

# Προεκτίμηση Δαπάνης Κατασκευής Οδικών Σηράγγων

ΚΛΕΟΠΑΤΡΑ ΠΕΤΡΟΥΤΣΑΤΟΥ

Πολιτικός Μηχανικός

ΣΕΡΓΙΟΣ ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

## Περίληψη

Οι υψηλοί αρχικοί προϋπολογισμοί των οδικών σηράγγων και οι συχνές και μεγάλες υπερβάσεις καθιστούν επιτακτική την ανάγκη ασφαλούς προεκτίμησης της δαπάνης κατασκευής τους το ενωρίτερο. Όμως, η έλλειψη επαρκών, αξιόπιστων και προσβάσιμων βάσεων δεδομένων δεν το έχει επιτρέψει διεθνώς μέχρι σήμερα. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται πρωτότυπα μοντέλα προεκτίμησης της δαπάνης κατασκευής οδικών σηράγγων με τη χρήση νευρωνικών δικτύων και πολλαπλής παλινδρόμησης. Πεδίο συλλογής των στοιχείων της εκτεταμένης βάσης δεδομένων που δημιουργήθηκε αποτέλεσαν 46 χιλιόμετρα σηράγγων της Εγνατίας Οδού. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των μοντέλων επαληθεύτηκε με τη χρήση ανεξάρτητων δειγμάτων. Τέλος, οι δύο μέθοδοι προεκτίμησης συγκρίθηκαν με βάση τα αποτελέσματά τους. Τα παραπάνω μοντέλα μπορεί να αποτελέσουν σημαντικό εργαλείο κατά το αρχικό στάδιο σχεδιασμού αυτοκινητοδρόμων και υπόγειων έργων.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κοινωνική και οικονομική απαίτηση μαζικής, ταχείας και αξιόπιστης μεταφοράς ανθρώπων και εμπορευμάτων έχει επιβάλει την ευρεία κατασκευή σύγχρονων αυτοκινητοδρόμων υψηλής ταχύτητας και ασφάλειας, με ομαλή, κατά το δυνατόν, οριζοντιογραφία και μηκοτομή. Η υπερνίκηση του εδαφικού ανάγλυφου και των διαφόρων γεωτεχνικών και υδραυλικών κωλυμάτων, καθώς και η παράκαμψη αστικών οικισμών, αρχαιολογικών τόπων και περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών, επιτυγχάνονται με την κατασκευή μεγάλων και δαπανηρών τεχνικών έργων, γεφυρών και σηράγγων.

Στη φάση προκαταρκτικής μελέτης των έργων, η επιλογή της βέλτιστης λύσης μεταξύ των διαφόρων εναλλακτικών μορφών σχεδιασμού προϋποθέτει την αξιόπιστη προεκτίμηση της δαπάνης κατασκευής τους. Ιδιαίτερα στην περίπτωση των σηράγγων, η υψηλή δαπάνη κατασκευής σε συνδυασμό με τον αυξημένο κίνδυνο γεωτεχνικών προβλημάτων που οδηγούν σε διόγκωσή της επιτείνουν την ανάγκη του Κύριου του Έργου (ΚτΕ) για ασφαλή προεκτίμηση.

Η εφαρμογή επιστημονικών μεθόδων για την προεκτίμηση της δαπάνης έργων απαιτεί καταρχήν την ύπαρξη εκτεταμένης, αξιόπιστης και ομοιογενούς βάσης δεδομένων. Δηλαδή, πρέπει να συγκεντρωθούν με άδεια των ΚτΕ συγκρίσιμα στοιχεία από πολλές σήραγγες που διανοίχθηκαν σε ποικιλία εδαφικών σχηματισμών, μελετήθηκαν με ανάλο-

γες παραδοχές, κατασκευάστηκαν με παρεμφερείς μεθόδους και πληρώθηκαν με παρόμοια τιμολόγια. Η δυσκολία του εγχειρήματος, που προφανώς επιτείνει η συνήθης απροθυμία παροχής ευαίσθητων οικονομικά στοιχείων, δεν έχει επιτρέψει την ανάπτυξη της σχετικής έρευνας.

Παράλληλα όμως, από την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι έχουν δημοσιευτεί αρκετές εργασίες όσον αφορά στην προεκτίμηση της δαπάνης άλλων τεχνικών έργων με τη χρήση νευρωνικών δικτύων (Neural Networks, NNs) και αναλύσεων πολλαπλής παλινδρόμησης (Multiple Regression, MR).

Τα τελευταία έτη κατασκευάστηκαν στη χώρα μας πολλές σήραγγες στην Εγνατία Οδό. Ο νέος αυτοκινητόδρομος διατρέχει σχεδόν όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς που απαντώνται στον ελληνικό χώρο και παρέχει το απαιτούμενο ευρύ πεδίο συλλογής στοιχείων. Στα πλαίσια της υπόψη έρευνας όλα τα τεχνικά, γεωλογικά και οικονομικά στοιχεία των σηράγγων αποθηκεύτηκαν σε εκτεταμένη βάση δεδομένων.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν πρωτότυπα αναλυτικά μοντέλα προεκτίμησης της δαπάνης κατασκευής οδικών σηράγγων, τόσο με τη χρήση MR, όσο και NNs, και ελέγχθηκε η αξιοπιστία τους.

Τέλος, αξιολογήθηκε συγκριτικά η αποτελεσματικότητα των δύο μεθόδων προεκτίμησης στην υπόψη περίπτωση.

## Συμβολισμοί

|                  |  |
|------------------|--|
| GSI:             | Γεωλογικός δείκτης αντοχής – Geological Strength Index   |
| ε:               | Παραμόρφωση της βραχώμαζας (%)   |
| H:               | Ύψος υπερκείμενων γαιών (m)  |
| EER:             | Ρυθμός σφάλματος εκτίμησης – Estimated error rate  |
| AEER:            | Μέσος ρυθμός σφάλματος εκτίμησης – Average estimated error rate  |
| WEER:            | Σταθμ. ρυθμός σφάλματος εκτίμησης - Weighted estimated error rate  |
| R <sup>2</sup> : | Συντελεστής προσδιορισμού  |
| F:               | Στατιστικός δείκτης σημαντικότητας μοντέλου  |
| p-value:         | Η πιθανότητα που ελέγχει τη μηδενική υπόθεση: ο συντελεστής προσδιορισμού του μοντέλου να είναι ίσος με μηδέν. |

## 2. ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση βελτιωμένων οδικών υποδομών, σε συνδυασμό με τους περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς περιορισμούς, έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή ολοένα και περισσότερων σιηράγγων. Οι συχνές και σημαντικές υπερβάσεις των αρχικών προϋπολογισμών κατασκευής, σε συνδυασμό με το μεγάλο απόλυτο μέγεθός τους, επιτάσσουν την ακριβέστερη δυνατή προεκτίμηση της δαπάνης το ενωρίτερο, ώστε να μετριασθεί ο κίνδυνος αστοχίας των αποφάσεων του ΚτΕ.

Στην ελληνική βιβλιογραφία δεν υπάρχουν εργασίες που να αναφέρονται σε προεκτίμηση δαπάνης οδικών σιηράγγων. Αλλά και κατά την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας ανευρέθη μόνο μία σχετική εργασία.

Οι Sinfield και Einstein [24] προσπάθησαν να προεκτιμήσουν παραμετρικά το κόστος σιηράγγων μικρής διαμέτρου (περίπου 5μ), οι οποίες θα χρησιμοποιούν ως δίοδοι μεταφοράς εμπορευμάτων σε μεγάλα αστικά κέντρα. Εστίασαν στη σχέση κόστους κατασκευής και διαμέτρου σιηράγγας χωρίς να λάβουν υπόψη άλλα σημαντικά στοιχεία, όπως ποιότητα υπεδάφους, μέθοδο εκσκαφής, μέτρα προσωρινής υποστήριξης κλπ. Επιπλέον, η βάση δεδομένων τους ήταν πολύ μικρή ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για παρόμοια έργα.

Υπάρχει όμως μικρός αριθμός δημοσιευμένων εργασιών, οι οποίες αναφέρονται σε κόστος κατασκευασμένων σιηράγγων.

Το 2001 η Ελβετική Εταιρεία Σιηράγγων [4] δημοσίευσε τα αποτελέσματα έρευνας σχετικά με το τελικό κόστος σιηράγγων. Η έρευνα περιελάμβανε 1200 σιηράγγες υπόγειας διάτρησης στην Ελβετία με συνολικό μήκος 1600χλμ, δηλαδή το ένα τρίτο περίπου του μήκους των ελβετικών σιηράγγων. Το κόστος εκσκαφής, προσωρινής και μόνιμης επένδυσης, κυμάνθηκε από 110€/m<sup>3</sup> για καλής ποιότητας βραχώμαζες έως 1077€/m<sup>3</sup> για πτωχής ποιότητας βραχώμαζες.

Ο Μαραβάς και Κωνσταντινίδης [30] διαπίστωσαν ότι το κόστος για τη διάνομιξη και την προσωρινή υποστήριξη των σιηράγγων καλύπτει κατά μέσο όρο το 62% του συνολικού κόστους τους. Το κόστος της τελικής επένδυσης, που αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα μεταβλητού πάχους ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας, είναι κατά μέσο όρο το 17% του συνολικού κόστους και έχει μικρότερη εξάρτηση από τη γεωλογία. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το κόστος της εγκατάστασης των ηλεκτρομηχανολογικών και τηλεματικών συστημάτων, που είναι της τάξης του 14%. Τα στόμια των σιηράγγων καλύπτουν το 3% του συνολικού κόστους, ενώ το υπόλοιπο 4% αφορά στις συνδετήριες στοές, στα φρεάτια εξαερισμού, στην οδοστρωσία, στα ασφαλτικά και στα κτίρια ελέγχου.

Είναι σαφές ότι υπάρχει διεθνώς ανάγκη αναλυτικής εξέτασης των παραμέτρων προσδιορισμού της δαπάνης κατασκευής των σιηράγγων.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται κατά τη

διάνομιξη καθορίζουν τη μέθοδο διάνομιξης και προσωρινής υποστήριξης και επομένως το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής δαπάνης. Όμως, η πρόγνωση τους είναι επίπονη και όχι πάντα επιτυχής, είτε γιατί δεν μπορούν να συλλεχθούν αρκετά εργαστηριακά στοιχεία, είτε γιατί αυτά ερμηνεύονται δύσκολα. Σε πολύπλοκες γεωλογικές συνθήκες ακόμα και η λεπτομερής εργαστηριακή ανάλυση και οι επί τόπου δοκιμές δεν μπορούν να αποκαλύψουν πλήρως την πραγματικότητα.

Για τους παραπάνω λόγους, η οποιαδήποτε εφαρμογή επιστημονικών μεθόδων για την προεκτίμηση της δαπάνης των σιηράγγων απαιτεί την ύπαρξη αξιόπιστης και ομοιογενούς βάσης δεδομένων. Τα προς επεξεργασία στοιχεία θα πρέπει να αντληθούν από έργα που έχουν μελετηθεί με παρόμοιες παραδοχές, κατασκευασθεί με παρεμφερείς μεθόδους, πληρωθεί με παρόμοια τιμολόγια και καλύπτουν μεγάλη ποικιλία εδαφών. Σε όλα αυτά πρέπει να προστεθεί και η απροθυμία των ΚτΕ στην παροχή ευαίσθητων οικονομικών στοιχείων, γεγονός που δικαιολογεί σε μεγάλο βαθμό την έλλειψη σχετικών επιστημονικών εγχειρημάτων.

## 3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Οι ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι προεκτίμησης κόστους είναι οι παρακάτω:

- τα NNs,
- η παραμετρική προκοστολόγηση, που βασίζεται στην MR.

Η καταλληλότητα των μεθόδων για την προεκτίμηση του κόστους κατασκευών αξιολογείται με βάση τους στατιστικούς δείκτες της Μέσης Απόλυτης Απόκλισης (Mean Absolute Deviation – MAD) και του Μέσου Απόλυτου Ποσοστιαίου Σφάλματος (Mean Average Percentage Error – MAPE).

Ο Goh Bee-Hua υποστηρίζει ότι σημαντικός περιορισμός στη χρήση στατιστικών μεθόδων είναι η εξάρτηση του αποτελέσματος κατά μεγάλο ποσοστό από την ποιότητα και την ποσότητα των δεδομένων. Όσο περισσότερα είναι τα δεδομένα, τόσο περισσότερο αυξάνονται οι πιθανότητες βελτίωσης της σημαντικότητας των στατιστικών δεικτών [10].

Ο Bode [6], μετά από πολλές εφαρμογές προεκτίμησης κόστους στη βιομηχανία, παρουσίασε τον παρακάτω πίνακα κριτηρίων επιλογής της πλέον κατάλληλης εκ των τριών προαναφερθεισών μεθόδων.

Η χρήση NNs στην πρόβλεψη της δαπάνης των κατασκευών είναι ευρέως διαδεδομένη, κυρίως επειδή δεν επιβάλλει τη χρήση μαθηματικής σχέσης σύνδεσης του κόστους με τις παραμέτρους που το επηρεάζουν. Τα NNs δεν θέτουν περιορισμό στον αριθμό των παραμέτρων που επιδρούν στο κόστος, επειδή έχουν την ικανότητα αναπροσαρμογής των συσχετίσεων μέσω εκπαίδευσης. Αυτοργανώνονται κάθε φορά που νέα δεδομένα προστίθενται στο δείγμα και επεξεργάζονται ταυτόχρονα πολλές παραμέτρους, χωρίς να είναι παραμετρικοί στατιστικοί εκτιμητές. Το βασικό μειονέ-

κτημά τους είναι ότι δεν υπάρχει εμφανής λογική πίσω από το βέλτιστο μοντέλο που προτείνεται. Επίσης, η εύρεση της σωστής αρχιτεκτονικής, η οποία είναι καθοριστικής σημασίας, μπορεί να εξελιχθεί σε πολύ χρονοβόρα διαδικασία.

Πίνακας 1: Κριτήρια επιλογής μεθόδου προεκτίμησης [6]  
Table 1: Selection criteria of pre - estimation method [6]

| Χρήση Νευρωνικών Δικτύων όταν ...  | Χρήση Παραμετρικών Μεθόδων όταν ...  |
|--|--|
| <p>σχετική γνώση όλων εκείνων των χαρακτηριστικών του προϊόντος που επηρεάζουν το κόστος του όταν οι παράμετροι που επηρεάζουν το κόστος είναι λίγες</p> <p>όταν δεν είναι γνωστό πώς αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν το κόστος</p> | <p>ακριβής γνώση όλων εκείνων των χαρακτηριστικών του προϊόντος που επηρεάζουν το κόστος του όταν οι παράμετροι που επηρεάζουν το κόστος είναι λίγες</p> <p>όταν είναι σχετικά γνωστό πώς αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν το κόστος</p> |

Οι Akintoye et al. χρησιμοποίησαν τεχνικές παλινδρόμησης προκειμένου να αναπτύξουν παραμετρικά μοντέλα εκτίμησης του κόστους κατασκευών [2]. Τα παραμετρικά μοντέλα επιτυγχάνουν την προκοστολόγηση του έργου στη φάση ελέγχου σκοπιμότητας, δεν είναι χρονοβόρα ή κοστοβόρα για τον ΚτΕ και βασίζονται σε μία ή περισσότερες παραμέτρους του έργου. Η ακρίβειά τους μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας συντελεστές απόκλισης, οι οποίοι μπορούν να προκύψουν από αναλύσεις παλινδρόμησης παλαιών δεδομένων.

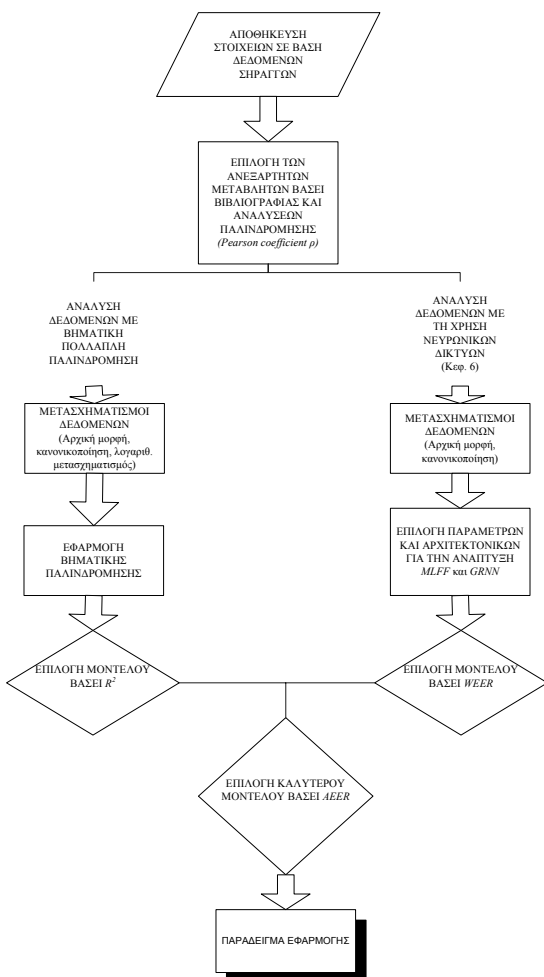
Επειδή στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ότι, τόσο τα NNs, όσο και οι τεχνικές ανάλυσης παλινδρόμησης έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε εκτιμήσεις δαπάνης έργων, θεωρήθηκε σκόπιμο να επιχειρηθεί η εφαρμογή και των δύο μεθόδων για την ανάπτυξη μοντέλων. Αυτό επιτρέπει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και την παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους στη συγκεκριμένη περίπτωση. Η προτεινόμενη μεθοδολογία προεκτίμησης απεικονίζεται στο Σχήμα 1.

#### 4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η δομή της βάσης δεδομένων σηράγγων πρέπει να καθοδηγεί τη συλλογή σωστά και να καθιστά ευχερή την καταγραφή για κάθε σήραγγα ξεχωριστά των επιμέρους στοιχείων που προκύπτουν, τόσο κατά τις έρευνες και μελέτες (γεωτρήσεις, εργαστηριακές δοκιμές, γεωλογική και γεωτεχνική μελέτη, μελέτη προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης κλπ), όσο και κατά την κατασκευή. Πρέπει επίσης να δίνει τη δυνατότητα αξιολόγησης και συσχέτισης των πληροφοριών, που έχουν αποθηκευτεί ή θα αποθηκεύονται στο μέλλον, όπως των στοιχείων κόστους κατασκευής με τις συνθήκες του γεωλογικού περιβάλλοντος και τις κατασκευαστικές μεθόδους.

Ο νέος αυτοκινητόδρομος Εγνατία διασχίζει από την Ηγουμενίτσα μέχρι τους Κήπους όλες τις γεωλογικές οικογένειες του βορειοελλαδικού χώρου. Η κατασκευή των σηράγγων σε δύσκολες γεωλογικές συνθήκες με σύνθετες και ασθενείς βραχώμαζες προσφέρει σημαντικό υλικό για την έρευνα της επίδρασης του γεωολογικού στη διαμόρφωση του τελικού κόστους.

Τα στοιχεία της βάσης συγκεντρώθηκαν από εκατόν σαράντα εννέα διαφορετικές διατομές τριάντα τριών διδύμων σηράγγων με συνολικό μήκος περίπου σαράντα έξι χιλιομέτρων, ανηγμένο σε μονό κλάδο. Οι εργασίες κατασκευής πραγματοποιήθηκαν από το 1998 έως το 2004. Η διατομή εκσκαφής έχει πλάτος έντεκα μέτρα και ύψος εννέα μέτρα περίπου και εξαρτάται από τις φάσεις εκσκαφής και τις επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες. Όλες οι σήραγγες διανοίχθηκαν με διάτρηση και ανατίναξη (drill and blast - DB) σύμφωνα με τη Νέα Αυστριακή Μέθοδο (New Austrian Tunneling Method - NATM), η οποία βασίζεται στην αρχή της ενεργοποίησης της αντοχής της περιβάλλουσας βραχώ-



Σχήμα 1: Μεθοδολογία προεκτίμησης ποσοτήτων εργασιών και τελικής δαπάνης σηράγγων  
Figure 1: Methodology for pre-estimation of work quantities and final cost of road tunnels

μαζας, όπως αυτή περιγράφεται αναλυτικά από τον Καββαδά [29].

Η οργάνωση της συγκέντρωσης των στοιχείων απαίτησε πολλές συναντήσεις με μελετητές και επιβλέποντες μηχανικούς στα κεντρικά και περιφερειακά γραφεία της Εγνατία Οδός Α.Ε. Καταστρώθηκε ερωτηματολόγιο για τη συλλογή των απολογιστικών στοιχείων των σηράγγων και προετοιμάστηκε πρότυπη απάντηση σε περιβάλλον Excel. Το ερωτηματολόγιο απεστάλη στους επιβλέποντες μηχανικούς των σηράγγων προκειμένου να συμπληρωθεί. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σειρά επισκέψεων στα κατά τόπους εργοτάξια και πιστοποιήθηκε η πληρότητα και ακρίβεια των συγκεντρωθέντων στοιχείων σε συνεργασία με τους επί τόπου μηχανικούς των αναδόχων κατασκευής και τους επιβλέποντες μηχανικούς της Εγνατία Οδός Α.Ε.

Η υλοποίηση της εφαρμογής έγινε στην πλατφόρμα της .NET της Microsoft με γλώσσα προγραμματισμού τη C#. Χρησιμοποιήθηκε βάση δεδομένων τύπου Microsoft Access. Τα στοιχεία ταξινομήθηκαν ως εξής:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και θέση σηράγγων με βάση τα στοιχεία της κατασκευής (χιλιομετρικές θέσεις εκσκαφής, μήκος σήραγγας, διατομές εκσκαφής, διάμετρος εκσκαφής, ύψος υπερκειμένων γαιών, υψόμετρο εδάφους, ερυθράς και στέψης).
- Σύντομη περιγραφή γεωλογικού προσομοιώματος.
- Δεδομένα σχετικά με τα υπόγεια νερά (στάθμη υδροφόρου ορίζοντα, μετρήσεις ροής εντός των σηράγγων).
- Κατηγορία βραχόμαζας σε φάση μελέτης και κατασκευής.
- Γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού (αντοχές βραχόμαζας, παραμορφώσεις, συντελεστές υπερφόρτισης).
- Κατηγορίες υποστήριξης προσωρινής και μόνιμης επένδυσης σε φάση μελέτης και κατασκευής (σύντομη περιγραφή βραχόμαζας, φάσεις, βήμα και τρόπος εκσκαφής, τύπος και ποσότητες προσωρινής και μόνιμης επένδυσης).
- Ρυθμός προχώρησης ανά κατηγορία υποστήριξης.
- Δαπάνη ανά κατηγορία προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης σε τιμές 2004.
- Δεδομένα εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών ανά χιλιομετρική θέση της σήραγγας.
- Δεδομένα γεωμηχανικής παρακολούθησης σηράγγων.

## 5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Οι μεταβλητές επιλέχθηκαν μετά από:

- Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για το χαρακτηρισμό της βραχόμαζας.
- Σειρά συναντήσεων με Καθηγητές Πανεπιστημίου, εμπειρογνώμονες, μελετητές και μηχανικούς επί τόπου του έργου, οι οποίοι υπέδειξαν εκείνες τις γεωτεχνικές παραμέτρους που κυρίως καθορίζουν τα μέτρα υποστήριξης μιας σήραγγας.

Κατά την ανάπτυξη των παραμετρικών μοντέλων προεκτίμησης και με βάση τη βιβλιογραφία του Bieniaswki [5], του Hoek [13], του Π. Μαρίνου [18] και της Κ. Πετρουσάτου [20] πραγματοποιήθηκε σειρά δοκιμών με σκοπό τον προσδιορισμό εκείνων των ανεξάρτητων μεταβλητών που (από μηχανικής αλλά και μαθηματικής πλευράς) θα έδιναν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Με βάση τον Hoek et al. [14, 15], η μελέτη της προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης των σηράγγων πραγματοποιείται με σειρά γραμμικών αναλύσεων (πεπερασμένων στοιχείων) της αλληλεπίδρασης της επένδυσης της σήραγγας και της περιβάλλουσας της βραχόμαζας, λαμβάνοντας πάντα υπόψη την ακολουθία εκσκαφής διάνοιξης της σήραγγας [14, 15]. Στα αρχικά στάδια μελέτης οι παράμετροι σχεδιασμού για τη βραχόμαζα εκτιμώνται με έμμεσο τρόπο, με βάση εμπειρικές συσχετίσεις με δείκτες ποιότητας της βραχόμαζας που προκύπτουν από τις μεθόδους ταξινόμησής της [18, 17]. Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας είναι:

- RMR (Rock Mass Rating),
- GSI (Geological Strength Index).

Ο δείκτης GSI φαίνεται να είναι πιο κατάλληλος για ασθενείς βραχόμαζες (GSI<45), όπου ανήκει το μεγαλύτερο ποσοστό των ελληνικών πετρωμάτων [29, 15].

Ο Sakurai [21] υποστήριξε ότι η παραμόρφωση της σήραγγας, ορισμένη ως το επί τοις εκατό ποσοστό του λόγου της σύγκλισης της σήραγγας προς τη διάμετρό της, μπορεί να δώσει αξιόπιστη ένδειξη της συμπεριφοράς της βραχόμαζας και να καθορίσει τα μέτρα υποστήριξης.

Ο Σπυρόπουλος [31] επισήμανε ότι η αστοχία του μετώπου εκσκαφής των σηράγγων επηρεάζεται από το ύψος των υπερκειμένων γαιών σε συνδυασμό με την ποιότητα της βραχόμαζας.

Το εμβαδόν εκσκαφής αντιπροσωπεύει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας.

Με βάση τα παραπάνω οι μεταβλητές χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες:

- Ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες προσδιορίζουν το γεωλογικό περιβάλλον της διανοιγόμενης διατομής:
  - ο γεωλογικός δείκτης αντοχής, GSI (Geological Strength Index),
  - ο παραμόρφωση % της διανοιγόμενης διατομής,  $\epsilon$ ,
  - ο ύψος των υπερκειμένων γαιών, H (σε m),
  - ο εμβαδόν εκσκαφής της διατομής, Area (σε m<sup>2</sup>).
- Εξαρτημένες μεταβλητές, οι οποίες είναι οι ποσότητες της προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης:
  - ο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προσωρινής υποστήριξης (m<sup>3</sup> / τρέχον μέτρο),
  - ο χαλύβδινα πλαίσια προσωρινής υποστήριξης (kg /τρέχον μέτρο),
  - ο αγκύρια προσωρινής υποστήριξης (m/τρέχον μέτρο),
  - ο σκυρόδεμα μόνιμης επένδυσης (m/τρέχον μέτρο),
  - ο χάλυβας μόνιμης επένδυσης (kg/τρέχον μέτρο).

## 6. ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Η Κ. Πετρουτσάτου [20] για την ανάλυση και εύρεση των μαθηματικών σχέσεων μεταξύ των γεωτεχνικών παραμέτρων και των μέτρων προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης και, στη συνέχεια, την εύρεση των μαθηματικών σχέσεων μεταξύ των ποσοτήτων αυτών και της τελικής δαπάνης κατασκευής σηράγγων, χρησιμοποίησε παλινδρόμηση 2-βημάτων (2-step multiple stepwise regression analysis). Κατά τον προσδιορισμό του μοντέλου προεκτίμησης της τελικής δαπάνης εκσκαφής και υποστήριξης σήραγγας (σε €, τιμές 2004 / τρέχον μέτρο σήραγγας) χρησιμοποιήθηκαν ως ανεξάρτητες μεταβλητές οι ποσότητες της προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης.

Προκειμένου να βελτιστοποιηθούν τα αποτελέσματα, έγιναν πειράματα με διάφορους μετασχηματισμούς των δεδομένων. Επίσης, το αρχικό δείγμα διαχωρίστηκε από μηχανική άποψη με βάση το μηχανισμό αστοχίας των διατομών των σηράγγων. Όταν χρησιμοποιήθηκε όλο το δείγμα στην αρχική μορφή των δεδομένων προέκυψαν υψηλοί δείκτες προσδιορισμού  $R^2$ .

Κατά το πρώτο βήμα της ανάλυσης, εξετάστηκαν πέντε ανεξάρτητες μεταβλητές, αλλά τελικά προσδιορίστηκε μικρότερος αριθμός ως σημαντικός για την ανάπτυξη του κάθε μοντέλου.

Κατά το δεύτερο βήμα της ανάλυσης, προσδιορίστηκαν ως σημαντικές για το μοντέλο προεκτίμησης της τελικής δαπάνης κατασκευής δύο από τις τέσσερις μεταβλητές (χάλυβας τελικής επένδυσης και χαλύβδινα πλαίσια προσωρινής επένδυσης).

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2. Κατά τη χρήση των μοντέλων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$GSI \leq 70, \varepsilon \geq 0,05\%, H \leq 240 m, E_{\mu\beta. \text{ Εκσκαφής}} \geq 110 m^2$$

Προκειμένου να εξεταστεί η ορθότητα και ακρίβεια των παραπάνω μοντέλων, από το σύνολο των εκατόν σαράντα εννέα διατομών επιλέχθηκε τυχαία υποσύνολο σαράντα διατομών και σε αυτό πραγματοποιήθηκαν, με ικανοποιητικά αποτελέσματα, ο έλεγχος  $t$  και ο έλεγχος του μέσου όρου των υπολοίπων μεταξύ των πραγματικών τιμών και των τιμών των μοντέλων πρόβλεψης [20].

Πίνακας 2: Αποτελέσματα ανάλυσης παλινδρόμησης  
Table 2: Regression analysis results

| Μοντέλο        | R    | R <sup>2</sup> | Προσαρμοσμένο R | F      | Σημαντικότητα (P-value) |
|----------------|------|----------------|-----------------|--------|-------------------------|
| Πλαίσια        | 0,78 | 0,61           | 0,60            | 51,85  | 0,000                   |
| Εκτ. Σκυρόδεμα | 0,76 | 0,57           | 0,56            | 44,93  | 0,000                   |
| Σκυρόδεμα      | 0,82 | 0,67           | 0,66            | 93,14  | 0,000                   |
| Χάλυβας        | 0,77 | 0,59           | 0,58            | 130,00 | 0,000                   |
| Δαπάνη         | 0,80 | 0,64           | 0,63            | 83,93  | 0,000                   |

Παρατήρηση: F- Στατιστικός δείκτης για τη σημαντικότητα του κάθε μοντέλου. Σύμφωνα με τους αποδεκτούς στατιστικούς νόμους: πολύ μεγάλη στατιστική σημαντικότητα ( $p < 0.001$ ).

## 7. ΜΟΝΤΕΛΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

### 7.1 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Αρκετές διεθνείς δημοσιεύσεις αναφέρονται στη χρήση NNs για την προεκτίμηση του κόστους κατασκευών.

Οι Creese και Li [7] το 1995 χρησιμοποίησαν NNs προκειμένου να εκτιμήσουν το κόστος κατασκευής ξύλινων γεφυρών. Χρησιμοποίησαν δεδομένα από εβδομήντα πέντε έργα και παρουσίασαν αποτελέσματα με MAPE 13.3%.

Οι Adeli et al. [1] εκτίμησαν το 1998 το κόστος αυτοκινητοδρόμων με χρήση NNs.

Οι Hegazy et al. [12] ανέπτυξαν το 1998 με NNs μοντέλο προκοστολόγησης έργων οδοποιίας. Χρησιμοποίησαν δεδομένα από δεκαοκτώ έργα, κατασκευασμένα στον Καναδά και παρουσίασαν αποτελέσματα με MAD 10,34%.

Οι Al-Tabtabai et al. [3] εκτίμησαν με NNs το 1999 την ποσοστιαία αύξηση του κόστους μεγάλων έργων υποδομής.

Οι Harding et al. [11] εξέτασαν με NNs το 1999 την επίπτωση των διαφόρων μεθόδων δημοπράτησης στο τελικό κόστος οικοδομικών έργων. Μείωσαν τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών χρησιμοποιώντας ανάλυση παραγόντων (Factor Analysis).

Οι Emsley et al. [9] ανέπτυξαν το 2002 μοντέλα NNs για την προεκτίμηση του κόστους οικοδομικών έργων. Χρησιμοποίησαν δεδομένα από τριακόσια έργα και παρουσίασαν αποτελέσματα με MAPE 16.6%.

Οι Ughu et al. [26] διερεύνησαν το 2004 τη δυνατότητα χρήσης NNs για την εκτίμηση του κόστους οδικών γεφυρών στο Χονγκ Κονγκ. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν γέφυρες από τριακόσια σαράντα ένα διαφορετικά έργα, οι οποίες κατασκευάστηκαν την περίοδο 1942-2001. Μετά από επεξεργασία των δεδομένων μείωσαν το δείγμα στις εβδομήντα τέσσερις γέφυρες και πέτυχαν προβλέψεις κόστους με MAPE 8,03%.

Οι Kim et al. [16] πρότειναν το 2005 τρόπους και αρχιτεκτονικές δικτύων που ενδείκνυνται για την προεκτίμηση του κόστους κατασκευής. Κατέληξαν ότι το καλύτερο μοντέλο για πρόβλεψη στα αρχικά στάδια κατασκευής είναι αυτό που χρησιμοποιεί ως αλγόριθμο εκμάθησης την οπισθοδιάδοση του λάθους (Back-propagation - BP) με χρήση γενετικών αλγορίθμων (Genetic Algorithms - GAs) για τη βελτιστοποίησή του.

Στις παραπάνω δημοσιεύσεις επισημαίνεται ότι:

- Τα NNs έχουν τη δυνατότητα εκμάθησης από τα δεδομένα που λαμβάνουν. Συνεπώς, ενδείκνυται η χρήση τους σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αρκετός «θόρυβος» (noise) γύρω από τις παραμέτρους που επηρεάζουν την τελική δαπάνη του έργου.
- Το γεγονός ότι ορισμένες παράμετροι επηρεάζουν το κόστος γραμμικά και άλλες όχι δημιουργεί δυσεπίλυτα προβλήματα. Τα μοντέλα NNs είναι μη παραμετρικά, έχουν την ικανότητα να συνδυάζουν πολλές παραμέτρους και να αναβαθμίζουν ή υποβαθμίζουν τη σημασία τους μέσω βαρών.
- Απαιτείται η καλύτερη δυνατή διαχείριση των ιστορικών δεδομένων από έργα παρόμοιας φύσης. Η ποιότητα των δεδομένων οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα προεκτίμησης.

## 7.2 Ανάπτυξη μοντέλων δαπάνης σιράγγων

Στην υπόψη εργασία αναπτύχθηκαν μοντέλα NNs για την προεκτίμηση των ποσοτήτων όλων των βασικών εργασιών της προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης, καθώς επίσης και για την προεκτίμηση της τελικής δαπάνης κατασκευής των σιράγγων. Για το κάθε δίκτυο μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές αρχιτεκτονικές και επιλέχθηκε αυτή που παρείχε τους καλύτερους δείκτες πρόβλεψης.

Η επιλογή των δεδομένων εισαγωγής αναπτύχθηκε εκτενώς στην ενότητα 5. Προστέθηκε η ανεξάρτητη μεταβλητή «Γεωλογία», η οποία απεικονίζει την κατηγοριοποίηση των οικογενειών των γεωλογικών σχηματισμών που συνάντησαν οι σιράγγες του δείγματος. Τα NNs παρέχουν τη δυνατότητα ανάλυσης παραμετρικών και μη παραμετρικών μεταβλητών, όπως είναι η προκειμένη.

Τα γεωυλικά ταξινομήθηκαν σε κατηγορίες βραχώμαζας με βάση τη μονοαξονική αντοχή άρρηκτου βράχου  $\sigma_{ci}$  (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Κατηγορίες Βραχώμαζας  
Table 3: Rockmass categories

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Γνεύσιος, Γρανίτες                 | 1 |
| Ασβεστόλιθοι                       | 2 |
| Μάρμαρα, Σχιστόλιθοι               | 3 |
| Ψαμμιτικός Φλύσχος                 | 4 |
| Ιλυολιθικός, Ψαμμιτικός Φλύσχος    | 5 |
| Ιλυολιθικός Φλύσχος                | 6 |
| Διατμημένοι Ιλυόλιθοι, Αργιλόλιθοι | 7 |
| Κερματισμένοι Ασβεστόλιθοι         | 8 |

Επιπρόσθετα, τα δεδομένα εισαγωγής μετασχηματίστηκαν στο διάστημα (0, 1) σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο επειδή αυτό οδήγησε σε καλύτερα αποτελέσματα μετά από αναλύσεις με την αρχική μορφή των δεδομένων του δείγματος.

$$\text{Μετασχηματισμένη τιμή} = \text{αρχική τιμή} / \text{μέγιστη τιμή}$$

Η ακρίβεια της πρόβλεψης που παρέχει ένα NN εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του. Για την κάθε εξαρτημένη μεταβλητή μελετήθηκαν τέσσερα διαφορετικά NN. Δοκιμάστηκαν δύο τύποι δικτύων:

- NN πρόσθιας τροφοδότησης πολλών επιπέδων (MLFN: multilayer feed-forward network), και
- NN γενικής παλινδρόμησης (GRNN: general regression neural network).

Κατά τη χρήση του δικτύου MLFN διάφορες παράμετροι και αρχιτεκτονικές δοκιμάστηκαν προκειμένου να επιλεγεί αυτή που θα έδινε τους καλύτερους δείκτες πρόβλεψης. Ο αριθμός των κρυμμένων επιπέδων ορίστηκε σε 1, όπως προτάθηκε από τον Hegazy et al. [12]. Στη συνέχεια, ο αριθμός των κρυμμένων κόμβων ορίστηκε σύμφωνα με τους παρακάτω τρεις κανόνες: (1)  $0.75 \times m$ ; (2)  $m$ ; (3)  $2 \times m + 1$ , όπου  $m$  είναι ο αριθμός των δεδομένων εισαγωγής. Συνεπώς, τα δίκτυα που εξετάστηκαν είχαν τις εξής αρχιτεκτονικές: 5-11-1, 5-5-1, 5-4-1. Μετά την εκπαίδευση των δικτύων, το καλύτερο μοντέλο επιλέχθηκε με κριτήρια τους δείκτες  $R^2$  και AEER, όπου [16]:

$$AEER = EER/n \quad n: \text{το πλήθος των στοιχείων}$$

$$EER = [(Πραγματική Τιμή - Προβλεφθείσα Τιμή) / (Πραγματική Τιμή)] \times 100$$

Τα προτεινόμενα μοντέλα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Προκειμένου να μην παραπλανούν τα αποτελέσματα, θα πρέπει να ισχύουν κατά τη χρήση των μοντέλων οι παρακάτω περιορισμοί:

$$GSI \leq 70, \varepsilon \leq 2, 26\%, H \leq 300 \text{ m}, E_{\text{μβ. Εκσκ.}} \leq 168 \text{ m}^2$$

Για τα αγκύρια βράχου και τις δοκούς προπορείας (forepolling) δεν κατέστη δυνατόν να αναπτυχθούν αξιόπιστα μοντέλα. Προέκυψαν πολύ μικροί  $R^2$ .

Πίνακας 4 : Προτεινόμενα μοντέλα  
Table 4: Proposed models

|                         | Πλαίσια |        |               | GRNN          |
|-------------------------|---------|--------|---------------|---------------|
|                         | MLFN    |        |               |               |
| <b>Κόμβοι</b>           | 5-11-1  | 5-5-1  | 5-4-1         | 5-105-1       |
| <b><math>R^2</math></b> | -0.90   | 0.51   | <b>0.54</b>   | <b>0.69</b>   |
| <b>AEER</b>             | -94.51  | -19.42 | <b>-15.51</b> | <b>-20.56</b> |

Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα

|                         | MLFN          |             |             | GRNN          |
|-------------------------|---------------|-------------|-------------|---------------|
|                         | <b>Κόμβοι</b> | 5-11-1      | 5-5-1       |               |
| <b><math>R^2</math></b> | 0.15          | <b>0.61</b> | <b>0.46</b> | <b>0.80</b>   |
| <b>AEER</b>             | -9.43         | <b>5.91</b> | <b>1.72</b> | <b>-22.80</b> |

Σκυρόδεμα

|                         | MLFN          |              |               | GRNN         |
|-------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
|                         | <b>Κόμβοι</b> | 5-11-1       | 5-5-1         |              |
| <b><math>R^2</math></b> | <b>0.88</b>   | <b>0.91</b>  | <b>0.92</b>   | <b>0.86</b>  |
| <b>AEER</b>             | <b>-4.44</b>  | <b>-8.26</b> | <b>-10.77</b> | <b>-6.82</b> |

Χάλυβας

|                      | MLFN         |        |        | GRNN         |
|----------------------|--------------|--------|--------|--------------|
| <b>Κόμβοι</b>        | 5-11-1       | 5-5-1  | 5-4-1  | 5-94-1       |
| <b>R<sup>2</sup></b> | <b>0.91</b>  | 0.72   | 0.30   | <b>0.89</b>  |
| <b>AEER</b>          | <b>-1.85</b> | -21.64 | -86.04 | <b>-4.07</b> |

Συνολική Δαπάνη

|                      | MLFN   |        |        | GRNN         |
|----------------------|--------|--------|--------|--------------|
| <b>Κόμβοι</b>        | 5-11-1 | 5-5-1  | 5-4-1  | 5-94-1       |
| <b>R<sup>2</sup></b> | -1.48  | -0.54  | -0.13  | <b>0.74</b>  |
| <b>AEER</b>          | -7.44  | -20.00 | -17.56 | <b>-3.35</b> |

Από τον Πίνακα 4 συμπεραίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός της προεκτίμησης της συνολικής δαπάνης, υπάρχουν περισσότερα του ενός μοντέλα (έντονη γραφή) που παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις ποσοτήτες εργασιών υποστήριξης με βάση τους συντελεστές R<sup>2</sup> (υψηλότερη τιμή) και AEER (χαμηλότερη απόλυτη τιμή). Για το λόγο αυτό έγιναν δοκιμές με σκοπό την αξιολόγησή τους από πλευράς ορθότητας και ακρίβειας (cross validation tests).

Επιλέχθηκε τυχαία δείγμα σαράντα διατομών από τον αρχικό πληθυσμό, το οποίο δεν είχε συμπεριληφθεί στις διαδικασίες εκπαίδευσης των πέντε δικτύων. Τα μοντέλα επαναξιολογήθηκαν ως προς την ορθότητα των προβλέψεων τους χρησιμοποιώντας το τυχαίο αυτό δείγμα ελέγχου αξιοπιστίας CVD (cross validation dataset) και το δείγμα ελέγχου κάθε δικτύου TD (test dataset) που αυτόματα δημιουργήθηκε από την εκπαίδευση του κάθε NN. Ο WEER που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγησή τους προκύπτει από την παρακάτω μαθηματική εξίσωση:

$$WEER = N_{CVD} / (N_{CVD} + N_{TD}) \times (EER_{ofCVD}) + (N_{TD} / (N_{CVD} + N_{TD})) \times (EER_{ofTD})$$

Όπου N<sub>CVD</sub> και N<sub>TD</sub> είναι ο αριθμός των διατομών στα CVD και TD αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Αξιολόγηση προτεινόμενων μοντέλων  
Table 5: Evaluation of proposed models

Πλαίσια

|               | MLFN   |       |       | GRNN        |
|---------------|--------|-------|-------|-------------|
| <b>Κόμβοι</b> | 5-11-1 | 5-5-1 | 5-4-1 | 5-105-1     |
| <b>WEER</b>   | -      | -     | 11.16 | <b>2.55</b> |

Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα

|               | MLFN   |        |       | GRNN         |
|---------------|--------|--------|-------|--------------|
| <b>Κόμβοι</b> | 5-11-1 | 5-5-1  | 5-4-1 | 5-105-1      |
| <b>WEER</b>   | -      | -10.95 | -4.19 | <b>-1.56</b> |

Σκυρόδεμα

|               | MLFN   |       |             | GRNN   |
|---------------|--------|-------|-------------|--------|
| <b>Κόμβοι</b> | 5-11-1 | 5-5-1 | 5-4-1       | 5-96-1 |
| <b>WEER</b>   | 11.76  | 5.64  | <b>5.53</b> | 6.87   |

Χάλυβας

|               | MLFN   |       |       | GRNN         |
|---------------|--------|-------|-------|--------------|
| <b>Κόμβοι</b> | 5-11-1 | 5-5-1 | 5-4-1 | 5-94-1       |
| <b>WEER</b>   | -11.35 | -     | -     | <b>-8.68</b> |

Συνολική Δαπάνη

|               | MLFN   |       |       | GRNN         |
|---------------|--------|-------|-------|--------------|
| <b>Κόμβοι</b> | 5-11-1 | 5-5-1 | 5-4-1 | 5-94-1       |
| <b>WEER</b>   | -      | -     | -     | <b>-2.25</b> |

Από τον Πίνακα 5 προκύπτει ότι το GRNN δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα (δείκτης WEER, χαμηλότερη απόλυτη τιμή) σε όλες τις περιπτώσεις (έντονη γραφή), εκτός του σκυροδέματος τελικής επένδυσης.

Πιθανή αιτία είναι ότι προκειμένου τα δίκτυα GRNNs να συσχετίσουν τα μη γραμμικά δεδομένα επεξεργάζονται κρυμμένους νευρώνες, όσες και οι περιπτώσεις. Τα GRNNs προσομοιάζουν περισσότερο σε καμπύλες προσαρμογής παρά σε εργαλεία πρόβλεψης, με αποτέλεσμα να αποδίδουν ικανοποιητικά μόνο στο εύρος των δεδομένων όπου έχουν εκπαιδευτεί.

## 8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗΣ

### 8.1 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Αρκετές διεθνείς δημοσιεύσεις αναφέρονται στη σύγκριση των δύο μεθόδων προεκτίμησης κόστους, NNs και MR.

Οι Garza et al. [8] χρησιμοποίησαν το 1995 NNs και MR για την προεκτίμηση του κόστους κατασκευής χαλύβδινων σωλήνων. Τα αποτελέσματα της MR παρουσίασαν πολύ μικρότερη ακρίβεια.

Οι Smith et al. [25] κατέληξαν στο συμπέρασμα το 1997 ότι τα NNs πλεονεκτούν όταν χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που τα δεδομένα δεν παρουσιάζουν γραμμικές εξαρτήσεις και δεν είναι σαφής η συσχέτισή τους με το κόστος κατασκευής.

Ο Williams [27] ανέπτυξε το 2002 μοντέλα προεκτίμησης του κόστους έργων πολιτικού μηχανικού με χρήση NNs και MR. Χρησιμοποίησε ως δεδομένα τις προσφορές στη φάση του διαγωνισμού σε τριακόσια δύο έργα που δημοπρατήθηκαν από τη Διεύθυνση Μεταφορών της πολιτείας του New Jersey μεταξύ 1989-1996. Η MR έδωσε καλύτερα αποτελέσματα από ό,τι τα NNs, ήτοι MAPE 7.39% και 7.55% αντίστοιχα.

Οι Setyawati et al. [22] χρησιμοποίησαν το 2002 NNs για την προεκτίμηση του κόστους οικοδομών με δεδομένα από σαράντα μία κατασκευές της περιόδου 1998-2001. Τα αποτελέσματα των NNs ήταν καλύτερα από εκείνα της MR. Εφάρμοσαν διάφορες αρχιτεκτονικές δικτύων και πρότειναν να χρησιμοποιείται για προεκτίμηση κόστους το ακόλουθο δίκτυο: ένα κρυμμένο επίπεδο – τέσσερις κρυμμένοι νευρώνες – ένα εξαγόμενο, ως συνάρτηση ενεργοποίησης η

συνάρτηση υπερβολικής εφαιπτομένης.

Οι ίδιοι συγγραφείς [23] το 2003 συνέκριναν τις δύο μεθόδους με μαθηματικά παραδείγματα, έχοντας ως σημείο αναφοράς τη δημοσίευση των Moselhi et al. [19]. Μέσω κατάλληλων μετασχηματισμών δεδομένων, επέτυχαν με NN 7.5% MAPE και με MR 9.2% MAPE.

Ο Williams [28] εκτίμησε το 2005 τις υπερβάσεις κόστους μεγάλων έργων υποδομής με NNs και MR. Χρησιμοποίησε ως δεδομένα τις χαμηλότερες προσφορές για χίλια διακόσια εξήντα έργα που κατασκευάστηκαν την περίοδο 1995-2000 στην πολιτεία του Τέξας. Το NN έδωσε καλύτερο MAPE 7.20%.

## 8.2 Σύγκριση μεθόδων προεκτίμησης δαπάνης σηράγγων

Προκειμένου να εξαχθούν συγκριτικά αποτελέσματα και να αξιολογηθούν τα διάφορα μοντέλα, από το σύνολο των εκατόν σαράντα εννέα διατομών της βάσης επιλέχθηκε τυχαία υποσύνολο σαράντα διατομών. Η ικανότητα πρόβλεψης των μοντέλων υπολογίστηκε με βάση το AEER.

Ο Πίνακας 6 συνοψίζει τα συγκριτικά αποτελέσματα των δύο μεθόδων, NNs και MR. Και στις δύο χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες ανεξάρτητες μεταβλητές, όπως αναλυτικά παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Πίνακας 6: Σύγκριση μεθόδων προεκτίμησης  
Table 6: Comparison of pre-estimation methods

|                        | AEER   |        | Προτιμώμενο μοντέλο |
|------------------------|--------|--------|---------------------|
|                        | NNs    | MR     |                     |
| Πλαίσια                | 11,60  | -6,47  | MR                  |
| Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα | 2,65   | -26,37 | NN                  |
| Σκυρόδεμα              | 16,74  | -10,59 | MR                  |
| Χάλυβας                | -21,05 | -18,19 | MR                  |
| Τελική Δαπάνη          | -4,65  | -9,40  | NN                  |

Για τα πλαίσια, το σκυρόδεμα και το χάλυβα της προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης των σηράγγων η MR με βάση τον AEER δίνει καλύτερες προβλέψεις από τα NNs. Στις περιπτώσεις αυτές, φαίνεται να επικρατεί μία γραμμική σχέση μεταξύ των εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών, περίπτωση που αντιμετωπίζεται καλύτερα από τη MR.

Αντίθετα, τα NNs δίνουν καλύτερα αποτελέσματα στις περιπτώσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και της τελικής δαπάνης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί, πρώτον, από το ότι και στις δύο περιπτώσεις τα στοιχεία είναι σύνθετα και έντονα άτακτα και, δεύτερον, από το ότι μεταξύ των εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών εμφανίζονται μη γραμμικές σχέσεις, περίπτωση που αντιμετωπίζουν καλύτερα τα NNs (ενότητα 7.1). Πρέπει να σημειωθεί ότι σε καμία περίπτωση τα μοντέλα δεν μπορούν να προβλέψουν μεγάλες και αδικαιολόγητες διακυμάνσεις που οφείλονται

σε άγνωστους παράγοντες.

Τα ανωτέρω επιβεβαιώνουν το κριτήριο του Bode [6] ότι στις περιπτώσεις προεκτίμησης του κόστους έργων η χρήση NNs ενδείκνυται όταν δεν είναι ευκρινής ο τρόπος που οι ανεξάρτητες μεταβλητές επιδρούν στο κόστος.

## 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκαν πρωτότυπα μοντέλα προεκτίμησης της δαπάνης κατασκευής οδικών σηράγγων με τη χρήση νευρωνικών δικτύων και συγκρίθηκαν με αντίστοιχα μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης.

Τα μοντέλα αφορούσαν στην προεκτίμηση των ποσοτήτων των βασικών εργασιών της προσωρινής και μόνιμης υποστήριξης καθώς και της τελικής δαπάνης. Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από σαράντα έξι χιλιόμετρα σηράγγων που κατασκευάστηκαν πρόσφατα στην Εγνατία Οδό. Για την κάθε εξαρτημένη μεταβλητή μελετήθηκαν έξι διαφορετικά NN. Δοκιμάστηκαν δύο τύποι: το MLFN και το GRNN. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των μοντέλων επαληθεύτηκε με τη χρήση ανεξάρτητων δειγμάτων.

Οι δύο μέθοδοι προεκτίμησης, NNs και MR, συγκρίθηκαν με βάση τα αποτελέσματά τους και κριτήριο το δείκτη AEER, χρησιμοποιώντας τυχαίο δείγμα διατομών από τα αρχικά δεδομένα. Με την εργασία αυτή επιβεβαιώνεται ότι τα NNs υπερτερούν σε περιπτώσεις μη-γραμμικών σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών και παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα.

Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην εργασία αυτή εκτιμάται ότι θα αποτελέσουν σημαντικό εργαλείο κατά το αρχικό στάδιο σχεδιασμού αυτοκινητοδρόμων και υπογείων έργων, δεδομένου ότι διευκολύνουν τη μελέτη εναλλακτικών λύσεων και τη λήψη αποφάσεων από τον ΚτΕ.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adeli H. and Wu M. **Regularization Neural Network for Construction Cost Estimation**, Journal of Construction Management and Economics, ASCE, 1998, Vol. 124, No. 1, pp. 18-24.
- Akintoye A., Fitzgerald E. **A survey of current estimating practices**, Construction Management and Economics, 2000, Vol. 18, pp. 161-172.
- AL-Tabtabai H., Alex P. Alex, and Maha Tantash. **Preliminary Cost Estimation of Highway Construction Using Neural Networks**, Cost Engineering Journal, 1999, Vol. 41, No. 3, pp. 19-24.
- Amstad Ch., A. Schneider, J. Kolberg, P. Egger, R. Gaerber, **Tunnelling Switzerland 2001**, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- Bieniawski Z. T. **Engineering Rock-Mass Classification**, 1989, Wiley, N. Y.
- Bode J. **Neural Networks for Cost Estimation**, Cost Engineering, 1998, Vol. 40, No. 1, pp. 25-30.
- Creese R. C. and Li Li. **Cost Estimation of Timber Bridges Using Neural Networks**, Cost Engineering, 1995, Vol. 37, No. 5, pp. 17-22.



8. De la Garza J., K. G. Rouhana. **Neural Networks Versus Parameter – Based Applications in Cost Estimating**, Journal of Cost Engineering, 1995, Vol. 37, No. 2, pp. 14-18.
9. Emsley M. W., Lowe D. J., Duff A. R., Harding A. and Hickson A. **Data Modelling and the Application of a Neural Network Approach to the Prediction of Total Construction Costs**, Construction Management and Economics, 2002, Vol. 20, pp. 465-472.
10. Goh Bee-Hua. **Residential Construction Demand Forecasting Using Economic Indicators: a Comparative Study of Artificial Neural Networks and Multiple Regression**, Construction Management and Economics, 1996, Vol. 14, pp. 25-34.
11. Harding A., Lowe D., Hickson A., Emsley M. and Duff R. **Implementation of a Neural Network Model for the Comparison of the Cost of Different Procurement Approaches**, Proceedings of Conference, Association of Researchers in Construction Management, 1999, Vol. 2, pp. 763-772.
12. Hegazy Tarek, Ayed Amr. **Neural Network Model for Parametric Cost Estimation of Highway Projects**, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 1998, Vol. 124, No. 3, pp. 210-218.
13. Hoek E. **Big Tunnels in bad rock**, ASCE 2000 Terzaghi Lecture, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2001, Vol. 127, Issue 9, pp. 726-740.
14. Hoek E., Kaiser K. P., and Bawden F. W. **Support of underground excavations in hard rock**, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, 1995.
15. Hoek E., Marinos P., and Benissi M. **Applicability of the Geological Strength Index (GSI) in the classification of very weak and sheered rock masses**, Bulletin of the International Association of Engineering, Geology and Environment, 1998, Vol. 57, pp. 151-160.
16. Kim G. H., Seo, D.S. and Kang K. I. **Hybrid Models of Neural Networks and Genetic Algorithms for Predicting Preliminary Cost Estimates**, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 2005, Vol. 19, No. 2, pp. 208-211.
17. Marinos P., Marinos V., Hoek E. **The geological strength index: applications and limitations**, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, Vol. 64 (1), pp. 55-65.
18. Marinos Paul, Evert Hoek. **Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch**, Bulletin of the International Association of Engineering, Geology and Environment, 2001, Vol. 60, pp. 85-92.
19. Moselhi Dr. Osama PE and Ines Siqueira. **Neural Networks for Cost Estimating of Structural Steel Buildings**, 1998, AACE International Transactions IT/IM.06, IT/IM.06.1-06.4.
20. Petroutsatou C., Lambropoulos S., Pantouvakis J-P. **Road Tunnel Early Cost Estimates Using Multiple Regression Analysis**, Operational Research. An International Journal, 2006, Vol. 6, No. 3, pp. 411-422.
21. Sakurai S. **Displacement measurements associated with the design of underground openings**, Proc. International Symposium Field Measurements in Geomechanics, 1983, Zurich 2, pp. 1163-1178.
22. Setyawati Bina R., Sidharta Sahirman and Creese Robert C. PE CCE. **Neural Networks for Cost Estimation**, 2002, AACE International Transactions EST. 13, EST.13.1-13.9.
23. Setyawati Bina R., Creese Robert C. PE CCE, and Sidharta Sahirman. **Neural Networks for Cost Estimation. (Part 2)**, 2003, AACE International Transactions EST. 14, EST.14.1-14.10.
24. Sinfield J. V., Einstein H. H. **Tunnel construction costs for tube transportation systems**, Journal of Construction Engineering and Management, 1988, Vol. Jan/Feb.
25. Smith A., E., Mason, A., K. **Cost Estimation Predictive Modelling: Regression Versus Neural Network**, Engineering Economist 1997, 42 (2): 137-161.
26. Ughu O. O. and Kumaraswamy M. M. **Neural Network Based Decision Support for Estimating Cost of Highway Bridges – A Hong Kong Study**, Proceedings of the international construction research conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors, 2004, Leeds Metropolitan University.
27. Williams T. P. **Predicting Completed Project Cost Using Bidding Data**, Construction Management and Economics, 2002, Vol. 20, pp. 225-235.
28. Williams T.P. **Bidding Ratios to Predict Highway Project Costs**, Engineering, Construction and Architectural Management, Vol. 12, No. 1, 2005, pp. 38-51.
29. Καββαδάς Μ., Αναπλ. Καθηγητής, Ε.Μ.Π. Σημειώσεις Μεταπτυχιακού μαθήματος «Σχεδιασμός Υπόγειων Έργων» του προγράμματος «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ», 1999.
30. Μαραβάς Α., Κωνσταντινίδης Δ. **Χρόνος – Κόστος και Ποιότητα έργων στην Εγνατία Οδό**, 2003, 3<sup>ο</sup> Συνέδριο του Ινστιτούτου Διαχείρισης Τεχνικών Έργων, Μάιος, Αθήνα.
31. Σπυρόπουλος Γ. **Τρισδιάστατη ανάλυση της αστάθειας του μετώπου εκσκαφής σηράγγων**, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της εργασίας αυτής δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την παροχή των απαιτούμενων στοιχείων από την “Εγνατία Οδός Α.Ε.” και την υποστήριξη των αρμόδιων στελεχών της και των επιβλεπόντων μηχανικών.

---

### Πετρουσάτου Κλεοπάτρα,

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Μ.Β.Α., Υποψήφια Διδάκτορας Ε.Μ.Π., Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Προγραμματισμού και Διαχείρισης Τεχνικών Έργων, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου, Αθήνα 157 80, kpetrou@tee.gr.

### Λαμπρόπουλος Σέργιος,

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π., Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Προγραμματισμού και Διαχείρισης Τεχνικών Έργων, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου, Αθήνα 157 80, laser@central.ntua.gr.

Extended summary

# Pre-estimation of Road Tunnel Construction Cost

PETROUTSATOU KLEOPATRA

Civil Engineer

SERGIOS LAMBROPOULOS

Assistant Professor N.T.U.A.

## Abstract

*The high construction budgets and frequent cost overruns of road tunnels have created the need for reliable early cost estimation. Unfortunately, the lack of sufficient reliable and accessible databases has prevented the development of international research into this matter. This paper presents models for the pre-estimation of road tunnel construction cost that use neural networks and multiple regression analysis. A database was created based on 46 km of road tunnels constructed on the Egnatia Odos motorway in northern Greece. The models were validated using independent samples and compared in terms of accuracy. Finally, the suitability of neural networks and multiple regression methods for cost estimation purposes are discussed.*

## 1. INTRODUCTION

Social and financial needs for the safe and rapid transportation of people and goods require the construction of secure, high speed highways. The need to overcome difficult geological terrain and to bypass urban conurbations, archeological sites and environmentally sensitive regions necessitates the construction of bridges and tunnels.

In the preliminary design phase of the projects, the selection of the best alternative solution presupposes reliable early estimates of construction cost. This is particularly true in the case of tunnels, where underground risks are involved.

However, research in this domain internationally is rare, mainly because large, reliable and homogeneous databases are lacking. The data to be statistically analyzed must be derived from different tunnels that were excavated in a variety of geological environments, were designed with the same parameters, were constructed according to the same practices and were tendered with similar pricing systems. This difficulty, coupled with the reluctance of public clients to supply financially sensitive data, has not allowed research to develop.

In the Greek literature there are no papers referring to early cost estimates of road tunnels; in the international literature there is only one. Sinfield and Einstein [24] tried to forecast the cost of micro tunnels (of a diameter < 5m) to be used for the transportation of goods through overcrowded city centres. Their research was mainly focused on the diameter of the

*Submitted: Apr. 2, 2007 Accepted: July 1, 2007*

tunnel; the soil parameters, the excavation method and the primary and permanent support were omitted from the study. Also, their sample was too small to provide reliable results.

The new motorway Egnatia Odos crosses almost all the geological families of northern Greece. An extensive database was developed, where detailed information regarding 49 km of constructed tunnels was gathered. This enabled the development of pre-estimation models using neural networks (NNs) and multiple regression (MR) methods.

## 2. METHOD SELECTION

The widely used methods for early cost estimates are NNs, MR, and analytical estimation. Bode [6] published the criteria for their proper selection (Table 1).

The ability of NNs to learn from the data that are presented makes them especially appropriate. Their basic drawback is that the selection of the right network architecture is essential; this might be very time-consuming and tedious work.

According to Akintoye et al. [2] MR is often used in order to develop cost estimating relationships in the construction industry. However, in many cases the fluctuations of construction costs cannot be depicted by mathematical equations, particularly where the data do not present linearity.

Analytical methods can be used only in the final design phase, where the project characteristics are determined in detail. Thus, they are not examined in this research.

Since both NNs and MR have been used with success, it was decided to apply both in the specific case of tunnel cost estimation. This enabled the comparison of results, advantages and drawbacks. The proposed methodology is depicted in Figure 1.

## 3. DEVELOPMENT OF THE DATABASE

A database was created using information collected from 149 (N=149) different tunnel sections in 33 Egnatia twin



The MR models produced better results for the steel sets, the concrete and the steel of the permanent support. This is probably explained by the fact that the main independent variable, the excavation area, is related linearly with the permanent support concrete and steel.

The NNs models produced better results in the cases of the shotcrete of the temporary support and the total construction cost. In both cases, this is probably explained by the fact that the data are complex and irregular and that no linear relationships appear among the dependent and independent variables.

The above confirm Bode's findings [6] that the NNs prevail when the dependent and independent variables are not clearly correlated.

## 8. CONCLUSIONS

In this paper, NNs models were developed for the pre-

estimation of the work quantities and the total construction cost of road tunnels; their results were compared with those of MR models. The data was collected from 46 km of road tunnels constructed recently across the Egnatia motorway.

For every dependent variable six different NNs were tested. Two types of networks were applied: MLFN and GRNN. The validity of the results was verified using independent samples.

The two methods, NNs and MR, were compared according to AEER; a random sample from the initial data was selected for this purpose. It was confirmed that the NNs give better results when no linear relationships exist between the independent and dependent variables.

The developed NNs models constitute an important decision making tool for the Client because they substantially improve the accuracy of cost prediction for the various alternatives in the initial design phase of roads and tunnels.

---

### **Petroutsatou Kleopatra,**

Civil Engineer, BSc., MSc., M.B.A., PhD Candidate, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Department of Construction Engineering and Management, 9, Iroon Polytechniou Street, 157 70, Athens, Greece, kpetrou@tee.gr.

### **Lambropoulos Sergios,**

Assistant Professor, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Department of Construction Engineering and Management, 9, Iroon Polytechniou Street, 157 70, Athens, Greece, laser@central.ntua.gr.