο excel σε μορφή CSV (comma delimited), ανοίγεται με μορφή .txt, ώστε να είναι συμβατό με το λογισμικό WEKA. Η ονομασία του τελικού αρχείου πρέπει να καταλήγει σε .arff και στη συνέχεια να αποθηκευτεί σε κωδικοποίηση ANSI ώστε να ανοίγει από το πρόγραμμα. Στην εικόνα 6.1 παρουσιάζεται η τελική μορφή του αρχείου.

Αρχείο	Επεξεργασία	Προβολή
		@relation Cost @attribute A numeric @attribute B numeric @attribute C numeric @attribute D numeric @attribute E numeric @attribute F numeric @attribute G numeric @attribute H numeric @attribute I numeric @data 35,20,95,21,40,570,98,800,3519749 25,15,82,21,31,300,98,350,2039450 20,5,85,21,24,323,98,350,2114589 15,5,100,20,25,34,98,280,269837 15,10,27,21,18,292,125,140,4173450 20,15,75,21,28,153,125,230,2666185 20,15,68,21,27,75,125,190,1567225 10,5,36,21,18,102,125,150,2651521 45,45,89,20,46,61,130,15.000,798110 30,30,135,20,35,741,130,3.000,9097173 20,20,175,20,29,237,130,800,4127740 20,25,110,24,23,476,133,1.400,3357828 15,20,118,24,22,151,133,800,1891882 50,60,132,21,45,840,120,12.000,412190

Εικόνα 6.1: Δημιουργία αρχείου txt.

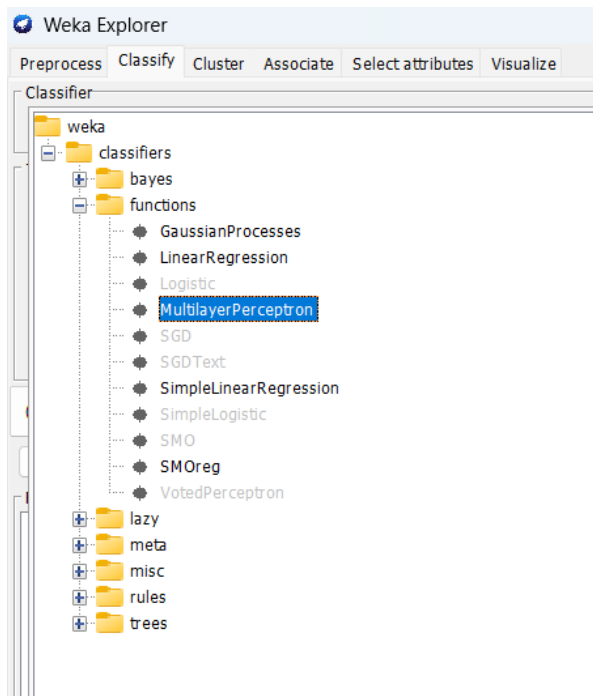
Αφού αποθηκευτεί το αρχείο ανοίγεται από το χρήστη και στο παράθυρο «current relation» διακρίνεται ότι υπάρχουν 8 μεταβλητές εισόδου (Attributes) και 40 έργα (Sum of weights).



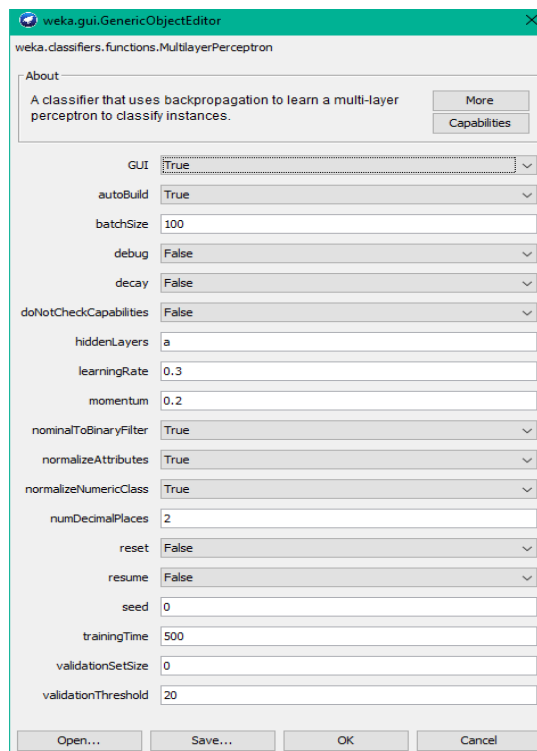
Εικόνα 6.2: Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου ο χρήστης επιλέγει την καρτέλα «classify» όπου γίνονται όλες οι απαραίτητες παραμετροποιήσεις από το χρήστη. Η ταξινόμηση των μεταβλητών γίνεται από μέσω των εντολών «choose» του πίνακα «classifier». Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιήσει για την ταξινόμηση των μεταβλητών. Στην παρούσα διπλωματική η ταξινόμηση των βαρών των μεταβλητών έγινε με τη μέθοδο MLP (MultilayerPerceptron) η ενώ στο χρήστη δίνεται η δυνατότητα να προβλέψει και με άλλες συναρτήσεις όπως η Gaussian Processes η οποία δεν συγκαταλέγεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Έπειτα, με αριστερό «click» πάνω στη μέθοδο που επιλέχθηκε, είναι εφικτό από το χρήστη να ρυθμίσει τις παραμέτρους του δικτύου μέσω ενός παραθύρου που εμφανίζεται. Αρχικά, προτείνεται η εντολή GUI να μετατραπεί από False σε True, έτσι ώστε να εμφανίζεται με γραφικό τρόπο το μοντέλο που αναπτύχθηκε. Στην εντολή hidden layers δίνεται στο χρήστη η επιλογή να επιλέξει τον αριθμό των κρυφών επιπέδων ενώ η προεπιλεγμένη εντολή είναι στο «auto» που στο λογισμικό συμβολίζεται με το γράμμα «a». Στην παρούσα διπλωματική έγινε βελτιστοποίηση των μοντέλων και επιλέχθηκε κάθε φορά ο βέλτιστος αριθμός κρυφών επιπέδων και ρυθμίσεων.



Εικόνα 6.3: Επιλογή της μεθόδου Multilayer Perceptron.

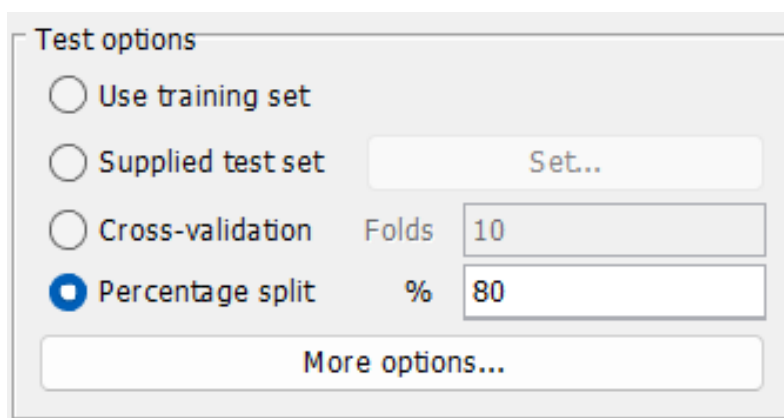


Εικόνα 6.4: Ρυθμίσεις για την παραμετροποίηση του μοντέλου.

Για κάθε μοντέλο που δημιουργήθηκε δοκιμάστηκαν πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί κρυφών επιπέδων και κόμβων στα κρυφά επίπεδα ώστε να μειωθεί το σφάλμα.

Παράλληλα για κάθε μοντέλο επιλέχθηκε ο κατάλληλος ρυθμός μάθησης (learning rate) μετά από δοκιμές έχοντας σημαντική συνεισφορά στην ικανότητα πρόβλεψης των μοντέλων. Στη μηχανική μάθηση και τη στατιστική, ο ρυθμός μάθησης είναι μια παράμετρος ρύθμισης σε έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης που καθορίζει το μέγεθος του βήματος σε κάθε επανάληψη.

Η επιλογή του ποσοστού των έργων που δίνονται για εκπαίδευση και για εξαγωγή αποτελεσμάτων γίνεται από την εντολή «Percentage split». Για την ανάπτυξη των μοντέλων επιλέχθηκε να εκπαιδευτεί το 80% των έργων και το υπόλοιπο 20% να εξαχθεί για τον υπολογισμό του NRMSE. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι από τα 40 έργα μελέτης τα 32 θα χρησιμοποιηθούν για εκπαίδευση από το λογισμικό και τα υπόλοιπα 8 για εξαγωγή αποτελεσμάτων. Ο χρήστης μέσω της εντολής «seed» μπορεί να διαφοροποιήσει ποια έργα θα εισάγει το WEKA για εκπαίδευση και ποια για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.



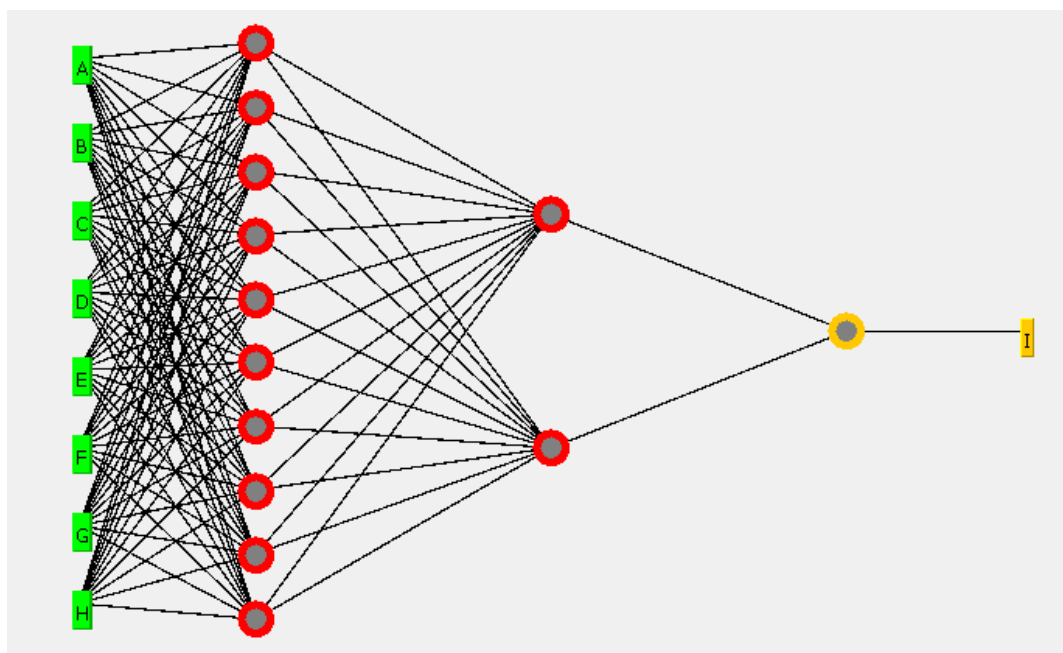
Εικόνα 6.5: Επιλογή του ποσοστού εκπαίδευσης του μοντέλου.

Στο 1^ο μοντέλο ΤΝΔ έγινε εισαγωγή όλων των μεταβλητών εισόδου ενώ στη συνέχεια δημιουργήθηκαν μοντέλα με λιγότερες μεταβλητές. Ο σκοπός αυτός έγινε με γνώμονα να εξεταστεί εάν τελικά η συλλογή όλων των δεδομένων είναι απαραίτητη για την εκτίμηση του κόστους ή τελικά με τη χρήση λίγων μόνο μεταβλητών μπορούν να επιτευχθούν το ίδιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Για να εξεταστεί εάν μία μεταβλητή έχει θετική επίδραση ή όχι αρκεί να εξεταστεί εάν υπάρχει μείωση ή αύξηση του σφάλματος. Με αυτόν τον τρόπο δοκιμάστηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί μεταβλητών σε ένα ικανοποιητικό δείγμα ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

6.4 Ανάπτυξη των μοντέλων

1^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 1^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν όλες οι μεταβλητές εισόδου. Αφού επιλεγεί από το χρήστη η εντολή «start» το λογισμικό δημιουργεί το μοντέλο και εμφανίζει στο χρήστη τη δομή των νευρώνων.



Εικόνα 6.6: Δομή των νευρώνων του 1^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.6 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 8-10-2-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιουργήθηκε στο λογισμικό έχει 8 μεταβλητές εισόδου, 10 κόμβους και 2 κόμβους στα 2 κρυφά επίπεδα και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος.

Η συσχέτιση μεταβλητών (correlation coefficient) εμφανίζεται στη συνέχεια από το λογισμικό και παίρνει τιμές από -1 έως και 1. Είναι φυσικό πως επιδιώκεται οι τιμές να είναι όσο πιο κοντά στη μονάδα. Στη συνέχεια το πρόγραμμα εμφανίζει τα διάφορα είδη σφαλμάτων όπως φαίνεται στην εικόνα 6.7

```

=== Summary ===

Correlation coefficient           0.9476
Mean absolute error              480317.3515
Root mean squared error          622473.3598
Relative absolute error          30.5026 %
Root relative squared error      32.8168 %
Total Number of Instances        8

```

Εικόνα 6.7: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 1^{ου} μοντέλου.

Όπως φαίνεται από την εικόνα 6.7 τα χαρακτηριστικά σφάλματα έχουν τιμή κοντά στο 30% οπότε συμπεραίνεται ότι το μοντέλο δεν έχει προβλέψει με μεγάλη ακρίβεια τα κόστη των σηράγγων που εξάχθηκαν για αποτελέσματα αν και οι τιμές είναι αποδεκτές.

Στην παρούσα διπλωματική θα υπολογιστεί επιπλέον το Normalized Root Mean Square Error ώστε να υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης με τη διεθνή βιβλιογραφία. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζεται το πραγματικό κόστος, το κόστος πρόβλεψης του μοντέλου, η απόκλιση τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

Πίνακας 6.2: Υπολογισμός NRMSE για το 1^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

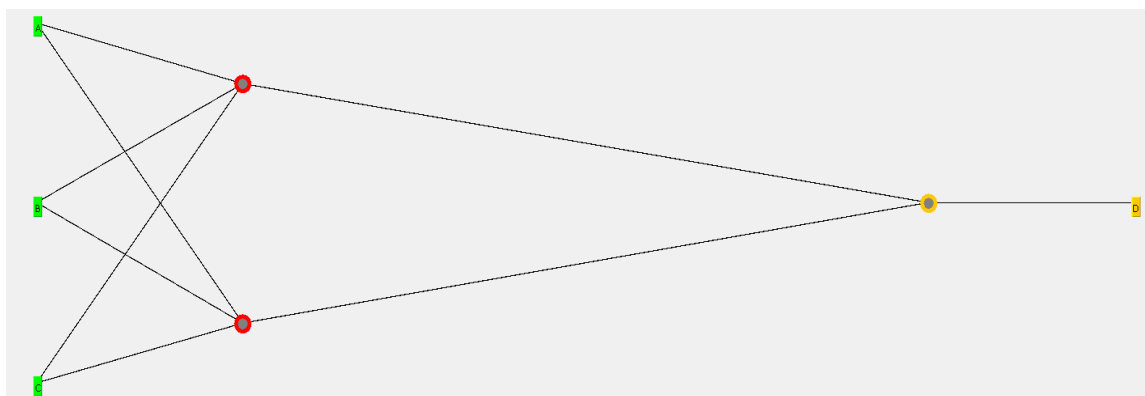
A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	2.515.279,00	2.670.635,00	155.356,00
2	1.369.870,00	1.769.842,00	399.972,00
3	2.226.850,00	2.624.888,00	398.038,00
4	6.927.820,00	7.468.802,00	540.982,00
5	1.372.100,00	1.362.498,00	9.602,00
6	1.170.641,00	1.859.737,00	689.096,00
7	4.867.890,00	3.535.227,00	1.332.663,00
8	2.286.490,00	2.403.317,00	116.827,00
NRMSE		0,20	

Η τιμή του NRMSE για να κριθεί εάν είναι ικανοποιητική ή όχι εξαρτάται το αντικείμενο μελέτης που εξετάζεται. Στη ρομποτική για παράδειγμα τιμές NRMSE > 0,01 θεωρούνται μη αποδεκτές. Στην επιστήμη των σηράγγων όμως λόγω της

αβεβαιότητας της γεωλογίας και πιθανών προβλημάτων στο έργο οι τιμές αυτές είναι πολύ υψηλότερες. Η τιμή NRMSE = 0,20 θεωρείται αρκετά ικανοποιητική.

2^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 2^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου το μήκος της σήραγγας L(m), το εμβαδόν της εκσκαφής Area (m²) και το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος E(MPa).



Εικόνα 6.8: Δομή των νευρώνων του 2^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.8 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 3-2-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 3 μεταβλητές εισόδου , 2 κόμβους στο κρυφό επίπεδο και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος.

Στην εικόνα 6.9 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

```

=== Summary ===

Correlation coefficient           0.9707
Mean absolute error              528333.0743
Root mean squared error         571301.024
Relative absolute error         33.0403 %
Root relative squared error     31.9051 %
Total Number of Instances      8
    
```

Εικόνα 6.9: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 2^{ου} μοντέλου.

Στον πίνακα 6.3 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

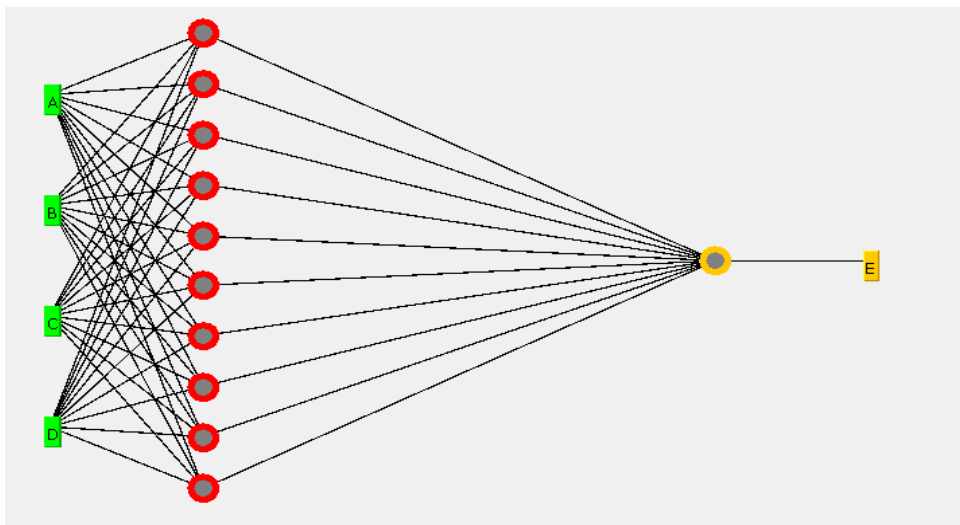
Πίνακας 6.3: Υπολογισμός NRMSE για το 2^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	5.866.370,00	6.360.645,00	494.275,00
2	5.528.530,00	6.423.195,00	894.665,00
3	4.867.890,00	4.077.495,00	790.395,00
4	2.226.850,00	1.769.240,00	457.610,00
5	1.891.882,00	1.316.980,00	574.902,00
6	3.357.828,00	3.593.620,00	235.792,00
7	1.567.225,00	1.031.657,00	535.568,00
8	1.142.201,00	1.385.659,00	243.458,00
NRMSE		0,17	

Η τιμή του NRMSE μειώθηκε αισθητά σε σχέση με το 1^ο μοντέλο. Φαίνεται λοιπόν ότι με μεταβλητές εισόδου μόνο μήκος της σήραγγας $L(m)$, το μέτρο ελαστικότητας E και το εμβαδόν της εκσκαφής $Area (m^2)$ το μοντέλο πρόβλεψε με ικανοποιητική ακρίβεια το κόστος.

3^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 3^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (MPa), το μήκος της σήραγγας $L(m)$, το εμβαδόν της εκσκαφής $Area (m^2)$ και το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος E (MPa).



Εικόνα 6.10: Δομή των νευρώνων του 3^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.10 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 4-10-1. Συνεπώς το μοντέλου όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 2 μεταβλητές εισόδου , 10 κόμβους στο κρυφό επίπεδο και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος.

Στην εικόνα 6.11 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

```

=== Summary ===

Correlation coefficient           0.9646
Mean absolute error             547290.9192
Root mean squared error        572356.2565
Relative absolute error         29.1813 %
Root relative squared error     26.9276 %
Total Number of Instances      8

```

Εικόνα 6.11: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 3^{ου} μοντέλου.

Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

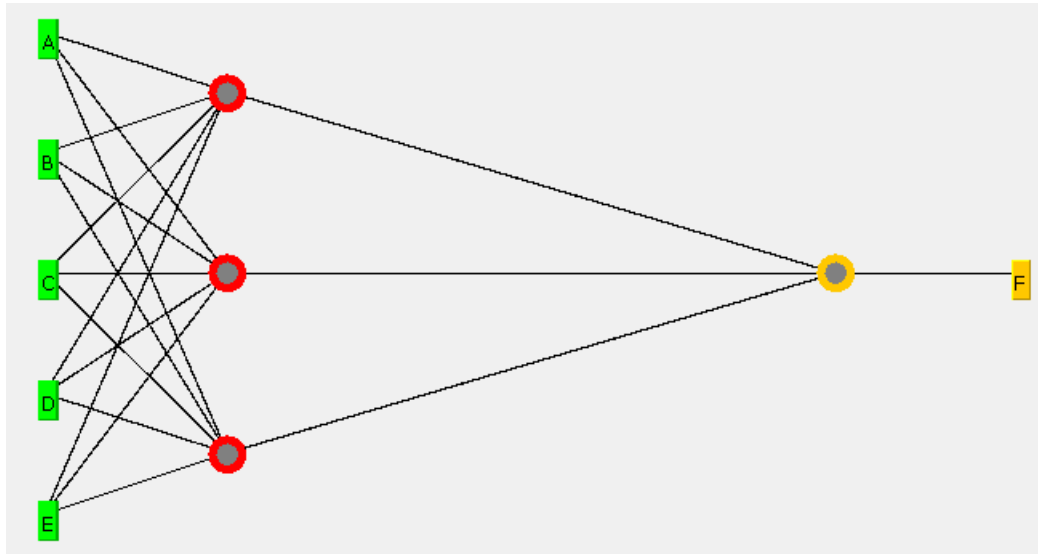
Πίνακας 6.4: Υπολογισμός NRMSE για το 3^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	1.567.225,00	1.297.143,00	270.082,00
2	6.528.530,00	6.121.800,00	406.730,00
3	269.837,00	696.256,00	426.419,00
4	6.659.740,00	6.977.942,00	681.798,00
5	1.170.751,00	1.221.259,00	50.508,00
6	3.357.828,00	3.059.440,00	298.388,00
7	1.372.100,00	917.886,00	454.214,00
8	2.226.850,00	1.739.884,00	486.966,00
NRMSE		0,17	

4^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 4^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (MPa), το μέσο

υπερκείμενο ύψος $H(m)$, το μήκος της σήραγγας $L(m)$, το εμβαδόν της εκσκαφής (m^2) και το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος E (MPa).



Εικόνα 6.12: Δομή των νευρώνων του 4^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.12 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 5-3-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 5 μεταβλητές εισόδου, 3 κόμβους στο κρυφό επίπεδο και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος.

Στην εικόνα 6.13 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

=== Summary ===

Correlation coefficient	0.957
Mean absolute error	543407.4402
Root mean squared error	613155.9428
Relative absolute error	28.9743 %
Root relative squared error	28.8471 %
Total Number of Instances	8

Εικόνα 6.13: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 4^{ου} μοντέλου.

Στον πίνακα 6.5 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

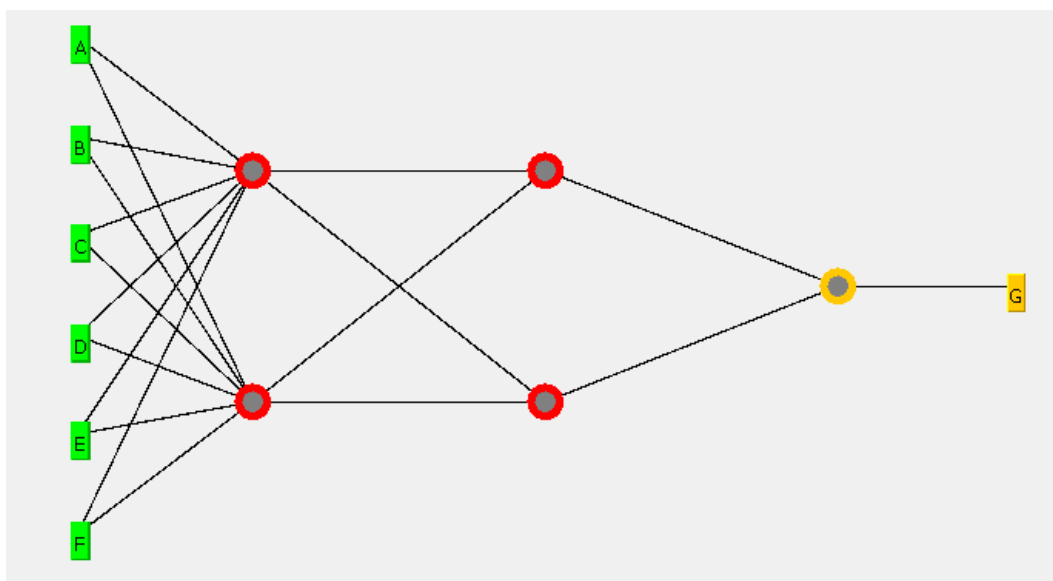
Πίνακας 6.5: Υπολογισμός NRMSE για το 4^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	1.567.225,00	1.141.035,00	426.190,00
2	6.528.530,00	6.437.081,00	91.449,00
3	269.837,00	989.823,00	719.986,00
4	6.659.740,00	6.919.858,00	739.882,00
5	1.170.751,00	1.421.773,00	251.022,00
6	3.357.828,00	4.403.012,00	1.046.184,00
7	1.372.100,00	734.822,00	637.278,00
8	2.226.850,00	1.790.581,00	436.269,00
NRMSE		0,22	

Η τιμή του NRMSE αυξήθηκε σε σχέση με το 3^ο μοντέλο. Η μεταβλητή του του μέσου υπερκείμενου ύψους H είχε ελαφρώς αρνητική επίδραση στην ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου.

5^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 5^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου το GSI, η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (MPa), το μέσο υπερκείμενο ύψος H(m), το μήκος της σήραγγας L(m), το εμβαδόν της εκσκαφής (m²) και το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος E (MPa).



Εικόνα 6.14: Δομή των νευρώνων του 5^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.14 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 6-2-2-1. Συνεπώς το μοντέλου όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 6 μεταβλητές εισόδου, 2 κόμβους σε κάθε ένα από τα 2 κρυφά επίπεδα και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος

Στην εικόνα 6.15 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

```

=== Summary ===

Correlation coefficient           0.8999
Mean absolute error             530338.3985
Root mean squared error        664689.525
Relative absolute error         27.9886 %
Root relative squared error     32.9071 %
Total Number of Instances      8
  
```

Εικόνα 6.15: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 5^{ου} μοντέλου.

Στον πίνακα 6.6 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

Πίνακας 6.6: Υπολογισμός NRMSE για το 5^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

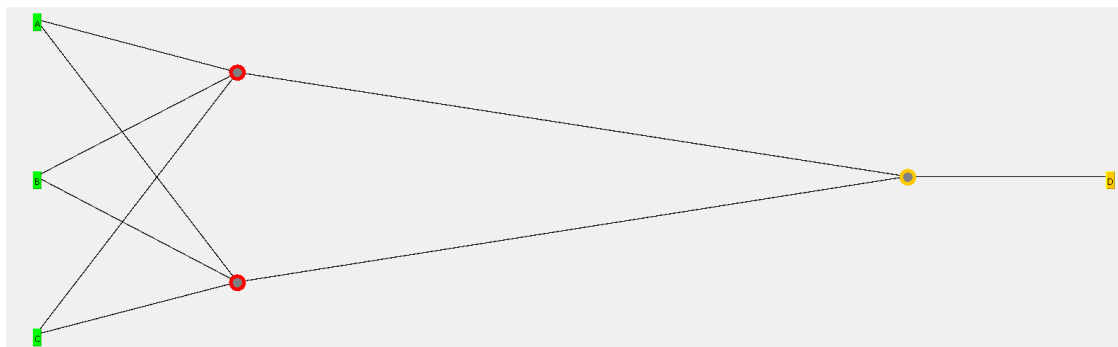
A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	269.837,00	516.311,00	246.474,00
2	4.173.450,00	3.633.009,00	540.441,00
3	2.100.790,00	2.440.763,00	339.973,00
4	1.142.201,00	1.687.727,00	545.526,00
5	2.039.450,00	2.385.285,00	345.835,00
6	798.110,00	1.049.833,00	251.723,00
7	1.567.225,00	1.668.210,00	100.985,00
8	991.427,00	1.263.173,00	271.746,00
NRMSE		0,20	

Η τιμή του NRMSE μειώθηκε ελαφρώς στο 5^ο μοντέλο. Η μεταβλητή του GSI είχε θετική επίδραση στην πρόβλεψη του κόστους σε όποια συνάρτηση κατανομής βαρών και αν δοκιμάστηκε. Το GSI όμως δεν είναι ορθό να εκτιμηθεί πριν από την εκσκαφή

της σήραγγας και δεν μπορεί να εισαχθεί με ασφάλεια σε ένα πρόγραμμα πρόβλεψης του κόστους.

6^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 6^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου το μέσο υπερκείμενο ύψος $H(m)$ το μήκος της σήραγγας $L(m)$ και το RMR.



Εικόνα 6.16: Δομή των νευρώνων του 6^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.16 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 3-2-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 3 μεταβλητές εισόδου, 2 κόμβους στο κρυφό επίπεδο και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος

Στην εικόνα 6.17 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

```
=== Summary ===  
  
Correlation coefficient           0.8344  
Mean absolute error             512067.1498  
Root mean squared error        730967.6356  
Relative absolute error        27.0245 %  
Root relative squared error    36.1885 %  
Total Number of Instances      8
```

Εικόνα 6.17: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 6^{ου} μοντέλου.

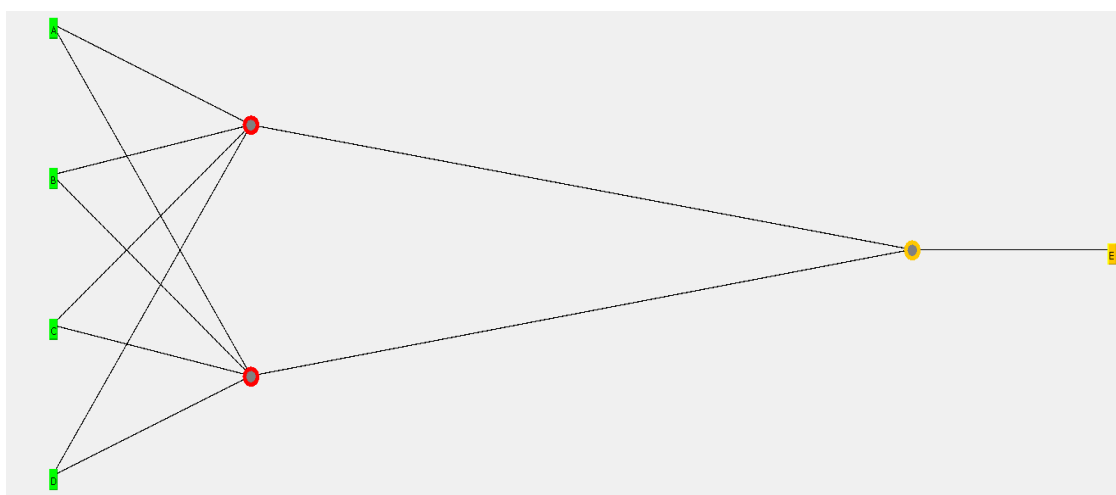
Στον πίνακα 6.7 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

Πίνακας 6.7: Υπολογισμός NRMSE για το 6^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	5.866.370,00	6.571.103,00	704.733,00
2	5.528.530,00	6.751.365,00	1.222.835,00
3	4.867.890,00	4.350.730,00	517.160,00
4	2.226.850,00	2.329.185,00	102.335,00
5	1.891.882,00	2.224.245,00	332.363,00
6	3.357.828,00	4.804.390,00	1.446.562,00
7	1.567.225,00	1.182.917,00	384.308,00
8	1.142.201,00	1.645.881,00	503.680,00
NRMSE		0,20	

7^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 7^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (MPa), το μέσο υπερκείμενο ύψος H(m) το μήκος της σήραγγας L(m) και το RMR.



Εικόνα 6.18: Δομή των νευρώνων του 7^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.18 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 4-2-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 4 μεταβλητές εισόδου, 2 κόμβους στο κρυφό επίπεδο και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος.

Στην εικόνα 6.19 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

```

=== Summary ===

Correlation coefficient           0.9799
Mean absolute error             598704.2813
Root mean squared error        843712.0248
Relative absolute error         33.2867 %
Root relative squared error     40.207 %
Total Number of Instances      8
  
```

Εικόνα 6.19: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 7^{ου} μοντέλου.

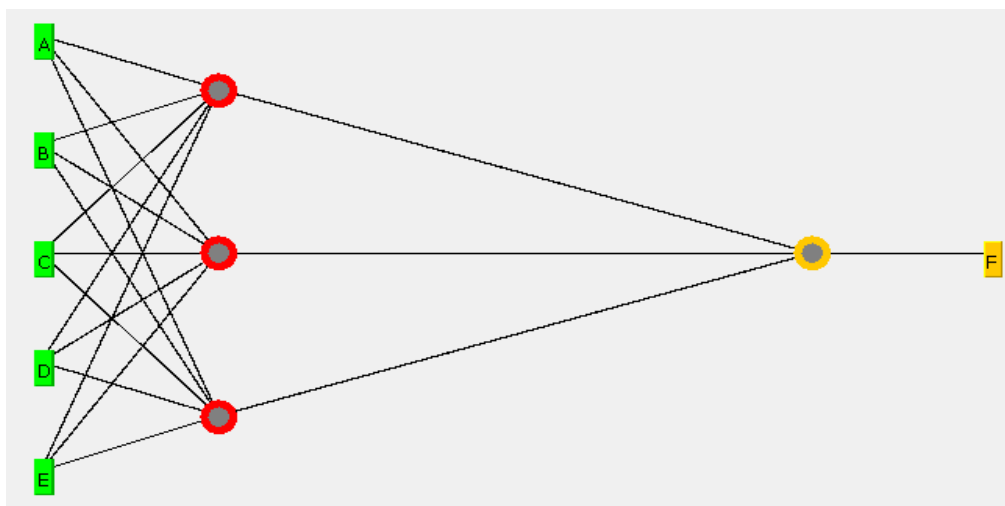
Στον πίνακα 6.8 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

Πίνακας 6.8: Υπολογισμός NRMSE για το 7^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	5.866.370,00	5.971.103,00	104.733,00
2	5.528.530,00	6.654.343,00	1.125.813,00
3	4.867.890,00	4.140.630,00	727.260,00
4	2.226.850,00	2.329.185,00	102.335,00
5	1.891.882,00	2.124.345,00	232.463,00
6	3.357.828,00	4.003.594,00	645.766,00
7	1.567.225,00	1.082.917,00	484.308,00
8	1.142.201,00	1.745.881,00	603.680,00
NRMSE		0,17	

8^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 8^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (MPa), το μέσο υπερκείμενο ύψος H(m) το μήκος της σήραγγας L(m), το RMR και το ειδικό βάρος του πετρώματος γ (kN/m³).



Εικόνα 6.20: Δομή των νευρώνων του 8^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.20 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 5-3-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 5 μεταβλητές εισόδου, 3 κόμβους στο κρυφό επίπεδο και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος.

Στην εικόνα 6.21 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

=== Summary ===

Correlation coefficient	0.9693
Mean absolute error	555077.3272
Root mean squared error	700928.0004
Relative absolute error	34.7128 %
Root relative squared error	38.7768 %
Total Number of Instances	8

Εικόνα 6.21: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 8^{ου} μοντέλου.

Στον πίνακα 6.9 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

Πίνακας 6.9: Υπολογισμός NRMSE για το 8^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

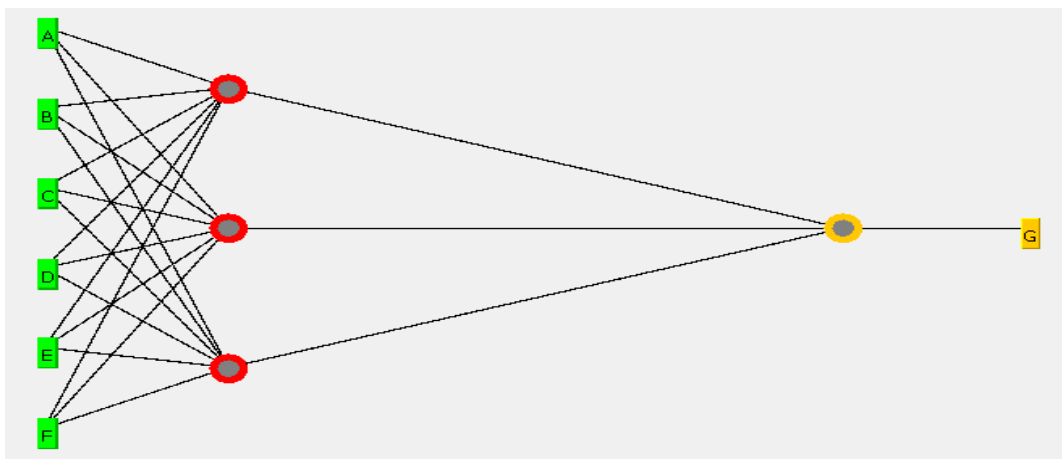
A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	5.866.370,00	6.618.604,00	752.234,00
2	5.528.530,00	6.887.021,00	1.358.491,00

3	4.867.890,00	4.803.099,00	64.791,00
4	2.226.850,00	1.887.882,00	338.968,00
5	1.891.882,00	1.846.545,00	45.337,00
6	3.357.828,00	4.155.321,00	797.493,00
7	1.567.225,00	1.321.479,00	245.746,00
8	1.142.201,00	1.979.760,00	837.559,00
NRMSE		0,19	

Η τιμή του NRMSE αυξήθηκε σε σχέση με το 7^ο μοντέλο. Η μεταβλητή του ειδικού βάρους γ επειδή είναι σταθερή με πολύ μικρή διακύμανση είχε αρνητική επίπτωση στην ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια.

9^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 9^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (MPa), το μέσο υπερκείμενο ύψος H(m), το μήκος της σήραγγας L(m), το RMR, το ειδικό βάρος του πετρώματος γ (kN/m³) και το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος E (MPa).



Εικόνα 6.22: Δομή των νευρώνων του 9^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.22 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 6-3-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 6 μεταβλητές εισόδου, 3 κόμβους στο κρυφό επίπεδο και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος.

Στην εικόνα 6.23 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

=== Summary ===

Correlation coefficient	0.9322
Mean absolute error	615515.6969
Root mean squared error	859105.2732
Relative absolute error	32.8191 %
Root relative squared error	40.4182 %
Total Number of Instances	8

Εικόνα 6.23: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 9^{ου} μοντέλου.

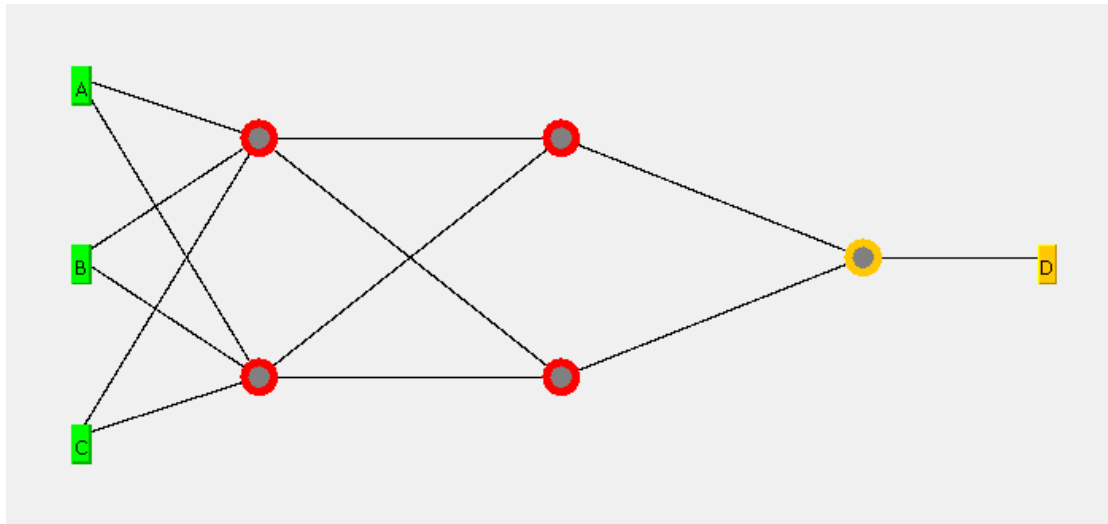
Στον πίνακα 6.10 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

Πίνακας 6.10: Υπολογισμός NRMSE για το 9^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	5.866.370,00	6.346.394,00	480.024,00
2	5.528.530,00	5.728.652,00	200.122,00
3	4.867.890,00	3.625.437,00	1.242.453,00
4	2.226.850,00	2.103.239,00	123.611,00
5	1.891.882,00	2.098.934,00	207.052,00
6	3.357.828,00	4.383.975,00	1.026.147,00
7	1.567.225,00	1.153.537,00	413.688,00
8	1.142.201,00	1.537.399,00	395.198,00
NRMSE		0,19	

10^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 10^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (MPa), το εμβαδόν της εκσκαφής A (m²) και το και το μήκος της σήραγγας L(m).



Εικόνα 6.24: Δομή των νευρώνων του 10^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.24 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 3-2-2-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 2 μεταβλητές εισόδου, 2 κόμβους στα 2 κρυφά επίπεδα και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος. Στο 10^ο μοντέλο το σφάλμα στο κρυφό επίπεδο ήταν ελαφρώς μειωμένο με χρήση περισσότερων κρυφών επιπέδων σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα.

Στην εικόνα 6.25 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

=== Summary ===

Correlation coefficient	0.9694
Mean absolute error	523545.7004
Root mean squared error	547722.2328
Relative absolute error	27.9153 %
Root relative squared error	25.7686 %
Total Number of Instances	8

Εικόνα 6.25: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 10^{ου} μοντέλου.

Στον πίνακα 6.11 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

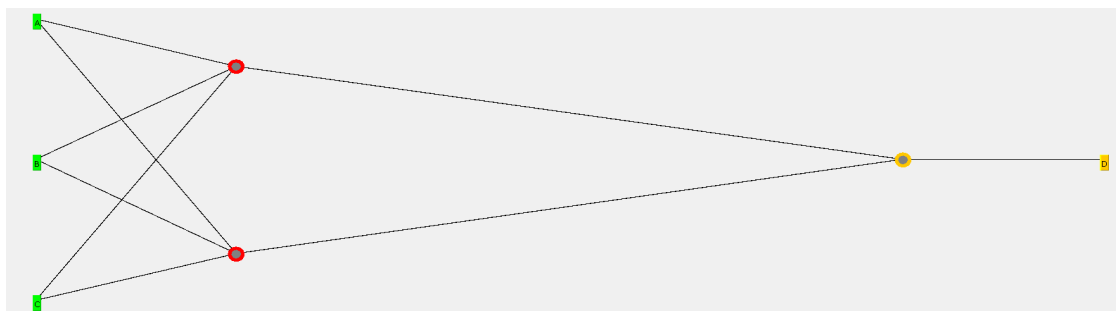
Πίνακας 6.11: Υπολογισμός NRMSE για το 10^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	5.866.370,00	6.307.574,00	441.204,00
2	5.528.530,00	6.283.431,00	754.901,00
3	4.867.890,00	4.390.944,00	476.946,00
4	2.226.850,00	1.987.733,00	239.117,00
5	1.891.882,00	1.857.441,00	34.441,00
6	3.357.828,00	3.970.343,00	612.515,00
7	1.567.225,00	1.082.051,00	485.174,00
8	1.142.201,00	945.460,00	196.741,00
NRMSE		0,14	

Η τιμές του NRMSE και του RAE (Relative absolute error) είναι πολύ χαμηλές σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα και συνεπώς φαίνεται ότι μία μεταβλητή των φυσικών ιδιοτήτων όπως είναι το σ_{ci} και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών όπως είναι το μέσο υπερκείμενο ύψος H αποδίδουν με ιδιαίτερη ακρίβεια στην εκτίμηση του κόστους όταν συνδυάζονται.

11^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 11^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου το GSI, η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (MPa) και το μήκος της σήραγγας $L(m)$.



Εικόνα 6.26: Δομή των νευρώνων του 11^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.26 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 3-2-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 3 μεταβλητές εισόδου, 1 κόμβο στο κρυφό επίπεδο και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος.

Στην εικόνα 6.27 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

```

=== Summary ===

Correlation coefficient           0.9725
Mean absolute error              520733.7722
Root mean squared error          668749.2383
Relative absolute error          32.565 %
Root relative squared error      36.9966 %
Total Number of Instances        8
  
```

Εικόνα 6.27: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 11^{ου} μοντέλου.

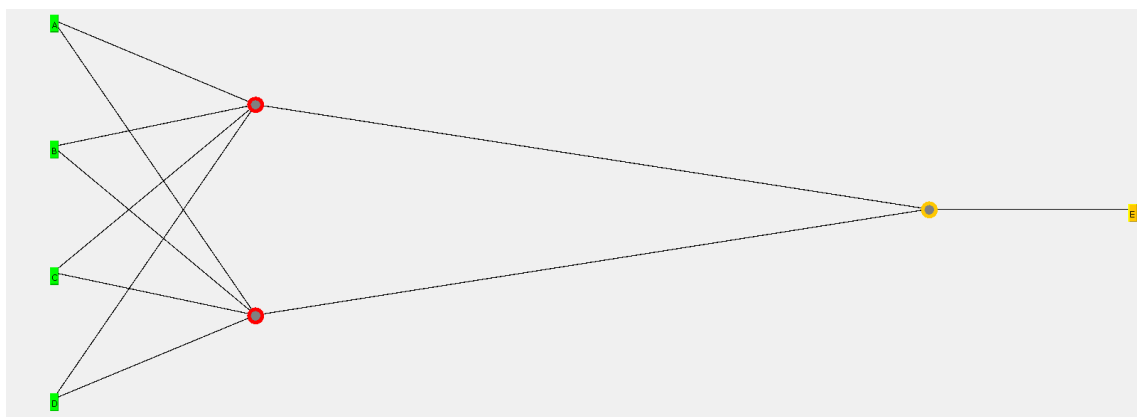
Στον πίνακα 6.12 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

Πίνακας 6.12: Υπολογισμός NRMSE για το 11^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	5.866.370,00	6.312.011,00	445.641,00
2	5.528.530,00	6.362.322,00	833.792,00
3	4.867.890,00	4.753.430,00	114.460,00
4	2.226.850,00	2.206.542,00	20.308,00
5	1.891.882,00	2.135.997,00	244.115,00
6	3.357.828,00	4.595.381,00	1.237.553,00
7	1.567.225,00	985.712,00	581.513,00
8	1.142.201,00	953.712,00	188.489,00
NRMSE		0,17	

12^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 12^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου το GSI, η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} (MPa), το μέσο υπερκείμενο ύψος H(m) και το μήκος της σήραγγας L(m).



Εικόνα 6.28: Δομή των νευρώνων του 12^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.28 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 4-2-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 4 μεταβλητές εισόδου, 1 κόμβο στο κρυφό επίπεδο και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος.

Στην εικόνα 6.29 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

=== Summary ===

Correlation coefficient	0.9755
Mean absolute error	480302.732
Root mean squared error	602026.2365
Relative absolute error	30.0366 %
Root relative squared error	33.621 %
Total Number of Instances	8

Εικόνα 6.29: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 12^{ου} μοντέλου.

Στον πίνακα 6.13 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

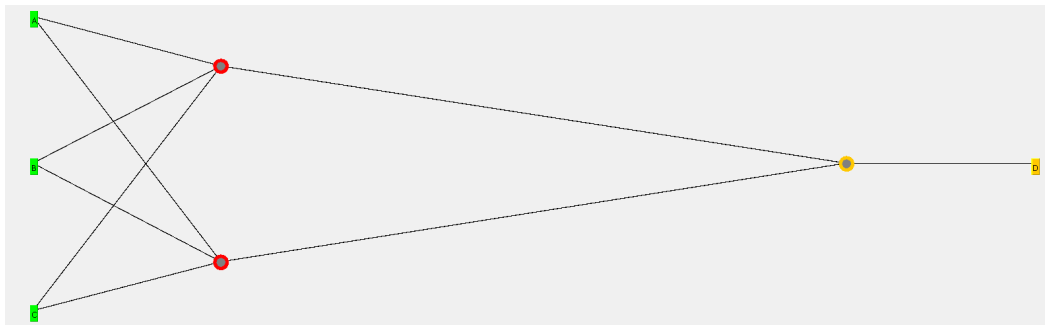
Πίνακας 6.13: Υπολογισμός NRMSE για το 12^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	5.866.370,00	6.402.544,00	536.174,00
2	5.528.530,00	6.583.419,00	1.054.889,00
3	4.867.890,00	4.559.090,00	308.800,00
4	2.226.850,00	1.938.617,00	288.233,00

5	1.891.882,00	1.757.465,00	134.417,00
6	3.357.828,00	4.430.435,00	1.072.607,00
7	1.567.225,00	1.182.051,00	385.174,00
8	1.142.201,00	1.080.073,00	62.128,00
NRMSE		0,17	

13^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 13^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου το GSI, το μήκος της σήραγγας $L(m)$ και το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος E (MPa).



Εικόνα 6.30: Δομή των νευρώνων του 13^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.30 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 3-2-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 3 μεταβλητές εισόδου, 1 κόμβο στο κρυφό επίπεδο και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος.

Στην εικόνα 6.31 παρουσιάζονται τα επί μέρους σφάλματα που εμφανίζει το λογισμικό.

=== Summary ===

Correlation coefficient	0.9724
Mean absolute error	456484.8562
Root mean squared error	539245.2735
Relative absolute error	28.5471 %
Root relative squared error	30.1149 %

Εικόνα 6.31: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 13^{ου} μοντέλου.

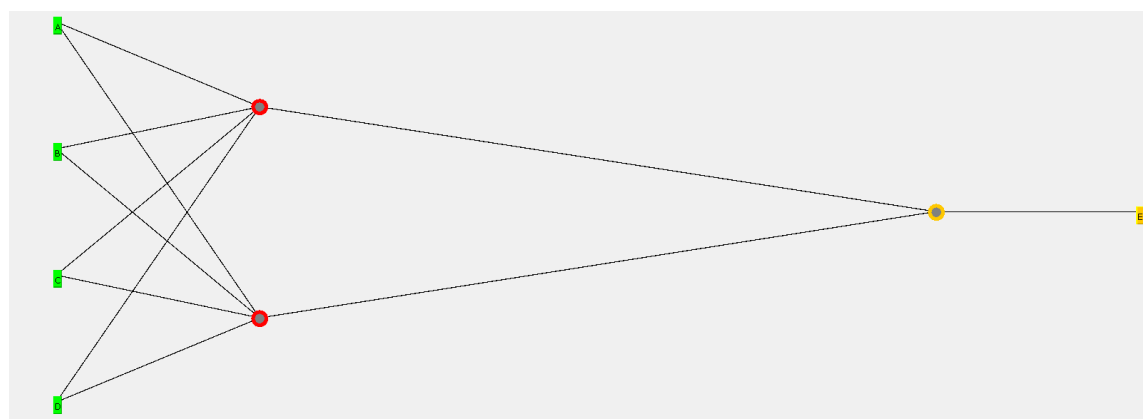
Στον πίνακα 6.14 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

Πίνακας 6.14: Υπολογισμός NRMSE για το 13^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	5.866.370,00	6.405.273,00	538.903,00
2	5.528.530,00	5.825.735,00	297.205,00
3	4.867.890,00	4.440.792,00	427.098,00
4	2.226.850,00	1.789.230,00	437.620,00
5	1.891.882,00	1.798.270,00	93.612,00
6	3.357.828,00	4.491.440,00	1.133.612,00
7	1.567.225,00	1.110.949,00	456.276,00
8	1.142.201,00	874.647,00	267.554,00
NRMSE		0,16	

14^ο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του κόστους στο WEKA

Στο 14^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα εισαχθούν ως μεταβλητές εισόδου το μέσο υπερκείμενο ύψος $H(m)$, το RMR, το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος E (MPa) και το μήκος της σήραγγας $L(m)$.



Εικόνα 6.32: Δομή των νευρώνων του 14^{ου} μοντέλου ΤΝΔ.

Από την εικόνα 6.30 προκύπτει ότι ακολουθείται η δομή 4-2-1. Συνεπώς το μοντέλο όπου δημιούργησε το λογισμικό έχει 4 μεταβλητές εισόδου, 2 κόμβους στο κρυφό επίπεδο και 1 μεταβλητή εξόδου το κόστος.

=== Summary ===

Correlation coefficient	0.975
Mean absolute error	479364.6895
Root mean squared error	552218.8828
Relative absolute error	29.978 %
Root relative squared error	30.8394 %
Total Number of Instances	8

Εικόνα 6.33: Χαρακτηριστικά σφάλματα του 14^{ου} μοντέλου.

Στον πίνακα 6.15 παρουσιάζονται τα πραγματικά κόστη, τα κόστη που πρόβλεψε το μοντέλο, η απόκλιση μεταξύ των τιμών καθώς και το NRMSE του μοντέλου.

Πίνακας 6.15: Υπολογισμός NRMSE για το 14^ο μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

A/A	Actual Cost (€)	Predicted Cost (€)	Deviation (€)
1	5.866.370,00	6.408.203,00	541.833,00
2	5.528.530,00	5.522.518,00	6.012,00
3	4.867.890,00	4.503.241,00	364.649,00
4	2.226.850,00	1.537.669,00	689.181,00
5	1.891.882,00	1.290.418,00	601.464,00
6	3.357.828,00	4.122.432,00	764.604,00
7	1.567.225,00	1.124.378,00	442.847,00
8	1.142.201,00	1.017.870,00	124.331,00
NRMSE		0,16	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

7.1 Συμπεράσματα/Περιορισμοί

Από τα αποτελέσματα των τιμών του NRMSE αλλά και των υπόλοιπων σφαλμάτων συμπεραίνεται ότι η πρόβλεψη του κόστους της άμεσης και της μόνιμης υποστήριξης των σηράγγων ήταν αρκετά ικανοποιητική στα περισσότερα μοντέλα που δημιουργήθηκαν. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτούνται πολλά περισσότερα δεδομένα σηράγγων. Επιπροσθέτως η χρησιμοποίηση της μέσης τιμής αυξάνει την αβεβαιότητα των δεδομένων καθώς θα ήταν σκόπιμο να γίνει ανάλυση του κόστους σε τμήματα σηράγγων όπου μεταβάλλονται οι μεταβλητές εισόδου. Οι σήραγγες όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο εξαρτώνται από μεταβλητές που αλλάζουν το κόστος της υποστήριξης μη γραμμικά. Είναι συνετό όμως να τονιστεί ότι με την εξέλιξη των τεχνογνωσίας των σηράγγων και τη συνεχή βελτίωση των μηχανημάτων τα δεδομένα αναμένεται να γίνουν πιο γραμμικά σε σχέση με το τελικό κόστος.

Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η αρχιτεκτονική των μοντέλων καθώς και τα σφάλματα NRMSE και RAE (Relative absolute Error) σε κάθε ένα από αυτά.

Πίνακας 7.1: Συγκεντρωτικός πίνακας μοντέλων ΤΝΔ.

Μοντέλο	Μεταβλητές εισόδου	Αρχιτεκτονική	NRMSE	RAE (%)
1	GSI, σ_{ci} , H, γ , RMR,L, Area, E	8-10-2-1	0,20	30,5
2	L, Area, E	3-2-1	0,17	33
3	σ_{ci} , L, Area, E	4-10-1	0,17	29,1
4	σ_{ci} , H, L, Area, E	5-3-1	0,22	28,9
5	GSI, σ_{ci} , H, L, Area, E	6-2-2-1	0,20	27,4
6	H, L, RMR	3-2-1	0,20	27
7	σ_{ci} , H, L, RMR	4-2-1	0,17	33,2
8	σ_{ci} , H, γ , L, RMR	5-3-1	0,19	34,7
9	σ_{ci} , H, γ , L, RMR, E	6-3-1	0,19	32,8
10	σ_{ci} , Area, L	3-2-2-1	0,14	27,9
11	GSI, σ_{ci} ,L	3-2-1	0,17	32,5
12	GSI, σ_{ci} , H,L	4-2-1	0,17	30
13	GSI, L, E	3-2-1	0,16	28,5
14	Area, RMR, E, L	4-2-1	0,16	29,8

Από το παραπάνω συμπεραίνεται ότι η μεταβλητή η οποία συσχετίζεται καλύτερα με το τελικό κόστος της άμεσης και της μόνιμης επένδυσης από τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}), το μέτρο ελαστικότητας (E) αλλά και το εμβαδόν της διατομής (Area). Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει μέσω της μείωσης των σφαλμάτων κατά την εισαγωγή αυτών των μεταβλητών σε υπάρχοντα μοντέλα. Επίσης παρατηρείται ότι μοντέλα με αυτές τις μεταβλητές εισόδου έχουν ελαφρώς μικρότερα σφάλματα. Στην αντίθετη περίπτωση το ειδικό βάρος (γ) και το μέσο υπερκείμενο ύψος (H) είχαν κυρίως αρνητική επίδραση στην τιμή του σφάλματος καθώς η εισαγωγής τους σε υπάρχον μοντέλο ή μείωσε την απόδοση. Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με το διάγραμμα που παρουσιάστηκε στην εικόνα 4.1, ότι δηλαδή κατασκευαστές, μελετητές και εμπειρογνώμονες αγνοούν τη μεταβλητή του βάθους όσον αφορά το τελικό κόστος ενώ δε συμβαίνει το ίδιο με τους γεωλογικούς παραμέτρους.

Τα στοιχεία της γεωτεχνικής ταξινόμησης όπως το GSI και το RMR δε φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά τα σφάλματα. Επίσης αυτές οι μεταβλητές δεν είναι εύκολο να εκτιμηθούν πριν την εκσκαφή και συνεπώς κρίνονται ακατάλληλες για χρήση σε μοντέλα πρόβλεψης τεχνητών νευρωνικών δικτύων ως μεταβλητές εισόδου.

Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν με λίγες μεταβλητές είχαν την ίδια ή και καλύτερη ικανότητα πρόβλεψης σε σχέση με τα μοντέλα που είχαν περισσότερες μεταβλητές εισόδου. Αυτό το συμπέρασμα είναι το πλέον σημαντικό αφού δίνει τη δυνατότητα στο μηχανικό να προεκτιμήσει το κόστος χωρίς να χρειάζεται την περισυλλογή όλων των δεδομένων. Ως εκ τούτου τα μοντέλα αυτά προσδίδουν σημαντικό πλεονέκτημα στην εκτίμηση του κόστους αφού απαιτείται λιγότερος χρόνος μελέτης και δοκιμών καθώς και μικρότερα κεφάλαια κατά το αρχικό στάδιο.

Βάσει όσων αναφέρθηκαν προτείνονται μοντέλα με μικρά σφάλματα και μεταβλητές που εμφανίζουν γενικότερα αποδοτική συμπεριφορά στο εύρος των μοντέλων.

Πίνακας 7.2 Προτεινόμενα μοντέλα προς χρήση.

Προτεινόμενα μοντέλα	Μεταβλητές εισόδου
3 ^ο	σ_{ci} , L, Area, E
10 ^ο	σ_{ci} , Area, L

Πρέπει να τονιστεί ότι το μήκος της σήραγγας (L) σε όλα τα μοντέλα λήφθηκε υπόψιν διότι είναι μία μεταβλητή που κρίνεται απαραίτητη καθώς επίσης είναι και γνωστή από την αρχή στο χρήστη.

Επιπροσθέτως είναι κρίσιμο να αντιληφθεί ο χρήστης των μοντέλων νευρωνικών δικτύων ότι τα παραπάνω έργα μελέτης έχουν λογικές τιμές και συνεπώς τα μοντέλα εκπαιδεύτηκαν μέσω αυτών των τιμών. Για παράδειγμα το μέσο υπερκείμενο ύψος είχε ανώτατη τιμή τα 314 μέτρα. Τα περισσότερα έργα σιράγγων στην Ελλάδα έχουν τιμές από 50 έως 300 μέτρα μέσω υπερκειμένων. Αυτό όπως φαίνεται και από τον πίνακα 7.1 να οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το υπερκείμενο ύψος δε διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο τελικό κόστος της άμεσης και της μόνιμης επένδυσης. Αυτό φυσικά δεν ισχύει καθώς με την αύξηση των υπερκειμένων γαιών αυξάνεται και η πίεση (MPa) που δέχονται τα προσωρινά και τελικά μέτρα υποστήριξης. Συνεπώς ακραίες τιμές του ύψους ή μίας άλλης μεταβλητής μπορεί να αλλάξει δραστικά το κόστος αλλά πιθανόν να μην μπορεί να εκτιμηθεί σωστά από το μοντέλο εάν αυτό δεν εκπαιδεύτηκε από έργα με ακραίες τιμές μεταβλητών.

Στον πίνακα 7.3 αναφέρονται τα όρια των δεδομένων όπου τα παραπάνω μοντέλα είναι αξιόπιστα και λειτουργικά.

Πίνακας 7.3 Όρια τιμών μεταβλητών όπου τα μοντέλα προτείνονται για χρήση.

Μεταβλητές	Όρια τιμών
GSI	10-90
σ_{ci} (MPa)	5-150
RMR	10-90
γ (kN/m ³)	18-27
H (m)	30-350
Area (m ²)	80-150
E (MPa)	100-30000

Η παράμετρος του πληθωρισμού δε λήφθηκε υπόψιν ώστε να υπολογιστεί η καθαρά παρούσα αξία κάθε έργου στο σήμερα καθώς πολλά έργα χρειάστηκαν πολλά χρόνια για να υλοποιηθούν και δε θα ήταν ακριβής ο υπολογισμός του κόστους στο σήμερα.

Τέλος οι παραπάνω αναλύσεις αφορούν αποκλειστικά έργα τα οποία υλοποιήθηκαν με τη μέθοδο συμβατικής διάνοιξης και όχι με TBM.

7.2 Μελλοντική εργασία/Προτάσεις

Βάσει όσων έχουν αναφερθεί και αναλυθεί στις παραπάνω ενότητες για μελλοντική εργασία προτείνεται :

- Η κατασκευή μίας μεγάλης βάσης δεδομένων από έργα σηράγγων όπου θα είναι γνωστές όλες οι μεταβλητές που επηρεάζουν το κόστος. Με αυτόν τον τρόπο θα αυξηθεί κατακόρυφα η αξιοπιστία των μοντέλων και συνεπώς θα επιτυγχάνεται μικρότερο σφάλμα στην εκτίμηση του τελικού κόστους.
- Δημιουργία μοντέλων με χρήση βαθιών νευρωνικών δικτύων (Deep Neural Networks). Προτείνεται η χρήση των λογισμικών Python και Matlab.
- Ποσοτικοποίηση της διάνοιξης με TBM ώστε να περιλαμβάνεται το πλήθος των έργων.

Συνοψίζοντας προτείνεται η αξιοποίηση των μοντέλων από κατασκευαστικές εταιρίες, μελετητικά γραφεία, δημόσιες υπηρεσίες όπως τα τεχνητά γραφεία των δήμων, από το υπουργείο υποδομών και μεταφορών καθώς και από την ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε.

Ξενογλώσση Βιβλιογραφία

- D. Kaliampakos, A. Benardos , A. Mavrikos (2015). A review on the economics of underground space utilization.
- Efron, N., Read, M., (2012). Analysing International Tunnel Costs.
- Maidl, B., Thewes, M., Maidl, B., (2013) Handbook of Tunnel Engineering Volume I: Structures and Methods.
- Haykin, S. S. (2009). Neural networks and learning machines/Simon Haykin.
IBM SPSS Neural Networks 25
- Lolino, G., Manconi, A., (2015). Engineering Geology for Society and Territory.
- Lundman, P. (2011). Cost Management for Underground Infrastructure Projects.
- Paraskevopoulou, C., Benardos, A., (2013). Assessing the construction cost of Greek transportation tunnel projects. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 38, 497–506.
- Paraskevopoulou, C., Benardos, A., Diederichs, M., (2013). Assessing and benchmarking the construction cost of tunnels.
- Paraskevopoulou, C., Boutsis, G., (2020). Cost Overruns in Tunnelling Projects: Investigating the Impact of Geological and Geotechnical Uncertainty Using Case Studies.
- P. B. Attewell, I. W. Farmer (1976). Principles of Engineering Geology.
- Petroutsatou, C., Lambropoulos, S., and Pantouvakis, J.P. (2006). Road tunnel early cost estimates using multiple regression analysis. *Operational Research - An International Journal*, Vol. 6, No. 3, pp. 411- 422.
- Prieto, A., Prieto, B., Ortigosa, E. M., Ros, E., Pelayo, F., Ortega, J., & Rojas, I. (2016). Neural networks: An overview of early research, current frameworks and new challenges. *Neurocomputing*, 214, 242-268.
- Setyawati, B. R., Sahirman, S., & Creese, R. C. (2002). Neural networks for cost estimation, *AACE International Transactions*, Vol. *EST13*, 13-1.
- Souping P.,Jincai Z. (2007) Engineering Geology for Underground Rocks.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αντωνιάδου, Ε. (2019). Συγκριτική ανάλυση κόστους και χρόνου σε τεχνικά έργα υποδομής μεταξύ των φάσεων μελέτης και κατασκευής (Αδημοσίευτη Μεταπτυχιακή εργασία). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκη.
- Αργυράκης, Π., (2001), "Νευρωνικά Δίκτυα και Εφαρμογές", Διδακτικές Σημειώσεις, Τόμος Β' Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.
- Βασιλόπουλος, Ι. Φ. (2018). *Εφαρμογές τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη του χρόνου και του κόστους υδραυλικών έργων* (No. GRI-2019-23588). Aristotle University of Thessaloniki.
- Γιαννάκος, Α. (2017). Εφαρμογή Νευρωνικών Δικτύων Στη Διαχείριση Τεχνικών Έργων. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Γιουβανίδης, Α. (2012). Πληροφοριακά Συστήματα Διοίκησης-Διαχείρισης Έργων (*P.M.I.S.*). Θεσσαλονίκη: Πανεπιστήμιο Μακεδονίας.
- Γναρδέλλης, Χ. (2003) Εφαρμοσμένη Στατιστική. Αθήνα , Ελλάδα : Εκδόσεις Παπαζήση.
- Θεοδόση-Κόκκινου, Α. (2013). *Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και εφαρμογές στα συστήματα αυτόματου ελέγχου* (Doctoral dissertation).
- Λαμπρόπουλος Σ., Αντωνίου Φ., Μαραβάς Α., Κωνσταντινίδης Δ., (2005). Διαχείριση Κόστους και Χρόνου Κατασκευής Μεγάλων Τεχνικών Έργων στην Εγνατία Οδό
- Λαμπρόπουλος Σ., Πετροτσάτου Κ., (2005). Ταχεία Εκτίμηση Προϋπολογισμού Δαπάνης Οδικών Σηράγγων», 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος.
- Μάνθος, Ε. Δ. (2009). *Μέτρο δυσκαμψίας και παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλτικών σκυροδεμάτων* (No. GRI-2009-2315). Aristotle University of Thessaloniki.
- Καλιαμπάκος, Δ. (2012). Βοηθητικές Σημειώσεις Χρηματοοικονομικής και κοινωνικοοικονομικής αξιολόγησης επενδύσεων

- Κύρκος, Ε. (2015). Επιχειρηματική ευφυΐα και εξόρυξη δεδομένων. Αθήνα, Ελλάδα : Εκδόσεις Κάλλιπος
- ΟΜΟΕ - Τεύχος Οδικών Σηράγγων: Έργα Πολιτικού Μηχανικού, Ιούλιος 2002
- Παρασκευοπούλου, Χ. (2011). Ανάλυση κόστους εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης Ελληνικών οδικών σηράγγων. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Πολύζος, Σ. (2017). Προγραμματισμός & Οργάνωση των Έργων – Μέθοδοι και Τεχνικές. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ
- Ν 4412/2016 “Δημόσιες Συμβάσεις Έργων, Προμηθειών και Υπηρεσιών” (ΦΕΚ Α’ 147)
- Ρώσσης, Ι., Τσανασίδης, Π., (2020). Εφαρμογή νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων. Θεσσαλονίκη : Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκη.
- Σοφιανός, Α., (2018). Διάνοιξη Σηράγγων. Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τσουχικά, Μ. Α. (2007). *Νευρωνικά δίκτυα και εφαρμογές* (No. GRI-2007-577). Aristotle University of Thessaloniki.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., (2008). Τιμολόγιο Μελέτης – Αναλυτική Περιγραφή Εργασιών Σύμφωνα με τα Αναλυτικά Τιμολόγια του Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, Αθήνα, (2008)

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

<https://www.rocscience.com/>

www.sciencedirect.com

<http://kelifos.physics.auth.gr>

<https://becominghuman.ai>