



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΠΡΟΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ
(ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ)**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΝΙΚΟΛΑΟΥ Π. ΦΡΑΓΚΑΚΗ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Σ. ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2012



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΠΡΟΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ
(ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ)**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΝΙΚΟΛΑΟΥ Π. ΦΡΑΓΚΑΚΗ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

1. Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
2. Σ. ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
(Επιβλέπων)
3. Π. ΠΑΝΤΟΥΒΑΚΗΣ, Αν. Καθ. ΕΜΠ

**ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

1. Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
2. Γ. ΚΑΛΦΑΚΑΚΟΥ, Καθ. Α.Π.Θ.
3. Γ. ΚΑΝΕΛΛΑΪΔΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Σ. ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
(Επιβλέπων)
5. Π. ΠΑΝΤΟΥΒΑΚΗΣ, Αν. Καθ. ΕΜΠ
6. Γ. ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Α. ΧΑΣΙΑΚΟΣ, Αν. Καθ. Παν. Πατρών

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2012

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)

Αφιερωμένο στην οικογένειά μου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εποχή μας χαρακτηρίζεται από την έντονη οικονομική κρίση η οποία έχει επιδράσει σημαντικά και στην ανάπτυξη της Ελλάδας τα τελευταία δυο χρόνια. Η κρίση εκδηλώθηκε την περίοδο ραγδαίας ανάπτυξης των μεταφορικών υποδομών, τόσο σε εθνικό, όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο, ιδιαίτερα με τον σχεδιασμό και κατασκευή αυτοκινητόδρομων υψηλής ταχύτητας και ασφάλειας.

Η ανάγκη για περιβαλλοντικά φιλικό σχεδιασμό αυτοκινητοδρόμων που υπερνικούν δύσκολα γεωλογικά υπόβαθρα και παρακάμπτουν κέντρα πόλεων, αστικούς πολεοδομικούς ιστούς, αρχαιολογικές περιοχές και προστατευόμενους ευαίσθητους βιοτόπους έχει αυξήσει σημαντικά την κατασκευή οδικών γεφυρών τα τελευταία χρόνια. Η κατασκευή γεφυρών, όμως, αποτελεί σύνηθες θύμα υπερβάσεων προϋπολογισμού δαπάνης. Για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, είναι κρίσιμο οι λήπτες των αποφάσεων να διαθέτουν αξιόπιστη προεκτίμηση της τελικής δαπάνης βασισμένη στην προηγούμενη κατασκευαστική εμπειρία.

Η παραπάνω ανάγκη καθίσταται περισσότερο επιτακτική σήμερα λόγω της οικονομικής κρίσης. Τα διαθέσιμα κεφάλαια του κράτους για επενδυτικά σχέδια μειώνονται, ενώ η αποδέσμευση ευρωπαϊκών κονδυλίων προαπαιτεί την καταβολή της εθνικής συμμετοχής. Παράλληλα, τα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα εμφανίζονται επιφυλακτικά στη χρηματοδότηση επενδυτικών σχεδίων μεταφορικών υποδομών, λόγω της μειωμένης ρευστότητας που αντιμετωπίζουν σε συνδυασμό με την επιδείνωση των παραγόντων που καθορίζουν τη ζήτηση των μεταφορών (π.χ. ραγδαία άνοδος της τιμής της βενζίνης που μειώνει τις μετακινήσεις με αυτοκίνητο και τα έσοδα των επενδυτών από καταβαλλόμενα διόδια στους αυτοκινητόδρομους). Η επιδείνωση λόγω της οικονομικής κρίσης εντείνεται και επιδρά στο εκτιμώμενο χρονικό διάστημα απόσβεσης των επενδύσεων. Ως εκ τούτου, είναι πλέον σήμερα αναγκαία η εκτίμηση της δαπάνης κατασκευαστικών έργων υψηλού κόστους, όπως των οδικών γεφυρών, με υψηλή ακρίβεια, ώστε τα κρατικά κεφάλαια να επενδύονται με μικρότερο κίνδυνο και τα έργα να σχεδιάζονται με τη μεγαλύτερη δυνατή αποδοτικότητα.

Μου δημιουργεί αίσθημα ικανοποίησης το ότι, στο πλαίσιο της θεωρητικής έρευνας και παράλληλα με την επίτευξη του σημαντικού προσωπικού μου στόχου, δημιουργήθηκε ένα διαχειριστικό εργαλείο που μπορεί να φανεί χρήσιμο στη χώρα στους δύσκολους καιρούς που βιώνει .

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Σ. Λαμπρόπουλο, στον οποίο χρωστώ πάρα πολλά, αφενός γιατί συνέβαλε στην

καλλιέργεια ενός δομημένου τρόπου σκέψης, πειραματισμού και εξαγωγής συμπερασμάτων στο γνωστικό αντικείμενο και αφετέρου γιατί με κατεύθυνε στην επιλογή των μεταπτυχιακών σπουδών που ακολούθησα στο εξωτερικό, οι οποίες έχουν καθορίσει τη μέχρι σήμερα επαγγελματική μου σταδιοδρομία. Παράλληλα μου παρείχε υποστήριξη, βοήθεια και συμβουλές καθόλη τη διάρκεια της μέχρι τώρα συνεργασίας μας από το 1998, αλλά ιδιαίτερα στις κρίσιμες φάσεις της εκπόνησης της εργασίας μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τα άλλα δύο μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Π. Παντουβάκη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Μ. Καββαδά για τη βοήθεια που μου παρείχαν οσάκις ζήτησα τη συνεργασία τους.

Ευχαριστώ ακόμη τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Γ. Τσιαμπάο για την πολύτιμη συνεισφορά του στην ανάπτυξη της κατηγοριοποίησης των εδαφών που προτείνεται στην παρούσα έρευνα, αλλά και για τη συμπαράσταση και τις επισημάνσεις του σε βασική δημοσίευσή μας. Η προσπάθειά του να με βοηθήσει κάθε φορά που ζήτησα τη συνεργασία του ήταν πραγματικά μεγάλη.

Ευχαριστώ τον Δρ. Μαρίνο Σκέμπα, Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π., για τη βοήθεια που παρείχε στην κατάταξη του τύπου εδάφους των γεφυρών της βάσης δεδομένων, καθώς και τον Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π. κ. Ι. Παπαδημητρίου για την επικοινωνιακή συνεργασία μας στην ανάπτυξη της βάσης δεδομένων και της εφαρμογής εκτίμησης της δαπάνης γεφυρών.

Η εκπόνηση της παρούσας εργασίας 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 των έργων γεφυροποιίας.

Τέλος, οφείλω να δηλώσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου που όλα αυτά τα χρόνια μου παρείχε κάθε υποστήριξη, μου συμπαραστάθηκε τόσο υλικά, όσο και ψυχολογικά, αλλά και ανέχθηκε τον περιορισμένο διαθέσιμο χρόνο που αφιέρωνα σε αυτή.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο εργαστήριο Δομικών Μηχανών και Διαχείρισης Τεχνικών Έργων του Τομέα Προγραμματισμού και Διαχείρισης Τεχνικών Έργων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών.

Αθήνα, 2012

Νικόλαος Π. Φραγκάκης

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	- 1 -
1.1	Εισαγωγή	- 1 -
1.2	Υπερβάσεις προϋπολογισμού δαπάνης τεχνικών έργων	- 2 -
1.3	Στόχος και σημασία παρούσας έρευνας	- 4 -
1.4	Προεκτίμηση δαπάνης και κοστολόγηση τεχνικών έργων	- 6 -
1.5	Επιλογή μεθόδου εκτίμησης δαπάνης	- 11 -
1.6	Δομή της εργασίας	- 12 -
2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ.....	- 16 -
2.1	Κύρια μέρη γεφυρών	- 16 -
2.2	Θεμελιώσεις γεφυρών.....	- 17 -
2.2.1	Σύντομη αναφορά στις θεμελιώσεις τεχνικών έργων	- 17 -
2.2.2	Επιφανειακή θεμελίωση - πέδιλα (spread foundation).....	- 19 -
2.2.3	Φρέατα (sockets – shafts).....	- 20 -
2.2.4	Θεμελιώσεις με πασσάλους (piles).....	- 23 -
2.3	Μεσόβαθρα γεφυρών.....	- 25 -
2.3.1	Μέθοδος ολισθαίνοντος ξυλοτύπου (sliding formwork)	- 27 -
2.3.2	Μέθοδος αναρριχόμενου ξυλοτύπου (climbing formwork).....	- 29 -
2.3.3	Σύγκριση μεθόδων ολισθαίνοντος και αναρριχόμενου ξυλοτύπου.....	- 30 -
2.4	Ακρόβαθρα γεφυρών	- 30 -
2.4.1	Γενικά στοιχεία	- 30 -
2.4.2	Πρόσθετοι παράγοντες σχεδιασμού	- 33 -
2.4.3	Κατασκευή ακροβάθρων	- 33 -

2.5	Ανωδομή γεφυρών	- 34 -
2.5.1	Μονοκύψελο κιβώτιο με επιτόπια σκυροδέτηση	- 37 -
2.5.2	Προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκοί και πλάκα συνέχειας	- 39 -
2.5.3	Μονοκύψελο κιβώτιο με προβολοδόμηση.....	- 42 -
3	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΑΠΑΝΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ.....	- 48 -
3.1	Προηγούμενες σχετικές μελέτες και έρευνες κόστους με θεωρητικά στοιχεία....	- 48 -
3.1.1	Έμπειρα συστήματα σχεδιασμού (expert systems)	- 48 -
3.1.2	Έρευνες βελτιστοποίησης	- 49 -
3.2	Προηγούμενες σχετικές μελέτες και έρευνες κόστους με πραγματικά στοιχεία .-	- 52 -
3.2.1	Έρευνα κόστους κατά Menn	- 52 -
3.2.2	Έλεγχος σχέσεων Menn	- 58 -
3.2.3	Στοιχεία δαπάνης γεφυρών από Υπηρεσίες Μεταφορών των Η.Π.Α.	- 60 -
3.2.4	Έρευνα δαπάνης οδικών γεφυρών Ελλάδας με πραγματικά στοιχεία	- 61 -
3.3	Συμπεράσματα.....	- 64 -
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ	- 66 -
4.1	Γραμμική Παλινδρόμηση	- 67 -
4.1.1	Σύντομη παρουσίαση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης	- 67 -
4.1.2	Παραδοχές γραμμικής παλινδρόμησης	- 69 -
4.1.3	Στατιστικά στοιχεία παλινδρόμησης	- 69 -
4.1.4	Προβληματισμοί στη χρήση της ανάλυσης παλινδρόμησης.....	- 71 -
4.2	Ειδικά θέματα παλινδρόμησης.....	- 71 -
4.2.1	Πολυσυγγραμμικότητα.....	- 71 -
4.2.2	Ετεροσκεδαστικότητα	- 74 -
4.3	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα παλινδρόμησης.....	- 78 -

4.4	Μέθοδοι επιλογής καλύτερης εξίσωσης παλινδρόμησης.....	- 79 -
4.5	Η εφαρμογή της μεθόδου Bootstrap στην ανάλυση παλινδρόμησης	- 82 -
5	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ.....	- 84 -
5.1	Σύντομη αναφορά στις βάσεις δεδομένων.....	- 84 -
5.1.1	Γενικά στοιχεία βάσεων δεδομένων.....	- 84 -
5.1.2	Εννοιολογικός σχεδιασμός βάσεων δεδομένων.....	- 86 -
5.2	Συλλογή πληροφοριών.....	- 86 -
5.3	Γέφυρες Εγνατίας Οδού.....	- 87 -
5.4	Ανάπτυξη βάσης δεδομένων οδικών γεφυρών (ΒΔΟΓ).....	- 89 -
5.4.1	Δομή ΒΔΟΓ.....	- 89 -
5.4.2	Συσχετίσεις ΒΔΟΓ.....	- 94 -
5.5	Εισαγωγή δεδομένων.....	- 95 -
5.5.1	Φόρμες εισαγωγής δεδομένων.....	- 95 -
5.5.2	Βιβλιοθήκες στοιχείων.....	- 97 -
5.6	Έλεγχος ορθότητας δεδομένων.....	- 98 -
5.7	Εξαγόμενες αναφορές της ΒΔΟΓ.....	- 101 -
5.7.1	Γενικές αναφορές.....	- 101 -
5.7.2	Αναφορές επιμέρους τμημάτων της γέφυρας.....	- 102 -
5.7.3	Αναφορές καταναλώσεων οπλισμού.....	- 107 -
6	ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΑΠΑΝΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΜΕΣΟΒΑΘΡΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ	- 110 -
6.1	Γεωλογία της Εγνατίας Οδού.....	- 111 -
6.2	Προτεινόμενη κατάταξη εδαφών.....	- 111 -
6.3	Επιλογή τύπου θεμελίωσης.....	- 116 -

6.4	Προτεινόμενο μοντέλο εκτίμησης δαπάνης	- 118 -
6.5	Στατιστική ανάλυση.....	- 121 -
6.6	Ποσότητες εργασιών φρεάτων	- 123 -
6.7	Ποσότητες εργασιών πασσάλων	- 124 -
6.8	Ποσότητες εργασιών επιφανειακών θεμελιώσεων	- 126 -
6.9	Έλεγχος των υποθέσεων της γραμμικής παλινδρόμησης.....	- 127 -
6.10	Παραμετρικά εύρη των συντελεστών παλινδρόμησης.....	- 129 -
6.11	Συμπεράσματα.....	- 131 -
7	ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΑΠΑΝΗΣ ΜΕΣΟΒΑΘΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΩΔΟΜΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ	- 132 -
7.1	Προτεινόμενη μέθοδος για προκαταρκτικές εκτιμήσεις δαπάνης	- 132 -
7.2	Ανάπτυξη μοντέλων ανωδομής.....	- 133 -
7.2.1	Στατιστική ανάλυση	- 133 -
7.2.2	Έλεγχος υποθέσεων γραμμικής παλινδρόμησης	- 137 -
7.2.3	Επικύρωση των μοντέλων.....	- 138 -
7.2.4	Παραμετρικά εύρη συντελεστών παλινδρόμησης.....	- 140 -
7.3	Ανάπτυξη μοντέλων μεσοβάθρων	- 141 -
7.3.1	Στατιστική ανάλυση	- 141 -
7.3.2	Έλεγχος υποθέσεων γραμμικής παλινδρόμησης	- 144 -
7.3.3	Παραμετρικά εύρη συντελεστών παλινδρόμησης.....	- 144 -
7.4	Μέθοδος bootstrap για εύρη εκτιμήσεων δαπάνης ανωδομής.....	- 145 -
7.4.1	Εύρος εκτιμήσεων για παράδειγμα έργου (case project).....	- 145 -
8	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΑΠΑΝΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ	- 148 -
8.1	Θεωρητικό υπόβαθρο	- 148 -

8.2	Χαρακτηριστικά – απαιτήσεις συστήματος	- 149 -
8.3	Εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού	- 149 -
8.4	Εισαγωγή δεδομένων	- 149 -
8.5	Αποτελέσματα	- 150 -
8.6	Παραδείγματα εφαρμογής	- 151 -
8.6.1	Γέφυρα με προκατασκευασμένες δοκούς και πλάκα συνεχείας	- 151 -
8.6.2	Γέφυρα με προβολοδόμηση	- 158 -
8.6.3	Σύγκριση εναλλακτικών λύσεων	- 162 -
8.7	Συμπεράσματα	- 162 -
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	- 163 -
9.1	Σύνοψη συμπερασμάτων προηγούμενων κεφαλαίων	- 163 -
9.2	Σπουδαιότητα και συμβολή της παρούσας έρευνας στην επιστήμη	- 169 -
9.3	Προτάσεις περαιτέρω έρευνας	- 171 -
	Παράρτημα I: Απόσπασμα βάσης δεδομένων θεμελιώσεων γεφυρών	- 172 -
	Παράρτημα II: Δείγμα βάσης δεδομένων γεφυρών	- 173 -
	Παράρτημα III: Αρχείο αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών πρώτου παραδείγματος έργου	- 174 -
	Παράρτημα IV: Σχέδια	- 179 -
	ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ	- 180 -
	Συνοπτικό βιογραφικό σημείωμα	- 189 -

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα δυσχέρεια χρηματοδότησης των οδικών έργων, τόσο από δημόσιους όσο και από ιδιωτικούς πόρους, καθιστά αναγκαία την εμπειριστατωμένη Ανάλυση Κόστους / Ωφελειών κάθε προγραμματιζόμενου έργου. Η κατασκευή γεφυρών απορροφά αξιόλογο ποσοστό των επενδύσεων σε οδικές υποδομές. Παράλληλα, παρουσιάζει διαχρονικά σημαντικές υπερβάσεις του προϋπολογισμού δαπάνης υλοποίησης. Κατά συνέπεια είναι εξαιρετικά σημαντικό να επιτευχθεί αξιόπιστη εκτίμηση της δαπάνης κατά το προκαταρκτικό στάδιο του έργου, κατά το οποίο μόνο οι βασικές προδιαγραφές και αρχικές τεχνικές λύσεις είναι γνωστές.

Μέχρι σήμερα έχουν δημοσιευθεί ελάχιστες σχετικές εργασίες για οδικές γέφυρες. Οι εργασίες αυτές βασίζονται στις περισσότερες περιπτώσεις σε θεωρητικές επιλύσεις μαθηματικών αλγορίθμων με βάση κανόνες σχεδιασμού γεφυρών και όχι σε πραγματικά στοιχεία από κατασκευασμένα έργα και δεν καλύπτουν όλα τα τμήματα του έργου, από τη θεμελίωση έως την ανωδομή. Παράλληλα, εντοπίζεται έλλειψη διαθέσιμων βάσεων δεδομένων οδικών γεφυρών με πραγματικά στοιχεία κατασκευής και δαπάνης.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έρχεται να καλύψει την ανάγκη επιστημονικής έρευνας για τη δημιουργία ολοκληρωμένου συστήματος προεκτίμησης της δαπάνης κατασκευής οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα που θα στηρίζεται σε αντίστοιχη βάση δεδομένων με πραγματικά στοιχεία και δαπάνες κατασκευής.

Ως πρώτη προσέγγιση της προεκτίμησης της δαπάνης οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα, συλλέχθηκαν πραγματικά στοιχεία δαπάνης από 111 οδικές γέφυρες της Εγνατίας Οδού. Η επεξεργασία των στοιχείων οδήγησε σε εκτιμήσεις της μέσης δαπάνης κατασκευής γεφυρών ανά μονάδα επιφάνειας καταστρώματος για τρεις μεθόδους κατασκευής γεφυρών. Κατέστη σαφές ότι η επίτευξη αυξημένης ακρίβειας κατά την προεκτίμηση της δαπάνης κατασκευής γέφυρας προϋποθέτει την προεκτίμηση της δαπάνης των επιμέρους τριών βασικών συστατικών της (θεμελίωση, βάθρα, φορέας) με βάση ανεξάρτητα στατιστικά μοντέλα.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε εκτεταμένη βάση δεδομένων οδικών γεφυρών στην οποία καταγράφηκαν αναλυτικά στοιχεία ποσοτήτων εργασιών και δαπάνης. Αναπτύχθηκε ειδική εφαρμογή με ξεχωριστές διαδικασίες εισαγωγής δεδομένων, διεξαγωγής αναζητήσεων και παρουσίασης των αποτελεσμάτων με αναφορές. Στο σχετικό κεφάλαιο της διατριβής δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις γέφυρες της Εγνατίας Οδού από τις οποίες αντλήθηκε το δείγμα δεδομένων. Περιγράφονται τα πρότυπα σχεδιασμού γεφυρών που υιοθετήθηκαν και οι διαδικασίες μελέτης και ελέγχου της κατασκευής που εφαρμόστηκαν.

Για τη στατιστική επεξεργασία των συλλεχθέντων στοιχείων επιλέχθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης. Στο σχετικό κεφάλαιο της διατριβής, παρουσιάζεται καταρχήν σύντομη επισκόπηση των γενικών αρχών και παραδοχών της μεθόδου και των ειδικότερων θεμάτων που πρέπει να εξετάζονται για την ορθή εφαρμογή της. Εξετάστηκαν επίσης, παραλλαγές της μεθόδου που χρησιμοποιούνται για την επιλογή της καλύτερης εξίσωσης, καθώς και η αναγκαιότητα και οι προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου «bootstrap» στην παλινδρόμηση.

Για την εκτίμηση της δαπάνης των θεμελιώσεων των μεσοβάθρων γεφυρών αναπτύχθηκε μοντέλο που περιλαμβάνει τρία διακριτά στάδια: επιλογή του συστήματος θεμελίωσης, υπολογισμό των ποσοτήτων εργασιών και υπολογισμό της δαπάνης κατασκευής. Προτείνονται σύστημα ταξινόμησης εδαφών και έμπειρο σύστημα, τα οποία σε συνδυασμό επιτρέπουν την επιλογή του κατάλληλου τύπου θεμελίωσης. Με εφαρμογή της μεθοδολογίας παλινδρόμησης με προς τα πίσω απαλοιφή αναπτύχθηκαν μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού για τους κυριότερους τύπους θεμελίωσης μεσοβάθρων. Εξετάστηκαν οι βασικές υποθέσεις της ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης και οι στατιστικοί δείκτες ώστε να επιβεβαιωθεί η ισχύς και η ικανοποιητική προσαρμογή αντίστοιχα των προτεινόμενων μοντέλων. Επίσης προτάθηκαν παραμετρικά εύρη των συντελεστών παλινδρόμησης με χρήση της μεθόδου «bootstrap».

Για την εκτίμηση της δαπάνης των μεσοβάθρων και της ανωδομής αναπτύχθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης μοντέλα πρόβλεψης των ποσοτήτων εργασιών για τρεις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους κατασκευής γεφυρών. Εξετάστηκαν οι βασικές υποθέσεις της μεθόδου της παλινδρόμησης και οι στατιστικοί δείκτες και εφαρμόστηκε η τεχνική επικύρωσης με 10 μέρη για την αξιολόγηση της ακρίβειας πρόβλεψης των προτεινόμενων μοντέλων εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών της ανωδομής. Επίσης αναπτύχθηκε μέθοδος αναδιάταξης δείγματος για την εξαγωγή του εύρους εκτίμησης της δαπάνης της ανωδομής.

Το ολοκληρωμένο σύστημα εκτίμησης της δαπάνης κατασκευής οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε με τη γλώσσα προγραμματισμού «Java». Για δυο παραδείγματα γεφυρών παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαδικασίες εισαγωγής των δεδομένων, εξαγωγής των αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών και δαπάνης κατασκευής, καθώς και προσδιορισμού του εύρους εκτίμησης. Η εφαρμογή του συστήματος επιτρέπει την ταχεία σύγκριση εναλλακτικών μορφών σχεδιασμού γεφυρών, ώστε να επιλέγεται η βέλτιστη λύση από τεχνική και οικονομική πλευρά.

ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ολοκλήρωση του Διευρωπαϊκού Οδικού Δικτύου αποτελεί βασικό στόχο της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ελλάδας. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης πολιτικής υλοποιείται σημαντικός αριθμός προγραμμάτων οδικών υποδομών. Παράλληλα, οι αυξημένες περιβαλλοντικές απαιτήσεις έχουν ως αποτέλεσμα την κατασκευή ολοένα περισσότερων και μεγαλύτερων γεφυρών.

Η παρούσα δυσχέρεια χρηματοδότησης των οδικών έργων, τόσο από δημόσιους όσο και από ιδιωτικούς πόρους, καθιστά αναγκαία την εμπειριστατωμένη Ανάλυση Κόστους / Ωφελειών κάθε προγραμματιζόμενου έργου. Αναπόσπαστο τμήμα της ανάλυσης αυτής αποτελεί η εκτίμηση με κάθε δυνατή ακρίβεια της δαπάνης κατασκευής και η σύγκριση εναλλακτικών μορφών σχεδιασμού κατά τα προκαταρκτικά στάδια των έργων (όταν μόνο οι βασικές προδιαγραφές και οι αρχικές τεχνικές λύσεις είναι γνωστές), ώστε να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη δυνατή αποδοτικότητα και να μειώνεται ο επενδυτικός κίνδυνος τους.

Η κατασκευή γεφυρών απορροφά αξιόλογο ποσοστό των επενδύσεων σε οδικές υποδομές. Παράλληλα, η κατασκευή γεφυρών παρουσιάζει διαχρονικά σημαντικές υπερβάσεις του προϋπολογισμού δαπάνης υλοποίησης. Κατά συνέπεια, είναι εξαιρετικά σημαντικό να επιτευχθεί αξιόπιστη εκτίμηση της δαπάνης το νωρίτερο δυνατό.

Από την επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι έχουν δημοσιευθεί ελάχιστες εργασίες που αναφέρονται στην εκτίμηση της δαπάνης οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα και καλύπτουν όλα τα τμήματα του έργου, από τη θεμελίωση έως την ανωδομή. Οι εργασίες αυτές βασίζονται στις περισσότερες περιπτώσεις σε θεωρητικές επιλύσεις μαθηματικών αλγορίθμων με βάση κανόνες σχεδιασμού γεφυρών και όχι σε πραγματικά στοιχεία από κατασκευασμένα έργα. Παράλληλα, εντοπίζεται έλλειψη διαθέσιμων βάσεων δεδομένων οδικών γεφυρών με πραγματικά στοιχεία κατασκευής και δαπάνης.

Συμπερασματικά, υφίσταται ανάγκη επιστημονικής έρευνας για τη δημιουργία ολοκληρωμένου συστήματος προεκτίμησης δαπάνης κατασκευής οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα που θα στηρίζεται σε αντίστοιχη βάση δεδομένων με πραγματικά στοιχεία και δαπάνες κατασκευής. Η παρούσα διδακτορική διατριβή έρχεται να καλύψει την ανάγκη αυτή.

Ως πρώτη προσέγγιση της προεκτίμησης της δαπάνης κατασκευής οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα, συλλέχθηκαν πραγματικά στοιχεία δαπάνης από 111 οδικές γέφυρες της Εγνατίας Οδού. Η επεξεργασία των στοιχείων οδήγησε σε εκτιμήσεις της μέσης δαπάνης κατασκευής γεφυρών ανά μονάδα επιφάνειας καταστρώματος για τρεις μεθόδους κατασκευής γεφυρών

(συμβατική κατασκευή, προβολοδόμηση και προκατασκευασμένες δοκοί). Κατέστη σαφές ότι η επίτευξη αυξημένης ακρίβειας κατά την προεκτίμηση της δαπάνης κατασκευής γέφυρας προϋποθέτει την προεκτίμηση της δαπάνης των επιμέρους τριών βασικών συστατικών της (θεμελίωση, βάθρα, φορέας) με βάση ανεξάρτητα στατιστικά μοντέλα.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε εκτεταμένη βάση δεδομένων οδικών γεφυρών στην οποία καταγράφηκαν αναλυτικά στοιχεία ποσοτήτων εργασιών και δαπάνης. Αναπτύχθηκε ειδική εφαρμογή με ξεχωριστές διαδικασίες εισαγωγής δεδομένων, διεξαγωγής αναζητήσεων και παρουσίασης των αποτελεσμάτων με αναφορές. Στο σχετικό κεφάλαιο της διατριβής δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις γέφυρες της Εγνατίας Οδού από τις οποίες αντλήθηκε το δείγμα δεδομένων. Περιγράφονται τα πρότυπα σχεδιασμού γεφυρών που υιοθετήθηκαν και οι διαδικασίες μελέτης και ελέγχου της κατασκευής που εφαρμόστηκαν.

Η συνήθης πρακτική δημοπράτησης δημοσίων έργων υποδομής στην Ελλάδα περιλαμβάνει την προμέτρηση των ποσοτήτων εργασιών και την εξαγωγή του συμβατικού προϋπολογισμού του έργου με τη χρήση τιμών μονάδας εργασιών από το εγκεκριμένο Αναλυτικό Τιμολόγιο Έργων Οδοποιίας. Το σύστημα εκτίμησης δαπάνης οδικών γεφυρών περιλαμβάνει την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης ποσοτήτων εργασιών για τη θεμελίωση, τα βάθρα και τον φορέα της γέφυρας. Στη συνέχεια εξάγονται οι εκτιμήσεις της δαπάνης χρησιμοποιώντας κατάλληλες τιμές μονάδας εργασιών. Η ανάπτυξη των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με στατιστική επεξεργασία των πραγματικών κατασκευαστικών στοιχείων που συλλέχθηκαν από τις γέφυρες της Εγνατίας Οδού.

Δεδομένου ότι η ανάλυση παλινδρόμησης είναι μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες στατιστικές τεχνικές και τα παραμετρικά μοντέλα εκτίμησης κόστους με παλινδρόμηση έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία από αρκετούς ερευνητές, υιοθετήθηκε η χρησιμοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου για την ανάπτυξη των μοντέλων πρόβλεψης ποσοτήτων εργασιών. Στο σχετικό κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζεται καταρχήν σύντομη επισκόπηση των γενικών αρχών και παραδοχών της μεθόδου και των ειδικότερων θεμάτων που πρέπει να εξετάζονται για την ορθή εφαρμογή της. Εξετάστηκαν επίσης, παραλλαγές της μεθόδου που χρησιμοποιούνται για την επιλογή της καλύτερης εξίσωσης, καθώς και η αναγκαιότητα και οι προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου «bootstrap» στην παλινδρόμηση.

Για την εκτίμηση της δαπάνης των μεσοβάθρων και της ανωδομής αναπτύχθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης μοντέλα πρόβλεψης των ποσοτήτων εργασιών για τρεις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους κατασκευής γεφυρών. Εξετάστηκαν οι βασικές υποθέσεις της μεθόδου της παλινδρόμησης και οι στατιστικοί δείκτες και εφαρμόστηκε η τεχνική επικύρωσης

με 10 μέρη για την αξιολόγηση της ακρίβειας πρόβλεψης των προτεινόμενων μοντέλων εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών της ανωδομής. Επίσης αναπτύχθηκε μέθοδος αναδιάταξης δείγματος για την εξαγωγή του εύρους εκτίμησης της δαπάνης της ανωδομής.

Η δημιουργία μοντέλου εκτίμησης της δαπάνης θεμελιώσεων γεφυρών εμφάνιζε όμως πρόσθετες δυσκολίες καθώς:

- Χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον τρεις διαφορετικοί τύποι θεμελιώσεων (φρέατα, πάσσαλοι και επιφανειακή θεμελίωση).
- Η επιλογή του κατάλληλου τύπου θεμελίωσης δεν εξαρτάται μόνο από τις εδαφικές συνθήκες. Αποτελεί σύνθετη διαδικασία, στην οποία ο μελετητής λαμβάνει υπόψη διαφορετικές παραμέτρους, όπως τις συνθήκες στο εργοτάξιο, τη μορφολογία εδάφους και τα απαιτούμενα γεωτεχνικά έργα για τη σταθεροποίηση πρανών, τη διαθεσιμότητα εξοπλισμού και τις κατασκευαστικές δυσκολίες.
- Η μεγάλη ποικιλία γεωλογικών συνθηκών καθιστά αδύνατη την ακριβή πρόβλεψη των εδαφικών χαρακτηριστικών στις θέσεις θεμελίωσης πριν την εκτέλεση λεπτομερών γεωλογικών και γεωτεχνικών μελετών.

Δεδομένου ότι το μοντέλο εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών και δαπάνης αναφέρεται στα προκαταρκτικά στάδια του έργου στα οποία τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περιορισμένα, κρίθηκε αναγκαία η ανάπτυξη συστήματος ταξινόμησης εδαφών, το οποίο χρησιμοποιεί πληροφορίες γνωστές κατά τα αρχικά στάδια σχεδιασμού.

Για την εκτίμηση της δαπάνης των θεμελιώσεων των μεσοβάθρων γεφυρών αναπτύχθηκε μοντέλο που περιλαμβάνει τρία διακριτά στάδια: επιλογή του συστήματος θεμελίωσης, υπολογισμό των ποσοτήτων εργασιών και υπολογισμό της δαπάνης κατασκευής. Προτείνονται σύστημα ταξινόμησης εδαφών και έμπειρο σύστημα, τα οποία σε συνδυασμό επιτρέπουν την επιλογή του κατάλληλου τύπου θεμελίωσης. Το έμπειρο σύστημα λαμβάνει υπόψη παράγοντες εξαρτώμενους από την τοποθεσία της γέφυρας. Βασίζεται στον τύπο εδάφους και σε κριτήρια επιλογής, τα οποία εμπεριέχουν την προηγούμενη κατασκευαστική εμπειρία και τη γνώση ειδικών γεωτεχνικών μηχανικών και μελετητών γεφυρών. Με εφαρμογή της μεθοδολογίας παλινδρόμησης με προς τα πίσω απαλοιφή, αναπτύχθηκαν μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού για τους κυριότερους τύπους θεμελίωσης μεσοβάθρων. Εξετάστηκαν οι βασικές υποθέσεις της ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης και οι στατιστικοί δείκτες ώστε να επιβεβαιωθεί η ισχύς και η ικανοποιητική προσαρμογή των προτεινόμενων

μοντέλων. Επίσης προτάθηκαν παραμετρικά εύρη των συντελεστών παλινδρόμησης με χρήση της μεθόδου «bootstrap».

Το σύστημα αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε με τη γλώσσα προγραμματισμού «Java». Για δυο παραδείγματα γεφυρών, παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαδικασίες εισαγωγής των δεδομένων, εξαγωγής των αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών και δαπάνης κατασκευής, καθώς και προσδιορισμού του εύρους εκτίμησης.

Το προτεινόμενο ολοκληρωμένο σύστημα αξιοποιεί εκτεταμένη βάση δεδομένων κατασκευασμένων έργων και παρέχει ταχύτατα αξιόπιστες εκτιμήσεις ποσοτήτων εργασιών και δαπάνης διαφόρων τύπων οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών σταδίων του έργου. Το σύστημα δίδει τη δυνατότητα οικονομικής σύγκρισης εναλλακτικών επιλογών συστημάτων θεμελίωσης, τύπων καταστρώματος και μεθόδων κατασκευής.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ

Ακρωνύμιο	Ελληνικός ή Ξενικός όρος
ΚτΕ	Κύριος του Έργου
ΑΠ	Ανάλυση Παλινδρόμησης
R ²	Συντελεστής Προσδιορισμού
VIF	Variance Inflation factor
ΒΔΟΓ	Βάσης Δεδομένων Οδικών Γεφυρών
ΣΔΒΔ	Σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων
ΕΟΑΕ	Εγνατία Οδός Α.Ε.
GSI	Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής
MAPE	Μέσο ποσοστιαίο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ

Συμβολισμός	Επεξήγηση
b	Πλάτος καταστρώματος (μ)
b_e	Χρήση εφεδράνων
b_{med}	Διάμεσος τιμή πλάτους καταστρώματος (μ)
B_p	Βάρος χάλυβα προέντασης (kg)
B_s	Βάρος χάλυβα οπλισμού (kg)
c_c	Τιμή μονάδας κόστους σκυροδέματος (€/μ ³)
c_p	Τιμή μονάδας κόστους χάλυβα προέντασης (€/kg)
c_s	Τιμή μονάδας κόστους χάλυβα οπλισμού (€/kg)
C_c	Δαπάνη σκυροδέματος (€)
C_p	Δαπάνη χάλυβα προέντασης (€)
C_s	Δαπάνη χάλυβα οπλισμού (€)
h	Ύψος μεσοβάθρου (μ)
l_c	Μήκος προβόλου (μ)
l_{cadj}	Προσαρμοσμένο μήκος προβόλου (μ)
l_s	Μήκος ανοίγματος (μ)
l_{sadj}	Προσαρμοσμένο μήκος ανοίγματος (μ)
l_{sup}	Μήκος υποστηριζόμενου καταστρώματος (μ)
l_{supadj}	Προσαρμοσμένο μήκος υποστηριζόμενου καταστρώματος (μ)
TC	Συνολική δαπάνη ανωδομής (€)
V_c	Όγκος σκυροδέματος (μ ³)
α	Σταθερός όρος γραμμικής παλινδρόμησης
β_0	Συντελεστής παλινδρόμησης ύψους μεσοβάθρου
β_1	Συντελεστής παλινδρόμησης μήκους υποστηριζόμενου καταστρώματος
β_2	Συντελεστής παλινδρόμησης πλάτους καταστρώματος
β_3	Συντελεστής παλινδρόμησης χρήσης εφεδράνων
β_4	Συντελεστής παλινδρόμησης προσαρμοσμένου μήκους ανοίγματος ή προβόλου
β_5	Συντελεστής παλινδρόμησης προσαρμοσμένου υποστηριζόμενου μήκους καταστρώματος

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Αριθμός	Τίτλος	Σελ.
3-1	Υποδιαίρεση κόστους κατασκευής γέφυρας κατά Menn	53
3-2	Κόστος κινητοποίησης, κατασκευής και εξοπλισμού ως ποσοστό του συνολικού κόστους	53
3-3	Κόστος ανωδομής και υποδομής ως ποσοστό του κόστους κατασκευής	54
3-4	Κόστος ξυλοτύπου και υλικών ως ποσοστό του κόστους ανωδομής	56
3-5	Κόστος σκυροδέματος, χάλυβα οπλισμού και χάλυβα προέντασης ως ποσοστό του κόστους υλικών	56
4-1	Γραφικές παραστάσεις ομοσκεδαστικότητας και ετεροσκεδαστικότητας (Gujarati 1999)	75
4-2	Πρότυπα ετεροσκεδαστικότητας στα διαγράμματα του τετραγώνου των υπολοίπων (Gujarati 1999)	76
5-1	Διάγραμμα οντοτήτων – συσχετίσεων ΒΔΟΓ	94
5-2	Φόρμα εισαγωγής στοιχείων πίνακα bridge	95
5-3	Φόρμα εισαγωγής στοιχείων πίνακα span	96
5-4	Φόρμα εισαγωγής στοιχείων πίνακα pier	96
5-5	Φόρμα εισαγωγής στοιχείων πίνακα pile	97
5-6	Μήνυμα σφάλματος περιορισμού ορθότητας μέγιστου μήκους ανοίγματος	98
5-7	Μήνυμα σφάλματος περιορισμού ορθότητας μέγιστου ύψους βάθρου	99
5-8	Μήνυμα σφάλματος περιορισμού ορθότητας μήκους ανωδομής	99
5-9	Μήνυμα σφάλματος περιορισμού ορθότητας πεδίου BridgeID	100
5-10	Μήνυμα σφάλματος περιορισμού ορθότητας πεδίου LeftSpanID	101
5-11	Απόσπασμα γενικής αναφοράς γεφυρών	102
5-12	Απόσπασμα αναφοράς ανωδομής για Μονοκυψελωτό Κιβώτιο και Συμβατική Κατασκευή	103
5-13	Απόσπασμα αναφοράς ανωδομής για Προκατασκευασμένες Δοκούς με Πλάκα Συνεχείας	104
5-14	Απόσπασμα αναφοράς ανοιγμάτων για Προκατασκευασμένες Δοκούς	105
5-15	Απόσπασμα αναφοράς μεσοβάθρων με ύψος μικρότερο από 15.00 μέτρα	106
5-16	Απόσπασμα αναφοράς φρεάτων θεμελίωσης	107
5-17	Απόσπασμα αναφοράς κατανάλωσης οπλισμού για γέφυρες μονοκυψελωτού κιβωτίου κατασκευασμένες με προβολοδόμηση	107

5-18	Απόσπασμα αναφοράς κατανάλωσης οπλισμού για γέφυρες με προκατασκευασμένες δοκούς και πλάκα συνεχείας	108
5-19	Απόσπασμα αναφοράς κατανάλωσης οπλισμού στα ανοίγματα γεφυρών κατασκευασμένα με προβολοδόμηση	109
5-20	Απόσπασμα αναφοράς κατανάλωσης οπλισμού στα βάρθρα γεφυρών με συμπαγή διατομή και ύψους μικρότερο από 15.00 μέτρα	109
6-1	Γράφημα GSI για διαφορετικές κατηγορίες εδαφών του Πίνακα 6-2	115
6-2	Στάδιο 1 του μοντέλου εκτίμησης δαπάνης	120
6-3	Στάδια 2 και 3 του μοντέλου εκτίμησης δαπάνης	121
7-1	Τμηματική κατασκευή γέφυρας με προβολοδόμηση	135
7-2	Εμπειρική συνάρτηση πιθανότητας της προβλεπόμενης δαπάνης κατασκευής ανωδομής	147
8-1	Οθόνη εισαγωγής γενικών δεδομένων για το πρώτο παράδειγμα έργου	152
8-2	Οθόνη εισαγωγής δεδομένων ανωδομής για το πρώτο παράδειγμα έργου	153
8-3	Οθόνη εισαγωγής δεδομένων μεσοβάθρων για το πρώτο παράδειγμα έργου	153
8-4	Οθόνη αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών πρώτου παραδείγματος έργου	155
8-5	Οθόνη αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών πρώτου παραδείγματος έργου (τιμές 95ου εκατοστημορίου)	155
8-6	Αποθήκευση αρχείου αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών πρώτου παραδείγματος έργου	156
8-7	Τελική οθόνη εισαγωγής τιμών μονάδας και υπολογισμού δαπάνης	156
8-8	Εισαγωγή τιμών μονάδας δαπάνης πρώτου παραδείγματος έργου	157
8-9	Αποτελέσματα τιμών δαπάνης πρώτου παραδείγματος έργου	157
8-10	Αποτελέσματα τιμών δαπάνης πρώτου παραδείγματος έργου (τιμές 95ου εκατοστημορίου)	158
8-11	Οθόνη εισαγωγής δεδομένων ανωδομής δεύτερου παραδείγματος έργου	159
8-12	Οθόνη εισαγωγής δεδομένων μεσοβάθρων δεύτερου παραδείγματος έργου	159
8-13	Ποσότητες εργασιών δεύτερου παραδείγματος έργου	160
8-14	Ποσότητες εργασιών δεύτερου παραδείγματος έργου (τιμές 95ου εκατοστημορίου)	160
8-15	Τιμές μονάδας και αποτελέσματα δαπάνης δεύτερου παραδείγματος έργου	161
8-16	Αποτελέσματα δαπάνης δεύτερου παραδείγματος έργου (τιμές 95ου εκατοστημορίου)	161
9-1	Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό 2000	168

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Αριθμός	Τίτλος	Σελ.
1-1	Υπέρβαση δαπάνης (σταθερές τιμές) σε 258 έργα μεταφορών κατά Flynnberg	3
1-2	Πίνακας κατηγοριοποίησης εκτιμήσεων κόστους σύμφωνα με την Association for the Advancement of Cost Engineering	10
1-3	Τύποι εκτιμήσεων δαπάνης κατά τη διάρκεια ζωής ενός έργου (Ayed 1997)	11
2-1	Σύγκριση μεθόδων ολισθαίνοντος και αναρριχόμενου ξυλοτύπου (Φραγκάκης 2000)	30
2-2	Πεδίο εφαρμογής - Κατηγοριοποίηση κατασκευαστικών μεθόδων (Καρμίρης 1999)	36
3-1	Μέσο κόστος θεμελιώσεων και βάθρων	55
3-2	Μέσο κόστος ξυλοτύπου και υλικών	55
3-3	Μέσο κόστος σκυροδέματος, χάλυβα οπλισμού και χάλυβα προέντασης	57
3-4	Επιμερισμός μέσου κόστους	58
3-5	Απόκλιση εκτιμήσεων ποσοτήτων εργασιών κατά Menn από τις πραγματικές	59
3-6	Αντιπροσωπευτικά αρχεία δαπάνης γεφυρών (Fragkakis και Lambropoulos 2004)	63
3-7	Ποσοστιαία κατανομή συνολικής δαπάνης κατασκευής γεφυρών (Fragkakis και Lambropoulos 2004)	64
5-1	Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας γέφυρα	89
5-2	Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας ανωδομή	90
5-3	Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας πεζοδρόμιο	90
5-4	Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας άνοιγμα	91
5-5	Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας βάθρο	92
5-6	Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας επιφανειακή θεμελίωση	92
5-7	Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας φρέατα	93
5-8	Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας πάσσαλοι	93
5-9	Βιβλιοθήκες στοιχείων και καθορισμένες τιμές	97
6-1	Κατάταξη των εδαφών κατά ΕΑΚ 2000	113
6-2	Προτεινόμενη κατηγοριοποίηση εδαφών	114
6-3	Συσχέτιση τύπου θεμελίωσης – τύπου εδάφους	118
6-4	Στατιστικές παλινδρόμησης για φρέατα	124
6-5	Στατιστικές παλινδρόμησης για πασσάλους	125
6-6	Στατιστικές παλινδρόμησης για κεφαλόδεσμο	126
6-7	Στατιστικές παλινδρόμησης για επιφανειακή θεμελίωση	127
6-8	Τιμή W, τιμή p και μέση τιμή υπολοίπων	128
6-9	Στατιστική ελέγχου, τιμή p και αποτέλεσμα ελέγχου	128

6-10	«HC3» διορθωμένες τιμές p για την επιφανειακή θεμελίωση	129
6-11	90 % διαστήματα εμπιστοσύνης συντελεστών παλινδρόμησης μοντέλων σκυροδέματος	130
6-12	90 % διαστήματα εμπιστοσύνης συντελεστών παλινδρόμησης μοντέλων χάλυβα οπλισμού	130
6-13	Τιμή 50 ^{ου} εκατοστημορίου συντελεστών παλινδρόμησης	131
7-1	Στατιστικά στοιχεία παλινδρόμησης	136
7-2	Μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών ανωδομής	136
7-3	Συντελεστές συσχέτισης για γέφυρες με προκατασκευασμένες δοκούς	137
7-4	Στατιστική ελέγχου, τιμή p και αποτέλεσμα του ελέγχου White	138
7-5	Τιμές MAPE μοντέλων πρόβλεψης και συνολικής δαπάνης ανωδομής	139
7-6	Τρέχουσες τιμές μονάδας εργασιών	140
7-7	90 % διαστήματα εμπιστοσύνης συντελεστών παλινδρόμησης	141
7-8	Τιμή 50 ^{ου} εκατοστημορίου συντελεστών παλινδρόμησης	141
7-9	Συντελεστές συσχέτισης, tolerance και variance inflation factors για μεσόβαθρα	143
7-10	Τιμές p , R^2 και τιμές ελέγχου F για μεσόβαθρα γεφυρών	143
7-11	Τιμές 5 ^{ου} , 95 ^{ου} και 50 ^{ου} εκατοστημορίου συντελεστών παλινδρόμησης	144
7-12	Τιμές των παραμέτρων του παραδείγματος	146
7-13	Εύρη εκτίμησης για το παράδειγμα έργου	146
9-1	Επιμερισμός δειγμάτων δεδομένων ανωδομής (ανοίγματα ή πρόβολοι) σε σεισμικές ζώνες	167

1 ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει χαρακτηρίσει την υποδομή μεταφορών το θεμέλιο για την ελεύθερη κινητικότητα των ατόμων και των αγαθών και για την εδαφική συνοχή της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η δημιουργία αποτελεσματικού διευρωπαϊκού δικτύου μεταφορών θεωρείται κομβικό στοιχείο στη στρατηγική της Λισσαβώνας για την ανάπτυξη της ανταγωνιστικότητας και απασχόλησης στην Ευρώπη. Οι σύγχρονοι αυτοκινητόδρομοι διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στην προοπτική αυτή. Αποτελούν μεγάλα έργα υποδομών, που περιλαμβάνουν ποικίλες κατασκευαστικές δραστηριότητες, όπως γέφυρες, σήραγγες, ορύγματα και επιχώματα και στις περισσότερες περιπτώσεις απορροφούν σημαντικό ποσοστό των διαθέσιμων κρατικών κεφαλαίων για επενδυτικά προγράμματα.

Η ανάγκη για περιβαλλοντικά φιλικό σχεδιασμό αυτοκινητοδρόμων, οι οποίοι υπερνικούν δύσκολα γεωλογικά υπόβαθρα και παρακάμπτουν κέντρα πόλεων, αστικούς πολεοδομικούς ιστούς, αρχαιολογικές περιοχές και προστατευόμενους ευαίσθητους βιοτόπους, έχει αυξήσει σημαντικά την κατασκευή οδικών γεφυρών τα τελευταία χρόνια. Η κατασκευή γεφυρών, όμως, αποτελεί σύνθετες θύμα υπερβάσεων προϋπολογισμού δαπάνης. Για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, είναι αναγκαίο να διαθέτουν οι λήπτες των αποφάσεων το ενωρίτερο δυνατόν αξιόπιστη προεκτίμηση της τελικής δαπάνης, βασισμένη στην προηγούμενη κατασκευαστική εμπειρία.

Οι συγκριτικές μελέτες κόστους που αφορούν σε υποδομές μεταφορών είναι σπάνιες, κυρίως επειδή δεν υπάρχουν αξιόπιστες, μεγάλες και ομοιογενείς βάσεις δεδομένων. Το εγχείρημα δημιουργίας βάσης δεδομένων δυσχεραίνεται από την απροθυμία των Κυρίων των Έργων να αποκαλύψουν οικονομικές πληροφορίες σχετικά με τα κατασκευασμένα έργα, καθιστώντας δυσχερή κάθε σχετική έρευνα.

Οι προκαταρκτικές εκτιμήσεις της δαπάνης κατασκευής προετοιμάζονται πριν την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του έργου, σε αρχικό στάδιο κατά το οποίο μόνο οι βασικές προδιαγραφές είναι γνωστές (Hendrickson 1998). Σύμφωνα με τον Wideman (1995), η φάση σύλληψης – εννοιολογική φάση είναι το πρώτο στάδιο ενός έργου στο οποίο εξετάζεται η αναγκαιότητα, αξιολογούνται οι εναλλακτικές λύσεις και επιλογές, προσδιορίζονται οι στόχοι και αναζητείται ο χρηματοδότης. Οι προκαταρκτικές εκτιμήσεις δαπάνης είναι ιδιαίτερα σημαντικές για όλα τα μέρη που εμπλέκονται στην κατασκευαστική διαδικασία, όπως τον Κύριο του Έργου (ΚτΕ), τους μελετητές, τους εργολάβους και τους οργανισμούς χρηματοδότησης. Θεωρούνται

απαραίτητες για αποφάσεις σχετικές με τη χρηματοοικονομική βιωσιμότητα των έργων, την επιλογή επενδυτικών σχεδίων μέσω της σύγκρισης εναλλακτικών προτάσεων, τον προσδιορισμό αρχικών προϋπολογισμών και τον επιμερισμό των διαθέσιμων κεφαλαίων. Οι προκαταρκτικές εκτιμήσεις δαπάνης παρουσιάζουν τη μικρότερη αναμενόμενη ακρίβεια εξαιτίας των περιορισμένων διαθέσιμων δεδομένων. Εντούτοις, ανακριβείς εκτιμήσεις οδηγούν στην απόρριψη επενδυτικών ευκαιριών και σε χαμηλότερες αποδόσεις κεφαλαίων σε σύγκριση με τις αναμενόμενες (Oberlender και Trost 2001).

1.2 Υπερβάσεις προϋπολογισμού δαπάνης τεχνικών έργων

Η τελική δαπάνη του κατασκευαστικού έργου αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την επιτυχία του. Παρά την αποδεδειγμένη σπουδαιότητά της, είναι σύνηθες φαινόμενο ένα έργο να μην επιτυγχάνει τους στόχους του όσον αφορά στον προϋπολογισμό της δαπάνης του. Ως εκ τούτου, οι υπερβάσεις του προϋπολογισμού δαπάνης τεχνικών έργων έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας διεθνώς.

Ο Flyvbjerg (2004;2007) συνέλεξε στοιχεία από 258 διαφορετικά έργα υποδομών – μεταφορών (γέφυρες, σήραγγες, αυτοκινητόδρομους, αεροδρόμια, σιδηροδρομικές γραμμές) συνολικής αξίας 90 δις \$ σε τιμές 1995 και διαμόρφωσε τη μεγαλύτερη βάση δεδομένων για υπερβάσεις δαπάνης κατασκευαστικών έργων που έχει παρουσιαστεί μέχρι σήμερα στη διεθνή βιβλιογραφία. Ο Πίνακας 1-1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των στοιχείων και ειδικότερα τη μέση υπέρβαση προϋπολογισμού δαπάνης, την τυπική της απόκλιση καθώς και τις τιμές των τεταρτημορίων. Ο Flyvbjerg κατέληξε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Εννιά στα δέκα έργα παρουσιάζουν υπέρβαση δαπάνης. Η πιθανότητα ύπαρξης υπέρβασης δαπάνης σε ένα τυχαίο έργο ανέρχεται σε 86%.
- Η υπέρβαση του προϋπολογισμού δαπάνης είναι διεθνές φαινόμενο, περισσότερο έντονο στις αναπτυσσόμενες χώρες σε σύγκριση με την Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική.
- Η υπέρβαση του προϋπολογισμού δαπάνης συναρτάται από το μέγεθος της καθυστέρησης υλοποίησης. Για κάθε έτος της, η μέση αύξηση της υπέρβασης ανέρχεται σε 4.64%.
- Όσον αφορά στις γέφυρες και τις σήραγγες, τα μεγαλύτερα έργα παρουσιάζουν μεγαλύτερες υπερβάσεις. Επομένως, η αύξηση του μεγέθους των έργων οδηγεί στην ανάγκη για βελτιωμένη διαχείριση και καλύτερο σχεδιασμό τους.

Πίνακας 1-1: Υπέρβαση δαπάνης (σταθερές τιμές) σε 258 έργα μεταφορών κατά Flyvbjerg

Τύπος έργου	Αριθμός έργων	Μέση υπέρβαση δαπάνης (%)	Τυπική απόκλιση (%)	Τεταρτημόρια (25/50/75%)
Σιδηροδρομικά	58	44.70	38.40	24/43/60
Γέφυρες και σήραγγες	33	33.80	62.40	-1/22/35
Αυτοκινητόδρομοι	167	20.40	29.90	5/15/32
Σύνολο	258	27.60	38.70	5/20/35

Οι Skamris και Flyvbjerg (1997) συνέκριναν την πραγματική δαπάνη κατασκευής 7 γεφυρών και σιδηροδρόμων της Δανίας με τους αντίστοιχους προϋπολογισμούς που είχαν συνταχθεί και ληφθεί υπόψη κατά τη λήψη των αποφάσεων υλοποίησης. Η μέση υπέρβαση προϋπολογισμού δαπάνης υπολογίστηκε σε 14% και κυμάνθηκε από -10% έως 33%. Η συγκεκριμένη εργασία περιέχει και βιβλιογραφική επισκόπηση προηγούμενων μελετών υπερβάσεων προϋπολογισμού δαπάνης και αναδεικνύει ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι διεθνές και παρατηρείται ακόμη και στις πλέον προηγμένες χώρες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι έρευνα που διεξήχθη από το Υπουργείο Μεταφορών των Ηνωμένων Πολιτειών σε 10 σιδηροδρομικά έργα με συνολικό προϋπολογισμό \$ 15.5 δις σε τιμές 1988 αποκάλυψε ότι η μέση υπέρβαση προϋπολογισμού δαπάνης ανήλθε σε 61% και κυμάνθηκε από -10% έως 106% (Pickrell 1990).

Μελέτη αναφορικά με την επίδοση του Τμήματος Μεταφορών της Πολιτείας της Φλόριντα των Η.Π.Α. στον έλεγχο των υπερβάσεων προϋπολογισμού δαπάνης κατασκευής αυτοκινητοδρόμων και γεφυρών αναγνωρίζει ότι η υπέρβαση της δαπάνης αποτελεί διαχρονικό πρόβλημα (Office of Program Policy Analysis and Government Accountability, The Florida Legislature 1996;1997). Η αξιολόγηση 102 έργων συνολικού προϋπολογισμού 302.70 εκ. \$ που ολοκληρώθηκαν το 1995 ανέδειξε υπερβάσεις δαπάνης ύψους 9.50% οι οποίες αυξήθηκαν σταθερά στα επόμενα οικονομικά έτη.

Αρκετές δημοσιευμένες εργασίες εξετάζουν τις υπερβάσεις του προϋπολογισμού δαπάνης των τεχνικών έργων στις αναπτυσσόμενες χώρες, δεδομένου ότι οι χώρες αυτές εμφανίζουν σημαντική κατασκευαστική δραστηριότητα με πληθώρα έργων υποδομής. Οι Azhar

et al. (2008) συνέλεξαν στοιχεία μέσω ερωτηματολογίων από 25 κατασκευαστικές εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο Πακιστάν και συμπέραναν ότι σχεδόν όλα τα κατασκευαστικά έργα αντιμετώπισαν υπερβάσεις δαπάνης στην εκτέλεσή τους κατά τουλάχιστον 10% και ότι οι μέγιστες υπερβάσεις προσέγγισαν το 60%. Συμπέραναν, ακόμη, ότι οι μεσαίου μεγέθους εταιρείες είναι περισσότερο ευάλωτες σε υπερβάσεις δαπάνης σε σύγκριση με τις μεγάλες και μικρές εταιρείες. Οι μεσαίου μεγέθους εταιρείες προσπαθούν να εκτελέσουν περισσότερα έργα και να αποκτήσουν μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς αναλαμβάνοντας όμως και μεγαλύτερο ρίσκο.

Οι Roxas και Chalermpong (2007) δημιούργησαν βάση δεδομένων με στοιχεία από 129 έργα αυτοκινητοδρόμων και γεφυρών που κατασκευάστηκαν στην Ταϊλάνδη και τις Φιλιππίνες και κατέληξαν ότι το 42% του δείγματος εμφάνισε υπέρβαση δαπάνης προϋπολογισμού. Η μέση τιμή της υπέρβασης για τις γέφυρες υπολογίστηκε σε 2.30%. Οι ερευνητές επισήμαναν ότι τα αποτελέσματα πιθανόν να μην είναι πλήρως αντιπροσωπευτικά, καθώς τα περισσότερα από τα έργα αυτά χρηματοδοτήθηκαν από διεθνείς οργανισμούς όπως την Παγκόσμια Τράπεζα, ενώ τα έργα με ιδιωτική χρηματοδότηση ή συγχρηματοδότηση από την κυβέρνηση και ιδιωτικούς φορείς δεν αντιπροσωπεύονται επαρκώς στη βάση δεδομένων.

Συνοψίζοντας, η υπέρβαση του αρχικού προϋπολογισμού δαπάνης κατασκευής ενός έργου υποδομής αποτελεί σύνθηρες φαινόμενο παγκοσμίως το οποίο προκαλεί σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις. Ο ΚτΕ πρέπει να επιδιώκει την όσο το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση της δαπάνης κατασκευής στα αρχικά στάδια σχεδιασμού στα οποία λαμβάνονται οι αποφάσεις υλοποίησης.

1.3 Στόχος και σημασία παρούσας έρευνας

Στόχος της παρούσας έρευνας είναι η ανάπτυξη ολοκληρωμένου συστήματος προεκτίμησης της δαπάνης κατασκευής οδικών γεφυρών, το οποίο περιλαμβάνει βάση δεδομένων με πραγματικά στοιχεία και υπολογιστικά μοντέλα με χρήση στατιστικών μεθόδων. Η παρούσα ερευνητική εργασία καλύπτει την ανάγκη για αξιόπιστες εκτιμήσεις της δαπάνης οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα στα αρχικά στάδια του έργου και παρουσιάζει σύστημα εκτίμησης δαπάνης με τη βοήθεια προγράμματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που βασίζεται σε πληροφορίες γνωστές πριν τον προσδιορισμό λεπτομερών σχεδίων και προδιαγραφών. Το σύστημα χρησιμοποιεί μοντέλα πρόβλεψης ποσοτήτων εργασιών που βασίζονται σε ανάλυση παλινδρόμησης και παρέχει εκτιμήσεις των ποσοτήτων εργασιών και της δαπάνης όλων των τμημάτων της γέφυρας. Η στατιστική ανάλυση εφαρμόστηκε σε πραγματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από προσφάτως κατασκευασμένες γέφυρες.

Η σημασία της παρούσας έρευνας πηγάζει από τη συνεχή αύξηση της κατασκευής οδικών γεφυρών σε συνδυασμό με τις σημαντικές υπερβάσεις του προϋπολογισμού δαπάνης παρόμοιων έργων που έχουν παρατηρηθεί. Η βελτίωση των οδικών υποδομών αποτελεί βασικό στόχο όχι μόνο της Ελλάδας, αλλά και της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς εκτιμάται ότι θα συμβάλει στη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας της Ευρωπαϊκής οικονομίας και στην αύξηση της απασχόλησης. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης πολιτικής υλοποιείται σημαντικός αριθμός προγραμμάτων υποδομών, με τελικό στόχο τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου διευρωπαϊκού δικτύου μεταφορών. Η βελτίωση των υποδομών συνοδεύεται και από αυξημένες περιβαλλοντικές απαιτήσεις, με αποτέλεσμα την κατασκευή ολοένα και περισσότερων γεφυρών σε δύσκολα εδαφικά ανάγλυφα.

Η κατασκευή γεφυρών έχει διαχρονικά παρουσιάσει σημαντικές υπερβάσεις του προϋπολογισμού δαπάνης όπως ήδη αναφέρθηκε στην ενότητα 1.2. Παράλληλα, το αρνητικό οικονομικό περιβάλλον της εποχής μας δυσχεραίνει τη χρηματοδότηση έργων υποδομής από διεθνή χρηματοπιστωτικά ιδρύματα και οργανισμούς. Η κατασκευή γεφυρών εκτιμάται ότι απορροφά αξιόλογο ποσοστό των διαθέσιμων κεφαλαίων των περισσότερων χωρών για προγράμματα υποδομών. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις δυσκολίες χρηματοδότησης, καθιστά ακόμη περισσότερο αναγκαία την εμπειριστατωμένη ανάλυση κόστους / ωφελειών και βιωσιμότητας των έργων. Αναπόσπαστο τμήμα της ανάλυσης αυτής αποτελεί η εκτίμηση με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια της δαπάνης κατασκευής και η σύγκριση εναλλακτικών μορφών σχεδιασμού κατά τα προκαταρκτικά στάδια του έργου, ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη λύση από τεχνικής και οικονομικής πλευράς.

Από την επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι έχουν δημοσιευθεί γενικά πολύ λίγες εργασίες που αναφέρονται στην εκτίμηση της δαπάνης οδικών γεφυρών. Επιπρόσθετα, οι ερευνητικές μελέτες που χρησιμοποιούν πραγματικά κατασκευαστικά και οικονομικά στοιχεία είναι πολύ περιορισμένες. Οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες, είτε αναφέρονται στον προκαταρκτικό σχεδιασμό των γεφυρών με θεωρητικούς κανόνες, είτε εκτελούν με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή διαδικασία δοκιμών με επαναλαμβανόμενες θεωρητικές επιλύσεις, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο τελικός σχεδιασμός από τεχνικής και οικονομικής πλευράς. Οι συγκεκριμένες εκτιμήσεις, όμως, βασίζονται σε θεωρητικές επιλύσεις μαθηματικών αλγορίθμων από κανόνες σχεδιασμού γεφυρών και δεν μπορούν να αποτυπώσουν πλήρως όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τον τελικό σχεδιασμό και τη δαπάνη κατασκευής των έργων. Δεν εξετάζουν τις απρόβλεπτες καταστάσεις και συνθήκες που

εμφανίζονται κατά τη διάρκεια κατασκευής και επιδρούν σημαντικά στην τελική δαπάνη και το σχεδιασμό.

Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνητικών μελετών της διεθνούς βιβλιογραφίας που αναφέρονται στην εκτίμηση της δαπάνης οδικών γεφυρών, βασίζεται στους κανόνες σχεδιασμού γεφυρών των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής και του Καναδά και δεν καλύπτει όλα τα τμήματα του έργου από τη θεμελίωση έως την ανωδομή. Οι περισσότεροι μελετητές εστιάζουν σε εκτιμήσεις κόστους και ποσοτήτων εργασιών της ανωδομής, προκειμένου να εξαλειφθούν οι εξαρτώμενοι από τη θέση του έργου παράγοντες, όπως οι εδαφικές και υδρολογικές συνθήκες, τα απότομα πρανή, η εγγύτητα σε ενεργά ρήγματα, οι μετατοπίσεις του εδάφους και οι υδάτινες ροές.

Με βάση τα παραπάνω, είναι σαφές ότι έχουν δημοσιευθεί στη διεθνή βιβλιογραφία ελάχιστες εργασίες που αναφέρονται στην εκτίμηση της δαπάνης οδικών γεφυρών, βασίζονται σε πραγματικά στοιχεία από κατασκευασμένα έργα και καλύπτουν όλα τα τμήματα του έργου από τη θεμελίωση έως την ανωδομή. Επομένως, υφίσταται κενό στην επιστήμη και απαιτείται περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο τομέα.

Παράλληλα, εντοπίζεται έλλειψη διαθέσιμων βάσεων δεδομένων οδικών γεφυρών με πραγματικά στοιχεία κατασκευής. Η δυσκολία δημιουργίας μιας βάσης δεδομένων γεφυρών με κατασκευαστικά στοιχεία επιτείνεται από την απροθυμία των ΚτΕ και των δημόσιων οργανισμών να παρέχουν και να δημοσιεύσουν τις σχετικές πληροφορίες. Η ύπαρξη πληθώρας διαφορετικών μεθόδων κατασκευής γεφυρών με διαφορετικές παραμέτρους κόστους αυξάνει τη δυσκολία συλλογής στοιχείων από έργα που έχουν μελετηθεί με παρόμοιες προδιαγραφές – κανονισμούς και καλύπτουν μεγάλη ποικιλία κατασκευαστικών μεθόδων. Συμπερασματικά, είναι σαφές ότι υφίσταται ανάγκη δημιουργίας αφενώς βάσης δεδομένων οδικών γεφυρών που θα περιλαμβάνει πραγματικά στοιχεία κατασκευής, και αφετέρου ολοκληρωμένου συστήματος εκτίμησης της δαπάνης κατασκευής, το οποίο θα βασίζεται σε δεδομένα γνωστά στα αρχικά στάδια της σύλληψης και σχεδιασμού του έργου.

1.4 Προεκτίμηση δαπάνης και κοστολόγηση τεχνικών έργων

Σύμφωνα με την Association for the Advancement of Cost Engineering (AACE 2005), διακρίνονται πέντε κατηγορίες εκτίμησης της δαπάνης για κατασκευαστικά έργα, με αρίθμηση από 5 έως 1. Η εκτίμηση κατηγορίας 5 βασίζεται στο χαμηλότερο βαθμό πληροφόρησης και ορισμού του έργου, ενώ η εκτίμηση κατηγορίας 1 προσεγγίζει τον τελικό σχεδιασμό του έργου στο στάδιο ωρίμανσης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση «αντίστροφης μέτρησης» βασίζεται στο

γεγονός ότι η εκτίμηση της δαπάνης ενός έργου αποτελεί διαδικασία διαδοχικών προσεγγίσεων που προετοιμάζονται μέχρι την τελική υλοποίηση του έργου. Ο Πίνακας 1-2 παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση των εκτιμήσεων κόστους – δαπάνης (Cost Estimate Classification Matrix), καθώς και τα χαρακτηριστικά κάθε τύπου.

Οι εκτιμήσεις κατηγορίας 5 βασίζονται σε πολύ περιορισμένες πληροφορίες και ως εκ τούτου παρουσιάζουν μεγάλο εύρος. Λόγω των απαιτήσεων του τελικού χρήστη, προετοιμάζονται σε μικρό χρονικό διάστημα και με λίγη προσπάθεια. Οι εκτιμήσεις αυτές εξυπηρετούν διάφορους σκοπούς στρατηγικού και επιχειρησιακού προγραμματισμού, όπως μελέτη αγοράς, επιλογή έργων, σύνταξη προϋπολογισμού, μακροπρόθεσμο προγραμματισμό επενδύσεων και αξιολόγηση της αρχικής βιωσιμότητας, των εναλλακτικών σχεδίων και των αναγκών πόρων. Χρησιμοποιούν κυρίως παραμετρικές και στοχαστικές μεθόδους, όπως καμπύλες κόστους/παραγωγής, παράγοντες Lang, Hand, Chilton, Peters-Timmerhaus και Guthrie.

Οι εκτιμήσεις κατηγορίας 4 βασίζονται σε περιορισμένες πληροφορίες (αλλά περισσότερες σε σύγκριση με την κατηγορία 5) και παρουσιάζουν επίσης μεγάλο εύρος. Χρησιμοποιούνται τυπικά για διαλογή έργων, προσδιορισμό του εφικτού, έγκριση προκαταρκτικών προϋπολογισμών, στρατηγικό προγραμματισμό, επιχειρησιακή ανάπτυξη, εναλλακτικό σχεδιασμό του έργου, επιβεβαίωση της οικονομικής ή της τεχνικής δυνατότητας πραγματοποίησης και για προκαταρκτική έγκριση ώστε να προχωρήσει το έργο σε επόμενο στάδιο. Χρησιμοποιούν παραμετρικές και στοχαστικές τεχνικές όπως και οι εκτιμήσεις κατηγορίας 5.

Οι εκτιμήσεις κατηγορίας 3 αποτελούν τη βάση για έγκριση και χρηματοδότηση προϋπολογισμών. Χρησιμοποιούνται για να υποστήριξη αιτημάτων χρηματοδότησης των έργων και είναι οι πρώτες «εκτιμήσεις ελέγχου» με τις οποίες οι πραγματικές δαπάνες και οι απορροφούμενοι πόροι θα ελεγχθούν για αποκλίσεις. Χρησιμοποιούνται ως προϋπολογισμοί των έργων μέχρι να αντικατασταθούν από περισσότερο λεπτομερείς εκτιμήσεις. Σε πολλούς φορείς η εκτίμηση δαπάνης κατηγορίας 3 είναι η τελευταία που απαιτείται και αποτελεί τη μοναδική βάση για τον έλεγχο δαπανών. Οι εκτιμήσεις κατηγορίας 3 βασίζονται συνήθως σε περισσότερο ντετερμινιστικές τεχνικές παρά σε στοχαστικές μεθόδους. Χρησιμοποιούν μεγάλο αριθμό τιμών μονάδας εργασιών, οι οποίες προσδιορίζονται σε βασικό επίπεδο λεπτομέρειας, ενώ στοχαστικές μέθοδοι και παραμετροποίηση είναι αποδεκτό να εφαρμοστούν για την εκτίμηση των λιγότερο σημαντικών τμημάτων του έργου.

Οι εκτιμήσεις κατηγορίας 2 εφαρμόζονται για τη διαμόρφωση λεπτομερούς γραμμής αναφοράς (baseline) με την οποία ελέγχεται η δαπάνη και η πρόοδος του έργου. Χρησιμοποιούνται συχνά ως «τιμή προσφοράς» των αναδόχων για τον καθορισμό της αξίας της σύμβασης. Οι εκτιμήσεις κατηγορίας 2 βασίζονται σε ντετερμινιστικές τεχνικές, προετοιμάζονται με μεγάλη λεπτομέρεια και περιέχουν μεγάλο αριθμό επιμέρους εργασιών του έργου.

Οι εκτιμήσεις κατηγορίας 1 προετοιμάζονται γενικά για επιμέρους τμήματα του συνολικού έργου και χρησιμοποιούνται από υπεργολάβους για προσφορές ή από τους ΚτΕ ως εκτιμήσεις ελέγχου και γίνονται η νέα γραμμή αναφοράς για τον έλεγχο των δαπανών και του προγραμματισμού του έργου. Εφαρμόζονται στην αξιολόγηση προσφορών και αξιώσεων, στην επίλυση διαφωνιών και στις διαπραγματεύσεις προμηθευτών/αναδόχων. Οι εκτιμήσεις αυτές βασίζονται σε ντετερμινιστικές μεθόδους και απαιτούν σημαντική προσπάθεια. Εμπεριέχουν τη μεγαλύτερη δυνατή λεπτομέρεια και ως εκ τούτου, προετοιμάζονται μόνο για τα πιο σημαντικά τμήματα του έργου. Χρησιμοποιούν τις πραγματικές ποσότητες σχεδιασμού στις οποίες εφαρμόζονται τιμές μονάδας.

Σύμφωνα με τον Ayed (1997), διακρίνονται τέσσερις τύποι εκτιμήσεων της δαπάνης κατασκευής κατά τη διάρκεια της ζωής ενός έργου. Ο Πίνακας 1-3 παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση των εκτιμήσεων δαπάνης, καθώς και τη φάση του έργου, το επίπεδο δυσκολίας, την αναμενόμενη ακρίβεια και το βαθμό διαθέσιμης πληροφόρησης που αναλογούν σε κάθε κατηγορία.

- Προκαταρκτική εκτίμηση (preliminary estimate): Πραγματοποιείται στα αρχικά στάδια, στα οποία τα κεφάλαια του έργου πρέπει να αποφασιστούν και η διαθέσιμη πληροφορία είναι περιορισμένη. Δεν βασίζεται σε αναλυτικές προδιαγραφές και κατασκευαστικά σχέδια. Η προκαταρκτική εκτίμηση δαπάνης είναι απαραίτητη για τη μελέτη σκοπιμότητας του ΚτΕ, βοηθά τους μηχανικούς να σχεδιάσουν στο πλαίσιο ενός συγκεκριμένου διαθέσιμου ποσού επένδυσης και χρησιμοποιείται στην αναζήτηση χρηματοδότησης. Συνήθως εφαρμόζεται η παραμετρική προσέγγιση εκτίμησης της δαπάνης.
- Στοιχειώδης εκτίμηση (elemental estimate): Πραγματοποιείται σε επόμενο στάδιο κατά το οποίο επιμερίζεται το έργο σε λειτουργικά στοιχεία και κοστολογείται ανεξάρτητα κάθε τμήμα του. Ο επιμερισμός αποκαλύπτει την ποσοστιαία κατανομή της συνολικής δαπάνης στα επιμέρους στοιχεία, συσχετίζει τη δαπάνη κάθε τμήματος με τη σημαντικότητά του ως μέρους του συνολικού έργου και διευκολύνει τη σύγκριση της δαπάνης του ίδιου στοιχείου σε διαφορετικά έργα.

- Εκτίμηση με τιμή μονάδας (unit price estimate): Πραγματοποιείται όταν ο αναλυτικός υπολογισμός των ποσοτήτων είναι δυνατός. Στοχεύει κυρίως στην αντικατάσταση προηγούμενων εκτιμήσεων που εμφανίζουν μικρότερη ακρίβεια, ώστε να συγκρατηθεί το έργο εντός του πλαισίου της συνολικής δαπάνης.
- Λεπτομερής εκτίμηση (detailed estimate): Βασίζεται στην ανάλυση κάθε στοιχείου με μεγαλύτερη ακρίβεια, αφού ληφθούν υπόψη όλοι οι παράγοντες που το επηρεάζουν και πραγματοποιείται συνήθως στο στάδιο της κατασκευής του έργου.

Ανάλογη κατηγοριοποίηση των εκτιμήσεων δαπάνης αναφέρεται από τον Burke (1999), ο οποίος χρησιμοποιεί τους όρους «προεκτίμηση», «συγκριτική εκτίμηση», «οριστική εκτίμηση» και «κοστολόγηση» για τους τέσσερις τύπους, με ποσοστά ακρίβειας που κυμαίνονται από $\pm 20\%$ σε $\pm 1\%$.

Ο Ritz (1994) ορίζει επίσης τέσσερις τύπους εκτίμησης της δαπάνης ενός κατασκευαστικού έργου με βάση το σκοπό της εκτίμησης. Ξεκινά από τον προσδιορισμό της βιωσιμότητας του έργου με αναμενόμενη ακρίβεια $\pm 25-30\%$ και καταλήγει στην τελική πρόβλεψη της δαπάνης με ακρίβεια $\pm 5\%$.

Πίνακας 1-2: Πίνακας κατηγοριοποίησης εκτιμήσεων κόστους σύμφωνα με την Association for the Advancement of Cost Engineering

Κατηγορία Εκτίμησης	Βασικό χαρακτηριστικό		Δευτερεύοντα χαρακτηριστικά		Προσπάθεια προετοιμασίας (τυπικός βαθμός προσπάθειας σε σχέση με τον ελάχιστο δείκτη 1)
	Επίπεδο ορισμού έργου (ως % του πλήρους)	Τελική χρήση (τυπικός σκοπός εκτίμησης)	Μεθοδολογία (Τυπική μέθοδος εκτίμησης)	Αναμενόμενο ποσοστό ακρίβειας (τυπική απόκλιση σε χαμηλό και υψηλό εύρος)	
5	0% - 2%	Επιλογή σύλληψης	Παραμετρικά μοντέλα, κρίση, αναλογία, παραμετροποίηση ποσότητας	X: -20% - -50% Y: +30% - +100%	1
4	1% - 15%	Βιωσιμότητα	Παραμετρικά μοντέλα, παραμετροποίηση εξοπλισμού	X: -15% - -30% Y: +20% - +50%	2-4
3	10% - 40%	Έγκριση προϋπολογισμού ή έλεγχος	Ημι-λεπτομερείς τιμές μονάδας	X: -10% - -20% Y: +10% - +30%	3-10
2	30% - 70%	Έλεγχος ή προσφορά	Λεπτομερείς τιμές μονάδας	X: -5% - -15% Y: +5% - +20%	4-20
1	50% - 100%	Έλεγχος εκτίμησης ή προσφοράς	Λεπτομερείς τιμές μονάδας	X: -3% - -10% Y: +3% - +15%	5-100

Πίνακας 1-3: Τύποι εκτιμήσεων δαπάνης κατά τη διάρκεια ζωής ενός έργου (Ayed 1997)

Τύπος εκτίμησης	Προκαταρκτική	Στοιχειώδης	Τιμή μονάδας	Λεπτομερής
Φάση έργου	Σύλληψη	Προκαταρκτικός Σχεδιασμός	Αναλυτικός σχεδιασμός	Κατασκευή
Διαθέσιμη πληροφορία	Περιορισμένη	—————>		Αναλυτική
Επίπεδο δυσκολίας	Υψηλό	—————>		Χαμηλό

Αναμενόμενη ακρίβεια	±20 %		±5 %
----------------------	-------	--	------

1.5 Επιλογή μεθόδου εκτίμησης δαπάνης

Οι κατηγοριοποιήσεις εκτιμήσεων δαπάνης κατασκευαστικών έργων που αναφέρθηκαν παραπάνω συνιστούν τη χρήση παραμετρικών τεχνικών στα προκαταρκτικά στάδια του έργου όπου η διαθέσιμη πληροφορία είναι περιορισμένη.

Ο Hegazy (2002) αναφέρει ότι στα αρχικά στάδια του έργου, όπου ο προϋπολογισμός προσδιορίζεται δεσμευτικά για το λήπτη της εγκριτικής απόφασης, δεν υπάρχουν οι πληροφορίες που θα επιτρέψουν αναλυτικό υπολογισμό και συνεπώς, οι τεχνικές της παραμετροποίησης είναι οι πλέον κατάλληλες. Προχωρά ακόμη στη σύγκριση των παραμετρικών εκτιμήσεων με τις αναλυτικές και καταλήγει στο ότι οι πρώτες είναι εύκολες στη χρήση, έχουν μικρό κόστος, βασίζονται σε λίγες παραμέτρους του έργου και είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τον ΚτΕ, καθώς παρέχουν στις αρχικές φάσεις της μελέτης προσεγγιστική εκτίμηση που είναι χρήσιμη για αποφάσεις σκοπιμότητας και χρηματοδότησης του έργου. Οι αναλυτικές εκτιμήσεις, αντίθετα, απαιτούν αρκετό χρόνο και πολλούς υπολογισμούς, έχουν σημαντικό κόστος, βασίζονται σε ποσότητες από προμετρήσεις και προϋποθέτουν ακριβή γνώση όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν τη δαπάνη. Ως εκ τούτου, παρέχουν ορθές προσεγγίσεις κατά τη διάρκεια της οριστικής μελέτης του έργου που είναι περισσότερες σημαντικές για την ανάδοχο εταιρεία στη

φάση του διαγωνισμού του έργου. Οι αναλυτικές μέθοδοι εκτίμησης της δαπάνης μπορεί να χρησιμοποιηθούν μόνο σε προχωρημένο στάδιο μελέτης κατά το οποίο ο σχεδιασμός του έργου είναι προχωρημένος και η διαθέσιμη πληροφορία μεγάλη. Ως εκ τούτου, δεν τυγχάνουν εφαρμογής στην παρούσα έρευνα.

Ένα παραμετρικό μοντέλο εκτίμησης δαπάνης περιλαμβάνει γενικά έναν ή περισσότερους αλγόριθμους ή σχέσεις (cost estimating relationships -CERs) που εκφράζουν τη δαπάνη ως συνάρτηση ενός ή περισσότερων φυσικών ή/και λειτουργικών χαρακτηριστικών της ή παραμέτρων που την ποσοτικοποιούν (AACE 2010). Οι αλγόριθμοι μεταφράζουν τα τεχνικά δεδομένα για ένα προϊόν σε αποτελέσματα κόστους.

Η βασική παραμετρική εξίσωση και οι σχετικές μεταβλητές πρέπει να οριστούν προτού πραγματοποιηθεί η ανάλυση για τον προσδιορισμό του μοντέλου εκτίμησης δαπάνης. Οι μεταβλητές προσδιορίζονται αφού επισημανθούν πρώτα τα χαρακτηριστικά του συστήματος που σχετίζονται άμεσα με τη δαπάνη και στη συνέχεια καθορίζεται η μαθηματική εξίσωση για την έκφραση της σχέσης. Οι παραμετρικές τεχνικές βασίζονται σε ντετερμινιστικές μεθόδους με κυριότερες την παλινδρόμηση, τα οικονομετρικά μοντέλα, τις τεχνικές κινούμενου μέσου όρου και εκθετικής προσαρμογής (Ayed 1997).

Τα παραμετρικά μοντέλα εκτίμησης δαπάνης στηρίζονται παραδοσιακά σε αναλύσεις πολλαπλής παλινδρόμησης δεδομένων από ήδη κατασκευασμένα έργα, τα οποία προσαρμόζονται στη συνέχεια ώστε να ανταποκρίνονται στις νέες συνθήκες. Η ακρίβειά τους δύναται να βελτιωθεί με τη χρήση συντελεστών απόκλισης που προκύπτουν από αναλύσεις παλινδρόμησης παλαιών δεδομένων (Hegazy 2002). Δεδομένης της ευρείας χρήσης των μοντέλων παλινδρόμησης για την προκαταρκτική εκτίμηση της δαπάνης τεχνικών έργων, όπως προκύπτει από την επισκόπηση της βιβλιογραφίας, θεωρήθηκε σκόπιμο να επιλεγεί η συγκεκριμένη μέθοδος και για το ολοκληρωμένο σύστημα προεκτίμησης της δαπάνης κατασκευής οδικών γεφυρών.

1.6 Δομή της εργασίας

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διδακτορικής διατριβής. Περιέχει σύντομη βιβλιογραφική αναφορά στις υπερβάσεις του προϋπολογισμού δαπάνης κατασκευαστικών έργων και στις διάφορες κατηγοριοποιήσεις εκτιμήσεων στη διεθνή βιβλιογραφία. Προσδιορίζονται, ακόμη, ο στόχος της έρευνας και η μεθοδολογία εκτίμησης δαπάνης που εφαρμόστηκε και παρουσιάζεται η δομή της εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στην κατασκευή των οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα και ιδιαίτερα στην ελληνική κατασκευαστική εμπειρία. Αναλύονται τα κύρια μέρη μιας γέφυρας (θεμελίωση - υποδομή – ανωδομή) και δίνεται έμφαση στις βασικές αρχές και παραμέτρους σχεδιασμού κάθε τμήματος. Παρουσιάζονται οι κύριες τεχνικές απαιτήσεις και τα στάδια σχεδιασμού της θεμελίωσης και τα τρία βασικά συστήματα που εφαρμόζονται (πέδιλα, φρέατα πάκτωσης, πάσσαλοι). Αναλύονται στη συνέχεια οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του τύπου, της διατομής και της σύνδεσης των μεσοβάθρων και περιγράφονται οι δυο βασικές μηχανοποιημένες μέθοδοι κατασκευής τους, ο ολισθαίνων και ο αναρριχόμενος ξυλότυπος. Όσον αφορά στην ανωδομή, παραθέτονται οι παράγοντες επιλογής του τύπου της γέφυρας, της διάταξης των ανοιγμάτων, της μορφής της διατομής του καταστρώματος και της μεθόδου κατασκευής. Παρουσιάζεται κατηγοριοποίηση των διαθέσιμων κατασκευαστικών μεθόδων και ανάλυση των τριών κυριότερων σύγχρονων μεθόδων κατασκευής ανωδομής που έχουν εφαρμοστεί στην Ελλάδα.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται επισκόπηση βιβλιογραφίας που αφορά στην εκτίμηση της δαπάνης οδικών γεφυρών. Αρχικά παρουσιάζονται μελέτες και έρευνες κόστους που βασίζονται σε θεωρητικά στοιχεία και περιγράφονται οι κυριότερες έρευνες βελτιστοποίησης του κόστους και του σχεδιασμού γεφυρών, καθώς και τα έμπειρα συστήματα προκαταρκτικού σχεδιασμού που έχουν αναπτυχθεί. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μελέτη του κόστους που πραγματοποίησε ο Menn, η οποία αποτελεί και τη μοναδική εργασία της βιβλιογραφίας που βασίζεται σε δείγμα πραγματικών στοιχείων από κατασκευασμένες γέφυρες. Ακολούθως, περιγράφεται η έρευνα της δαπάνης οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Παρουσιάζεται ο προτεινόμενος επιμερισμός της συνολικής δαπάνης σε εργασίες και η ποσοστιαία κατανομή της με την παράθεση της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και της μέγιστης και ελάχιστης τιμής που παρατηρήθηκαν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το βασικό πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε για τη στατιστική επεξεργασία των συλλεχθέντων στοιχείων. Γίνεται σύντομη επισκόπηση της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης, καθώς και των γενικών αρχών και παραδοχών της, ενώ περιγράφονται αναλυτικά δυο βασικά ειδικά θέματα που πρέπει να εξετάζονται για την ορθή εφαρμογή της, δηλαδή η πολυσυγγραμμικότητα και η ετεροσκεδαστικότητα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου, καθώς και σε προβληματισμούς αναφορικά με τη χρήση της παλινδρόμησης μέσω της παράθεσης περιπτώσεων που αντιπροσωπεύουν συνηθισμένα παραδείγματα λανθασμένης εφαρμογής της. Παρουσιάζονται, τέλος, παραλλαγές της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης που χρησιμοποιούνται για την

επιλογή της καλύτερης εξίσωσης, καθώς και η εφαρμογή της μεθόδου «bootstrap» στην παλινδρόμηση.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στη δημιουργία της Βάσης Δεδομένων Οδικών Γεφυρών στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Ξεκινά με τη συνοπτική περιγραφή της γενικής δομής και του τρόπου λειτουργίας των βάσεων δεδομένων και την παρουσίαση της διαδικασίας συλλογής των στοιχείων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη συνέχεια στις γέφυρες της Εγνατίας Οδού από τις οποίες αντλήθηκε το δείγμα δεδομένων και περιγράφονται τα πρότυπα σχεδιασμού γεφυρών που υιοθετήθηκαν και η διαδικασία σχεδιασμού - μελέτης και ελέγχου της κατασκευής που εφαρμόστηκε. Παρουσιάζεται στη συνέχεια αναλυτικά το πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή που αναπτύχθηκε για τη βάση δεδομένων και αναλύονται οι πίνακες που δημιουργήθηκαν, τα στοιχεία κάθε πίνακα και οι συσχετίσεις των πινάκων. Περιγράφονται, τέλος, μέσω αντιπροσωπευτικών εικόνων της εφαρμογής, η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων, διεξαγωγής αναζητήσεων και παρουσίασης των αποτελεσμάτων με αναφορές. Το πρόγραμμα βασίστηκε στην πλατφόρμα «Access» της εταιρείας «Microsoft».

Το έκτο κεφάλαιο ανταποκρίνεται στην ανάγκη για εκτιμήσεις δαπάνης των θεμελιώσεων των μεσοβάθρων γεφυρών στα αρχικά στάδια του έργου. Παρουσιάζεται ένα εννοιολογικό μοντέλο εκτίμησης δαπάνης που στηρίζεται σε πληροφορίες γνωστές πριν τον προσδιορισμό λεπτομερών σχεδίων και προδιαγραφών και περιλαμβάνει τρία διακριτά στάδια: επιλογή του συστήματος θεμελίωσης, υπολογισμό των ποσοτήτων εργασιών και υπολογισμό του κατασκευαστικού κόστους. Προτείνονται επίσης σύστημα ταξινόμησης εδαφών και έμπειρο σύστημα, τα οποία σε συνδυασμό επιτρέπουν την επιλογή του κατάλληλου τύπου θεμελίωσης. Προσδιορίζονται οι σημαντικές μεταβλητές για κάθε τύπο θεμελίωσης και παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας παλινδρόμησης με προς τα πίσω απαλοιφή για την εξέταση της συμφωνίας των αποτελεσμάτων με την άποψη ειδικών. Αναπτύσσονται με την τεχνική αυτή μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού για τους κυριότερους τύπους θεμελίωσης μεσοβάθρων. Εξετάζονται, τέλος οι βασικές υποθέσεις της ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης και τα στατιστικά στοιχεία ώστε να επιβεβαιωθεί η ισχύς και η ικανοποιητική προσαρμογή αντίστοιχα των προτεινόμενων μοντέλων και προτείνονται παραμετρικά εύρη των συντελεστών παλινδρόμησης με χρήση της μεθόδου «bootstrap».

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο εκτίμησης της δαπάνης των μεσοβάθρων και της ανωδομής οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα. Αναπτύσσονται με χρήση ανάλυσης παλινδρόμησης μοντέλα πρόβλεψης των ποσοτήτων εργασιών των μεσοβάθρων και της ανωδομής για τρεις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους κατασκευής γεφυρών. Όπως και

στην περίπτωση των θεμελιώσεων μεσοβάθρων, εξετάζονται οι βασικές υποθέσεις της ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης και τα στατιστικά στοιχεία και προτείνονται παραμετρικά εύρη των συντελεστών παλινδρόμησης με χρήση της μεθόδου «bootstrap». Δεδομένου ότι η ανωδομή παρουσιάζει τη μεγαλύτερη επίδραση στο κόστος κατασκευής μιας σύγχρονης οδικής γέφυρας από σκυρόδεμα, περιγράφεται η εφαρμογή της τεχνικής επικύρωσης με 10 μέρη (10-fold validation method) για την αξιολόγηση της απόδοσης πρόβλεψης των προτεινόμενων μοντέλων της ανωδομής και παρουσιάζεται bootstrap μέθοδος αναδιάταξης δείγματος για την εξαγωγή εύρους εκτίμησης της δαπάνης της ανωδομής. Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται σε παράδειγμα έργου.

Στο όγδοο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά το σύστημα εκτίμησης της δαπάνης κατασκευής οδικών γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα που αναπτύχθηκε στην παρούσα έρευνα. Η υλοποίηση της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε με τη γλώσσα προγραμματισμού «Java». Αναλύονται τα χαρακτηριστικά του συστήματος, οι παραδοχές του σχεδιασμού της γέφυρας και οι παραλλαγές που προσφέρονται προς επιλογή, τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου από το χρήστη και τα αποτελέσματα που εξάγονται. Η χρήση του προτεινόμενου συστήματος σε δυο παραδείγματα γεφυρών παρουσιάζεται μέσω αντιπροσωπευτικών εικόνων της εφαρμογής. Περιγράφονται αναλυτικά οι διαδικασίες εισαγωγής των δεδομένων της γέφυρας, εξαγωγής των αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών και δαπάνης κατασκευής, καθώς και προσδιορισμού του εύρους εκτίμησης.

Στο ένατο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας διδακτορικής εργασίας και προτείνονται πεδία περαιτέρω έρευνας.

2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

Το παρόν κεφάλαιο περιέχει σύντομη αναφορά στα βασικά τμήματα μιας οδικής γέφυρας από σκυρόδεμα. Περιγράφονται οι τρεις συνηθέστεροι τύποι θεμελίωσης (πέδιλα, πάσσαλοι και φρέατα), οι βασικές μηχανοποιημένες μέθοδοι κατασκευής βάθρων και οι τρεις κυριότερες σύγχρονες μέθοδοι κατασκευής ανωδομής που έχουν εφαρμοστεί στην Ελλάδα. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στους βασικούς παράγοντες σχεδιασμού κάθε τμήματος της γέφυρας και στην κατασκευαστική πρακτική στην Ελλάδα.

Η διεξοδική ανάλυση κάθε επιμέρους τύπου οδικών γεφυρών ξεπερνά το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αποσκοπεί στην περιγραφή των βασικών μεθόδων και αρχών σχεδιασμού ώστε να αποτελέσει το θεωρητικό υπόβαθρο της στατιστικής επεξεργασίας των συλλεχθέντων στοιχείων.

2.1 Κύρια μέρη γεφυρών

Οι γέφυρες αποτελούνται από δύο βασικά τμήματα που περιλαμβάνουν διάφορα επιμέρους στοιχεία - κατασκευαστικές διατάξεις, όπως παρουσιάζεται στο σχέδιο 1 του παραρτήματος IV:

- **Την ανωδομή** που περιλαμβάνει τον κύριο φορέα με το κατάστρωμα κυκλοφορίας και όλα τα επιπρόσθετα στοιχεία του που εξυπηρετούν την κίνηση, όπως:
 - Το οδόστρωμα.
 - Τις μονωτικές στρώσεις.
 - Τα πεζοδρόμια.
 - Τα στηθαία ασφαλείας.
 - Τα συστήματα αποχέτευσης του καταστρώματος.
 - Τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό.
 - Τα στοιχεία διαμόρφωσης των αρμών και τα στοιχεία στήριξης του φορέα.
- **Την υποδομή** που περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:
 - Τα εφόδρανα που διαβιβάζουν τα φορτία της ανωδομής στα βάθρα.

- Τα βάθρα (μεσόβαθρα και ακρόβαθρα) που μεταβιβάζουν τα φορτία της ανωδομής στη θεμελίωση.
- Τη θεμελίωση που μεταβιβάζει τα φορτία της ανωδομής στο έδαφος.
- Τους πτερυγότοιχους και λοιπούς τοίχους αντιστήριξης.
- Τα απαραίτητα έργα για μετάβαση από τη γέφυρα στην οδό (πλάκες πρόσβασης).
- Τα απαραίτητα έργα για την προστασία των θεμελιώσεων.

Ακολουθεί σύντομη ανάλυση των τμημάτων μιας σύγχρονης οδικής γέφυρας.

2.2 Θεμελιώσεις γεφυρών

2.2.1 Σύντομη αναφορά στις θεμελιώσεις τεχνικών έργων

Όλες οι κατασκευές μηχανικού που εδράζονται στη γη πρέπει να φέρουν ένα είδος ενδιάμεσου στοιχείου που ονομάζεται «θεμελίωση». Η θεμελίωση μεταφέρει στο υποκείμενο έδαφος τα φορτία που υποστηρίζει, καθώς και το ίδιο βάρος της. Οι προκύπτουσες πιέσεις στο έδαφος είναι επιπρόσθετες σε εκείνες που προϋφίστανται στη γήινη μάζα λόγω του ίδιου του βάρους της και της γεωλογικής της ιστορίας. Το σύστημα θεμελίωσης και η αλληλεπίδρασή του με την ανωδομή διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη συνολική στατική συμπεριφορά των γεφυρών και κατά συνέπεια, η επιλογή του συστήματος θεμελίωσης και ο σχεδιασμός – ανάλυση των συστατικών του είναι ιδιαίτερα σημαντικά (Menn 1990).

Σύμφωνα με τους Αναγνωστόπουλο και Παπαδόπουλο (1989), οι κύριες τεχνικές απαιτήσεις σε μια θεμελίωση είναι οι ακόλουθες:

- Να εδράζεται σε κατάλληλο βάθος ώστε να μην επηρεάζεται από τις διάφορες μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος ή από μελλοντική γειτονική κατασκευή.
- Να μην υφίσταται κίνδυνος αστοχίας του εδάφους.
- Να μην πραγματοποιούνται καθιζήσεις σε μέγεθος που να βλάπτουν την ανωδομή.

Εκτός από τις παραπάνω γενικές απαιτήσεις, διάφοροι ακόμη παράγοντες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό της θεμελίωσης (Bowles 1996):

- Το σύστημα θεμελίωσης πρέπει να προστατεύεται από διάβρωση και φθορά εξαιτίας επιβλαβών υλικών που βρίσκονται στο έδαφος.
- Το σύστημα θεμελίωσης πρέπει να επαρκεί για να αντιμετωπίσει μεταγενεστέρες αλλαγές στη γεωμετρία της κατασκευής και να δύναται εύκολα να τροποποιηθεί αν αλλαγές στην ανωδομή και τη φόρτιση καταστούν απαραίτητες.
- Η θεμελίωση πρέπει να δύναται να κατασκευαστεί με το διαθέσιμο προσωπικό και εξοπλισμό.

Οι θεμελιώσεις κατηγοριοποιούνται (Bowles 1996) σε επιφανειακές και βαθιές, ανάλογα με τη θέση όπου το φορτίο μεταφέρεται στο έδαφος. Το βάθος θεμελίωσης είναι μικρότερο ή ίσο με το πλάτος της στις πρώτες, ενώ το μήκος της θεμελίωσης υπερβαίνει κατά τουλάχιστον τέσσερις φορές το πλάτος της στις βαθιές θεμελιώσεις.

Οι θεμελιώσεις διαχωρίζονται σε ακόμη δυο κατηγορίες ανάλογα με το υπόβαθρο θεμελίωσης: στις θεμελιώσεις σε βραχώδεις σχηματισμούς και στις θεμελιώσεις στους εδαφικούς σχηματισμούς. Οι πρώτες παρουσιάζουν δυο βασικά χαρακτηριστικά που τις διαφοροποιούν σε σχέση με τις υπόλοιπες (Wyllie 1999). Πρώτον, ο βράχος διαθέτει την ικανότητα να αναλάβει πολύ μεγαλύτερα φορτία σε σύγκριση με το κοινό έδαφος και δεύτερον, η παρουσία ατελειών στο βράχο συντελεί στο να είναι μικρότερη η αντοχή της βραχώμαζας από εκείνη του άρρηκτου βράχου.

Τα απαραίτητα στάδια για το σχεδιασμό της θεμελίωσης ενός έργου είναι κατά σειρά τα ακόλουθα (Αναγνωστόπουλος και Παπαδόπουλος 1989):

- Η διερεύνηση του υπεδάφους.
- Ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας και η εκτίμηση των χαρακτηριστικών εδαφοτεχνικών παραμέτρων.
- Η προσέγγιση της συμπεριφοράς των εδαφικών στοιχείων και η επιλογή της κατάλληλης θεωρίας για το σχεδιασμό.
- Η συνεκτίμηση της ευαισθησίας της ανωδομής.
- Σύνθεση όλων των ανωτέρω και απόφαση για συγκεκριμένο τρόπο θεμελίωσης.
- Σε έργα μεγάλης κλίμακας απαιτείται επιπλέον και η παρακολούθηση της συμπεριφοράς του έργου μετά την κατασκευή του.

Οι φορτίσεις των θεμελιώσεων κτιριακών έργων επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από αρχιτεκτονικούς παράγοντες, όπως τον αριθμό των ορόφων, την ύπαρξη υπόγειων επιπέδων και την απόσταση των υποστυλωμάτων. Στις περιπτώσεις όμως των γεφυρών (Tomlinson 1995), οι επιβαλλόμενες φορτίσεις από την κυκλοφορία οχημάτων είναι κυρίαρχες και αποτελούν κινητά φορτία που προκαλούν σημαντικές διαμήκεις δυνάμεις στο κατάστρωμα. Διαμήκεις δυνάμεις προκαλούνται ακόμη από τη συστολή / διαστολή του καταστρώματος λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, ενώ εγκάρσιες δυνάμεις προκαλούνται από φορτίσεις ανέμου, καθώς και από δυνάμεις κυμάτων και σύγκρουσης σκαφών στις περίπτωση ποτάμιων ή θαλάσσιων γεφυρών. Οι σεισμικές δυνάμεις μεταφέρονται από το έδαφος στις στηρίξεις της γέφυρας σε κάθε κατεύθυνση, ενώ πρόσθετες φορτίσεις δύνανται να εφαρμοστούν και κατά τη διάρκεια της κατασκευής, όπως στην περίπτωση γεφυρών που κατασκευάζονται με τη μέθοδο της προβολοδόμησης ή στην περίπτωση που συναρμολογούνται στο έδαφος και ανυψώνονται στη συνέχεια. Παράλληλα, ο μελετητής γεφυρών διαθέτει περιορισμένη δυνατότητα επιλογής του τύπου κατασκευής ώστε να εκμεταλλευτεί ευνοϊκές εδαφικές συνθήκες. Οι οδικές γέφυρες κατασκευάζονται συνήθως σε συγκεκριμένες θέσεις για να εξυπηρετούν συνδέσεις με υφιστάμενους δρόμους. Οι γέφυρες πάνω από ποτάμια και θάλασσες τοποθετούνται σε θέση ώστε να γεφυρώνουν το μικρότερο μήκος της διάβασης, είτε σε θέση όπου η ροή του νερού έχει μετατοπισθεί με μηχανικά μέσα. Κατά συνέπεια, ο μελετητής της θεμελίωσης γεφυρών πρέπει να αντιμετωπίσει τόσο τη μεγάλη ποικιλία γεωλογικών συνθηκών και προβλημάτων, όσο και το πλήθος και την πολυπλοκότητα των φορτίσεων.

Οι κυριότεροι τύποι θεμελίωσης που εφαρμόζονται στις οδικές γέφυρες είναι:

- α) Επιφανειακή θεμελίωση με πέδιλα και
- β) Βαθιά θεμελίωση με πασσάλους ή φρέατα πάκτωσης.

Ακολουθεί σύντομη ανάλυση των παραπάνω τύπων θεμελίωσης.

2.2.2 Επιφανειακή θεμελίωση - πέδιλα (spread foundation)

Η επιφανειακή θεμελίωση αποτελεί τον πιο απλό και οικονομικό τύπο θεμελίωσης (Menn 1990). Δύναται να χρησιμοποιηθεί όταν ένα ικανό στρώμα εδάφους ή βράχου βρίσκεται σχετικά κοντά στην επιφάνεια, διαθέτει επαρκή φέρουσα ικανότητα και είναι προσβάσιμο για κατασκευή. Η επιφανειακή θεμελίωση παρουσιάζεται περισσότερο ευάλωτη σε διάβρωση ή κατολίπηση του πρανούς της κοιλιάδας και επομένως, το βάθος της θεμελίωσης πρέπει να βρίσκεται χαμηλότερα από το μέγιστο βάθος της διείδυσης του πάγου, ενώ η άνω επιφάνειά της

πρέπει να βρίσκεται τουλάχιστον 0.50 μ. χαμηλότερα από την τελική διαμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους.

Η επιφανειακή θεμελίωση πρέπει να εξασφαλίζει την αποφυγή υπερβολικών μετακινήσεων, ανατροπής της ανωδομής και υπέρβασης των τάσεων του εδάφους. Η ευστάθεια έναντι ανατροπής διαδραματίζει ιδιαίτερο ρόλο για τα μεσόβαθρα κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους, ενώ η ευστάθεια του πρανούς θα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη στο σχεδιασμό επιφανειακών θεμελιώσεων που βρίσκονται σε επικλινές έδαφος. Στις περιπτώσεις που οι επιφανειακές θεμελιώσεις δεν κρίνονται κατάλληλες για τις δεδομένες γεωτεχνικές συνθήκες χρησιμοποιούνται βαθιές θεμελιώσεις, όπως πάσσαλοι και φρέατα πάκτωσης.

Όσον αφορά στην κατασκευή των επιφανειακών θεμελιώσεων, γίνεται εκσκαφή μέχρι το επιθυμητό βάθος και στη συνέχεια διαστρώνεται σκυρόδεμα καθαριότητας για τη διαμόρφωση της επιφάνειας εργασίας. Αν το έδαφος είναι αργιλικό, προηγείται στρώση χαλίκων. Μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος καθαριότητας, τοποθετείται ο οπλισμός του πεδύλου και περικλείεται από μεταλλότυπο ή ξυλότυπο. Ακολουθεί η σκυροδέτηση, η σκλήρυνση του σκυροδέματος, η απομάκρυνση του τύπου και η επίστρωση μονωτικού υλικού. Κατόπιν το πέδιλο επιχώνεται ή προστατεύεται με λιθόδεμα, αν βρίσκεται εντός κοίτης ποταμού και δημιουργείται μια νέα επιφάνεια εργασίας. Εφόσον κριθεί αναγκαίο, είναι δυνατή η πραγματοποίηση τσιμεντενέσεων για την ενίσχυση του εδάφους κάτω από το θεμέλιο, οι οποίες μπορεί να πραγματοποιηθούν πριν ή μετά τη σκυροδέτηση του πεδύλου, αλλά και κατά την ανέγερση των μεσοβάθρων.

Χαρακτηριστικές επιφανειακές θεμελιώσεις μεσοβάθρων οδικών γεφυρών παρουσιάζονται στα σχέδια 2 και 3 του παραρτήματος IV. Το σχέδιο 3 περιγράφει την κατασκευή ενιαίου πεδύλου για τα βάθρα και των δυο κλάδων της γέφυρας.

2.2.3 Φρέατα (sockets – shafts)

Φρέαρ πάκτωσης ονομάζεται η θεμελίωση στην οποία ο λόγος του βάθους θεμελίωσης προς τη διάμετρο κυμαίνεται από 1 έως 5 (Γκαζέτας 1998). Η κατασκευή φρεάτων απαιτείται όταν τα φορτία σε μεμονωμένες θεμελιώσεις είναι πολύ μεγάλα και οι επιτρεπόμενες μετακινήσεις πολύ μικρές ή όταν η προσβάσιμη επιφάνεια δεν έχει επαρκή φέρουσα ικανότητα (Wyllie 1999). Τα φρέατα κατασκευάζονται σε βάθος όπου αδιάρρηκτος (sound) βράχος δύναται να αναλάβει τα φορτία της γέφυρας. Οι διαστάσεις και η μορφή του φρεάτος επιλέγονται ελεύθερα από το μελετητή. Η διάμετρός του πρέπει όμως να επιτρέπει τη μηχανική εκσκαφή ή

την εκσκαφή με εκρηκτικά. Σύμφωνα με την Ελληνική κατασκευαστική εμπειρία, στις περισσότερες περιπτώσεις επιλέγεται κυκλική διατομή.

Τα φρέατα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που μεταφέρουν τα φορτία από την ανωδομή στο έδαφος (Wyllie 1999):

- Φρέατα αιχμής, τα οποία μεταφέρουν το φορτίο από το βάθρο στο έδαφος μέσω της αιχμής στο βάθος του φρέατος. Τα τοιχώματα εξυπηρετούν κυρίως την αντιστήριξη της εκσκαφής.
- Φρέατα τριβής, τα οποία μεταφέρουν σημαντικό μέρος του φορτίου μέσω της τριβής των τοιχωμάτων.

Η φέρουσα ικανότητα των φρεάτων θεμελίωσης συνδυάζει στις περισσότερες περιπτώσεις τη δύναμη τριβής στα τοιχώματα της περιφέρειας του φρέατος με τη δύναμη αιχμής στο βάθος του φρέατος.

Η διάνοιξη μεγάλων φρεάτων σε βράχο είναι δαπανηρή και επομένως καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική η ελαχιστοποίηση της διαμέτρου και του βάθους του φρέατος. Η προσεκτική ανάλυση των εδαφικών συνθηκών είναι απαραίτητη ώστε να προσδιοριστεί το βάθος του σταθερού βραχώδους υποβάθρου και η ποιότητά του. Σημαντική θεωρείται ακόμη η αναγνώριση προβληματικών γεωλογικών συνθηκών, όπως ζωνών θραυσμένου - ασθενούς βράχου και «φλεβών» πληρωμένων με αργιλικό υλικό. Η στάθμη των υπόγειων υδάτων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες κατασκευής του φρέατος. Το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα προσδιορίζει κατά πόσο το φρέαρ θα είναι στεγνό, ενώ η διαπερατότητα του βράχου προσδιορίζει κατά πόσο υγρά φρέατα μπορεί να μετατραπούν σε στεγνά με άντληση υδάτων και υποβιβασμό του υδροφόρου ορίζοντα.

Η μέθοδος κατασκευής των φρεάτων προσομοιάζει (Γκαζέτας 1998):

- Είτε με την κατασκευή εκσκαπτόμενου πασσάλου στις περιπτώσεις σκληρών εδαφών και βραχώδων σχηματισμών.
- Είτε με την κατασκευή καταδύομενου κιβωτίου στα πολύ μαλακά εδάφη.

Στην πρώτη περίπτωση εκσκάπτεται φρέαρ με διατομή μεγαλύτερη ή ίση της διατομής του μεσοβάθρου. Οι διαδοχικές φάσεις κατασκευής είναι οι παρακάτω :

- Δημιουργία επιφάνειας εργασίας με επιφανειακές εκσκαφές.
- Τμηματική εκσκαφή με χρήση εκρηκτικών ή με κασμά και φτυάρι.

- Πιθανή προσωρινή προστασία και αντιστήριξη των παρειών της εκσκαφής (χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, παθητικών αγκυρίων, δακτυλιωτούς αντιστήριξης).
- Όπλιση φρέατος μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής.
- Σκυροδέτηση φρέατος χωρίς καλούπι σε μία φάση. Σκυροδετείται και το επιπλέον τμήμα που εκσκάπηκε πέραν της θεωρητικής διαμέτρου του φρέατος («Ενεργό φρέαρ»).

Στην περίπτωση του καταδυόμενου κιβωτίου, κατασκευάζονται πρισματικά ή κυλινδρικά αλληλοϋπερτιθέμενα τεμάχια ύψους ενός έως πέντε μέτρων. Μετά την κατάδυση του φρέατος, τοποθετείται υλικό πληρώσεως από στρογγυλούς χάλικες ή γαλάκτωμα μπετονίτη.

Τα φρέατα πάκτωσης παρουσιάζουν γενικά τα ακόλουθα πλεονεκτήματα (Menn 1990; Γκαζέτας 1998):

- Το έδαφος είναι πλήρως προσβάσιμο και εμφανές για οπτική επιθεώρηση σε όλο το βάθος της θεμελίωσης (παρειές και βάση) κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Επομένως μπορεί να γίνει έλεγχος, επιβεβαίωση και αναθεώρηση των παραδοχών των γεωτεχνικών μελετών και εντοπισμός των απρόβλεπτων καταστάσεων που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία.
- Το οριστικό βάθος της θεμελίωσης μπορεί να προσδιοριστεί κατά τη διάρκεια της κατασκευής ώστε να ανταποκρίνεται στις πραγματικές εδαφικές συνθήκες που συναντήθηκαν.
- Το φρέαρ χρησιμοποιείται αντί ομάδας πασσάλων σε περίπτωση μεγάλων τιμών τεμνουσών δυνάμεων και ροπών. Άρα, επιτυγχάνεται οικονομία απαιτούμενου μηχανολογικού εξοπλισμού και διαθέσιμου χώρου προσβάσεων, ενώ απαιτούνται μικρότερη επιφάνεια εργασίας και λιγότερες εκσκαφές για τη δημιουργία της. Το παραπάνω γεγονός αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα ιδιαίτερα σε επικλινή πρανή, όπου θα απαιτούνταν μεγάλες και δαπανηρές εκσκαφές για τη δημιουργία της επιφάνειας εργασίας. Αποφεύγεται, τέλος, ο κεφαλόδεσμος, ο οποίος θα οδηγούσε σε επιπλέον εκσκαφές.
- Οι οριζόντιες σεισμικές δράσεις αντιμετωπίζονται με προεντεταμένη αγκύρωση των φρεάτων σε επισφαλή ολισθαίνοντα πρανή. Με τα φρέατα αποφεύγεται και η μεγάλη διατάραξη πρανών επικίνδυνων σε ολίσθηση.

- Παρέχεται η δυνατότητα αύξησης της πλευρικής τριβής και δημιουργίας τραχείας επιφάνειας με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Για τη δημιουργία ανώμαλης διεπιφάνειας χρησιμοποιούνται πολλές φορές και βλήτρα.
- Χρησιμοποιείται πολλές φορές ελλειψοειδής διατομή φρέατος για την αύξηση της ροπής αντίστασης της διατομής.

Χαρακτηριστικές περιπτώσεις φρεάτων θεμελίωσης μεσοβάθρων οδικών γεφυρών παρουσιάζονται στα σχέδια 4-7 του παραρτήματος IV. Τα σχέδια περιέχουν κατακόρυφες και οριζόντιες τομές φρεάτων, στα οποία η αντιστήριξη των πρικών εκσκαφής επιτυγχάνεται είτε με αγκύρια πάκτωσης είτε με μικροπασσάλους.

2.2.4 Θεμελιώσεις με πασσάλους (piles)

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών συστημάτων πασσάλων για να καλύπτει τη μεγάλη ποικιλία των δυνατών εδαφικών συνθηκών. Οι πάσσαλοι χρησιμοποιούνται για βαθιές θεμελιώσεις όταν το έδαφος δεν είναι ευαίσθητο σε οριζόντιες μετακινήσεις και όταν διατίθεται ικανοποιητική πρόσβαση στα μηχανήματα κατασκευής. Οι πάσσαλοι κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Menn 1990; Αναγνωστόπουλος 1990) :

- Παραγωγή: Προκατασκευασμένοι ή επί τόπου έγχυτοι.
- Τοποθέτηση: Εμπηγνύομενοι (με εκτόπιση εδαφικού υλικού) ή με εκσκαφή.
- Μεταφορά φορτίου: Αιχμή βάσης ή τριβή.

Οι προκατασκευασμένοι πάσσαλοι κατασκευάζονται από ξύλο, σίδηρο ή σκυρόδεμα. Οι διαστάσεις τους περιορίζονται από το διαθέσιμο εξοπλισμό για τη μεταφορά και τοποθέτησή τους και, κατά συνέπεια, η δυνατότητα ανάληψης φορτίων είναι περιορισμένη.

Οι επί τόπου έγχυτοι πάσσαλοι προσφέρουν μεγάλη δυνατότητα ανάληψης φορτίου, δεδομένου ότι το μήκος τους είναι πρακτικά πολύ μεγάλο.

Οι εμπηγνύομενοι πάσσαλοι (Tomlinson 1995; Αναγνωστόπουλος 1990) χρησιμοποιούνται όταν το έδαφος δεν περιέχει εμπόδια για την έμπηξη. Η έμπηξη επιτυγχάνεται με δόνηση, επαφή ή κρούση. Οι παρακείμενες εδαφικές επιφάνειες συμπιέζονται από τη μετακίνηση του εδάφους και τη δόνηση και διαταράσσονται, ενώ υπάρχει πιθανότητα ανύψωσης των γειτονικών πασσάλων μέσω της δημιουργίας εφελκυστικών τάσεων. Οι πάσσαλοι, ακόμη, μπορεί να υποστούν φθορές και ρωγμές κατά τη διάρκεια της έμπηξης προκαλώντας καθυστερήσεις και επομένως, απαιτείται έλεγχος της ακεραιότητας όλων των πασσάλων κατά

την κατασκευή του συστήματος θεμελίωσης. Η διαδικασία έμπηξης, τέλος, προκαλεί θόρυβο και εκτεταμένη όχληση.

Στους πασσάλους με εκσκαφή, ένας ίσος όγκος εδάφους αφαιρείται πριν την τοποθέτηση. Αποφεύγεται, συνεπώς, η διατάραξη του παρακείμενου εδάφους, ενώ το μήκος των πασσάλων δύναται να καθορισθεί και κατά τη διάρκεια της κατασκευής, δεδομένου ότι λαμβάνεται συνεχών δείγμα του εκσκαπόμενου υλικού. Η κατασκευή πραγματοποιείται χωρίς δυνατό θόρυβο ή δόνηση και ασκείται μικρή επίδραση στις παρακείμενες κατασκευές, ενώ το υλικό του πασσάλου δεν εξαρτάται από τις δυνατότητες μεταφοράς και τοποθέτησης. Όσον αφορά τα μειονεκτήματα των πασσάλων με εκσκαφή, η διαδικασία διάτρησης μπορεί να χαλαρώσει τα κοκκώδη εδάφη και τους ημίβραχους, ενώ η σκυροδέτηση δεν πραγματοποιείται κάτω από ιδανικές συνθήκες, ούτε μπορεί να επιθεωρηθεί επισταμένως. Αντιμετωπίζονται, ακόμη, δυσκολίες για τη σκυροδέτηση του πασσάλου κάτω από νερό και την επίτευξη της προδιαγεγραμμένης ποιότητας σκυροδέματος. Επομένως, κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος της ακεραιότητας του πασσάλου.

Οι πάσσαλοι τριβής μεταφέρουν το φορτίο από την κατασκευή στο έδαφος βασικά μέσω της τριβής και ως εκ τούτου, ο υψηλός συντελεστής τριβής μεταξύ του εδάφους και της επιφάνειας του πασσάλου είναι απαραίτητος για την επιτυχή λειτουργία τους. Εάν το εδαφικό υλικό στο βάθος του πασσάλου είναι σκληρό και σχετικά αδιαπέραστο, όπως βράχος ή πολύ πυκνή άμμος, ο πάσσαλος αποκτά το μεγαλύτερο μέρος της δυνατότητας ανάληψης φορτίου από την αντίσταση στο βάθος του και ονομάζεται πάσσαλος αιχμής. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις, το φορτίο μεταφέρεται στο έδαφος με συνδυασμό αιχμής και τριβής.

Εκτός από την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ένας μόνο πάσσαλος, είναι απαραίτητος κεφαλόδεσμος για τη μεταφορά των κάθετων και οριζόντιων φορτίων σε όλους τους πασσάλους της ομάδας. Ο κεφαλόδεσμος κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα πάνω από τον κάρνα των πασσάλων. Ο σχεδιασμός του λαμβάνει υπόψη τις δυνάμεις και τις ροπές των μεσοβάθρων – υποστυλωμάτων, το υπερκείμενο έδαφος όταν κατασκευάζεται κάτω από την τελική διαμορφωμένη επιφάνεια και το ίδιο το βάρος του (Bowles 1996).

Κατασκευαστικά, ο κεφαλόδεσμος δεν παρουσιάζει διαφορές με την περίπτωση του πεδίου επιφανειακής θεμελίωσης. Καταρχήν διαστρώνεται σκυρόδεμα καθαριότητας, στη συνέχεια τοποθετείται ο οπλισμός και τελικά εκτελείται η σκυροδέτηση, αφού χρησιμοποιηθεί ο κατάλληλος μεταλλότυπος ή ξυλότυπος. Μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος απομακρύνεται ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε και πραγματοποιείται η επίστρωση του κεφαλόδεσμου με

μονωτικό υλικό. Ο κεφαλόδεσμος επιχώνεται ή προστατεύεται με λιθόδεμα αν βρίσκεται εντός κοίτης ποταμού.

Το σχέδιο 8 του παραρτήματος IV παρουσιάζει μια τυπική θεμελίωση μεσοβάθρου οδικής γέφυρας με πασσάλους. Περιλαμβάνει την κάτοψη της θεμελίωσης, χαρακτηριστικές τομές, καθώς και τον οπλισμό του πασσάλου.

2.3 Μεσόβαθρα γεφυρών

Τα μεσόβαθρα (θα αναφέρονται ως «βάθρα» στη συνέχεια) παρέχουν κάθετες στηρίξεις σε ενδιάμεσα σημεία στα ανοίγματα και εκτελούν δυο βασικές λειτουργίες (Chen and Duan 1999):

- Μεταφέρουν κάθετα φορτία από την ανωδομή στη θεμελίωση και
- Ανθίστανται στις οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται στη γέφυρα.

Μολονότι τα βάθρα παραδοσιακά σχεδιάζονται ώστε να αντέχουν στα κάθετα φορτία, ολοένα και περισσότερο επικρατεί να καθορίζεται ο σχεδιασμός τους από την αντοχή σε υψηλές πλευρικές φορτίσεις από σεισμικές δράσεις.

Η επιλογή του τύπου του βάθρου βασίζεται σε στατικές, γεωμετρικές και λειτουργικές απαιτήσεις. Εξαρτάται μεταξύ άλλων από τον τύπο της ανωδομής, το ύψος του βάθρου, τη χρήση της γέφυρας (οδική ή σιδηροδρομική) και το είδος του εμποδίου που γεφυρώνεται (για παράδειγμα στην περίπτωση μιας γέφυρας πάνω από ποτάμι ή θάλασσα, πρέπει να προβλεφθεί το βάθρο να αντέχει σε πρόσκρουση σκάφους) (Chen and Duan 1999). Η επιλογή της μορφής των βάθρων πρέπει να ικανοποιεί απαιτήσεις αισθητικής, αλλά ταυτόχρονα να προσφέρει επαρκή αντοχή για την ανάληψη της αναμενόμενης έντασης και να δύναται να κατασκευασθεί με μια από τις σύγχρονες κατασκευαστικές μεθόδους. Οι τύποι των βάθρων καθορίζονται σε πολλές περιπτώσεις από τις κυβερνητικές υπηρεσίες και τους κύριους των έργων μέσω των προδιαγραφών τυπικών διατομών (ιδίως στις υπηρεσίες μεταφορών των Η.Π.Α.).

Ένας μεγάλο πλήθος διατομών δύναται να εφαρμοσθεί για τα μεσόβαθρα γεφυρών. Οι διάκενες διατομές χρησιμοποιούνται για ψηλά βάθρα ώστε να μειώνεται το βάρος τους και κατ'επέκταση η απαίτηση ανάληψης φορτίων από τις θεμελιώσεις. Βάθρα με μονά υποστυλώματα διευκολύνουν τη μελέτη και την κατασκευή, αλλά εμφανίζουν αρκετά μειονεκτήματα όπως υψηλή ροπή στη βάση, υψηλές σεισμικές δράσεις στη θεμελίωση και υψηλές μετατοπίσεις του καταστρώματος. Τα βάθρα με πολλαπλά υποστυλώματα προσφέρουν μικρότερες μετατοπίσεις στη στάθμη του καταστρώματος, ειδικά στη διαμήκη κατεύθυνση και

ανακατανομή των δράσεων μεταξύ των υποστυλωμάτων. Ωστόσο, η ανταπόκρισή τους στις σεισμικές δράσεις είναι περισσότερο πολύπλοκη και επομένως πιο δύσκολο να προβλεφθεί (Ryall et al. 2000).

Σύμφωνα με τους Chen and Duan (1999), τα βάθρα με συμπαγείς τοίχους χρησιμοποιούνται κυρίως στις διαβάσεις ποταμών, καθώς προσφέρουν ικανοποιητική αντοχή στις υδάτινες ροές. Τα ορθογωνικά βάθρα με διεύρυνση στο άνω τμήμα τους εφαρμόζονται συνήθως σε αστικές περιοχές στις οποίες ο περιορισμός του χώρου που καταλαμβάνεται από αυτά αποτελεί βασική απαίτηση. Έχουν ευρύτατα εφαρμοστεί για τη στήριξη μεταλλικών καταστροφμάτων και ανωδομών προεντεταμένου σκυροδέματος. Είναι αισθητικώς ικανοποιητικά, καταλαμβάνουν γενικά λιγότερο χώρο και διευκολύνουν την κίνηση οχημάτων κάτω από τη γέφυρα. Αρκετά βάθρα αποτελούν επεκτάσεις των πασσάλων θεμελίωσης και περιλαμβάνουν κυκλικά υποστυλώματα που επεκτείνονται από τη θεμελίωση μέχρι το κατάστρωμα. Βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι η κατάληψη ελάχιστου χώρου.

Δεδομένου ότι τα βάθρα παρουσιάζουν κυρίαρχη επίδραση στην εμφάνιση και αισθητική των γεφυρών, η αισθητική αποτελεί σημαντικό παράγοντα σχεδιασμού τους. Η βελτίωση της διαπερατότητας – διαφάνειας αποτελεί τη βασική αισθητική λειτουργία των βάθρων, ενώ η επίδρασή τους στο κόστος κατασκευής των γεφυρών είναι μικρή (Menn 1990). Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μέσο ύψος τους είναι μικρότερο από 30.00 μέτρα, η ανέγερσή τους αντιπροσωπεύει λιγότερο από 5% του συνολικού κόστους κατασκευής της γέφυρας. Συμπερασματικά, το επιπρόσθετο κόστος για τη δημιουργία αισθητικά ικανοποιητικών διατομών είναι μικρό και είναι προτιμότερο να επιλέγονται διατομές για τα βάθρα με βάση θεωρήσεις αισθητικής παρά με κριτήρια οικονομίας.

Η διαπερατότητα της κατασκευής μεγιστοποιείται όταν το πλάτος του βάθρου είναι μικρό σε σχέση με το πλάτος του καταστρώματος. Βάθρα με μονά υποστυλώματα είναι συνεπώς προτιμότερα. Εξαιρεση αποτελούν οι χαμηλές γέφυρες μεγάλου πλάτους, στις οποίες πρέπει να χρησιμοποιούνται δυο λεπτά υποστυλώματα (Menn 1990).

Η σύνδεση των βάθρων με την ανωδομή είναι είτε μονολιθική, είτε με εφένδρανα (Ryall et al. 2000). Η μονολιθική κατασκευή χρησιμοποιείται συνήθως για λεπτά υποστυλώματα και μικρές γέφυρες. Η συγκεκριμένη διάταξη προσφέρει μεγαλύτερη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, αλλά οδηγεί στη μετάδοση υψηλών ροπών στο κατάστρωμα οι οποίες προστίθενται στις ροπές από τις δυνάμεις βαρύτητας. Οι θερμοκρασιακές μεταβολές επιβάλλουν μεγάλες διαμήκεις μετατοπίσεις στα μονολιθικά συστήματα και επομένως απαιτούνται μικρά ανοίγματα μεταξύ των αρμών διαστολής. Η δεύτερη εναλλακτική μορφή σύνδεσης των βάθρων με την

ανωδομή πραγματοποιείται με τη χρήση εφεδράνων που επιτρέπουν έναν ή περισσότερους βαθμούς ελευθερίας. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης εφεδράνων είναι το γεγονός ότι το κατάστρωμα δεν υπόκειται σε σεισμικές δράσεις. Η χρήση εφεδράνων όμως εμφανίζει και μειονεκτήματα, όπως η επιμήκυνση της περιόδου της κατασκευής σε περιοχές με μαλακά εδαφικά στρώματα που υπόκεινται σε μεγάλους σεισμούς. Η γέφυρα ακόμη υπόκειται σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις λόγω της χρήσης εφεδράνων σε σχέση με την αντίστοιχη μονολιθική σύνδεση.

Τα βάθρα κατασκευάζονται κυρίως από οπλισμένο σκυρόδεμα. Μολονότι η κατασκευή τους απλοποιείται σημαντικά με τη χρήση σταθερής διατομής, οι παραβολικές διατομές που αντιστοιχούν στο διάγραμμα ροπών είναι προτιμότερες για πολύ ψηλά βάθρα (Menn 1990). Η μέθοδος του ολισθαίνοντος και του αναρριχόμενου ξυλοτύπου αποτελούν τις δυο βασικές μηχανοποιημένες μεθόδους κατασκευής των βάθρων.

Τα σχέδια 9-12 του παραρτήματος IV παρουσιάζουν χαρακτηριστικές περιπτώσεις μεσοβάθρων γεφυρών της Εγνατίας Οδού. Περιλαμβάνουν εγκάρσιες, οριζόντιες και κατά μήκος τομές στις οποίες αποτυπώνεται και η μόνωση με ασφαλική απάλωση που εφαρμόζεται στο τμήμα του βάθρου κάτω από τη στάθμη του φυσικού εδάφους. Τα σχέδια 9 και 10 παρουσιάζουν μεσόβαθρα με διάκενες ορθογωνικές διατομές, το σχέδιο 11 μονόστυλο συμπαγές βάθρο κυκλικής διατομής και το σχέδιο 12 συμπαγές βάθρο ορθογωνικής διατομής.

2.3.1 Μέθοδος ολισθαίνοντος ξυλοτύπου (sliding formwork)

Κατά τη μέθοδο αυτή (Σιγάλας 1998), η καθ' ύψος κατασκευή του βάθρου προχωρά με μικρά αλλά συνεχή βήματα, κατά τα οποία το τυπικό τμήμα του ξυλοτύπου ανελκύεται με τη βοήθεια ανυψωτικού συστήματος που περιλαμβάνει γρύλους, ράβδους ανύψωσης και πλαίσιο ανάρτησης. Το σύστημα συμπληρώνεται από τμήμα ξυλοτύπου, δάπεδα εργασίας, διαδρόμους επιθεώρησης και στηθαία ασφαλείας.

Οι εργασίες εκτελούνται χωρίς διακοπή σε 24ώρη βάση. Η ανέλκυση ξεκινά όταν το σκυρόδεμα που έχει ήδη χυτευθεί αποκτήσει επαρκή αντοχή. Η ταχύτητα ανέλκυσης πρέπει να διατηρείται σταθερή καθόλο το 24ωρο, ενώ οι ρυθμοί τοποθέτησης του οπλισμού και σκυροδέτησης οφείλουν να ακολουθούν το ρυθμό της ανέλκυσης. Η σκυροδέτηση πραγματοποιείται ομοιόμορφα κατά μήκος της περιμέτρου του βάθρου σε πάχη 20 έως 30 εκατοστών, ενώ η δόνηση γίνεται αποκλειστικώς με εσωτερικούς δονητές. Η επιφάνεια του αποκαλυπτόμενου σκυροδέματος παρακολουθείται από εξειδικευμένο προσωπικό και οι μικροατέλειες που προκαλούνται από την ολίσθηση του καλουπιού πρέπει να επιδιορθώνονται.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ρυθμοί σκυροδέτησης που επιτυγχάνονται κυμαίνονται από 3 έως 5 μέτρα ανά ημέρα, ενώ το βήμα ολίσθησης του ξυλοτύπου είναι 2.5 εκατοστά ανά 5 έως 15 λεπτά. Μικροδιακοπές της ολίσθησης είναι αποδεκτές. Μεγαλύτερες διακοπές όμως (π.χ. για μάτισμα οπλισμών) απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην μπλοκάρει το καλούπι. Απρόβλεπτες διακοπές, π.χ. μίας ημέρας, απαιτούν ειδική επεξεργασία του αρμού διακοπής.

Η μέθοδος του ολισθαίνοντος ξυλοτύπου εμφανίζει αρκετές ειδικές απαιτήσεις. Η συνεχής πρόοδος των εργασιών προϋποθέτει υψηλή ποιότητα κατασκευής. Κρίνεται ακόμη απαραίτητη η λεπτομερής εξέταση των ειδικών συνθηκών του έργου, όπως των καιρικών συνθηκών, των ανέμων και των προσβάσεων παροχής ενέργειας, ενώ πρέπει να εξασφαλίζεται ο απαραίτητος ρυθμός παραγωγής και μεταφοράς του σκυροδέματος. Τέλος, απαιτείται λεπτομερής μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος και του ρυθμού ανάπτυξης των αντοχών του. Σύμφωνα με τα παραπάνω, καθίσταται αναγκαία η παρουσία έμπειρου προσωπικού σε 24ώρη βάση.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου του ολισθαίνοντος ξυλοτύπου είναι τα ακόλουθα:

- Ακρίβεια στην κατασκευή.
- Μονολιθικότητα.
- Ταχύτητα.
- Ποικιλία μορφών.
- Οικονομία για ύψη βάθρων μεγαλύτερα των 30 μέτρων.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Υψηλό επίπεδο οργάνωσης και συντονισμού.
- Σημαντικός βοηθητικός εξοπλισμός.
- Έμπειρο προσωπικό.
- Εργασία και πέρα από τις συνήθεις συνθήκες (24ώρη εργασία ανεξαρτήτως από καιρικές συνθήκες).
- Κοινωνικά προβλήματα από τη συνεχή εργασία.

2.3.2 Μέθοδος αναρριχόμενου ξυλοτύπου (climbing formwork)

Σύμφωνα με τη μέθοδο του αναρριχόμενου ξυλοτύπου (Σιγάλας 1998), η σκυροδέτηση κάθε επιμέρους τμήματος βάθρου γίνεται εντός ξυλοτύπου καταλλήλου ύψους (3.00 μέτρα έως 6.00 μέτρα). Τα τμήματα του ξυλοτύπου αποσυναρμολογούνται μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος, προωθούνται (αναρριχώνται) στην επόμενη στάθμη και επανασυνδέονται. Η κίνηση του ξυλοτύπου είναι ασυνεχής σε αντίθεση με τη μέθοδο του ολισθαίνοντος ξυλοτύπου και η ανύψωση γίνεται με οικοδομικούς γεραμούς ή με ειδικούς μηχανισμούς προσαρτημένους στο σύστημα (αυτοαναρρίχηση). Η ανάπτυξη των αυτοαναρριχόμενων συστημάτων συνέβαλλε στην ανεξαρτητοποίηση της μεθόδου από τους περιορισμούς ύψους εξυπηρέτησης των γεραμών, με αποτέλεσμα η μέθοδος του αναρριχόμενου ξυλοτύπου να συναγωνίζεται τη μέθοδο του ολισθαίνοντος ξυλοτύπου σε όλο το εύρος υψών βάθρων και να τείνει να την αντικαταστήσει.

Το σύστημα περιλαμβάνει δύο πανομοιότυπες διατάξεις για την εξωτερική και εσωτερική πλευρά του σκυροδετούμενου στοιχείου. Η διάταξη κάθε πλευράς αποτελείται από τμήμα ξυλοτύπου και φορείο εργασίας δικτυωτής διάταξης με ρυθμιζόμενα μέλη. Τα δάπεδα, οι διάδρομοι εργασίας και οι διατάξεις καθοδήγησης είναι προσαρτημένα στο φορείο. Το σύστημα στηρίζεται επί των ήδη σκυροδετηθέντων τμημάτων με διατάξεις αγκύρωσης που ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα.

Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, η κατασκευαστική διαδικασία δεν επιβάλλει συγκεκριμένες δεσμεύσεις. Η μέθοδος επιτρέπει εύκολη διαμόρφωση σύνθετων διατομών, υψηλή ποιότητα σκυροδέματος, άριστο επιφανειακό τελείωμα και προσαρμογή του ρυθμού εργασιών σε μικρότερη ένταση. Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι οι αρμοί διακοπής των εργασιών και ο αργός ρυθμός προόδου. Ο τυπικός κύκλος εργασιών για την κατασκευή τμήματος μεσοβάθρου μήκους 3.00 έως 5.00 μέτρων διαρκεί στις περισσότερες περιπτώσεις 4 έως 6 ημέρες.

2.3.3 Σύγκριση μεθόδων ολισθαίνοντος και αναρριχόμενου ξυλοτύπου

Πίνακας 2-1: Σύγκριση μεθόδων ολισθαίνοντος και αναρριχόμενου ξυλοτύπου (Φραγκάκης 2000)

Μέθοδος ολισθαίνοντος ξυλοτύπου	Μέθοδος αναρριχόμενου ξυλοτύπου
Ταχύτητα ανέλκυσης σταθερή καθ' όλο το 24ωρο	Κίνηση του μεταλλότυπου σημαντικά ασυνεχής
Δεν απαιτείται εν γένει επεξεργασία των αρμών διακοπής	Απαιτείται επεξεργασία των αρμών διακοπής
Υψηλή ταχύτητα κατασκευής βάθρου	Αργός ρυθμός προόδου κατασκευής βάθρου
Απαιτείται συνεχής εργασία καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.	Προσαρμογή ρυθμού εργασιών σε μικρότερη ένταση
Χρήση χαμηλών ποιοτήτων σκυροδέματος. Ειδικά μέτρα για χρήση υψηλών ποιοτήτων	Δυνατότητα χρήσης υψηλών ποιοτήτων σκυροδέματος
Απαιτήση υψηλού επιπέδου οργάνωσης και εξοπλισμού και έμπειρου προσωπικού	Δεν απαιτείται υψηλό επίπεδο οργάνωσης και συντονισμού
Χρήση ρευστοποιητών δεν είναι επιθυμητή	Χρήση ρευστοποιητών δεν δημιουργεί ειδικά προβλήματα
Ύπαρξη ειδικών απαιτήσεων για την εξασφάλιση της ποιότητας της κατασκευής	Δεν υπάρχουν ουσιαστικές δεσμεύσεις για την εξασφάλιση της ποιότητας της κατασκευής.
Απαιτείται σταθερός ρυθμός παραγωγής και άφιξης σκυροδέματος	Δεν απαιτείται σταθερός ρυθμός παραγωγής και άφιξης σκυροδέματος

2.4 Ακρόβαθρα γεφυρών

2.4.1 Γενικά στοιχεία

Τα ακρόβαθρα αποτελούν βασικό τμήμα της γέφυρας, καθώς παρέχουν την κάθετη στήριξη της ανωδομής στα δυο άκρα, συνδέουν τη γέφυρα με τους δρόμους πρόσβασης και συγκρατούν τα υλικά κατασκευής των δρόμων αυτών. Υποδιαιρούνται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με τη σχέση μεταξύ του ακροβάθρου και του εμποδίου (δρόμος ή υδάτινο κανάλι) που η γέφυρα διασχίζει (Chen and Duan 1999):

- Ακρόβαθρα ανοικτού άκρου (open-end abutments).
- Ακρόβαθρα κλειστού άκρου (closed-end abutments).

Στα ακρόβαθρα ανοικτού άκρου μεσολαβούν πρηνή μεταξύ του τοίχου του ακροβάθρου και του εμποδίου που η γέφυρα διασχίζει. Τα πρηνή επιτρέπουν τη μελλοντική διαπλάτυνση του εμποδίου με την προσαρμογή της κλίσης τους. Η ύπαρξη όμως των πρηνών απαιτεί μεγαλύτερα ανοίγματα γεφυρών και επιπρόσθετες χωματουργικές εργασίες και επομένως, συντελεί αύξηση του κατασκευαστικού κόστους της γέφυρας.

Τα κλειστού άκρου ακρόβαθρα κατασκευάζονται πολύ κοντά στην άκρη των εμποδίων που η γέφυρα διασχίζει. Η κατασκευή πρηνών μεταξύ του ακροβάθρου και του εμποδίου δεν επιτρέπεται σε αρκετές περιπτώσεις λόγω απαιτήσεων ελεύθερου ύψους και περιορισμών στην κατασκευή δίπλα στο εμπόδιο και επομένως απαιτείται η κατασκευή ψηλών τοίχων ακροβάθρων. Η μελλοντική επέκταση του δρόμου είναι εξαιρετικά δύσκολη εξαιτίας της έλλειψης ελεύθερου χώρου, ενώ οι υψηλοί τοίχοι ακροβάθρων και ο μεγαλύτερος όγκος του υποστηριζόμενου χωμάτινου υλικού οδηγούν σε μεγαλύτερα κατασκευαστικά κόστη για τα κλειστού άκρου ακρόβαθρα σε σχέση με τα αντίστοιχα ανοικτού άκρου. Συνοψίζοντας, τα ανοικτού άκρου ακρόβαθρα θεωρούνται γενικά περισσότερο οικονομικά, ελκυστικά ως προς την εμφάνιση και εύκολα προσαρμόσιμα σε σχέση με τα κλειστού άκρου ακρόβαθρα (Chen and Duan 1999).

Τα ακρόβαθρα χωρίζονται σε δυο ακόμη κατηγορίες ανάλογα με τη σύνδεσή τους με την ανωδομή της γέφυρας: στα μονολιθικά και στα καθιστού τύπου ακρόβαθρα (seat-type abutment). Τα πρώτα κατασκευάζονται μονολιθικά με την ανωδομή. Η σχετική μετατόπιση μεταξύ του ακροβάθρου και της ανωδομής δεν επιτρέπεται και ως εκ τούτου, οι δυνάμεις της ανωδομής στα άκρα της γέφυρας μεταφέρονται στη στέψη του ακροβάθρου, στη συνέχεια στο παρακείμενο υποστηριζόμενο έδαφος και στη θεμελίωση. Τα μονολιθικά ακρόβαθρα σχεδιάζονται ώστε να ανθίστανται στη συνολική σεισμική δύναμη (Ryall et al. 2000). Το μικρότερο κατασκευαστικό κόστος και η συμμετοχή του υποστηριζόμενου εδάφους στην απορρόφηση ενέργειας όταν η γέφυρα υπόκειται σε κάθετη μετατόπιση είναι τα κυριότερα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου ακροβάθρων (Chen and Duan 1999). Η παθητική πίεση του εδάφους δυσχεραίνει όμως το σχεδιασμό της στέψης του ακροβάθρου, ενώ παρατηρείται και υψηλό κόστος συντήρησης. Τα μονολιθικά ακρόβαθρα κατασκευάζονται στην πράξη κυρίως για μικρές γέφυρες.

Τα καθιστού τύπου ακρόβαθρα (Chen and Duan 1999) κατασκευάζονται ξεχωριστά από την ανωδομή. Δεδομένου ότι η ανωδομή «κάθεται» στη στέψη του ακροβάθρου μέσω εφεδράνων, ο μελετητής της γέφυρας διατηρεί τον έλεγχο των δυνάμεων της ανωδομής που

μεταφέρονται πρώτα στη στέψη του ακροβάθρου και στη συνέχεια στο παρακείμενο έδαφος. Η μετατόπιση της γέφυρας ελέγχεται με την προσαρμογή των εφεδράνων. Οι στηρίξεις με εφέδρανα εφαρμόζονται κυρίως στις μεγάλες γέφυρες στις οποίες είναι δύσκολη η συγκέντρωση της συνολικής σεισμικής δύναμης σε ένα σημείο και για το λόγο αυτό, όλα τα κάθετα μέλη συμμετέχουν στη σεισμική αντοχή της γέφυρας (Ryall et al. 2000). Μολονότι τα ακρόβαθρα καθιστού τύπου εμφανίζουν υψηλότερο αρχικό κατασκευαστικό κόστος σε σχέση με τα μονολιθικά ακρόβαθρα, το κόστος συντήρησής τους είναι σημαντικά χαμηλότερο (Chen and Duan 1999).

Η επιλογή του τύπου του ακροβάθρου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η γεωμετρία της γέφυρας, οι απαιτήσεις του εμποδίου που γεφυρώνεται (δρόμος ή υδάτινο κανάλι), γεωτεχνικοί περιορισμοί, απαιτήσεις αισθητικής και παράγοντες οικονομίας. Η γνώση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των διαφόρων τύπων ακροβάθρων διευκολύνει τους μελετητές γεφυρών να επιλέξουν τον κατάλληλο τύπο ακροβάθρου κατά το αρχικό στάδιο του σχεδιασμού.

Η μετάδοση των κάθετων και οριζόντιων δυνάμεων από το κατάστρωμα της γέφυρας στο έδαφος χωρίς να προκαλούνται υπέρβαση της αντοχής και υπερβολικές μετατοπίσεις στο παρακείμενο έδαφος είναι η βασική λειτουργία των ακροβάθρων (Ryall et al. 2000). Τα ακρόβαθρα αποτελούν το όριο μεταξύ της γέφυρας και του δρόμου πρόσβασης και λειτουργούν ως τοίχος αντιστήριξης. Οι φορτίσεις σχεδιασμού τους περιλαμβάνουν τα κάθετα και οριζόντια φορτία της ανωδομής, τις κάθετες και διαμήκειες εδαφικές πιέσεις, το ίδιο βάρος τους, τις φορτίσεις ανέμου και τα φορτία που μεταφέρονται από τη σύνδεση μεταξύ της ανωδομής και του ακροβάθρου (Chen and Duan 1999).

Οι μελετητές των γεφυρών δεν δίνουν σε αρκετές περιπτώσεις μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό των ακροβάθρων, εξαιτίας της λανθασμένης αντίληψης ότι αυτά είναι λιγότερο επιρρεπή σε καταστροφή από σεισμό σε σχέση με τα μεσόβαθρα (Ryall et al. 2000). Η ακριβής αναπαράσταση της σεισμικής απόκρισης των ακροβάθρων είναι δύσκολη εξαιτίας της αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους και κατασκευής. Μελέτες, όμως, με μοντέλα γεφυρών με ξεχωριστές συνθήκες ακροβάθρων κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι οριακές συνθήκες στα ακρόβαθρα εμφανίζουν σημαντική επίδραση στα συνολικά δυναμικά χαρακτηριστικά των γεφυρών από οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα (Ryall et al. 2000).

2.4.2 Πρόσθετοι παράγοντες σχεδιασμού

Οι περυγότοιχοι αποτρέπουν το υποστηριζόμενο έδαφος που βρίσκεται πίσω από το ακρόβαθρο να μετατοπιστεί εγκάρσια και αντιμετωπίζουν την ώθηση των γαιών. Διακρίνονται αρκετοί τύποι περυγότοιχων, με πιο κοινό τον περυγότοιχο σε πρόβολο από το ακρόβαθρο. Η αντιμετώπιση της ώθησης των γαιών δύναται να πραγματοποιηθεί με διάφορους εναλλακτικούς τρόπους ανάλογα και με την αισθητική που επιθυμεί ο μελετητής να διαμορφώσει. Σε αρκετές περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή τοίχων αντιστήριξης για την υποστήριξη του εδάφους που κατασκευάζονται μετά τη σκυροδέτηση της δοκού έδρασης και του θωρακίου.

Η κατασκευή του ακροβάθρου περιλαμβάνει συχνά και ειδικό σύστημα αποστράγγισης υδάτων. Το σύστημα είναι ενσωματωμένο στο υποστηριζόμενο έδαφος και σχεδιάζεται για τη μείωση της υδροστατικής πίεσης, τον έλεγχο της διάβρωσης του δρόμου πρόσβασης και τη μείωση της πιθανότητας ρευστοποίησης του εδάφους κατά τη διάρκεια σεισμού (Chen and Duan 1999). Το εσωτερικό των ακροβάθρων πρώτα προστατεύεται από τη διάβρωση με ασφαλική επάλειψη και στη συνέχεια κατασκευάζεται το μεταβατικό επίχωμα. Πλάκα σκυροδέματος (μεταβατική πλάκα) κατασκευάζεται πάνω στο μεταβατικό επίχωμα για τον περιορισμό της καθίζησής του.

Τα πρηνή των ακροβάθρων πρέπει να προστατεύονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της γέφυρας, ώστε να διατηρούνται ανέπαφα και να μη μετατοπίζονται. Μερικά από τα μέτρα προστασίας που εφαρμόζονται είναι στηρίξεις με πασσάλους και ενισχύσεις με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

2.4.3 Κατασκευή ακροβάθρων

Σύμφωνα με την Ελληνική κατασκευαστική εμπειρία, τα ακρόβαθρα είναι στις περισσότερες περιπτώσεις τοιχεία κάτωτης Π επιχωμένα στην κοίλη πλευρά τους. Ονομάζονται «ακρόβαθρα βαρυτικού τύπου». Τα σχέδια 13-19 του παραρτήματος IV παρουσιάζουν διάφορα ακρόβαθρα οδικών γεφυρών της Ελλάδας. Περιλαμβάνονται κατόψεις, όψεις και χαρακτηριστικές τομές των ακροβάθρων, από τις οποίες διαπιστώνεται η σημαντική ποικιλία μορφών που εφαρμόζεται και ιδιαίτερα οι διαφοροποιήσεις στους περυγότοιχους.

Η κατασκευή των ακροβάθρων πραγματοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις με συμβατικό ξυλότυπο. Διακρίνονται οι παρακάτω φάσεις:

- Κατασκευή της θεμελίωσης του ακροβάθρου.
- Κατασκευή κορμού και ενός τμήματος του περυγότοιχου.

- Κατασκευή δοκού έδρασης, θωρακίου και υπολοίπου τμήματος πτερυγότοιχου.
- Ασφαλτική επάλειψη και διαμόρφωση μεταβατικών επιχωμάτων.
- Διάστρωση σκυροδέματος καθαριότητας πάνω από το μεταβατικό επίχωμα.
- Κατασκευή πλάκας πρόσβασης (μεταβατική πλάκα).

2.5 Ανωδομή γεφυρών

Οι ανωδομές γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα καλύπτουν ευρύ φάσμα κατασκευαστικών μορφών με ανοίγματα που κυμαίνονται μεταξύ 25.00 και 400.00 μέτρων. Το προεντεταμένο σκυρόδεμα αποτελεί στις περιπτώσεις αυτές οικονομική και απλή λύση. Η χρήση σπλισμένου σκυροδέματος είναι συνήθης εναλλακτική στις περιπτώσεις μικρότερων ανοιγμάτων. Μεταλλικά χαλύβδινα καταστρώματα ή σύμμικτες κατασκευές προτιμώνται για ανοίγματα μεγαλύτερα των 400 μέτρων (Ryall et al. 2000).

Οι συνήθεις μορφές διατομών στις γέφυρες από προεντεταμένο σκυρόδεμα είναι οι παρακάτω:

- Πλάκα (συμπαγής ή με διάκενα).
- Πλακοδοκοί – σχάρες δοκών.
- Κιβωτιοειδείς διατομές.

Η επιλογή του τύπου γέφυρας και της διάταξης των ανοιγμάτων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως τη δυνατότητα κάθε τύπου για γεφύρωση συγκεκριμένου εύρους μήκους ανοιγμάτων, τη διαθεσιμότητα του συστήματος από τους κατασκευαστές, το ιστορικό απόδοσης κάθε τύπου, την εμπειρία του μελετητή και τις προτιμήσεις του ΚτΕ. Παράλληλα, λαμβάνονται υπόψη και περιορισμοί που απορρέουν από τη θέση της γέφυρας, το λόγο του ύψους της διατομής προς το μήκος του ανοίγματος, το χρόνο κατασκευής, την αισθητική και το κόστος (Taly 1998).

Η κατασκευή πραγματοποιείται σε όλους τους τύπους γεφυρών με κάποιον από τους παρακάτω τρόπους:

- Κατασκευή επιτόπου όλων των τμημάτων της γέφυρας.
- Προκατασκευή μικρών στοιχείων και τοποθέτηση στο έργο σε συνδυασμό με στοιχεία που κατασκευάζονται επιτόπου.
- Προκατασκευή όλων των επιμέρους τμημάτων και συναρμολόγηση επιτόπου.

Οι σύγχρονες ανάγκες συγκοινωνιακών έργων απαιτούν σε πολλές περιπτώσεις την κατασκευή οδικών γεφυρών σε δύσβατες περιοχές και σε δύσκολα εδαφικά ανάγλυφα, τη γεφύρωση εμποδίων (π.χ. χαράδρες, ποταμοί, σιδηροδρομικές γραμμές) και το πέρασμα πάνω από πολεοδομικούς ιστούς, αρχαιολογικούς τόπους ή οικολογικά ευαίσθητες περιοχές. Παράλληλα, απαιτείται η μείωση του χρόνου κατασκευής στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Οι παραπάνω απαιτήσεις καθιστούν ασύμφορες ή/και αδύνατες τις «συμβατικές» μεθόδους κατασκευής των γεφυρών με χρήση ικριωμάτων εδραζόμενων στο έδαφος. Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί πληθώρα μηχανοποιημένων μεθόδων κατασκευής της ανωδομής γεφυρών. Οι συνηθέστερες είναι οι ακόλουθες:

- Μέθοδος προβολοδόμησης.
- Μέθοδος σταδιακής προώθησης.
- Μέθοδος προωθούμενων - αυτοφερομένων δοκών.
- Μέθοδος προκατασκευασμένων δοκών.

Η κατασκευή των βάρων σε προηγούμενη φάση και η κατασκευή του καταστρώματος κατά τμήματα αποτελούν τα κοινά χαρακτηριστικά των παραπάνω μεθόδων. Το μέγεθος των τμημάτων σε σχέση με την τελική επιφάνεια του καταστρώματος εμφανίζει τις εξής ποικιλίες:

- Τμήματα πλήρους μήκους (τυπικού ανοίγματος) και μέρους του πλάτους (μέθοδος προκατασκευασμένων δοκών).
- Τμήματα πλήρους πλάτους και μέρους του μήκους (προβολοδόμηση, μέθοδος σταδιακής προώθησης).
- Τμήματα πλήρους πλάτους και πλήρους μήκους (μέθοδος προωθούμενων αυτοφερομένων δοκών).

Η ύπαρξη πληθώρας κατασκευαστικών μεθόδων καθιστά την επιλογή της δύσκολη και σημαντική απόφαση, στην οποία τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε εναλλακτικής πρέπει να μελετηθούν διεξοδικά ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση. Η επιλογή της συμφερότερης κατά περίπτωση μεθόδου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, με κυριότερους το μήκος των επιμέρους ανοιγμάτων, το συνολικό μήκος γεφύρωσης, τη γεωμετρία της χάραξης κατά μήκος και οριζοντιογραφικά, το κόστος και τη διαθεσιμότητα εξοπλισμού και τέλος, την προηγούμενη εμπειρία (Λαμπρόπουλος 2008). Έρευνες που έγιναν από τους Wittfoht και Lamphart κατέληξαν στην κατηγοριοποίηση των διαθέσιμων κατασκευαστικών του Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2: Πεδίο εφαρμογής - Κατηγοριοποίηση κατασκευαστικών μεθόδων (Καρμίρης 1999)

ΤΥΠΟΣ ΓΕΦΥΡΑΣ	ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ (μ.)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΓΕΦΥΡΑΣ (μ.)
Προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκοί από σκυρόδεμα ή χαλύβδινες δοκοί τοποθετημένες στα βάθρα με συμβατικά ανυψωτικά μηχανήματα. Συμβατικές δοκοί.	10÷40	ΑΠΕΡΙΟΡΙΣΤΟ
Προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκοί από σπλισμένο σκυρόδεμα ή χαλύβδινες δοκοί τοποθετημένες σταδιακά από αυτοκινούμενο γερανοδικτύωμα (Σύστημα CARO PONTE).	30÷60	300÷600
Δόμηση εν προβόλω ή μέθοδος της προβολοδόμησης. Τμηματική επί τόπου σκυροδέτηση και προένταση ή σταδιακή συναρμολόγηση και προένταση προκατα-σκευασμένων σπονδύλων από Ο/Σ.	60÷250	ΑΠΕΡΙΟΡΙΣΤΟ
Τμηματική προώθηση. Τμηματική σκυροδέτηση της γέφυρας δίπλα στο ακρό-βαθρο και σταδιακή προώθηση της πάνω στα μεσόβαθρα.	30÷80	300÷1200
Επί τόπου σκυροδέτηση ή συναρμολόγηση προκατασκευασμένων στοιχείων υποστηριζόμενη από ξυλότυπο ή μεταλλότυπο εδραζόμενο κατ'ευθείαν στο έδαφος.	5÷125	5÷125
Επί τόπου σκυροδέτηση πάνω σε ξυλότυπο ή μεταλλότυπο κυλιόμενο πάνω στα μεσόβαθρα με τη βοήθεια γερανού ή γερανοδικτύωματος.	20÷60	300÷600
Καλωδιωτές γέφυρες. Σπόνδυλοι από χάλυβα ή σκυρόδεμα συνδεδεμένοι με ευθύγραμμα καλώδια με βάθρα-πύργους.	75÷800	ΑΠΕΡΙΟΡΙΣΤΟ
Κρεμαστές γέφυρες. Σπόνδυλοι από χάλυβα ή σκυρόδεμα κρεμασμένοι σε κοίλα καλώδια μεγάλης διατομής επίσης κρεμασμένα σε βάθρα-πύργους.	400÷1500	ΑΠΕΡΙΟΡΙΣΤΟ

Η διάταξη των ανοιγμάτων καθορίζεται κυρίως από το εμπόδιο που πρέπει να γεφυρωθεί. Ωστόσο, πρέπει να εξυπηρετεί και τον τύπο της γέφυρας που πρόκειται να κατασκευαστεί (Ryall et al. 2000). Η διατήρηση ενός τυπικού μήκους δοκού επιδιώκεται στην περίπτωση των προκατασκευασμένων προεντεταμένων δοκών ώστε να τυποποιηθεί ο κατασκευαστικός εξοπλισμός. Τα ακραία ανοίγματα πρέπει να έχουν μήκος ίσο με 70% περίπου του μεσαίου ανοίγματος στην περίπτωση της επιτόπιας σκυροδέτησης και των γεφυρών που κατασκευάζονται με σταδιακή προώθηση, ώστε να αντισταθμίζονται οι καμπτικές ροπές. Τα ακραία ανοίγματα πρέπει να έχουν μήκος ίσο με 60% των μεσαίων ανοιγμάτων στην περίπτωση των γεφυρών που κατασκευάζονται με συμμετρική προβολοδόμηση,

Οι κυριότεροι τύποι καταστρώματος και κατασκευαστικές μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί στην Ελλάδα για την κατασκευή οδικών γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα είναι οι ακόλουθοι:

1. Μονοκύψελο κιβώτιο με επιτόπια σκυροδέτηση.
2. Προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκοί και πλάκα σκυροδέματος.
3. Μονοκύψελο κιβώτιο μεταβλητού ύψους που κατασκευάζεται με συμμετρική προβολοδόμηση.

Ακολουθεί σύντομη ανάλυση των παραπάνω τύπων γεφυρών.

2.5.1 Μονοκύψελο κιβώτιο με επιτόπια σκυροδέτηση

Γέφυρες προεντεταμένου σκυροδέματος με επιτόπια σκυροδέτηση διατομής μονοκύψελου κιβωτίου κατασκευάζονται με χρήση ικριωμάτων και ξυλότυπου – μεταλλότυπου και χρησιμοποιούνται ευρέως για μεσαία και μεγάλα ανοίγματα. Η εμφάνισή τους είναι παρόμοια με εκείνη των αντίστοιχων διατομών από οπλισμένο σκυρόδεμα, με μόνη διαφορά ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα κιβώτια είναι λεπτότερα για το ίδιο άνοιγμα (Taly 1998). Ακόμη, η πάνω και η κάτω πλάκα του κιβωτίου από οπλισμένο σκυρόδεμα διαθέτουν σημαντική ποσότητα συμβατικού διαμήκους οπλισμού, ενώ τα προεντεταμένα κιβώτια διαθέτουν τένοντες προέντασης.

Το μονοκύψελο προεντεταμένο κιβώτιο με επιτόπια σκυροδέτηση αποτελεί οικονομικό τύπο ανωδομής για ανοίγματα μήκους μέχρι 80.00 μέτρων (Menn 1990). Η εμπειρία κατασκευής οδικών γεφυρών στην πολιτεία της Καλιφόρνιας των Η.Π.Α. έχει δείξει ότι ο συγκεκριμένος τύπος γέφυρας αποτελεί οικονομική εναλλακτική για μήκη ανοιγμάτων μεταξύ 30.00 και 90.00 μέτρων περίπου (Taly 1998). Η επιλογή μήκους ανοίγματος που ελαχιστοποιεί τη διαφορά των

διαγραμμάτων ροπών των δυο όμορων ανοιγμάτων οδηγεί σε αποτελεσματική χρήση των υλικών και σε απλή διάταξη των τενόντων προέντασης. Το ύψος του κιβωτίου καθορίζεται με βάση παραμέτρους οικονομίας και αισθητικής, καθώς και απαιτήσεις ελεύθερου ύψους διάβασης κάτω από τη γέφυρα. Πρέπει, όμως, να διατηρείται σταθερό καθόλο το μήκος της γέφυρας, ώστε να μειώνεται το κόστος του ξυλότυπου. Ο λόγος του μήκους του ανοίγματος προς το ύψος του κιβωτίου (l/h) πρέπει να επιλέγεται μεταξύ 12 και 35 (Menn 1990). Το πιο οικονομικό ύψος κιβωτίου αντιστοιχεί σε λόγο l/h της τάξης του 15. Η οικονομία στον ξυλότυπο που επιτυγχάνεται με την αύξηση του λόγου l/h αντισταθμίζεται από την αύξηση της κατανάλωσης του χάλυβα προέντασης. Η αύξηση όμως του κόστους είναι μικρή σε σύγκριση με τη βελτιωμένη εμφάνιση της γέφυρας που απορρέει από το πιο λεπτό προφίλ. Ειδικότερα, η αύξηση του λόγου l/h από 15 σε 20 οδηγεί σε αύξηση του κατασκευαστικού κόστους κατά περίπου 5.00%. Ο λόγος του μήκους του ανοίγματος προς το ύψος του κιβωτίου επιλέγεται στις περισσότερες περιπτώσεις μεταξύ 17 και 22, τιμές υψηλότερες από την πιο οικονομική τιμή. Η αύξηση του κόστους για τιμές l/h μεταξύ 25 και 30 είναι σημαντική και δικαιολογείται μόνο από απαίτηση ελεύθερου ύψους διάβασης κάτω από τη γέφυρα.

Οι οριζόντιες διαμήκεις δυνάμεις προερχόμενες από την ανωδομή (εξαιτίας φρεναρίσματος, επιτάχυνσης, ανέμου και σεισμού) σε γέφυρες συνολικού μήκους μέχρι 300 μέτρων πρέπει να μεταφέρονται απευθείας σε συμπαγή θεμελίωση, γεγονός που επιτυγχάνεται καλύτερα με σταθερή μονολιθική σύνδεση σε ένα από τα ακρόβαθρα (Menn 1990). Η διάταξη αυτή απαιτεί τη χρήση ενός μόνο αρμού διαστολής, βελτιώνοντας με τον τρόπο αυτό την ανθεκτικότητα. Οι μετατοπίσεις, όμως, της ανωδομής λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, διαστολής και συστολής είναι πολύ μεγάλες για να απορροφηθούν στο ένα άκρο όταν το συνολικό μήκος της γέφυρας υπερβαίνει τα 300 μέτρα. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η χρήση αρμών διαστολής και στα δυο ακρόβαθρα.

Η συνέχεια αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό για γέφυρες πολλαπλών ανοιγμάτων μονοκύψελου κιβωτίου. Η τάση σχεδιασμού είναι να επεκτείνεται όσο το δυνατόν η ζώνη συνέχειας, ώστε να μειώνονται οι αρμοί διαστολής και τα προβλήματα συντήρησης και να επιτυγχάνεται οικονομία στα κόστη σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου (life cycle costs). Η μονολιθική σύνδεση των βάθρων με την ανωδομή είναι πρακτική όταν δεν υφίσταται κίνδυνος από μετατοπίσεις της θεμελίωσης. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται και το πρόβλημα συντήρησης και αντικατάστασης των εφεδράνων. Σε αντίθετη περίπτωση, η ανωδομή αποκόπτεται από την υποδομή με χρήση εφεδράνων σε κάθε βάθρο.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των γεφυρών μονοκύπελου κιβωτίου με επιτόπια σκυροδέτηση είναι τα ακόλουθα (Ryall et al. 2000; Taly 1998):

1. Αποτελεσματική χρήση σκυροδέματος και προέντασης.
2. Ευελιξία στη διάταξη των ανοιγμάτων.
3. Αποφυγή βαρέων μηχανημάτων μεταφοράς και ανύψωσης προεντεταμένων τμημάτων.
4. Ευκολία προσαρμογής σε αλλαγές της χάραξης, διατομής και μήκους του ανοίγματος.
5. Ευκολία δημιουργίας αρμών διαστολής αν απαιτηθούν.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου (Ryall et al. 2000; Taly 1998) εντοπίζονται στην ανάγκη εκτέλεσης έντονων δραστηριοτήτων στο εργοτάξιο, στο μεγάλο χρόνο κατασκευής που απαιτείται για μεγάλες γέφυρες και στην ανάγκη κατάληψης του χώρου κάτω από τη γέφυρα για την τοποθέτηση κριωμάτων.

2.5.2 Προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκοί και πλάκα συνέχειας

Η μέθοδος των προκατασκευασμένων δοκών χρησιμοποιείται στην Ευρώπη από την προ Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου εποχή. Είναι η περισσότερο εφαρμοζόμενη από τις μηχανοποιημένες μεθόδους στην Ελλάδα, επειδή επιτυγχάνει τον περιορισμό χρήσης κριωμάτων και τη μείωση του χρόνου κατασκευής (Λαμπρόπουλος 2008).

Οι γέφυρες με προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς (Menn 1990; Ryall et al. 2000) είναι οικονομικές για γέφυρες μεγάλου μήκους με πολλά μικρά ανοίγματα (μήκους της τάξης των 30.00 μ.) με την προϋπόθεση ότι ένας ελάχιστος αριθμός δοκών, συνήθως 40, πρόκειται να προκατασκευαστούν. Το εύρος των ανοιγμάτων κυμαίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις μεταξύ 25.00 και 40.00 μέτρα, ενώ και μεγαλύτερα ανοίγματα μήκους 50.00 μέτρων έχουν κατασκευαστεί. Η μέγιστη ανυψωτική δυναμικότητα των συνήθων γερανών ανέρχεται περίπου στα 900 KN. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το βάρος ανά τρέχον μέτρο της προκατασκευασμένης δοκού κυμαίνεται μεταξύ 20 και 25KN/m, προκύπτει ότι για ανοίγματα μεγαλύτερα των 40 μέτρων είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ειδικών διατάξεων. Συνοψίζοντας (Λαμπρόπουλος 2008):

- Για ανοίγματα μεγαλύτερα των 40 μέτρων απαιτείται η χρησιμοποίηση ειδικών διατάξεων, όπως του αυτοκινούμενου γερανοδικτυώματος (launching gantry), το υψηλό κόστους των οποίων δικαιολογείται μόνο για γέφυρες μεγάλου μήκους.
- Η χρήση, είτε συνήθων γερανών, είτε ειδικών διατάξεων είναι δυνατή για ανοίγματα μήκους 30 έως 40 μέτρων. Επιπρόσθετοι παράγοντες, όπως το συνολικό μήκος της γέφυρας, ο αριθμός των προκατασκευασμένων δοκών και το ανάγλυφο του εδάφους πρέπει να ληφθούν υπόψη στην περίπτωση αυτή.
- Συνήθεις γερανοί χρησιμοποιούνται στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων για ανοίγματα μικρότερα των 30 μέτρων.

Η ακριβής διατομή των γεφυρών με προκατασκευασμένες δοκούς καθορίζεται από τη διαδικασία κατασκευής των δοκών, το σύστημα προέντασης, τη διαδικασία ανύψωσης και την κατασκευή της πλάκας του καταστρώματος (Menn 1990). Ο λόγος του ύψους της διατομής προς το μήκος του ανοίγματος ανέρχεται σε 1/16 (Ryall et al. 2000). Οι δοκοί συνήθως σκυροδετούνται σε μεταλλικά καλούπια που κινούνται για τη δόνηση του σκυροδέματος. Μολονότι θα ήταν θεωρητικώς δυνατός ο σχεδιασμός της ανωδομής εξολοκλήρου από προκατασκευασμένες δοκούς, οι απαιτούμενες δοκοί θα ήταν πολύ βαριές και ως εκ τούτου, εξαιρετικά ακριβές να μεταφερθούν και να ανυψωθούν. Η ανύψωση θα περιπλεκόταν και από τις άνισες παραμορφώσεις των δοκών, οι οποίες θα έπρεπε να εξισωθούν πριν την εγκάρσια σύνδεση των δοκών. Η επιτόπια σκυροδέτηση της πλάκας μετά την τοποθέτηση των δοκών οδηγεί σε ελαφρότερες δοκούς, οι οποίες είναι ευκολότερες και πιο οικονομικές στη μεταφορά και ανύψωση και σε στατικό σύστημα λιγότερο ευαίσθητο στις άνισες παραμορφώσεις των δοκών. Ο ξυλότυπος για την πλάκα καταστρώματος είτε υποστηρίζεται από το κάτω πέλμα της δοκού, είτε αναρτάται από το πάνω πέλμα. Εναλλακτικά χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένες πρόπλακες για την αποφυγή ξυλοτύπου.

Η κλασική εφαρμογή της μεθόδου στην Ελλάδα περιλαμβάνει τη χρήση προκατασκευασμένων προεντεταμένων δοκών και χυτής επιτόπου πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος με τοποθέτηση προπλάκων. Από στατική άποψη κατασκευάζονται αποκλειστικά αμφιέριστοι φορείς με πλάκες συνέχειας καταστρώματος για τον περιορισμό των αρμών. Οι διαφορετικές χρόνιες παραμορφώσεις των σκυροδεμάτων (προκατασκευασμένου και χυτού) λόγω διαφορετικής ηλικίας και φόρτισης, η εξασφάλιση διαφραγματικής λειτουργίας της πλάκας καταστρώματος και η αποκατάσταση της συνέχειάς της και τέλος, η διαμόρφωση και λειτουργία των αρμών στις θέσεις έδρασης των δοκών είναι τα κυριότερα μελετητικά και κατασκευαστικά θέματα που ανακύπτουν κατά την εφαρμογή της μεθόδου (Γσουκαντάς 1998).

Το σχέδιο 20 του παραρτήματος IV παρουσιάζει μια τυπική οδική γέφυρα με προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς, πρόπλακες και χυτή επιτόπου πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος. Περιλαμβάνεται κατά μήκος τομή και κάτοψη του φορέα, εγκάρσια τομή του καταστρώματος, χαρακτηριστικές λεπτομέρειες των πεζοδρομίων και των εφεδράνων και αναλυτική περιγραφή της τυπικής προκατασκευασμένης δοκού (οριζόντια και εγκάρσια τομή, κατά μήκος τομή των τενόντων προέντασης και όψη της αγκύρωσης τους).

Η παραγωγή των δοκών πραγματοποιείται είτε στο εργοστάσιο, είτε στην περιοχή του έργου (Τσουκαντάς 1998). Η πρώτη περίπτωση εξασφαλίζει υψηλή ποιότητα κατασκευής, αλλά εμπεριέχει δεσμεύσεις στο μήκος των στοιχείων που δύναται να μεταφερθούν στο εργοτάξιο (μέγιστο μήκος δοκών ίσο με 30.00 μέτρα). Η προκατασκευή των δοκών στο εργοτάξιο απαιτεί ιδιαίτερη υποδομή (διαμόρφωση και κάλυψη χώρου προκατασκευής, εργαστήριο, υλικά), εξοπλισμό (παραγωγή σκυροδέματος, γερανογέφυρα, καλούπια σταθερής διάταξης ή μεταφερόμενα), ανθρώπινο δυναμικό (εργοδηγούς, χειριστή γερανόγεφυρας κ), υλικά (χάλυβες προέντασης) και ενέργεια.

Συστήματα ανωδομής με χρήση αρμών διαστολής μεταξύ δυο ανοιγμάτων δεν προσφέρουν επαρκή ανθεκτικότητα ούτε ευκολία οδήγησης. Είναι δύσκολη η διατήρηση υδατοστεγανότητας του αρμού διαστολής και της σύνδεσής του με τη μεμβράνη (waterproofing membrane) κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της γέφυρας, με αποτέλεσμα τη διείσδυση νερού που δημιουργεί κινδύνους στην άκρη των δοκών, στα εφέδρανα και στην κορυφή των βάθρων. Σημειώνεται, ακόμη, ότι σε πολλές περιπτώσεις οι άκρες των δοκών δεν είναι προσβάσιμες για επιθεώρηση και συντήρηση. Ως εκ τούτου, η πάνω πλάκα κατασκευάζεται συνεχής, ώστε να περιορίζεται η ανάγκη αρμών διαστολής στην επιφάνεια του δρόμου. Οι δοκοί συνήθως συνδέονται στις θέσεις των στηρίξεων (βάθρα) με εγκάρσια δοκό ή διάφραγμα που προσφέρει ακαμψία στο σύστημα και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των φορτίων από τις δοκούς στις στηρίξεις.

Η επίτευξη οικονομίας λόγω της επαναλαμβανόμενης διαδικασίας προκατασκευής των δοκών και της έλλειψης κριωμάτων, καθώς και η ταχύτητα κατασκευής είναι τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης προκατασκευασμένων δοκών (Ryall et al. 2000). Τα κυριότερα μειονεκτήματα (Ryall et al. 2000; Λαμπρόπουλος 2008) είναι η αναγκαιότητα καλής πρόσβασης των μηχανημάτων, ο ειδικός εξοπλισμός ανύψωσης που απαιτείται για μεγάλα ανοίγματα, οι αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης λόγω ύπαρξης μεγάλου αριθμού εφεδράνων και αρμών, η διαμόρφωση της διατομής του φορέα με σκυροδέματα διαφορετικής ηλικίας, αντοχής και ενδεχομένως ποιότητας και τέλος, το αμφίβολο αισθητικό αποτέλεσμα, το οποίο δεν είναι

συνυφασμένο με τη μέθοδο της προκατασκευής αλλά με την ακολουθούμενη πρακτική υλοποίησής της.

2.5.3 Μονοκύψελο κιβώτιο με προβολοδόμηση

Η μέθοδος της προβολοδόμησης χρησιμοποιείται ευρέως για γέφυρες από σκυρόδεμα με ανοίγματα μεσαίου και μεγάλου μήκους, στις οποίες η μορφολογία του εδάφους και οι τοπικές συνθήκες καθιστούν τη χρήση παραδοσιακών ικριωμάτων δύσκολη, αδύνατη ή εξαιρετικά δαπανηρή. Η προβολοδόμηση έχει αναγνωριστεί ως μια από τις πιο αποδοτικές μεθόδους κατασκευής γεφυρών χωρίς χρήση ικριωμάτων (Chen and Duan 1999). Η μέθοδος αναφέρεται στην κατασκευή του καταστρώματος της γέφυρας με μια ακολουθία τμημάτων-σπονδύλων, συνήθως ξεκινώντας από ένα ή περισσότερα μεσοβάθρα, όπου κάθε τμήμα που τοποθετείται ισορροπεί το βάρος του επόμενου τμήματος στην αντίθετη πλευρά του μεσοβάθρου και περιστασιακά το βάρος του συνεργείου κατασκευής των σπονδύλων (Mathivat, 1983). Κάθε σπόνδυλος θεωρείται μέρος του ήδη κατασκευασθέντα φορέα εφόσον ολοκληρωθεί η πρώτη φάση της διαδικασίας σκλήρυνσης και ακολούθως, ο εν λόγω σπόνδυλος αποτελεί τη βάση επί της οποίας θα κατασκευασθεί ο επόμενος. Η σταθερότητα του προβόλου εξασφαλίζεται σε κάθε βήμα της κατασκευής από καλώδια προέντασης που τοποθετούνται σύμφωνα με το διάγραμμα ροπών του προβόλου.

Η κλασική εφαρμογή της μεθόδου αναφέρεται στην κατασκευή συμμετρικών τμημάτων ανωδομής εκατέρωθεν κάθε μεσοβάθρου. Η κατασκευή και μη συμμετρικών τμημάτων ανωδομής είναι δυνατή αλλά συναντάται σπανιότερα. Κάθε μεσαίο άνοιγμα υπολογίζεται ως το άθροισμα του μήκους των δύο προβόλων από τους οποίους θα καλυφθεί. Το ακραίο άνοιγμα συνιστάται να ισούται με το μισό του γειτονικού ανοίγματος. Αν όμως το μήκος του είναι ίσο με 65 έως 70% του γειτονικού, τότε τμήμα της ανωδομής κοντά στο ακρόβαθρο κατασκευάζεται συμβατικά με χρήση ικριωμάτων. Η πάκτωση ή αγκύρωση της ανωδομής στο ακρόβαθρο για την εξουδετέρωση της ροπής ανατροπής κρίνεται απαραίτητη στην περίπτωση που το ακραίο άνοιγμα είναι μικρότερο από το 50% του γειτονικού.

Διακρίνονται δυο παραλλαγές της μεθόδου της προβολοδόμησης ανάλογα με τη σκυροδέτηση των σπονδύλων:

- Επιτόπια σκυροδέτηση των σπονδύλων με τη βοήθεια κινητών ξυλοτύπων.
- Προκατασκευή των σπονδύλων και τοποθέτησή τους με ειδικό εξοπλισμό, όπως γερανοδικτύωμα.

Η προβολοδόμηση με επιτόπια σκυροδέτηση προτιμάται για γέφυρες με μεγάλα και άνισα ανοίγματα. Αποτελεί τη μόνη παραλλαγή της μεθόδου που έχει χρησιμοποιηθεί στην Ελλάδα. Διακρίνονται τρεις εναλλακτικές εφαρμογές της μεθόδου της προβολοδόμησης με επιτόπια σκυροδέτηση των σπονδύλων ανάλογα με τον τρόπο στήριξης του κατασκευαζόμενου σπονδύλου (Πελεγκάρης 2003):

- Μετακινούμενο μεταλλικό φορείο που μεταφέρει τον ειδικό ξυλότυπο για την κατασκευή του σπονδύλου (mobile carriage).
- Λυόμενο συγκρότημα κριωμάτων επί του υποκείμενου εδάφους το οποίο σε περίπτωση ποταμού στηρίζεται σε προβλήτα (traveling falsework).
- Μετακινούμενος ξυλότυπος που μετακινείται με τη βοήθεια γερανοδικτύωματος (steel gantry).

Η πρώτη εφαρμογή είναι η πιο συνηθισμένη.

Οικονομία επιτυγχάνεται μερικώς από τη μέθοδο κατασκευής και μερικώς από το στατικό σύστημα (Menn 1990). Τα προηγούμενως σκυροδετηθέντα τμήματα της ανωδομής δύναται να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την υποστήριξη της κατασκευής των επόμενων τμημάτων, καθιστώντας δυνατή τη χρήση μικρών και οικονομικών φορείων. Τα φορεία επιδέχονται επίσης αρκετές προσαρμογές και δύναται να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερες γέφυρες, διευκολύνοντας σημαντικά την απόσβεση του εξοπλισμού. Η συνεχής επανάληψη παρόμοιων διαδικασιών για την κατασκευή των τυποποιημένων στοιχείων (επαναληπτικός κύκλος) αυξάνει την απόδοση του τεχνικού προσωπικού και σταδιακά μειώνει το λόγο του κόστους εργατικών προς το κόστος υλικών. Η κατασκευή τμημάτων μικρού μήκους καθιστά δυνατή την οικονομική διάταξη των τενόντων, οι οποίοι προσαρμόζονται καλύτερα στο διάγραμμα ροπών.

Η μέθοδος της προβολοδόμησης με επιτόπια σκυροδέτηση είναι οικονομική για ανοίγματα από 70 έως 250 μέτρα (Menn 1990). Ο λόγος του κόστους του ξυλοτύπου προς το συνολικό κόστος κατασκευής της ανωδομής κυμαίνεται μεταξύ 25 και 35% για μεγάλα ανοίγματα εφαρμογής, ανεξάρτητα από το ύψος της γέφυρας και τις τοπογραφικές συνθήκες. Το γεγονός αυτό προσφέρει σημαντική οικονομία σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο με κριώματα, στην οποία ο παραπάνω λόγος ανέρχεται συνήθως σε 40% (Κόλιας 1998). Τα πλεονεκτήματα της προβολοδόμησης αντισταθμίζονται από το υψηλό κόστος κατασκευής των βάθρων και ανέγερσης των φορείων κατασκευής για ανοίγματα μικρότερα από 70 μέτρα.

Η μορφολογία των προβολοδόμενων γεφυρών και ο τύπος της διατομής καθορίζονται από τη γεωμετρία του εμποδίου, τη χάραξη του έργου, τις εδαφικές συνθήκες και από απαιτήσεις αισθητικής. Τα μονοκύπελα κιβώτια προσφέρουν την πιο αποδοτική διατομή για σκυροδέτηση (Chen and Duan 1999). Αντίθετα, τα πολυκύπελα κιβώτια σπανίως χρησιμοποιούνται. Η μέθοδος της προβολοδόμησης εφαρμόζεται με επιτυχία τόσο σε ανωδομές μεταβλητής διατομής, όσο και σε ανωδομές σταθερής διατομής (Πελεγκάρης 2003). Οι ανωδομές μεταβλητής διατομής πλεονεκτούν στην παραλαβή της έντασης στη φάση κατασκευής και λειτουργίας του έργου. Η μεταβολή της διατομής είναι συνήθως παραβολική. Με βάση θεωρήσεις αισθητικής και οικονομίας, ο λόγος του μήκους του ανοίγματος προς το ύψος της διατομής για παραβολική μεταβολή διατομής πρέπει να προσεγγίζει την τιμή 50 στο μέσο του ανοίγματος και 15 έως 20 στις στηρίξεις. Ο παραπάνω λόγος γίνεται 85 στο μέσο του ανοίγματος και παραμένει ο ίδιος στις στηρίξεις για διατομές σταθερού ύψους (Πελεγκάρης 2003). Οι κεκλιμένοι κορμοί βελτιώνουν την αισθητική, αλλά προσθέτουν δυσκολία στην κατασκευή με φορείο όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μεταβλητό ύψος διατομής. Ως εκ τούτου, είναι συνήθως κατακόρυφοι για ευκολία κατά τη σκυροδέτηση. Οι κορμοί περιέχουν λίγους τένοντες και σε μερικές περιπτώσεις ακόμη και κανέναν. Κατά συνέπεια, το πάχος τους προσδιορίζεται από την αντοχή τους σε τέμνουσα δύναμη, με την προϋπόθεση ότι επιπλέον πάχος δεν απαιτείται για την αγκύρωση των τενόντων του προβόλου ή για τη δόνηση του σκυροδέματος. Το πάχος της πλάκας καταστρώματος υπολογίζεται ώστε να περιέχει τους τένοντες προβόλου, ενώ επιπρόσθετο πάχος μπορεί να απαιτηθεί στην περιοχή των κορμών για την αγκύρωση των τενόντων. Το πάχος της κάτω πλάκας είναι μεγαλύτερο στις στηρίξεις ώστε να αντέχει στο φορτίο λόγω στρέψης και τέμνουσας στην οριακή κατάσταση μεγίστου φορτίου και μειώνεται γραμμικά μέχρι το μέσο του ανοίγματος.

Τρεις τύποι σπονδύλων κατασκευάζονται κατά τη διάρκεια κατασκευής της ανωδομής γεφυρών με προβολοδόμηση:

1. Οι σπόνδυλοι βάση-στήριξης ή κεφαλόδεσμοι (support sections).
2. Οι τυπικοί σπόνδυλοι (standard segments).
3. Οι σπόνδυλοι «παρά την κλείδα».

Οι σπόνδυλοι βάση-στήριξης κατασκευάζονται με χρήση τυπικού ξυλότυπου μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής των βάθρων. Αποτελούν τη βάση συναρμολόγησης και εκκίνησης των μεταλλικών φορείων μεταφοράς του ειδικού ξυλότυπου για τη σκυροδέτηση των τυπικών σπονδύλων. Το μήκος τους καθορίζεται από το βάρος και τον τύπο του χρησιμοποιούμενου φορείου.

Οι τυπικοί σπόνδυλοι κατασκευάζονται συμμετρικά από τα μεσόβαθρα στην κλασική προβολοδόμηση με μήκος που κυμαίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις από 3 έως 5 μέτρα. Τα συνήθη στάδια σκυροδέτησης ενός τυπικού σπονδύλου είναι τα ακόλουθα:

- Σκυροδέτηση του κάτω τμήματος της διατομής.
- Σκυροδέτηση των πλευρικών στοιχείων της διατομής.
- Σκυροδέτηση του άνω τμήματος της διατομής.

Η αλληλουχία κατασκευής για ένα συγκεκριμένο σπόνδυλο περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (τυπικός εβδομαδιαίος κύκλος εργασιών) (Πελεγκάρης 2003):

- Προένταση προ-τοποθετημένων τενόντων και προώθηση φορείου (Δευτέρα).
- Ενσυρμάτωση τενόντων επόμενου σπονδύλου (Τρίτη, Τετάρτη, Πέμπτη).
- Τοποθέτηση σιδηροπλισμού επόμενου σπονδύλου (Τρίτη, Τετάρτη, Πέμπτη).
- Σκυροδέτηση σπονδύλου (Παρασκευή).
- Σκλήρυνση σκυροδέματος (συνήθως κατά τη διάρκεια του Σαββατοκύριακου).

Οι σπόνδυλοι «παρά την κλείδα» είναι οι τελευταίοι που σκυροδετούνται κατά τη διάρκεια της κατασκευής της ανωδομής γεφυρών με προβολοδόμηση. Η κατασκευή τους πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή εφόσον αλλάζει η στατική λειτουργία του φορέα από πρόβολο σε συνεχή δοκό με την ολοκλήρωση της κατασκευής τους. Οι ολοκληρωμένοι πρόβολοι συνδέονται στο μέσο του ανοίγματος, είτε με ένα σύνδεσμο, οπότε διαμορφώνεται άρθρωση, είτε πραγματοποιείται μονολιθική σύνδεση με αποκατάσταση της συνέχειας. Οι σύνδεσμοι στο μέσο του ανοίγματος είναι γενικώς πιο οικονομικοί από τις μονολιθικές συνδέσεις, γιατί αποτρέπουν την αναδιανομή των ροπών από τη «δυνατή» περιοχή της στήριξης στην «αδύνατη» περιοχή του μέσου του ανοίγματος (Menn 1990). Ωστόσο, οι σύνδεσμοι παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα σχετικά με τη λειτουργικότητα, αφού οι ασυνέχειες στο κατάστρωμα λόγω παραμορφώσεων από ερπυσμό των προβόλων είναι αναπόφευκτες. Η χρήση αρμών διαστολής στο μέσο του ανοίγματος μειώνει ακόμη την ανθεκτικότητα και την οδηγική άνεση.

Η μείωση των χρόνιων παραμορφώσεων, η αποφυγή του σημαντικού αρχικού κόστους των αρθρώσεων και των αρμών και η αποφυγή της αντίστοιχης δαπάνης συντήρησης είναι τα κυριότερα πλεονεκτήματα στην περίπτωση αποκατάστασης της συνέχειας (Κόλιας 1998). Για την κατασκευή των σπονδύλων «παρά την κλείδα» με τους οποίους αποκαθίσταται η συνέχεια της ανωδομής χρησιμοποιούνται συνήθως μεταλλικές δοκοί ενισχυμένες με νευρώσεις. Οι

μεταλλικές αυτές δοκοί στηρίζονται επί στοιχείων που κατασκευάζονται με σκυροδέτηση από κονίαμα υψηλής αντοχής. Η διαδικασία κατασκευής ολοκληρώνεται με τη σκυροδέτηση του σπονδύλου.

Η εξάλειψη της ανάγκης χρήσης συμβατικών ξυλοτύπων σκυροδέτησης είναι το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου της προβολοδόμησης. Ως εκ τούτου, η προβολοδόμηση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων κατασκευαστικών μεθόδων 1) σε αστικές περιοχές όπου υποκείμενη οδική αρτηρία με σημαντικό κυκλοφοριακό φόρτο πρέπει να συνεχίσει τη λειτουργία της κατά την ανέγερση της γέφυρας και οι προσωρινές στηρίξεις δυσχεραίνουν την κυκλοφορία οχημάτων (το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση υποκείμενης κίνησης πλοίων), 2) σε βαθιές και πλατιές χαράδρες με ψηλά βάθρα και 3) σε διαβάσεις ποταμών με σημαντική παροχή νερού και ξαφνικές πλημμύρες. Η χρήση ικριωμάτων θα ήταν δαπανηρή και επικίνδυνη στις παραπάνω περιπτώσεις. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα (Mathivat 1983):

- Υψηλή ποιότητα κατασκευής και μεγάλη ανθεκτικότητα, εφόσον η παραγωγική διαδικασία επαναλαμβάνεται τυποποιημένα κάθε εβδομάδα και μάλιστα στον ίδιο εργασιακό χώρο.
- Δυνατότητα επιτάχυνσης της διαδικασίας κατασκευής, εφόσον η κατασκευή της ανωδομής δύναται να ξεκινάει από διαφορετικά σημεία και να εκτελείται ταυτόχρονα.
- Υφίσταται δυνατότητα κατασκευής με πολύ αυξημένη απόδοση (έως και 10 μέτρα ανά ημέρα) στην περίπτωση χρήσης προκατασκευασμένων σπονδύλων, ειδικά αν συνδυαστεί με ταυτόχρονη κατασκευή σε διαφορετικά σημεία.
- Τα φορεία που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των ειδικών ξυλοτύπων σκυροδέτησης των σπονδύλων ή των προκατασκευασμένων σπονδύλων είναι ρυθμιζόμενα και επιδέχονται πολλαπλών εφαρμογών.

Τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα (Mathivat 1983):

- Απαιτείται πολλαπλή μελέτη της στατικής απόκρισης της κατασκευής επιπρόσθετα από τη συνήθη μελέτη του τελικού συστήματος της γέφυρας, λόγω των διαδοχικών αλλαγών κατά τις διάφορες φάσεις. Οι διατομές ελέγχονται σε κάθε βήμα προόδου της κατασκευής, καθώς μεταβάλλονται η εξωτερική ένταση, ο αριθμός των τενόντων, η δύναμη προέντασης, ο ερπυσμός, η συστολή ξήρανσης και οι παραμορφώσεις.

- Εκτός από τα συνήθη φορτία, πρέπει να γίνεται και λεπτομερής εξέταση των κινητών φορτίων των μηχανημάτων κατασκευής, των μεταβολών της προέντασης και των διαδοχικών μεταβολών ερπυσμού και συστολής ξήρανσης.
- Η διαρκής μεταβολή των παραμορφώσεων κατά την κατασκευή καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη τη διατήρηση της ανωδομής στη σωστή θέση κατά τις διαδοχικές σκυροδετήσεις. Επομένως, απαιτείται λεπτομερής υπολογισμός των αναμενομένων βελών - μετατοπίσεων με προσεκτικές τοπογραφικές παρατηρήσεις μετά το τέλος κάθε κύκλου, ώστε να δοθούν τα απαιτούμενα «αντιβέλη» στα τμήματα που κατασκευάζονται. Οι υπολογισμοί παραμορφώσεων είναι απαραίτητο να συνοδεύονται και από επιτόπου μετρήσεις θερμοκρασίας.
- Το σημαντικό κόστος μεταφόρτωσης των υλικών κατά τη διάρκεια της κατασκευής, ιδιαίτερα στην περίπτωση υψηλών βάθρων.

Το σχέδιο 21 του παραρτήματος IV παρουσιάζει μια τυπική οδική γέφυρα από σκυρόδεμα κατασκευασμένη με τη μέθοδο της συμμετρικής προβολοδόμησης. Περιλαμβάνεται κατά μήκος τομή της γέφυρας, καθώς και αναλυτική παράθεση των φάσεων κατασκευής και της διάταξης προέντασης του φορέα.

3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΑΠΑΝΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

Κατά την επισκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με την εκτίμηση της δαπάνης κατασκευής οδικών γεφυρών, διαπιστώθηκε ότι οι σχετικές μελέτες εμπίπτουν γενικά σε δύο κατηγορίες. Οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες, είτε αναφέρονται στον προκαταρκτικό σχεδιασμό των γεφυρών με θεωρητικούς κανόνες, είτε εκτελούν με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή διαδικασία δοκιμών με επαναλαμβανόμενες θεωρητικές επιλύσεις, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο τελικός σχεδιασμός από τεχνικής και οικονομικής πλευράς. Πολύ λίγες μελέτες, όμως, στηρίζονται σε πραγματικά κατασκευαστικά και οικονομικά στοιχεία από κατασκευασμένες γέφυρες προκειμένου να παραχθούν εκτιμήσεις ποσοτήτων εργασιών και κόστους.

3.1 Προηγούμενες σχετικές μελέτες και έρευνες κόστους με θεωρητικά στοιχεία

3.1.1 Έμπειρα συστήματα σχεδιασμού (expert systems)

Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες αφορούν στην ανάπτυξη έμπειρων συστημάτων προκαταρκτικού σχεδιασμού των γεφυρών.

Οι Welch και Biswas (1986) ανέπτυξαν το «BDES» (ακρωνύμιο για το «Bridge Design Expert System»), το οποίο περιορίζεται στην ανωδομή, επιτρέπει το σχεδιασμό και την επιλογή του τύπου καταστρώματος για οδικές γέφυρες και βασίζεται στην πρακτική που εφαρμόζεται στις Η.Π.Α.

Οι Burgoyne και Sham (1987) μελέτησαν την εφαρμογή έμπειρων συστημάτων στο σχεδιασμό γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα. Αφού αναγνώρισαν τους τομείς της διαδικασίας σχεδιασμού στους οποίους δύναται να εφαρμοστούν έμπειρα συστήματα, επικεντρώθηκαν στον τύπο της ανωδομής που επιλέγεται σε μια γέφυρα. Παρουσίασαν στη συνέχεια τα προβλήματα της συγκέντρωσης, επικύρωσης και αποτύπωσης της γνώσης – εμπειρίας των ειδικών και δημιούργησαν μια βάση γνώσης (knowledge base) με κανόνες για την επιλογή των διαφόρων τύπων καταστρώματος. Οι ερευνητές κατέληξαν στην πρόταση ενός μοντέλου σχεδιασμού του τύπου της ανωδομής της γέφυρας και επικύρωσαν τους κανόνες που αυτό περιλαμβάνει.

Ο Moore (1991) πρότεινε το «BRIDGE1», ένα έμπειρο σύστημα σχεδιασμού οδικών γεφυρών διατομής δοκών μικρού έως μεσαίου μήκους. Το σύστημα θεωρείται πρώτης γενιάς,

περιλαμβάνει όχι μόνο την αποτύπωση, αλλά και τον έλεγχο της γνώσης ειδικών και εξελίχθηκε στο «BRIDGE2» (Moore et al. 1997) όπου αναδιατάχθηκε και εμπλουτίστηκε η βάση γνώσης.

Οι Aparicio et al. (1996) ανέπτυξαν σύστημα σχεδιασμού με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή οδικών γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα. Το λογισμικό βασίζεται σε λίγα γεωμετρικά στοιχεία του έργου, εκτελεί τον πλήρη σχεδιασμό της γέφυρας και παράγει τη γεωμετρία και το κόστος όλων των επιμέρους στοιχείων της. Το σύστημα προσφέρει εναλλακτικές σχεδιασμού για γέφυρες μεσαίου και μεγάλου μήκους, οι οποίες καλύπτουν διαφορετικά είδη διατομών ανωδομής και κατασκευαστικές μεθόδους. Οι εναλλακτικές δυνατότητες της ανωδομής για γέφυρες μικρού και μεσαίου μήκους ανοιγμάτων περιλαμβάνουν προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς και πλάκα σκυροδέματος και διατομή συμπαγούς ή διάκενης πλάκας. Αναφορικά με τις γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων, προβλέπεται ανωδομή κιβωτιοειδής με μεταβλητό ύψος κατασκευασμένη με συμμετρική προβολοδόμηση με επιτόπια σκυροδέτηση. Το προτεινόμενο σύστημα επιτρέπει τη χρήση μοντέλων φόρτισης που θα οριστούν από το χρήστη σύμφωνα με εθνικούς ή διεθνείς κανονισμούς και τον ορισμό των απαιτήσεων αντοχής, των ιδιοτήτων υλικών και των συντελεστών ασφαλείας που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση. Ο αριθμός και το μήκος των ανοιγμάτων, ο τύπος ανωδομής και κατασκευαστικής μεθόδου και η απόσταση μεταξύ της στάθμης του δρόμου και του εδάφους στη θέση των βάθρων και των ακροβάθρων είναι τα απαιτούμενα στοιχεία εισαγωγής για τη χρήση του συστήματος. Σύμφωνα με τους ερευνητές, το προτεινόμενο σύστημα επιτρέπει τον ακριβή σχεδιασμό και την εκτίμηση του κόστους συγκεκριμένης γέφυρας λαμβάνοντας υπόψη τις πιο σημαντικές τεχνικές απαιτήσεις και προδιαγραφές.

Η συγκέντρωση της γνώσης ειδικών κυρίως με συνεντεύξεις και η μετατροπή της σε κανόνες σχεδιασμού είναι το βασικό χαρακτηριστικό των έμπειρων συστημάτων που προαναφέρθηκαν. Βασίζονται, συνεπώς, σε θεωρητικούς κανόνες σχεδιασμού και όχι σε πραγματικά κατασκευαστικά στοιχεία.

3.1.2 Έρευνες βελτιστοποίησης

Δεδομένου του πλήθους και της πολυπλοκότητας των περιορισμών που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό της ανωδομής γεφυρών, η επιλογή της τελικής λύσης δεν κρίνεται ως βέλτιστη σε πολλές περιπτώσεις. Το γεγονός αυτό οφείλεται καταρχήν στη στάση των μελετητών, οι οποίοι, ικανοποιημένοι από την επιτυχία συγκεκριμένων τύπων ανωδομής και κατασκευαστικών μεθόδων, είναι επιφυλακτικοί στη χρήση νέων μεθόδων. Παράλληλα, οι κατασκευαστικές εταιρείες έχουν επενδύσει σε συγκεκριμένα είδη εξοπλισμού, τα οποία και

πρέπει να αποσβέσουν. Επομένως, αρκετές ερευνητικές μελέτες εξετάζουν τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού προεντεταμένων οδικών γεφυρών πραγματοποιώντας θεωρητικές επιλύσεις. Η γενική προσέγγιση αναφέρεται στη βελτιστοποίηση των επιμέρους τμημάτων του καταστρώματος (π.χ. δοκοί) για ένα δεδομένο σύστημα μέσω της ελαχιστοποίησης της ποσότητας των υλικών ή του κόστους κατασκευής, παρά στη βελτιστοποίηση του συνολικού συστήματος. Ως εκ τούτου, δε λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της γεωμετρίας και της διάταξης των μελών (π.χ. διαστάσεις προκατασκευασμένων δοκών και απόσταση μεταξύ τους) στο συνολικό κόστος του καταστρώματος. Για παράδειγμα, λιγότερες δοκοί σε μεγαλύτερες αποστάσεις ελαχιστοποιούν το κόστος των δοκών, αλλά αυξάνουν το κόστος του καταστρώματος λόγω της αύξησης του πάχους της πλάκας, της ποσότητας του οπλισμού και του απαιτούμενου ξυλότυπου.

Σύμφωνα με τους Lounis και Cohn (1993), τα τρία επίπεδα βελτιστοποίησης ξεκινούν από το μέλος του συστήματος, προχωρούν στη συνολική διάταξη και διαμόρφωση της ανωδομής και καταλήγουν στο συνολικό στατικό σύστημα. Είναι προφανές ότι η γενική επίδραση στο κόστος του έργου αυξάνεται με την εμβάθυνση στα υψηλότερα επίπεδα βελτιστοποίησης.

Ο Taly (1998) παρουσιάζει επισκόπηση των δημοσιευμένων εργασιών σε κάθε επίπεδο, από την οποία προκύπτει ότι η πλειονότητά τους αναφέρεται στο επίπεδο 1 και ότι ελάχιστες μελέτες εμβαθύνουν στα επίπεδα 2 και 3.

Οι Sarma και Adeli (1998) παρουσιάζουν επισκόπηση των μελετών σχετικά με τη βελτιστοποίηση του κόστους κατασκευών από σκυρόδεμα, ενώ οι Hassanain και Loon (2003) παρουσιάζουν τις ανάλογες μελέτες για γέφυρες.

Ακολουθεί σύντομη ανάλυση των κυριότερων δημοσιευμένων εργασιών για τη βελτιστοποίηση συστημάτων ανωδομής γεφυρών.

Οι Lounis και Cohn (1993) πρότειναν μέθοδο βελτιστοποίησης του κόστους της ανωδομής οδικών γεφυρών με ανοίγματα μικρού και μεσαίου μήκους, αποτελούμενων από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος και προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς τύπου I. Χρησιμοποίησαν προδιαγραφές και περιορισμούς του Κώδικα Οδικών Γεφυρών του Οντάριο, Καναδά (Ontario 1983) και εφάρμοσαν την προαναφερθείσα διαδικασία βελτιστοποίησης τριών επιπέδων. Η βελτιστοποίηση επιμέρους τμημάτων, όπως των διαστάσεων των δοκών, του πάχους της πλάκας και των ποσοτήτων του χάλυβα οπλισμού και προέντασης εξετάζεται στο πρώτο επίπεδο. Το δεύτερο επίπεδο αντιμετωπίζει τη βελτιστοποίηση της διαμήκους και εγκάρσιας διάταξης (π.χ. αριθμός ανοιγμάτων και αριθμός δοκών). Η ελαχιστοποίηση του κόστους του

συνολικού συστήματος αντιμετωπίζεται στο τρίτο επίπεδο. Η συνάρτηση κόστους περιλαμβάνει όχι μόνο το κόστος των υλικών του σκυροδέματος και του χάλυβα, αλλά και το κόστος των συνδέσεων στα βάθρα και της παρασκευής, μεταφοράς και ανέγερσης των δοκών. Η έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η βελτιστοποίηση του συνολικού συστήματος οδηγεί σε πιο οικονομική κατασκευή σε σύγκριση με τη βελτιστοποίηση των επιμέρους τμημάτων και προτείνει βέλτιστες διατάξεις ανοιγμάτων και διατομών δοκών ανάλογα με το συνολικό μήκος της εξεταζόμενης γέφυρας. Διαγράμματα συσχέτισης του μήκους και πλάτους της γέφυρας με το κόστος ανωδομής ανά μονάδα καταστρώματος επιτρέπουν την επιλογή του πιο οικονομικού συστήματος.

Οι Cohn και Lounis (1994) εφάρμοσαν τη διαδικασία βελτιστοποίησης τριών επιπέδων σε οδικές γέφυρες από προεντεταμένο σκυρόδεμα με μήκη ανοιγμάτων μεταξύ 10.00 και 15.00 μέτρων και πλάτος καταστρώματος μεταξύ 8.00 και 16.00 μέτρων. Εξετάστηκαν συστήματα ανωδομής τύπου πλάκας (συμπαγής ή διάκενης), μονοκύψελα κιβώτια και προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκοί με πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων το ελάχιστο κόστος ανωδομής, το ελάχιστο βάρος χάλυβα προέντασης, τον ελάχιστο όγκο σκυροδέματος, τη μέγιστη απόσταση δοκών, το ελάχιστο ύψος διατομής, το μέγιστο λόγο μήκους ανοίγματος προς ύψος διατομής και το μέγιστο μήκος ανοίγματος. Οι ερευνητές ανέπτυξαν συστηματική διαδικασία για το βέλτιστο σχεδιασμό της ανωδομής (διαμήκης και εγκάρσια διάταξη και διαστασιολόγηση των επιμέρους τμημάτων), καθώς επίσης και γραφικές παραστάσεις σύγκρισης του κόστους ανωδομής για κάθε σύστημα. Ανάλογες εργασίες βελτιστοποίησης του κόστους οδικών γεφυρών έχουν δημοσιευθεί από τους Lounis και Cohn (1995,1996) και Fereig (1996).

Οι Sirca και Adeli (2005) ανέπτυξαν μέθοδο βελτιστοποίησης του κόστους ανωδομής γεφυρών με προκατασκευασμένες, προεντεταμένες δοκούς τύπου I, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος του προεντεταμένου σκυροδέματος και του χάλυβα των δοκών, του οπλισμένου σκυροδέματος και του χάλυβα της πλάκας καταστρώματος και του ξυλότυπου. Οι διαστάσεις της διατομής του καταστρώματος δεν αποτέλεσαν ξεχωριστές παραμέτρους σχεδιασμού. Η γενική διαδικασία σχεδιασμού την ανωδομής βασίστηκε στις προδιαγραφές των Η.Π.Α. και στις τυπικές διατομές που προτείνονται (AASHTO 1999). Το μοντέλο αντιμετωπίζει την ανωδομή συνολικά ως σύστημα και δεν εξετάζει τα επιμέρους στοιχεία.

Οι Ayvaz και Aydin (2009) εξέτασαν την ελαχιστοποίηση του κόστους ανωδομής γεφυρών από προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς τύπου I μέσω της βελτιστοποίησης των διατομών. Η διαδικασία βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε με γενετικούς αλγορίθμους.

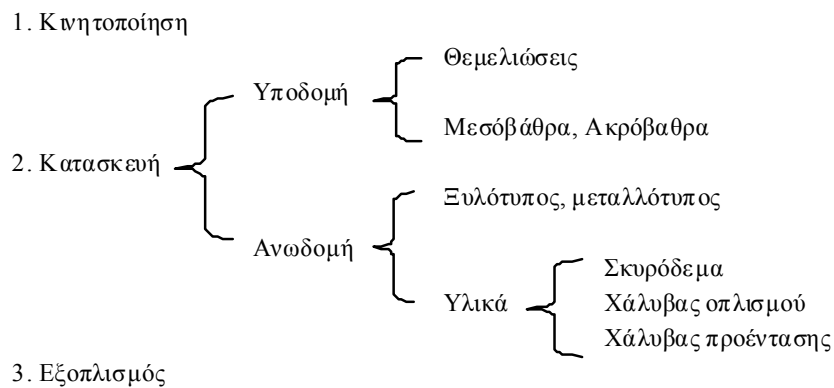
Οι Ahsan et al. (2010;2011) ανέπτυξαν μέθοδο βελτιστοποίησης του σχεδιασμού γεφυρών αποτελούμενων από προεντεταμένες απλά εδραζόμενες δοκούς τύπου I, η οποία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της ανωδομής εξετάζοντας το κόστος υλικών, επεξεργασίας και τοποθέτησης. Για δεδομένο μήκος δοκών και πλάτος καταστρώματος, εξετάστηκαν μεταξύ άλλων ως παράμετροι σχεδιασμού η απόσταση των δοκών, διάφορες διαστάσεις της διατομής της δοκού, ο αριθμός των τενόντων και η διάταξή τους και το πάχος της πλάκας καταστρώματος. Οι περιορισμοί που επιβλήθηκαν στις παραμέτρους σχεδιασμού βασίστηκαν σε γεωμετρικές απαιτήσεις, σε πρακτικές συνθήκες για την κατασκευή και γενικά στις απαιτήσεις των τυπικών προδιαγραφών των Η.Π.Α. Η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης εφαρμόστηκε σε πραγματικό έργο και οδήγησε σε σχεδιασμό ανωδομής με 35% οικονομία στο κόστος ανά επιφάνεια μονάδας καταστρώματος.

Οι προαναφερθείσες ερευνητικές μελέτες παρέχουν προκαταρκτικές εκτιμήσεις του κόστους και του σχεδιασμού της ανωδομής οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα, ακολουθώντας προδιαγραφές σχεδιασμού των Η.Π.Α. ή του Καναδά και χρησιμοποιώντας τυποποιημένες μορφές δοκών και διατομές καταστρώματος. Δεν καλύπτουν την υποδομή και τη θεμελίωση των γεφυρών και βασίζονται σε θεωρητικές επιλύσεις και όχι σε πραγματικά κατασκευαστικά στοιχεία.

3.2 Προηγούμενες σχετικές μελέτες και έρευνες κόστους με πραγματικά στοιχεία

3.2.1 Έρευνα κόστους κατά Menn

Ο Menn (1990) ερεύνησε τα οικονομικά στοιχεία προεντεταμένων οδικών γεφυρών. Βασίστηκε σε πραγματικά στοιχεία κόστους και χρησιμοποίησε δείγμα 19 οδικών γεφυρών που κατασκευάστηκαν στην Ελβετία μεταξύ των ετών 1958 και 1985. Το συνολικό κόστος κατασκευής μιας γέφυρας από σκυρόδεμα σύμφωνα με τον Menn υποδιαιρείται ως εξής (Σχήμα 3-1):



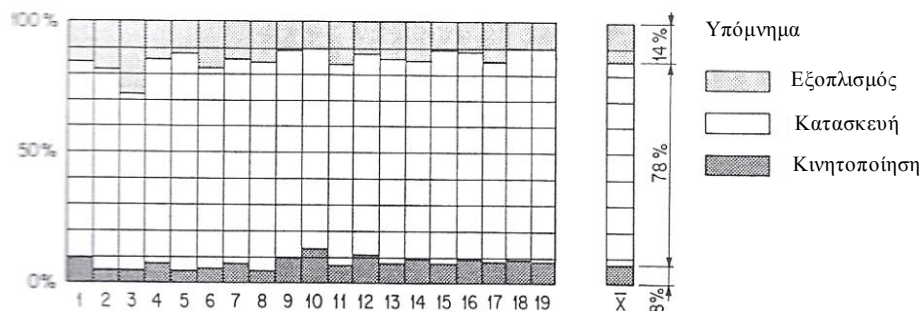
Σχήμα 3-1: Υποδιαίρεση κόστους κατασκευής γέφυρας κατά Menn

Η «κινητοποίηση» περιλαμβάνει τις απαιτούμενες εργασίες προτού αρχίσει η κατασκευή του έργου, όπως για παράδειγμα τη διαμόρφωση των προσβάσεων στο εργοτάξιο, την προετοιμασία των εγκαταστάσεων και την παραγγελία υλικών και εξοπλισμού. Ο εξοπλισμός περιλαμβάνει τα εφόδρανα, τους αρμούς διαστολής, το σύστημα αποχέτευσης, τα κιγκλιδώματα, το σύστημα προστασίας του καταστρώματος από το νερό και τα στηθαία ασφαλείας.

Η έρευνα του Menn βασίστηκε σε δείγμα 19 γεφυρών που κατασκευάστηκαν στην Ελβετία μεταξύ των ετών 1958 και 1985. Τέσσερις γέφυρες (1-4) κατασκευάστηκαν για ανυψωμένους αυτοκινητόδρομους σε αστικές περιοχές, επτά γέφυρες (5-11) αποτελούν διαβάσεις σε ορεινές περιοχές και οκτώ γέφυρες (12-19) είναι χαραδρογέφυρες.

Το μέσο κόστος για κάθε βασική υποδιαίρεση είναι το ακόλουθο (Σχήμα 3-2)

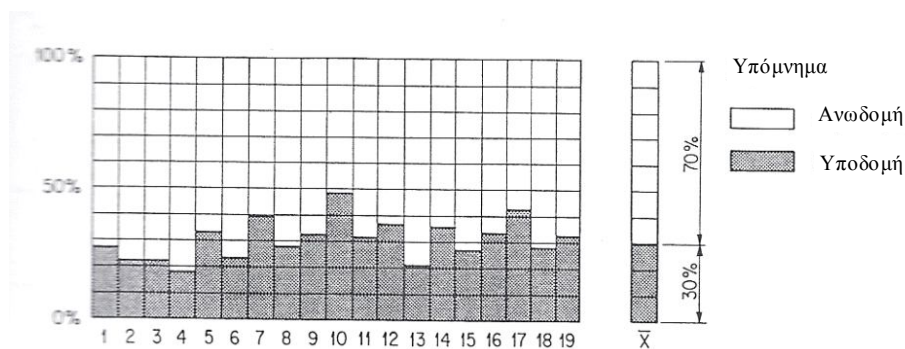
- 1. Κινητοποίηση 8.00%
- 2. Κατασκευή 78.00%
- 3. Εξοπλισμός 14.00%



Σχήμα 3-2: Κόστος κινητοποίησης, κατασκευής και εξοπλισμού ως ποσοστό του συνολικού κόστους

Το κόστος κατασκευής υποδιαιρείται στο κόστος της υποδομής και στο κόστος της ανωδομής. Εξαιτίας αβεβαιοτήτων σε γεωτεχνικά και υδραυλικά δεδομένα, οι θεμελιώσεις σχεδιάζονται συνήθως περισσότερο συντηρητικές σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματα της κατασκευής. Ακόμη όμως και για πολύ αντίξοες καταστάσεις θεμελίωσης, το κόστος της υποδομής είναι συνήθως σημαντικά μικρότερο από το κόστος της ανωδομής. Η συμβολή του κόστους υποδομής και ανωδομής στο κόστος κατασκευής είναι (Σχήμα 3-3):

1. Υποδομή 30.00%
2. Ανωδομή 70.00%



Σχήμα 3-3: Κόστος ανωδομής και υποδομής ως ποσοστό του κόστους κατασκευής

Το κόστος υποδομής αποτελείται από το κόστος των θεμελιώσεων και το κόστος κατασκευής των μεσοβάθρων και των ακροβάθρων. Το κόστος των ακροβάθρων, το οποίο είναι σχετικά μικρό, περιλαμβάνεται συνήθως στο κόστος των μεσοβάθρων. Το κόστος των θεμελιώσεων εξαρτάται κυρίως από γεωτεχνικές και υδραυλικές συνθήκες, ενώ το κόστος των μεσοβάθρων εξαρτάται κυρίως από το ύψος της γέφυρας. Δεδομένου ότι οι παραπάνω παράγοντες διαφέρουν σημαντικά σε κάθε γέφυρα, ο λόγος του κόστους των θεμελιώσεων προς το κόστος κατασκευής των βάθρων θα μεταβάλλεται σημαντικά. Το μέσο κόστος των θεμελιώσεων και των μεσοβάθρων-ακροβάθρων εκφρασμένο ως ποσοστό του κόστους υποδομής και κατασκευής και του συνολικού κόστους της γέφυρας παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-1.

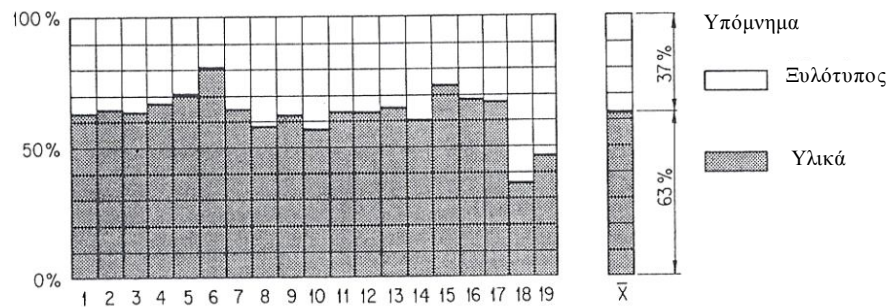
Πίνακας 3-1: Μέσο κόστος θεμελιώσεων και βάθρων

	Βάθρα Ακρόβαθρα (%)	Θεμελίωση (%)	Σύνολο (%)
Κόστος Υποδομής	24.0	76.00	100.00
Κόστος Κατασκευής	7.00	23.00	30.00
Συνολικό κόστος κατασκευής	5.50	18.00	23.50

Το κόστος ανωδομής υποδιαιρείται στο κόστος του ξυλότυπου-μεταλλότυπου και στο κόστος των υλικών. Η τοποθέτηση και απομάκρυνση του ξυλότυπου-μεταλλότυπου αποτελούν εργασίες που απαιτούν εκτεταμένη προσπάθεια και απασχόληση των εργατών. Η αύξηση στους μισθούς και τα ασφάλιστρα τα τελευταία 25 χρόνια συμβαδίζει με την οικονομία που επιτυγχάνεται μέσω αυτοματοποίησης και μηχανοποίησης. Κατά συνέπεια, το κόστος του ξυλότυπου-μεταλλότυπου έχει ελάχιστα μεταβληθεί σε σχέση με το κόστος των υλικών. Το Σχήμα 3-4 παρουσιάζει το κόστος του ξυλότυπου και των υλικών για κάθε γέφυρα του δείγματος ως ποσοστό του κόστους της ανωδομής, ενώ ο Πίνακας 3-2 συνοψίζει τις μέσες τιμές του κόστους του ξυλότυπου-μεταλλότυπου και των υλικών εκφρασμένες ως ποσοστά του κόστους ανωδομής και κατασκευής και του συνολικού κόστους της γέφυρας.

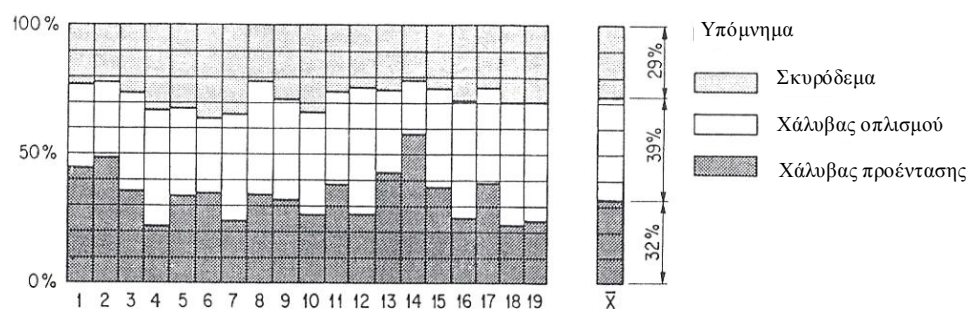
Πίνακας 3-2: Μέσο κόστος ξυλότυπου και υλικών

	Ξυλότυπος (%)	Υλικά (%)	Σύνολο (%)
Κόστος ανωδομής	37.00	63.00	100.00
Κόστος κατασκευής	26.00	44.00	70.00
Συνολικό κόστος κατασκευής	20.00	34.50	54.50



Σχήμα 3-4: Κόστος ξυλοτύπου και υλικών ως ποσοστό του κόστους ανωδομής

Το κόστος του σκυροδέματος, του χάλυβα οπλισμού και του χάλυβα προέντασης είναι συναρτήσεις του μήκους κάθε ανοίγματος και των διαστάσεων της διατομής της γέφυρας. Η αύξηση του πάχους των πλακών και των κορμών της διατομής οδηγεί σε αύξηση της ποσότητας του σκυροδέματος και των διαμήκων οπλισμών και σε μείωση της ποσότητας του εγκάρσιου οπλισμού. Είναι, επομένως, οικονομικά αποδοτικότερο να επιλέγονται διατομές με πλάκες και κορμούς σχετικά μεγάλου πάχους για γέφυρες μικρών ανοιγμάτων. Λεπτές και βαριά οπλισμένες διατομές είναι προτιμότερες για γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων, στις οποίες η μείωση των μόνιμων φορτίων είναι επιθυμητή. Το Σχήμα 3-5 παρουσιάζει το κόστος του σκυροδέματος, του χάλυβα οπλισμού και του χάλυβα προέντασης για κάθε γέφυρα του δείγματος ως ποσοστό του κόστους υλικών. Ο Πίνακας 3-3 συνοψίζει τις μέσες τιμές του κόστους του σκυροδέματος, του χάλυβα προέντασης και του χάλυβα οπλισμού ως ποσοστά του κόστους υλικών, ανωδομής και κατασκευής και του συνολικού κόστους της γέφυρας.



Σχήμα 3-5: Κόστος σκυροδέματος, χάλυβα οπλισμού και χάλυβα προέντασης ως ποσοστό του κόστους υλικών

Πίνακας 3-3: Μέσο κόστος σκυροδέματος, χάλυβα οπλισμού και χάλυβα προέντασης

	Σκυρόδεμα (%)	Χάλυβας οπλισμού (%)	Χάλυβας προέντασης (%)	Σύνολο (%)
Κόστος υλικών	29.00	39.00	32.00	100.00
Κόστος ανωδομής	18.00	25.00	20.00	63.00
Κόστος κατασκευής	12.50	17.00	14.50	44.00
Συνολικό κόστος κατασκευής	10.00	13.30	11.20	34.50

Τα μέση κόστη του σκυροδέματος, του χάλυβα οπλισμού και του χάλυβα προέντασης παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις. Μεταξύ 60 και 65% του χρησιμοποιούμενου χάλυβα οπλισμού απαιτείται συνήθως για τον έλεγχο της ρηγμάτωσης της ολοκληρωμένης κατασκευής. Μόνο το υπόλοιπο 35 έως 40% του χάλυβα οπλισμού και το σύνολο του χάλυβα προέντασης μπορούν να μειωθούν μέσω υπολογισμών. Μειώνοντας την ποσότητα του χάλυβα αυτού κατά 10%, θα μειωθεί το συνολικό κόστος κατασκευής της γέφυρας κατά λιγότερο από 2%. Επομένως, σημαντική εξοικονόμηση κόστους δεν μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη βελτιστοποίηση των υπολογισμών.

Οι μέσες τιμές του κόστους που προέκυψαν από το δείγμα των 19 γεφυρών συνοψίζονται στον Πίνακα 3-4. Ο Menn υποστήριξε ότι μολονότι το δείγμα αντιπροσωπεύει ευρεία ποικιλία συνθηκών, οι σημαντικότεροι παράγοντες κόστους δεν ποικίλλουν σημαντικά από τη μια γέφυρα στην άλλη και κατά συνέπεια, η προτεινόμενη κατανομή του μέσου κόστους κατασκευής είναι χρήσιμη στην προετοιμασία προκαταρκτικών εκτιμήσεων κόστους.

Πίνακας 3-4: Επιμερισμός μέσου κόστους

	Κόστος (% συνολικού κόστους κατασκευής)	
Κινητοποίηση		8.00
Κατασκευή		
Υποδομή		
Θεμελίωση	18.00	
Βάθρα και ακρόβαθρα	5.50	
Σύνολο Υποδομής	23.50	23.50
Ανωδομή		
Ξυλότυπος-μεταλλότυπος	20.00	
Σκυρόδεμα	10.00	
Χάλυβας Οπλισμού	13.30	
Χάλυβας Προέντασης	11.20	
Σύνολο Ανωδομής	54.50	54.50
Σύνολο Κατασκευής		78.00
Εξοπλισμος		14.00
Συνολικό κόστος κατασκευής		100.00

Ο Menn ανέπτυξε επίσης εμπειρικές εξισώσεις των ποσοτήτων εργασιών του σκυροδέματος, του χάλυβα οπλισμού και του χάλυβα προέντασης της ανωδομής γεφυρών. Πρότεινε διαφορετικές εξισώσεις για γέφυρες κατασκευασμένες συμβατικά με επιτόπια σκυροδέτηση και ξυλότυπο, με σταδιακή προώθηση και με προβολοδόμηση. Οι εξισώσεις αυτές, σε συνδυασμό με την κατανομή του συνολικού κόστους, οδηγούν σε εκτιμήσεις του συνολικού κόστους κατασκευής γεφυρών.

3.2.2 Έλεγχος σχέσεων Menn

Οι εμπειρικές εξισώσεις του Menn (1990) χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή εκτιμήσεων ποσοτήτων σκυροδέματος, χάλυβα οπλισμού και χάλυβα προέντασης για τις οδικές γέφυρες που κατασκευάστηκαν με συμμετρική προβολοδόμηση και με επιτόπια σκυροδέτηση στην Ελλάδα και για τις οποίες έχουν καταγραφεί πραγματικά κατασκευαστικά στοιχεία (αριθμός γεφυρών 15 και 18 αντίστοιχα). Οι εκτιμήσεις αυτές συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα

κατασκευασθέντα στοιχεία. Ο Πίνακας 3-5 παρουσιάζει τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση, τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της απόκλισης της εκτίμησης από την πραγματική ποσότητα.

Πίνακας 3-5: Απόκλιση εκτιμήσεων ποσοτήτων εργασιών κατά Μενν από τις πραγματικές

	V _c	B _s	B _p
1. Γέφυρες κατασκευασμένες με προβολοδόμηση			
Μέση Τιμή	-21,82%	-41,22%	-49,52%
Τυπική Απόκλιση	9,27%	12,63%	12,23%
Ελάχιστο	-9,51%	-19,78%	-27,41%
Μέγιστο	-41,47%	-55,07%	-68,77%
2. Γέφυρες με συμβατική κατασκευή			
Μέση Τιμή	-32,69%	-41,69%	-75,34%
Τυπική Απόκλιση	14,13%	13,41%	5,94%
Ελάχιστο	-8,48%	-21,99%	-58,47%
Μέγιστο	-61,08%	-70,31%	-86,05%

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-5 αναδεικνύουν ότι οι εμπειρικές εξισώσεις του Μενν υποεκτιμούν τις ποσότητες εργασιών της ανωδομής. Το γεγονός αυτό αποδίδεται καταρχήν στην ανομοιότητα των προδιαγραφών κατασκευής και των κανονισμών μελέτης των γεφυρών. Ο Μενν χρησιμοποίησε δείγμα γεφυρών που κατασκευάστηκαν στην Ελβετία μεταξύ των ετών 1958 και 1985. Οι κανονισμοί με βάση τους οποίους μελετήθηκαν αυτά τα τεχνικά έργα είναι σημαντικά διαφορετικοί από εκείνους που ισχύουν για τις γέφυρες του δείγματος. Παράλληλα, οι σεισμικές συνθήκες παρουσιάζουν σημαντική επίδραση στη μελέτη των γεφυρών. Η έκθεση εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας που εκπονήθηκε το 2004 χαρακτηρίζει τη σεισμική δραστηριότητα της Ελβετίας ως μέτρια και μνημονεύει ότι η Ελβετία παρουσιάζει μικρότερη αναμενόμενη μέγιστη επιτάχυνση εδάφους από την Ελλάδα (Swiss Seismological Service 2004). Αναφέρει, ακόμη, ότι η χώρα βρίσκεται στη μεταβατική ζώνη μεταξύ περιοχών υψηλής σεισμικής δραστηριότητας όπως η Ελλάδα και η Ιταλία και περιοχών χαμηλής δραστηριότητας της Βόρειας Ευρώπης. Επομένως, οι γέφυρες με βάση τις οποίες ο Μενν ανέπτυξε τις εμπειρικές εξισώσεις εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών μελετήθηκαν με ευνοϊκότερους κανονισμούς και φορτίσεις σε σύγκριση με τις γέφυρες του δείγματος.

Η απόκλιση των εκτιμήσεων του Menn από τις πραγματικές ποσότητες εργασιών πιθανόν να οφείλεται και στη στάση των μελετητών γεφυρών. Η Ελβετία είναι χώρα με μακροχρόνια παράδοση στη μελέτη και κατασκευή γεφυρών λόγω του ορεινού εδαφικού ανάγλυφου της χώρας. Η Ελλάδα, από την αντίθετη πλευρά, γνώρισε σημαντική έξαρση μελέτης και κατασκευής γεφυρών κατά τα τελευταία 15 χρόνια ως επακόλουθο της βελτίωσης των υποδομών μεταφοράς, της αναβάθμισης των υφιστάμενων οδικών αξόνων αλλά και της δημιουργίας νέων αυτοκινητοδρόμων με κυριότερο την Εγνατία Οδό. Επομένως, είναι πιθανό οι μελετητές των οδικών γεφυρών και οι ελεγκτές των μελετών στην Ελλάδα να είναι περισσότερο συντηρητικοί στο σχεδιασμό των έργων σε σύγκριση με συναδέλφους τους που κατέχουν μεγαλύτερη εμπειρία.

3.2.3 Στοιχεία δαπάνης γεφυρών από Υπηρεσίες Μεταφορών των Η.Π.Α.

Υπηρεσίες Μεταφορών διαφόρων πολιτειών των Η.Π.Α. έχουν δημοσιεύσει εκτιμήσεις δαπάνης γεφυρών βασισμένες σε οικονομικά στοιχεία από εκτελεσθέντα έργα και από προσφορές που κατατέθηκαν για την εκτέλεση έργων.

Η Υπηρεσία Μεταφορών της Αϊόβα (2011) παρέχει προκαταρκτικές εκτιμήσεις δαπάνης για τυπικές γέφυρες που κατασκευάζονται στην πολιτεία. Για παράδειγμα, το κόστος νέας γέφυρας με δοκούς προεντεταμένου σκυροδέματος εκτιμάται σε \$ 861 / μ² σε τιμές Απριλίου 2011. Οι συγκεκριμένες εκτιμήσεις θεωρούνται ακριβείς για σύγκριση εναλλακτικών έργων και μορφών σχεδιασμού, αλλά δεν προσφέρουν αξιοπιστία στον προσδιορισμό του τελικού κατασκευαστικού κόστους. Διευκρινίζεται ότι οι τιμές μονάδας που δίνονται πρέπει να προσαρμόζονται και να αυξάνονται μεταξύ άλλων σε έργα που κατασκευάζονται τμηματικά, σε σύνθετα έργα με μεταβλητό πλάτος καταστρώματος, στις περιπτώσεις κατασκευής γεφυρών άνωθεν κυκλοφορίας οχημάτων και σε αστικές πυκνοδομημένες περιοχές. Δεν περιλαμβάνουν τη δαπάνη κινητοποίησης του αναδόχου, την καθαίρεση υφιστάμενων κατασκευών, την κατασκευή πλακών πρόσβασης, καθώς και εκτεταμένες εργασίες διεθέτησης ποταμών.

Η Υπηρεσία Μεταφορών της Καλιφόρνιας (2011) δημοσιεύει το εύρος μονάδας δαπάνης για τυπικές διατομές γεφυρών που κατασκευάζονται στους αυτοκινητοδρόμους της πολιτείας. Τα στοιχεία προσφέρουν γενικές κατευθύνσεις για την επιλογή διατομής και στατικού συστήματος γέφυρας και το αντίστοιχο κόστος. Για παράδειγμα, το κόστος νέας γέφυρας διατομής κιβωτίου από προεντεταμένο σκυρόδεμα εκτιμάται μεταξύ \$ 968,40 έως 1.829,20 / μ² σε τιμές Ιανουαρίου 2011. Τα μικρά ανοίγματα, το χαμηλό ελεύθερο ύψος, η έλλειψη περιβαλλοντικών περιορισμών, η κατασκευή σε αστική περιοχή με ξηρές συνθήκες (όπου δεν απαιτείται άντληση υδάτων), η

χρήση επιφανειακής θεμελίωσης για τα βάθρα και ακροβάθρων καθιστού τύπου, αλλά και η συνεχόμενη κατασκευή συμβάλλουν στην υιοθέτηση τιμής μονάδας στο χαμηλό όριο του εύρους. Οι αντίθετες συνθήκες (για παράδειγμα μεγάλα ανοίγματα, περιβαλλοντικοί περιορισμοί στο έργο, απαιτήσεις αισθητικής, χρήση πασσάλων για θεμελίωση βάθρων και απομάκρυνση υδάτων με ειδικά έργα άντλησης) οδηγούν σε τιμές μονάδας κόστους στο υψηλό όριο του εύρους. Η τμηματική κατασκευή του έργου σε περισσότερες από δυο φάσεις και η αντιμετώπιση εδαφικών συνθηκών με εξειδικευμένες θεμελιώσεις οδηγούν σε υπερβάσεις δαπάνης κατά 25 έως 150% σε σύγκριση με το εύρος τιμών που δίνεται. Το Τμήμα Μεταφορών της πολιτείας της Καλιφόρνιας δημοσιεύει, επίσης, στατιστικά στοιχεία δαπάνης 83 έργων με βάση τις κατατεθειμένες προσφορές του 2010. Παρουσιάζονται και δείκτες μεταβολής του κόστους κατασκευής γεφυρών από το 1969 έως σήμερα με έτος βάσης το 1940.

Η Υπηρεσία Μεταφορών της Νέας Υορκής (2012) ανέπτυξε μεθοδολογία για την προκαταρκτική εκτίμηση της δαπάνης κατασκευής γεφυρών η οποία παρουσιάζεται σε ειδικό φύλλο εργασίας. Η μέθοδος χρησιμοποιείται στα αρχικά στάδια του έργου, στα οποία αρκετές λεπτομέρειες σχεδιασμού, όπως το ύψος των ακροβάθρων, δεν έχουν καθοριστεί. Οι τιμές μονάδας κόστους που εφαρμόζονται προσδιορίστηκαν από την εξέταση τρεχουσών προσφορών κατασκευής έργων. Ο χρήστης της μεθόδου ξεκινά από το βασικό κόστος κατασκευής της γέφυρας, το οποίο προσαρμόζει στη συνέχεια ανάλογα με τον τύπο θεμελίωσης, το ύψος των ακροβάθρων, το μήκος των ανοιγμάτων, την κυρτότητα των δοκών, το μήκος των περυγότοιχων και τη συνεχόμενη ή σταδιακή κατασκευή του έργου.

3.2.4 Έρευνα δαπάνης οδικών γεφυρών Ελλάδας με πραγματικά στοιχεία

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, συλλέχθηκαν πραγματικά στοιχεία δαπάνης για ολοκληρωμένες γέφυρες και άνω διαβάσεις της Εγνατίας Οδού. Η επεξεργασία των στοιχείων αυτών και τα συμπεράσματα που εξάγονται αποτέλεσαν το αντικείμενο πρόδρομης δημοσίευσης από τους Fragkakis και Lambropoulos (2004). Η συγκεκριμένη έρευνα παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα αυτή.

Το διαθέσιμο δείγμα περιλαμβάνει 16 γέφυρες με κατάστρωμα από προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς και πλάκα συνέχειας από οπλισμένο σκυρόδεμα, 16 γέφυρες με μονοκύψελο κιβώτιο κατασκευασμένες με προβολοδόμηση, 39 γέφυρες και 40 άνω διαβάσεις κατασκευασμένες συμβατικά με χρήση κριωμάτων με διατομή διάκενης πλάκας ή κιβώτιο. Η μέση συνολική δαπάνη κατασκευής ανά μονάδα επιφανείας καταστρώματος υπολογίστηκε για κάθε κατηγορία γεφυρών. Η δαπάνη αυτή αναφέρεται στον ΚτΕ και ανέρχεται σε 825 €/τ.μ. για

γέφυρες με προκατασκευασμένες δοκούς, σε 1245 €/τ.μ. για γέφυρες κατασκευασμένες με προβολοδόμηση, σε 745 €/τ.μ. για γέφυρες κατασκευασμένες συμβατικά και σε 630 €/τ.μ. για άνω διαβάσεις. Οι γέφυρες με προβολοδόμηση είναι οι πιο ακριβές, καθώς κατασκευάζονται με μεγάλα ανοίγματα στα πλέον δύσκολα εδαφικά ανάγλυφα και απαιτούνται μεγάλες διατομές και υψηλά βάθρα. Οι άνω διαβάσεις εμφανίζουν μικρότερη δαπάνη σε σύγκριση με τις γέφυρες, δεδομένου ότι διαθέτουν μικρότερο ελεύθερο ύψος και κατασκευάζονται σε εύκολες εδαφικές συνθήκες.

Η συνολική δαπάνη κατασκευής οδικής γέφυρας από σκυρόδεμα επιμερίστηκε σε χωματουργικές εργασίες, θεμελίωση, υποδομή, ανωδομή και εξοπλισμός. Οι χωματουργικές εργασίες αναφέρονται στην ασφαλή πρόσβαση στο εργοτάξιο, στη δημιουργία των αναγκαίων επιπέδων εργασίας για την κατασκευή των θεμελιώσεων, καθώς και στα ειδικά γεωτεχνικά έργα, όπως ενισχύσεις εδάφους και προστασία/σταθεροποίηση πρανών. Η δαπάνη θεμελίωσης περιλαμβάνει την κατασκευή των θεμελιώσεων όλων των ακροβάθρων και μεσοβάθρων, ενώ η δαπάνη υποδομής αναφέρεται στην ανέγερση των ακροβάθρων και μεσοβάθρων. Η δαπάνη ανωδομής αναφέρεται στην κατασκευή του καταστρώματος, ενώ ο εξοπλισμός περιλαμβάνει τα εφέδρανα, τους αρμούς διαστολής, το σύστημα αποχέτευσης / αποστράγγισης, τα στηθαία ασφαλείας, τη στεγάνωση και τις ασφαλικές στρώσεις.

Ο Πίνακας 3-6 παρουσιάζει αντιπροσωπευτικά αρχεία δαπάνης για κάθε κατηγορία γεφυρών και βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά (μήκος και πλάτος γέφυρας). Τα στοιχεία αναφέρονται σε χρόνο αναφοράς το Α΄ τρίμηνο 2003 και περιλαμβάνουν γενικά έξοδα και εργολαβικό όφελος (18%), όχι όμως Φ.Π.Α.

Ο Πίνακας 3-7 παρουσιάζει το ποσοστό και τη σύνθεση της συνολικής δαπάνης κατασκευής ανά κατηγορία εργασιών και περιέχει τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση, τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή των ποσοστών αυτών. Η μέση δαπάνη ανωδομής υπερβαίνει το ένα τρίτο της συνολικής δαπάνης κατασκευής σε όλες τις περιπτώσεις. Παρατηρούνται μέγιστες τιμές της που υπερβαίνουν το 50%. Η μέθοδος της προβολοδόμησης εφαρμόζεται για τα μεγαλύτερα ανοίγματα με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτερες διατομές φορέα και ακριβός ειδικός εξοπλισμός και να παρουσιάζει την υψηλότερη δαπάνη ανωδομής. Τα μεγάλα ανοίγματα οδηγούν σε μικρότερο αριθμό μεσοβάθρων σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους με αποτέλεσμα τη μικρότερη δαπάνη υποδομής. Οι χωματουργικές εργασίες αντιπροσωπεύουν το μικρότερο μέρος της συνολικής δαπάνης κατασκευής γεφυρών. Επισημαίνονται, όμως, οι σημαντικές μέγιστες τιμές και αποκλίσεις τους που οφείλονται στις γεωτεχνικές συνθήκες, οι οποίες καθιστούν σε μερικές περιπτώσεις απαραίτητα ειδικά γεωτεχνικά έργα, όπως σταθεροποίηση

πρανών και βελτιώσεις εδάφους. Η μέθοδος της προβολοδόμησης όπως εφαρμόζεται στην Ελλάδα περιλαμβάνει τη χρήση εφεδράνων μόνο στα ακρόβαθρα. Επομένως, παρατηρείται σημαντικά μικρότερη δαπάνη εξοπλισμού (7.40%) σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους στις οποίες το ποσοστό της ξεπερνά το 14.00%.

Πίνακας 3-6: Αντιπροσωπευτικά αρχεία δαπάνης γεφυρών (Fragkakis και Lambropoulos 2004)

Όνομα	l_{tot} (m)	b (m)	Χωματοργικά (000 €)	Θεμελίωση (000 €)	Υποδομή (000 €)	Ανωδομή (000 €)	Εξοπλισμός (000 €)	Σύνολο (000 €)	Δαπάνη/m ² (€/m ²)
1. Γέφυρες με προκατασκευασμένες δοκούς									
12+837-Ιασμος	416.0	14.25	217	1283	440	1353	711	4004	675
T5-Σιάτιστα	280.0	12.10	88	730	292	1461	205	2775	819
T6-Σιάτιστα	280.0	12.10	82	680	272	1361	191	2586	763
2. Γέφυρες με προβολοδόμηση									
Μεσοβούνι	260.0	13.00	90	568	299	1765	269	2991	885
Γ1 Καστανιά.	155.0	14.00	269	729	461	1094	211	2763	1273
Βοτονόσσι	490.0	13.50	240	1145	1,428	5615	396	8824	1333
3. Γέφυρες με συμβατική κατασκευή									
14+301- Αλεξ/πολη	180.0	13.75	57	272	264	408	241	1242	502
35+026-Ξάνθη	145.0	14.00	142	505	36	675	95	1452	715
24+483-Ιασμος	115.0	14.00	81	244	65	426	104	919	571
4. Άνω διαβάσεις με συμβατική κατασκευή									
25+544-Ιασμος	92.5	9.50	8	191	45	220	42	506	576
T9- Αρ. Ορεστικό	88.1	10.00	37	50	39	222	77	425	482
T3/Περιστέρι	83.0	9.00	53	56	44	296	74	523	700

Μελετώντας τις τιμές του Πίνακα 3-7 διαπιστώνεται ότι παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις σε κάθε υποδιαίρεση δαπάνης. Κατά συνέπεια, η επίτευξη αυξημένης ακρίβειας κατά την προεκτίμηση της δαπάνης κατασκευής προϋποθέτει προεκτίμηση δαπάνης των επιμέρους τριών κύριων συστατικών (θεμελίωση, βάθρα, φορέας) με βάση ανεξάρτητα στατιστικά μοντέλα

Πίνακας 3-7: Ποσοστιαία κατανομή συνολικής δαπάνης κατασκευής γεφυρών(Fragkakis και Lambropoulos 2004)

	Χωματουργικά	Θεμελίωση	Υποδομή	Ανωδομή	Εξοπλισμός
1. Γέφυρες με προκατασκευασμένες δοκούς					
Μέση Τιμή	4.70	26.70	15.90	34.40	18.30
Τυπική Απόκλιση	3.50	8.50	6.90	10.70	6.10
Ελάχιστο	0.30	7.80	7.50	17.40	7.40
Μέγιστο	14.70	39.90	27.10	52.60	30.20
2. Γέφυρες κατασκευασμένες με προβολοδόμηση					
Μέση Τιμή	8.30	19.20	15.20	49.90	7.40
Τυπική Απόκλιση	6.40	7.60	3.10	10.30	1.90
Ελάχιστο	2.70	5.40	10.00	39.20	4.50
Μέγιστο	23.60	28.10	19.90	64.30	9.80
3. Γέφυρες με συμβατική κατασκευή					
Μέση Τιμή	6.80	25.40	19.10	34.10	14.60
Τυπική Απόκλιση	6.10	11.30	6.80	11.80	8.00
Ελάχιστο	0.20	9.60	2.50	10.20	1.40
Μέγιστο	28.70	47.00	33.10	54.10	39.00
4. Άνω διαβάσεις με συμβατική κατασκευή					
Μέση Τιμή	10.40	17.70	17.80	37.80	16.20
Τυπική Απόκλιση	8.90	7.50	8.10	13.00	6.00
Ελάχιστο	0.60	8.50	5.70	14.20	2.40
Μέγιστο	31.20	39.10	41.20	61.20	39.50

3.3 Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, οι ερευνητικές μελέτες για οδικές γέφυρες που χρησιμοποιούν πραγματικά κατασκευαστικά και οικονομικά στοιχεία είναι πολύ περιορισμένες, λόγω της έλλειψης διαθέσιμων στοιχείων και της δυσκολίας ανάπτυξης μεγάλων και αξιόπιστων βάσεων δεδομένων. Μολονότι οι εκτιμήσεις δαπάνης και κόστους με θεωρητικές επιλύσεις σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μπορούν να προσφέρουν χρήσιμα αποτελέσματα, αδυνατούν να εξετάσουν τις πραγματικές συνθήκες κατασκευής και τις κατασκευαστικές αλλαγές που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της υλοποίησης του έργου. Επομένως, δεν μπορούν να

αποτυπώσουν πλήρως τους παράγοντες που επηρεάζουν τον τελικό σχεδιασμό και τη δαπάνη κατασκευής του έργου.

Τα πραγματικά στοιχεία δαπάνης που συλλέχθηκαν από κατασκευασμένες γέφυρες της Εγνατίας Οδού και ο επιμερισμός τους σε επιμέρους εργασίες ανέδειξαν την ύπαρξη σημαντικών αποκλίσεων σε κάθε υποδιαίρεση δαπάνης. Κατά συνέπεια, η επίτευξη αυξημένης ακρίβειας κατά την προεκτίμηση της δαπάνης κατασκευής οδικών γεφυρών προϋποθέτει προεκτίμηση δαπάνης των επιμέρους τριών κύριων συστατικών της (θεμελίωση, βάθρα, φορέας) με βάση ανεξάρτητα στατιστικά μοντέλα

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Η ανάλυση παλινδρόμησης (ΑΠ) είναι μια από τις πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες στατιστικές τεχνικές για την εξέταση και απεικόνιση της σχέσης μεταξύ μεταβλητών και την περιγραφή δειγμάτων δεδομένων. Οι εφαρμογές της είναι πολλές και εντοπίζονται σε διάφορους τομείς, όπως στις φυσικές, χημικές, βιολογικές και κοινωνικές επιστήμες, στα οικονομικά, στη διοίκηση επιχειρήσεων και στις επιστήμες μηχανικού.

Μοντέλα παλινδρόμησης χρησιμοποιούνται για αρκετούς σκοπούς όπως:

- Περιγραφή δεδομένων.
- Εκτίμηση παραμέτρων.
- Πρόβλεψη και εκτίμηση.
- Έλεγχο δεδομένων.

Η εκτίμηση του κόστους με στατιστικές μεθόδους βασίζεται στην αξιοποίηση ιστορικών δεδομένων και στη συμπύκνωσή τους σε μια εύκολα χρησιμοποιούμενη μορφή. Η ΑΠ είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες στατιστικές μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί από ερευνητές και μηχανικούς για την προσέγγιση του κόστους κατασκευαστικών έργων. Οι πρώτες εφαρμογές της εντοπίζονται στη δεκαετία του 1970.

Το κεφάλαιο περιέχει σύντομη επισκόπηση της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης, καθώς και των γενικών αρχών και παραδοχών της. Αναλύονται ακόμη τα κυριότερα ειδικά θέματα που πρέπει να εξετάζονται για την ορθή εφαρμογή της και παραθέτονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της. Παρουσιάζονται, τέλος, παραλλαγές της γραμμικής παλινδρόμησης για την επιλογή της καλύτερης εξίσωσης, καθώς και η εφαρμογή της μεθόδου bootstrap στην παλινδρόμηση.

Η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης έχει αποτελέσει αντικείμενο πληθώρας βιβλίων και δημοσιεύσεων. Η παρούσα επισκόπηση (μέθοδος, παραδοχές και στατιστικά στοιχεία) βασίστηκε στους Draper και Smith (1981), Maddala (1992), Rawlings et al.(1998) και Montgomery et al. (2006). Οι Gujarati (1999) και Maddala (1992) αναλύουν εκτενώς τα ειδικά θέματα της γραμμικής παλινδρόμησης. Η περιγραφή των παραλλαγών της γραμμικής παλινδρόμησης και της εφαρμογής της μεθόδου bootstrap βασίστηκε στους Draper και Smith (1981) και στους Montgomery et al. (2006) αντίστοιχα.

Η διεξοδική ανάλυση της στατιστικής μεθόδου της παλινδρόμησης ξεπερνά το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζει το βασικό πλαίσιο που θα χρησιμοποιηθεί για τη στατιστική επεξεργασία των συλλεχθέντων στοιχείων.

4.1 Γραμμική Παλινδρόμηση

4.1.1 Σύντομη παρουσίαση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης

Η ΑΠ περιγράφει και αξιολογεί τη σχέση μεταξύ μιας δεδομένης μεταβλητής που ονομάζεται εξαρτημένη (dependent ή explained) και συμβολίζεται με Y και μιας ή περισσότερων μεταβλητών που ονομάζονται ανεξάρτητες (independent) και συμβολίζονται με X_1, X_2, \dots, X_k . Η απλή ΑΠ αναφέρεται στην περίπτωση μιας ανεξάρτητης μεταβλητής, ενώ η πολλαπλή ανάλυση ΑΠ σε περισσότερες από μια μεταβλητές.

Η περίπτωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης θα εξεταστεί χάριν απλούστευσης. Υποθέτουμε ότι η γραμμή της παλινδρόμησης της μεταβλητής που συμβολίζεται με Y πάνω στη μεταβλητή X είναι γραμμική και αποτελεί στοχαστική σχέση. Το γραμμικό μοντέλο πρώτης τάξης γράφεται ως εξής:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (4-1)$$

που σημαίνει ότι για τη δοθείσα τιμή της X , η αντίστοιχη παρατήρηση Y αποτελείται από την τιμή $\beta_0 + \beta_1 X$ συν την ποσότητα ε που εκφράζει την προσαύξηση μέσω της οποίας κάποια παρατήρηση Y απέχει από τη γραμμή της παλινδρόμησης. Η ποσότητα αυτή αποτελεί τον όρο σφάλματος. Ο συντελεστής β_1 ονομάζεται κλίση της ευθείας παλινδρόμησης.

Τα β_0 , β_1 και ε στην εξίσωση είναι άγνωστα. Το ε είναι δύσκολο να βρεθεί επειδή μεταβάλλεται για κάθε παρατήρηση Y . Αν δεν υπήρχε τυχαίο σφάλμα στις παρατηρήσεις Y , οι παράμετροι β_0 και β_1 θα μπορούσαν να υπολογιστούν από δυο οποιαδήποτε ζεύγη παρατηρήσεων X και Y . Ωστόσο, δεδομένης της ύπαρξης του τυχαίου σφάλματος, τα β_0 και β_1 παραμένουν σταθερά και μολονότι δε μπορούν να υπολογιστούν ακριβώς χωρίς να εξεταστούν όλες οι δυνατές τιμές των Y και X , μπορούν να αξιοποιηθούν οι παρατηρήσεις των παραμέτρων Y και X του δείγματος για να αποκτηθούν οι εκτιμήσεις b_0 και b_1 των β_0 και β_1 αντίστοιχα. Επομένως η Εξίσωση 4-1 γράφεται

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X \quad (4-2)$$

όπου \hat{Y} (« Y με καπέλο») συμβολίζει την προβλεπόμενη (predicted) τιμή της Y για δοθείσα τιμή της X , όταν οι τιμές των b_0 και b_1 έχουν προσδιοριστεί. Η Εξίσωση 4-2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εξίσωση πρόβλεψης (predictive equation), όπου αντικαθιστώντας μια τιμή της X παίρνουμε πρόβλεψη για την αληθινή μέση τιμή της Y , για αυτή τη συγκεκριμένη τιμή της X . Συνήθίζεται η χρήση πεζών λατινικών γραμμάτων b_0 και b_1 για το συμβολισμό των εκτιμήσεων των παραμέτρων, οι οποίες συμβολίζονται με τα ελληνικά γράμματα β_0 και β_1 . Ο συμβολισμός $\hat{\beta}_0$ και $\hat{\beta}_1$ επίσης χρησιμοποιείται συχνά για τις εκτιμήσεις.

Ο σκοπός της ανάλυσης είναι η εξαγωγή εκτιμήσεων των άγνωστων παραμέτρων b_0 και b_1 της Εξίσωσης 4-2 με δεδομένες τις παρατηρήσεις των Y και X . Για τον υπολογισμό των εκτιμήσεων αυτών, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι που θεωρούνται οι καλύτερες με βάση κάποιο κριτήριο. Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων είναι η βασικότερη. Χρησιμοποιεί το κριτήριο ότι η λύση πρέπει να οδηγεί στο μικρότερο δυνατό άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των παρατηρούμενων Y από την πραγματική γραμμή. Ας υποθέσουμε ότι διαθέτουμε n σύνολα παρατηρήσεων $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$. Τότε σύμφωνα με την Εξίσωση 4-1 μπορούμε να γράψουμε

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (4-3)$$

για $i=1,2,\dots,n$, έτσι ώστε το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων από την πραγματική γραμμή είναι:

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_i)^2 \quad (4-4)$$

Οι εκτιμήσεις b_0 και b_1 θα επιλεγθούν, ώστε όταν αντικαταστήσουν τα β_0 και β_1 στην Εξίσωση 4-4 να δίνουν την ελάχιστη δυνατή τιμή για το S . Καταλήγουμε τελικά στις ακόλουθες σχέσεις:

$$b_1 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (4-5)$$

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X} \quad (4-6)$$

όπου όλα τα αθροίσματα είναι από $i=1$ μέχρι n , $\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$ και $\bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n}$.

Οι κυριότερες ιδιότητες των εκτιμητών των ελαχίστων τετραγώνων b_0 και b_1 είναι οι ακόλουθες:

- Είναι γραμμικοί συνδυασμοί των παρατηρήσεων Y .
- Είναι αμερόληπτοι εκτιμητές των παραμέτρων β_0 και β_1 .
- Όταν η μέση τιμή και η διασπορά του όρου σφάλματος είναι μηδενική και σταθερή αντίστοιχα και τα σφάλματα είναι ασυσχέτιστα, οι εκτιμητές των ελαχίστων τετραγώνων είναι αμερόληπτοι και έχουν την ελάχιστη διασπορά όταν συγκριθούν με όλους τους υπόλοιπους αμερόληπτους εκτιμητές που είναι γραμμικοί συνδυασμοί των Y . Για το λόγο αυτό, ονομάζονται ως οι καλύτεροι γραμμικοί αμερόληπτοι εκτιμητές (best linear unbiased estimators).

4.1.2 Παραδοχές γραμμικής παλινδρόμησης

Για την ορθή εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης πρέπει να τηρούνται ορισμένες παραδοχές. Οι βασικές υποθέσεις του μοντέλου της Εξίσωσης 4-3 είναι οι ακόλουθες:

1. Ο όρος σφάλματος ε_i είναι μία τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή μηδέν και άγνωστη κοινή διασπορά για όλα τα i .
2. Τα ε_i και ε_j είναι ασυσχέτιστα για $i \neq j$, έτσι ώστε η συνδιακύμανσή τους να ισούται με μηδέν ($\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$). Επομένως και τα Y_i και Y_j για $i \neq j$ είναι ασυσχέτιστα.
3. Ο όρος σφάλματος ε_i είναι μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κανονική κατανομή, με μέση τιμή μηδέν και κοινή διασπορά (υπόθεση κανονικότητας). Κάτω από την τελευταία αυτή υπόθεση, έπεται ότι τα ε_i και ε_j δεν είναι μόνο ασυσχέτιστα αλλά και ανεξάρτητα (υπόθεση ανεξαρτησίας).

4.1.3 Στατιστικά στοιχεία παλινδρόμησης

Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) είναι ένας από τους βασικότερους δείκτες της ΑΠ. Ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4-7)$$

όπου και τα δύο αθροίσματα γίνονται για $i=1,2,\dots,n$. Το R^2 μετράει την αναλογία της συνολικής μεταβλητότητας γύρω από τη μέση τιμή που ερμηνεύεται από την παλινδρόμηση. Η αναλογία

αυτή εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό επί τοις εκατό. Ο συντελεστής προσδιορισμού παρέχει μέτρο της μεταβλητότητας που εξηγείται από το μοντέλο. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο καλύτερα η εξίσωση προσαρμογής (παλινδρόμησης) ερμηνεύει τη μεταβλητότητα των δεδομένων. Η τετραγωνική ρίζα του συντελεστή προσδιορισμού ονομάζεται συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης (multiple correlation coefficient) και είναι η συσχέτιση μεταξύ των τιμών Y και \hat{Y} .

Η τιμή του στατιστικού ελέγχου t εξετάζει την υπόθεση ότι ο συντελεστής παλινδρόμησης β_1 ισούται με μηδέν και ως εκ τούτου, η ανεξάρτητη μεταβλητή δεν έχει επίδραση στην εξαρτημένη μεταβλητή. Για τη διεξαγωγή του ελέγχου συγκρίνεται η τιμή t της παλινδρόμησης με την κρίσιμη τιμή από τον πίνακα της κατανομής t . Εναλλακτικά χρησιμοποιείται η τιμή του στατιστικού ελέγχου p (τιμή p) που εκφράζει την πιθανότητα ένας συντελεστής παλινδρόμησης να ισούται με μηδέν. Τιμές p μικρότερες από το επίπεδο σημαντικότητας που επιλέγεται εκφράζουν στατιστική σημαντικότητα της ανεξάρτητης μεταβλητής.

Η συνάρτηση MS_{reg} ονομάζεται μέσο τετράγωνο λόγω παλινδρόμησης και η s^2 μέσο τετράγωνο λόγω της υπόλοιπης μεταβολής. Οι συναρτήσεις αυτές περιέχονται στους συνήθεις πίνακες ανάλυσης διασποράς (πίνακες ANOVA) των περισσότερων λογισμικών στατιστικής ανάλυσης. Αποδεικνύεται ότι ο λόγος τους ($F = MS_{reg} / s^2$) ακολουθεί F -κατανομή με 1 και $(n-2)$ βαθμούς ελευθερίας με την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής παλινδρόμησης β_1 ισούται με μηδέν. Το γεγονός αυτό χρησιμοποιείται ως έλεγχος για τη σημαντικότητα της παλινδρόμησης και για το αν ο συντελεστής παλινδρόμησης β_1 ισούται με μηδέν. Ειδικότερα, συγκρίνεται ο λόγος αυτός με το κρίσιμο $100(1-\alpha)\%$ σημείο της κατανομής $F(1, n-2)$ από τον αντίστοιχο πίνακα και διαπιστώνεται αν ο συντελεστής παλινδρόμησης β_1 μπορεί να θεωρηθεί μηδενικός στο δείγμα δεδομένων που εξετάζεται. Ο F έλεγχος είναι ισοδύναμος με τον έλεγχο t που προαναφέρθηκε. στην περίπτωση της απλής παλινδρόμησης. Στην περίπτωση πολλαπλής παλινδρόμησης με περισσότερες από μια ανεξάρτητες μεταβλητές, ο ολικός F έλεγχος αναφέρεται σε ταυτόχρονες μηδενικές τιμές όλων των συντελεστών παλινδρόμησης β_1, β_2 κλπ, οπότε στην πράξη εξετάζεται η υπόθεση ότι ο συντελεστής προσδιορισμού ισούται με μηδέν. Η σημαντικότητα του ελέγχου F εκφράζει την πιθανότητα να είναι ορθή η προαναφερθείσα υπόθεση. Τιμές μικρότερες από το επιλεγμένο επίπεδο σημαντικότητας (1% στις περισσότερες περιπτώσεις) εκφράζουν σημαντικότητα του μοντέλου παλινδρόμησης.

4.1.4 Προβληματισμοί στη χρήση της ανάλυσης παλινδρόμησης

Η ΑΠ χρησιμοποιείται αρκετές φορές με λανθασμένο τρόπο από τους ερευνητές για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συσχέτιση μεταβλητών. Οι παρακάτω περιπτώσεις αποτελούν συνηθισμένα παραδείγματα λανθασμένης χρήσης της μεθόδου που πρέπει να προβληματίζουν τους ερευνητές (Montgomery et al. 2006).

1. Το μοντέλα παλινδρόμησης είναι εξισώσεις προσαρμογής εντός του εύρους τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή τους. Ο χρήστης πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός στη χρήση των μοντέλων για τιμές εκτός του συγκεκριμένου εύρους.
2. Η διάταξη των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών X διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην προσαρμογή με τη χρήση των ελαχίστων τετραγώνων. Ενώ όλα τα σημεία έχουν το ίδιο βάρος στον προσδιορισμό της γραμμής παλινδρόμησης, η κλίση επηρεάζεται κυρίως από τις απομακρυσμένες τιμές των X . Ο ερευνητής γενικά οφείλει να γνωρίζει ότι λίγα μόνο σημεία δύναται να ελέγχουν βασικές ιδιότητες του μοντέλου σε ορισμένα δείγματα δεδομένων.
3. Οι απομονωμένες τιμές (outliers) μπορεί να επηρεάσουν αρκετά την προσαρμογή των ελαχίστων τετραγώνων. Η εκτίμηση του συντελεστή παλινδρόμησης πιθανώς να είναι λανθασμένη αν ένα σημείο αποτελεί απομονωμένη τιμή.
4. Η ανάδειξη μέσω της ΑΠ σημαντικής σχέσης μεταξύ δυο μεταβλητών δεν συνεπάγεται απαραίτητα ότι οι μεταβλητές συνδέονται με σχέση αιτίου – αιτιατού. Η αιτιότητα μεταξύ δυο μεταβλητών προϋποθέτει και απαραίτητη-αναγκαστική συσχέτιση. Η ΑΠ αντιμετωπίζει μόνο το θέμα της συσχέτισης και όχι το γεγονός ότι πρέπει να είναι αναγκαστική. Ως εκ τούτου, ο ερευνητής πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός στην απόδειξη σχέσεων αιτίου – αιτιατού μέσω ΑΠ.

4.2 Ειδικά θέματα παλινδρόμησης

4.2.1 Πολυσυγγραμμικότητα

Μια από τις βασικές παραδοχές του κλασσικού μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης είναι ότι δεν υφίσταται τέλεια πολυσυγγραμμικότητα (multicollinearity), δηλαδή ακριβής γραμμική σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών που περιλαμβάνονται στην παλινδρόμηση. Στην περίπτωση της τέλει πολυσυγγραμμικότητας, δεν δύναται να αποκτηθούν

μοναδικές εκτιμήσεις των παραμέτρων και να πραγματοποιηθεί έλεγχος υποθέσεων για δεδομένο δείγμα (Gujarati 1999). Ο όρος «πολυσυγγραμμικότητα» θα αναφέρεται στη συνέχεια στις περιπτώσεις υψηλής και ατελούς συγγραμμικότητας.

Οι ακόλουθες πρακτικές συνέπειες πιθανόν να συναντηθούν στις περιπτώσεις υψηλής πολυσυγγραμμικότητας (Gujarati 1999):

1. Μεγάλες αποκλίσεις και τυπικά σφάλματα των εκτιμητών ελαχίστων τετραγώνων.
2. Ευρύτερα διαστήματα εμπιστοσύνης.
3. «Ασήμαντοι» λόγοι t . Ο λόγος t χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της υπόθεσης ότι ένας συντελεστής παλινδρόμησης ισούται με μηδέν και η εκτιμηθείσα τιμή t συγκρίνεται με την κρίσιμη τιμή t από τον πίνακα της κατανομής. Όμως, στις περιπτώσεις υψηλής συγγραμμικότητας, τα εκτιμηθέντα τυπικά σφάλματα αυξάνονται σημαντικά, με αποτέλεσμα τη μείωση των τιμών t και την αύξηση των πιθανοτήτων αποδοχής της υπόθεσης ότι ο σχετικός πραγματικός συντελεστής του πληθυσμού είναι μηδενικός.
4. Υψηλές τιμές του συντελεστή προσδιορισμού R^2 , αλλά ελάχιστοι σημαντικοί λόγοι t .
5. Οι εκτιμητές ελαχίστων τετραγώνων και τα τυπικά τους σφάλματα γίνονται πολύ ευαίσθητοι σε μικρές αλλαγές των δεδομένων και τείνουν να είναι ασταθείς.
6. Εσφαλμένα πρόσημα των συντελεστών παλινδρόμησης.
7. Δυσκολία εκτίμησης της ατομικής συμβολής των ανεξάρτητων μεταβλητών στο άθροισμα των τετραγώνων που εξηγείται από την παλινδρόμηση ή στο συντελεστή προσδιορισμού.

Συνοψίζοντας, η πολυσυγγραμμικότητα καθιστά δύσκολη τη σωστή αποτίμηση από τους ερευνητές της οριακής συμβολής των παραμέτρων (Belshey et al. 1980), καθώς προκαλεί μεγάλα τυπικά σφάλματα των συντελεστών παλινδρόμησης και οδηγεί σε παραπλανητικά συμπεράσματα στους ελέγχους υποθέσεων και στατιστικής σημαντικότητας, στην εκτίμηση και πρόβλεψη.

Οι κυριότερες ενδείξεις ύπαρξης πολυσυγγραμμικότητας είναι οι ακόλουθες (Gujarati 1999):

1. Υψηλοί συντελεστές προσδιορισμού, αλλά λιγοστοί στατιστικώς σημαντικοί λόγοι t .
2. Υψηλές κατά ζεύγος συσχετίσεις μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Το συγκεκριμένο κριτήριο δεν αποδεικνύεται αξιόπιστο σε όλες τις περιπτώσεις.

3. Υψηλοί συντελεστές μερικής συσχέτισης μεταξύ ανεξάρτητων μεταβλητών. Το συγκεκριμένο κριτήριο επίσης δεν είναι πλήρως αξιόπιστο σε όλες τις περιπτώσεις.
4. Εναλλακτικές παλινδρομήσεις. Δεδομένου ότι η συγγραμμικότητα οφείλεται στο γεγονός ότι μια ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές είναι ακριβείς ή σχεδόν ακριβείς γραμμικοί συνδυασμοί άλλων ανεξάρτητων μεταβλητών, είναι δυνατό να εκτελεστεί η παλινδρόμηση κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής με τις υπόλοιπες και να υπολογιστούν οι σχετικοί συντελεστές προσδιορισμού. Η σημαντικότητα κάθε συντελεστή προσδιορισμού ελέγχεται στη συνέχεια με τον F-έλεγχο.
5. Variance Inflation factor (VIF). Οι συντελεστές προσδιορισμού των εναλλακτικών παλινδρομήσεων δεν αποτελούν πλήρως αξιόπιστα διαγνωστικά εργαλεία πολυσυγγραμμικότητας. Το VIF ισούται με

$$VIF = \frac{1}{(1 - R_i^2)} \quad (4-8)$$

όπου R_i^2 είναι ο συντελεστής προσδιορισμού των εναλλακτικών παλινδρομήσεων (X_i στα υπόλοιπα X_s). Σύμφωνα με τους Chatterjee και Price (1991), τιμές μεγαλύτερες από 10 αποτελούν ένδειξη ύπαρξης πολυσυγγραμμικότητας. Το VIF υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή.

6. Condition Number (Maddala 1992): Ο condition number αποτελεί συνολική μέτρηση της πολυσυγγραμμικότητας και μετρά την ευαισθησία των εκτιμητών της παλινδρόμησης σε μικρές μεταβολές των δεδομένων. Όσο περισσότερο προσεγγίζει την τιμή ένα, τόσο καλύτερη είναι η κατάσταση των δεδομένων.

Πρόσθετες ενδείξεις ύπαρξης πολυσυγγραμμικότητας αναφέρονται από τον Maddala (1992).

Η πολυσυγγραμμικότητα αποτελεί μέρος του δείγματος και όχι του πληθυσμού. Ο εντοπισμός αναφέρεται κυρίως στο βαθμό της πολυσυγγραμμικότητας που υφίσταται στο δείγμα. Ουσιαστικά δεν ελέγχεται η ύπαρξη πολυσυγγραμμικότητας, αλλά εξετάζεται – μετράται ο βαθμός πολυσυγγραμμικότητας σε ένα δεδομένο δείγμα.

Οι υψηλές συσχετίσεις μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών δε δημιουργούν σε όλες τις περιπτώσεις υποχρεωτικά από μόνες τους προβλήματα στους ελέγχους υποθέσεων (Maddala 1992). Το μέγεθος της διασποράς του όρου σφάλματος και των διασπορών των ανεξάρτητων μεταβλητών καθορίζει κατά πόσο οι υψηλές συσχετίσεις θα αποτελέσουν πρόβλημα στην

παλινδρόμηση. Οι υψηλές συσχετίσεις δεν αποτελούν πρόβλημα όταν υφίσταται επαρκής διακύμανση στις ανεξάρτητες μεταβλητές και η διασπορά του όρου σφάλματος είναι μικρή.

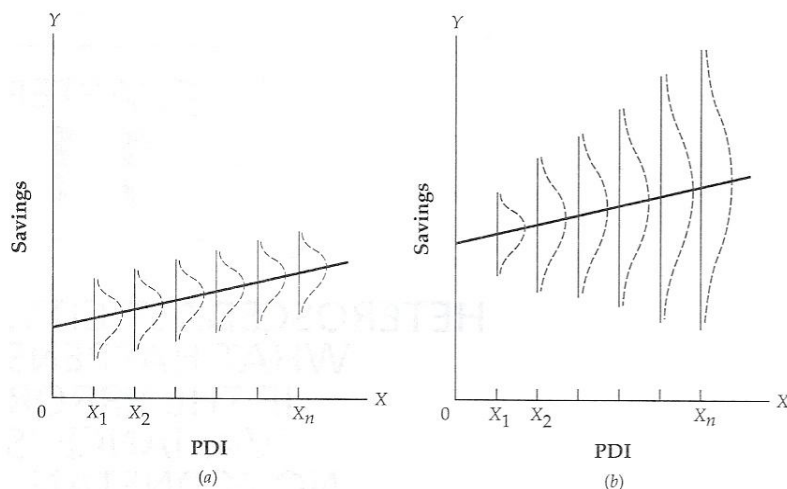
Ορισμένα θεραπευτικά μέτρα που έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση της πολυσυγγραμμικότητας είναι τα ακόλουθα (Gujarati 1999; Maddala 1992):

1. Απαλοιφή της μεταβλητής από το μοντέλο. Δεδομένου, όμως, ότι ο σχηματισμός του μοντέλου βασίζεται σε θεωρητικές εκτιμήσεις, η απαλοιφή μεταβλητών δύναται να οδηγήσει σε σφάλμα προδιαγραφής του μοντέλου και επομένως, σε εσφαλμένους συντελεστές παλινδρόμησης του νέου μοντέλου.
2. Απόκτηση περισσότερων δεδομένων ή νέου δείγματος. Η αύξηση του μεγέθους του δείγματος περιορίζει σε αρκετές περιπτώσεις το βαθμό της πολυσυγγραμμικότητας.
3. Επανεξέταση του μοντέλου που επιλέγεται από εμπειρική ανάλυση.
4. Μετατροπή των μεταβλητών.
5. Παλινδρόμηση κορυφογραμμής (ridge regression).
6. Παλινδρόμηση κύριων συνιστωσών (principal component regression).

Δεδομένου ότι η πολυσυγγραμμικότητα αποτελεί μέρος συγκεκριμένου δείγματος, δεν μπορεί εκ των προτέρων να προβλεφθούν η μέθοδος εντοπισμού και το θεραπευτικό μέτρο που θα αποδώσουν καλύτερα στη δεδομένη κατάσταση.

4.2.2 Ετεροσκεδαστικότητα

Μια βασική παραδοχή του κλασσικού μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης είναι ότι τα υπόλοιπα έχουν σταθερή διασπορά, δηλαδή είναι ομοσκεδαστικά. Η αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν η διασπορά μεταβάλλεται μεταξύ των παρατηρήσεων, ονομάζεται ετεροσκεδαστικότητα. Για να εξηγηθεί καλύτερα η διαφορά μεταξύ ομοσκεδαστικότητας και ετεροσκεδαστικότητας, θεωρούμε ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης, στο οποίο οι προσωπικές οικονομίες-αποταμιεύσεις (Savings) αποτελούν την εξαρτημένη μεταβλητή και το προσωπικό μετά φόρων εισόδημα (Personal Disposable Income – PDI) την ανεξάρτητη μεταβλητή.



Σχήμα 4-1: Γραφικές παραστάσεις ομοσκεδαστικότητας και ετεροσκεδαστικότητας (Gujarati 1999)

Το Σχήμα 4-1(α) δείχνει ότι όταν αυξάνεται το εισόδημα, το μέσο επίπεδο οικονομιών επίσης αυξάνεται, αλλά η διασπορά τους γύρω από τη μέση τιμή παραμένει σταθερή για όλα τα επίπεδα εισοδήματος. Αυτή είναι η περίπτωση της ομοσκεδαστικότητας. Αντίθετα, το Σχήμα 4-1(β) δείχνει ότι, μολονότι το επίπεδο των οικονομιών αυξάνεται με την αύξηση του εισοδήματος, η διασπορά του δεν παραμένει σταθερή για όλα τα επίπεδα του εισοδήματος. Δείχνει, ακόμη, ότι άνθρωποι υψηλού εισοδήματος αποταμιεύουν περισσότερο κατά μέσο όρο σε σχέση με τους ανθρώπους χαμηλού εισοδήματος και ότι παρατηρείται μεγαλύτερη μεταβλητότητα στις αποταμιεύσεις τους.

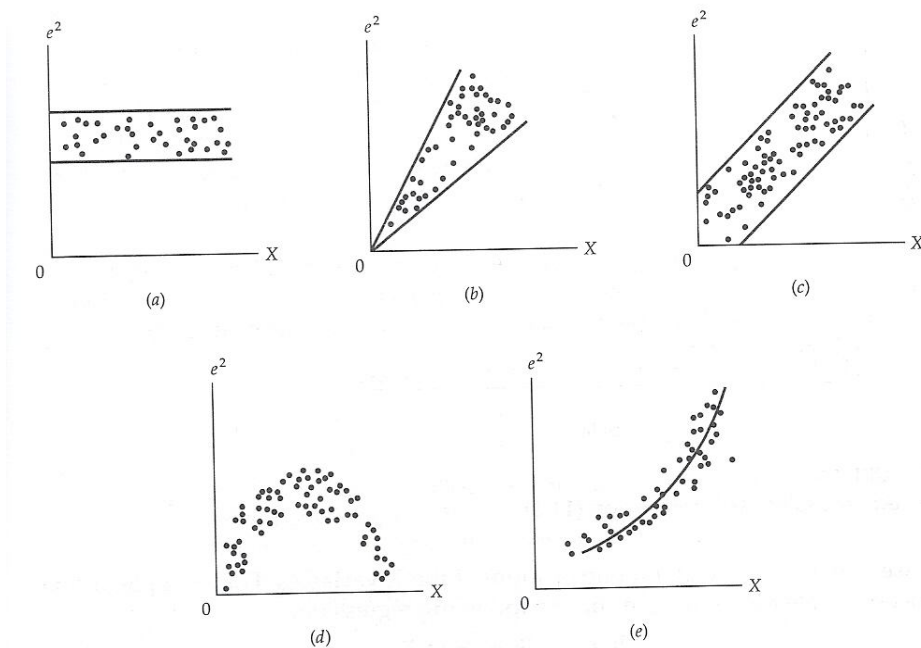
Οι ακόλουθες συνέπειες συναντώνται στις περιπτώσεις ετεροσκεδαστικότητας (Gujarati 1999; Maddala 1992):

1. Οι εκτιμητές ελαχίστων τετραγώνων είναι γραμμικοί και αμερόληπτοι.
2. Οι εκτιμητές ελαχίστων τετραγώνων δεν έχουν ελάχιστη διασπορά, δηλαδή δεν είναι πλέον αποτελεσματικοί. Συνεπώς, δεν είναι οι καλύτεροι γραμμικοί αμερόληπτοι εκτιμητές.
3. Οι συνήθεις συναρτήσεις υπολογισμού της διασποράς των εκτιμητών ελαχίστων τετραγώνων είναι μεροληπτικές.
4. Τα διαστήματα εμπιστοσύνης και οι έλεγχοι υποθέσεων που βασίζονται σε κατανομές t και F δεν είναι αξιόπιστες. Επομένως, υφίσταται πιθανότητα εξαγωγής

λανθασμένων συμπερασμάτων από τη χρήση συμβατικών διαδικασιών ελέγχου υποθέσεων.

Συνοψίζοντας, οι συνήθεις εφαρμογές ελέγχου υποθέσεων δεν είναι οι πλέον αξιόπιστες εξαιτίας της παρουσίας ετεροσκεδαστικότητας και υπάρχει πιθανότητα εξαγωγής λανθασμένων συμπερασμάτων.

Κατά αναλογία με την πολυσυγγραμμικότητα, δεν υφίσταται σίγουρη μέθοδος εντοπισμού της ετεροσκεδαστικότητας. Έχουν, όμως, προταθεί αρκετά διαγνωστικά εργαλεία που βοηθούν στον εντοπισμό της. Κατά πρώτο λόγο, χρήσιμα συμπεράσματα εξάγονται από την εξέταση των υπολοίπων της συνάρτησης παλινδρόμησης. Το Σχήμα 4-2 παρουσιάζει πρότυπα ετεροσκεδαστικότητας που πιθανώς να συναντηθούν στα διαγράμματα του τετραγώνου των υπολοίπων (e^2) με την ανεξάρτητη μεταβλητή. Τα διαγράμματα του τετραγώνου των υπολοίπων με κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή ή με την εκτιμώμενη μέση τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής \hat{Y}_i μελετώνται στις περιπτώσεις πολλαπλής παλινδρόμησης.



Σχήμα 4-2: Πρότυπα ετεροσκεδαστικότητας στα διαγράμματα του τετραγώνου των υπολοίπων (Gujarati 1999)

Ο White (1980) πρότεινε έναν εύκολο στην εφαρμογή γενικό έλεγχο ετεροσκεδαστικότητας. Ο έλεγχος του White περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα (Gujarati 1999):

1. Εκτιμάται πρώτα η συνάρτηση παλινδρόμησης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και εξάγονται τα υπόλοιπα e_i .
2. Εξετάζεται η εναλλακτική παλινδρόμηση του τετραγώνου των υπολοίπων ως εξαρτημένη μεταβλητή και των αρχικών ανεξάρτητων μεταβλητών, των τετραγώνων τους και τους συνδυασμούς πολλαπλασιασμού τους ανά δυο ως ανεξάρτητες μεταβλητές.
3. Εξάγεται ο συντελεστής προσδιορισμού της εναλλακτικής παλινδρόμησης. Ο White απέδειξε ότι, όταν δεν υφίσταται ετεροσκεδαστικότητα, ο συντελεστής προσδιορισμού της εναλλακτικής παλινδρόμησης, πολλαπλασιασμένος με το μέγεθος του δείγματος, ακολουθεί την κατανομή X^2 με βαθμούς ελευθερίας ίσους με τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών της εναλλακτικής παλινδρόμησης.
4. Αν η τιμή X^2 που εξάγεται υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή για δεδομένο επίπεδο σημαντικότητας ή αν η τιμή p της τιμής X^2 είναι χαμηλή, απορρίπτεται η βασική υπόθεση ότι δεν υφίσταται ετεροσκεδαστικότητα.

Πληθώρα πρόσθετων εργαλείων εντοπισμού ετεροσκεδαστικότητας αναφέρονται από τους Gujarati (1999) και Maddala (1992).

Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση της ετεροσκεδαστικότητας (Gujarati 1999). Η μέθοδος των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων είναι η κυριότερη. Εξάγει τους καλύτερους γραμμικούς αμερόληπτους εκτιμητές, αλλά βασίζεται σε γνωστή διασπορά του όρου σφάλματος. Η πραγματική διασπορά του όρου σφάλματος είναι σπανίως γνωστή, με αποτέλεσμα τη χρήση παραδοχών για τη διασπορά των υπολοίπων και το μετασχηματισμό των δεδομένων ώστε ο όρος σφάλματος στο μετασχηματισμένο μοντέλο παλινδρόμησης να είναι ομοσκεδαστικός. Ο μετασχηματισμός των δεδομένων στις λογαριθμικές τους τιμές και ο αποπληθωρισμός τους με κάποιο μέτρο μεγέθους έχουν επίσης προταθεί για τον περιορισμό του προβλήματος της ετεροσκεδαστικότητας (Maddala 1992).

Δεδομένου ότι η παρουσία ετεροσκεδαστικότητας καθιστά τους εκτιμητές ελαχίστων τετραγώνων μη αποτελεσματικούς και τους ελέγχους υποθέσεων αναξιόπιστους, ο White ανέπτυξε διαδικασία εκτίμησης των τυπικών σφαλμάτων των συντελεστών παλινδρόμησης που

λαμβάνει υπόψη την παρουσία ετεροσκεδαστικότητας και δεν απαιτεί μετασχηματισμό του μοντέλου, όπως προϋποθέτει η μέγεθος των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων. Οι MacKinnon και White (1985) εξέφρασαν ανησυχίες για την αξιοπιστία των διορθωμένων τυπικών σφαλμάτων για μικρά δείγματα και πρότειναν τη χρήση τριών ελέγχων με την ονομασία «HC1», «HC2» και «HC3». Οι Long και Ervin (2000) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο έλεγχος με την ονομασία «HC3» είναι ο πιο αξιόπιστος.

4.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα παλινδρόμησης

Παραμετρικά μοντέλα εκτίμησης κόστους που βασίζονται σε στατιστική ανάλυση με παλινδρόμηση έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί από αρκετούς ερευνητές, λόγω των απλών υπολογισμών και διατυπώσεων των σχέσεων που περιέχουν (Ayed 1997). Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιεί ιστορικά δεδομένα για την ανάπτυξη μοντέλων, στα οποία ένα χαρακτηριστικό του συστήματος, το κόστος, εκτιμάται από άλλα χαρακτηριστικά απόδοσης του συστήματος. Η ΑΠ είναι μια απλή στη χρήση μέθοδος, ιδίως μετά την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των στατιστικών προγραμμάτων, η οποία προσφέρει επαρκή ακρίβεια και τη δυνατότητα αξιοποίησης μόνο των στατιστικώς σημαντικών μεταβλητών. Επιτρέπει, ακόμη, το διαχωρισμό της επίδρασης των μεταβλητών στο κόστος του έργου με απλή ανάλυση (Sonmez 2008). Σύμφωνα με τον Smith (1999), η μέθοδος της παλινδρόμησης είναι εξαιρετικά δυνατό εργαλείο που επιτρέπει στον ερευνητή να μάθει περισσότερα για τις σχέσεις των δεδομένων που εξετάζει. Η συγκεκριμένη τεχνική επιτρέπει ακόμη τον καθορισμό της ακρίβειας της εκτίμησης με αριθμητικές παρά με υποκειμενικές εκφράσεις και τον προσδιορισμό του εύρους τιμών στο οποίο θα κυμαίνεται το κόστος στις περισσότερες περιπτώσεις (Φραγκάκης 2000).

Η εφαρμογή της παλινδρόμησης θεωρείται γενικά εύκολη και γρήγορη. Οι εκτιμήσεις κόστους με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης είναι περισσότερο ακριβείς στις περισσότερες περιπτώσεις από τις αρχικές εκτιμήσεις του μελετητή του έργου και κατά συνέπεια προσφέρουν σημαντική βελτίωση στις υπάρχουσες μεθόδους εκτίμησης που χρησιμοποιούνται σε κάθε εταιρεία (McCaffer 1975).

Ένα βασικό μειονέκτημα των παραδοσιακών τεχνικών παραμετρικών εκτιμήσεων με χρήση παλινδρόμησης, είναι ότι η μαθηματική μορφή πρέπει να οριστεί προτού εκτελεστεί η μαθηματική ανάλυση για τον προσδιορισμό της συνάρτησης κόστους που ταιριάζει καλύτερα στα ιστορικά δεδομένα (Creese και Li 1995). Το γεγονός αυτό προϋποθέτει, επιπλέον, απόφαση για την τάξη της συσχέτισης (γραμμική, κυβική κα) (Sonmez 2004). Το καλύτερο κριτήριο για την

επιλογή της συνάρτησης κόστους είναι η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το κόστος μεταβάλλεται με αλλαγές στις ανεξάρτητες μεταβλητές (Ayed 1997). Ο σκοπός αυτός είναι δύσκολος, βασίζεται στην εμπειρία των εκτιμητών και ως εκ τούτου, εκτελείται με πολλαπλές δοκιμές. Εσφαλμένη εκτίμηση της μαθηματικής μορφής δύναται να οδηγήσει σε παραπλανητικά μοντέλα. Ταυτόχρονα, η αποτύπωση του κόστους ενός συστήματος ως συνάρτηση ανεξάρτητων μεταβλητών δεν καθίσταται εύκολη εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των αξιολογούμενων μεταβλητών και των πολυάριθμων αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους (Hegazy και Ayed 1998). Επιπρόσθετο μειονέκτημα αποτελεί η χρήση μιας μόνο συνάρτησης κόστους για όλες τις εμπλεκόμενες μεταβλητές, οι οποίες εμφανίζουν σε πολλές περιπτώσεις διαφορετική μαθηματική συσχέτιση η καθεμία με το κόστος του συστήματος (Ayed 1997). Η ΑΠ, τέλος, δεν είναι κατάλληλη για την περιγραφή πολυδιάστατων μη γραμμικών σχέσεων που αποτελούνται από πολλαπλό πρόβλημα εισόδου και εξόδου (Kim et al. 2004).

Η ανάγκη συσχέτισης και προσαρμογής των δεδομένων τεχνικών έργων του παρελθόντος είναι πρόσθετο μειονέκτημα της μεθόδου της παλινδρόμησης (Φραγκάκης 2000). Τα ιστορικά στοιχεία πρέπει πρώτα να προσαρμοστούν στις σημερινές συνθήκες που εξετάζονται (χρόνος, προδιαγραφές έργων, κανονισμοί κ.ά.) και στη συνέχεια να παραχθεί το μοντέλο εκτίμησης κόστους. Στην πράξη, κρίνεται απαραίτητη και η περιοδική ανανέωση των μοντέλων αξιοποιώντας τα πρόσφατα δεδομένα και αποβάλλοντας τα παλαιότερα από το στατιστικό δείγμα.

Συνοψίζοντας, παρά τα παραπάνω μειονεκτήματα, η ΑΠ αποτελεί μια από τις πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους για την εκτίμηση κόστους στα αρχικά στάδια του έργου. Έχει εφαρμοστεί ιδιαίτερα για την εκτίμηση του κόστους κατασκευής κτιριακών έργων (Kouskoulas και Koehn 1974; Karshenas 1984; Khosrowshahi και Kaka 1996; Love et al. 2005; Lowe et al. 2006; Sonmez 2008). Τα πρώτα παραδείγματα χρήσης της μεθόδου ως εργαλείο πρόβλεψης αναφέρονται από τον McCaffer (1975). Πρόσφατες εφαρμογές της περιέχονται στους Kaiser (2006) και Hoffman et al. (2007).

4.4 Μέθοδοι επιλογής καλύτερης εξίσωσης παλινδρόμησης

Σύμφωνα με τους Draper και Smith (1981), δυο αντιτιθέμενα κριτήρια εμπλέκονται στη διαδικασία επιλογής μιας εξίσωσης:

1. Το μοντέλο πρέπει να περιλαμβάνει όσο το δυνατόν περισσότερες μεταβλητές για την κατασκευή εξίσωσης χρήσιμης για σκοπούς πρόβλεψης, ώστε οι εκτιμήσεις να είναι αξιόπιστες.

2. Επειδή η συγκέντρωση πληροφοριών για μεγάλο αριθμό μεταβλητών και η επακόλουθη επεξεργασία τους οδηγούν σε σημαντικό κόστος, η εξίσωση πρέπει να περιλαμβάνει όσο το δυνατόν λιγότερες μεταβλητές.

Ο συμβιβασμός μεταξύ των δυο αυτών ακραίων περιπτώσεων είναι γνωστός ως «επιλογή της καλύτερης εξίσωσης παλινδρόμησης». Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος, με κυριότερες τη διαδικασία όλων των δυνατών παλινδρομήσεων (all possible regressions), της προς τα πίσω απαλοιφής (backward elimination), της παλινδρόμησης κατά βήματα (stepwise regression), καθώς και παραλλαγές τους. Σημειώνεται ότι η εφαρμογή των παραπάνω διαδικασιών δεν οδηγεί πάντοτε στο ίδιο αποτέλεσμα.

Η μέθοδος όλων των δυνατών παλινδρομήσεων απαιτεί την προσαρμογή όλων των δυνατών εξισώσεων που περιλαμβάνουν την εξεταζόμενη εξαρτημένη μεταβλητή και οποιοδήποτε αριθμό και συνδυασμό των ανεξάρτητων μεταβλητών. Στη συνέχεια, κάθε εξίσωση αξιολογείται με βάση κάποιο κριτήριο. Η διαδικασία είναι προφανώς εκτενής και προϋποθέτει έντονη χρήση υπολογιστών.

Η διαδικασία της προς τα πίσω απαλοιφής είναι οικονομικότερη από την προηγούμενη μέθοδο, καθώς εξετάζει μόνο τις καλύτερες παλινδρομήσεις με συγκεκριμένο αριθμό μεταβλητών. Τα βασικά βήματα είναι τα ακόλουθα:

1. Υπολογίζεται η εξίσωση παλινδρόμησης με όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές.
2. Υπολογίζεται η τιμή του μερικού F-ελέγχου για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή, η οποία θεωρείται ως η τελευταία μεταβλητή που εισήχθη στο μοντέλο.
3. Η μικρότερη τιμή του μερικού F-ελέγχου συγκρίνεται με ένα προεπιλεγμένο επίπεδο σημαντικότητας
 - α) Αν είναι μικρότερη, τότε αφαιρείται η μεταβλητή από το μοντέλο, υπολογίζεται η παλινδρόμηση με τις απομένουσες μεταβλητές και επαναλαμβάνεται το στάδιο 2.
 - β) Αν είναι μεγαλύτερη, τότε δεχόμαστε την εξίσωση παλινδρόμησης και η διαδικασία σταματά.

Εναλλακτικά χρησιμοποιείται t-έλεγχος ή η αντίστοιχη τιμή p. Η διαδικασία της προς τα πίσω απαλοιφής στοχεύει πρακτικά στην αφαίρεση των μεταβλητών που δε συνεισφέρουν στο μοντέλο. Θεωρείται ικανοποιητική για τους επιστήμονες που επιθυμούν να «βλέπουν» όλες τις μεταβλητές στην εξίσωση και είναι οικονομικότερη στον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο και

ανθρώπινο δυναμικό συγκριτικά με το μέθοδο όλων των δυνατών παλινδρομήσεων. Ωστόσο, άπαξ και μια μεταβλητή αφαιρεθεί κατά τη διαδικασία παραμένει εκτός παλινδρόμησης και ως εκ τούτου, τα εναλλακτικά μοντέλα με τις μεταβλητές που έχουν ήδη απαλειφθεί δεν είναι διαθέσιμα για εξέταση.

Η μέθοδος της προς τα πίσω απαλοιφής ξεκινά με τη μεγαλύτερη εξίσωση παλινδρόμησης με όλες τις μεταβλητές και ακολούθως μειώνει τον αριθμό τους. Η διαδικασία παλινδρόμησης κατά βήματα ακολουθεί την αντίθετη κατεύθυνση. Ξεκινώντας από τη μικρότερη εξίσωση, εισάγονται οι μεταβλητές έως ότου προκύψει το τελικό μοντέλο. Κατά αναλογία με την προηγούμενη μέθοδο, η σειρά εισαγωγής των μεταβλητών καθορίζεται με το συντελεστή μερικής συσχέτισης ως μέτρο της σημαντικότητάς τους. Τα βασικά βήματα είναι τα ακόλουθα:

1. Επιλέγεται η ανεξάρτητη μεταβλητή που σχετίζεται περισσότερο με την εξαρτημένη, εισάγεται στο μοντέλο και υπολογίζεται η εξίσωση παλινδρόμησης πρώτης τάξης.
2. Ελέγχεται η σημαντικότητα της μεταβλητής. Αν είναι σημαντική, αναζητείται η επόμενη μεταβλητή εισαγωγής, αλλιώς η διαδικασία σταματά.
3. Εξετάζονται οι συντελεστές μερικής συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών που δεν έχουν συμπεριληφεί και εισάγεται στο μοντέλο η μεταβλητή με το μεγαλύτερο συντελεστή. Το μοντέλο ελέγχεται για τη σημαντικότητά του, σημειώνεται η βελτίωση του συντελεστή προσδιορισμού και εξετάζονται οι μερικές F-τιμές για τις δυο ανεξάρτητες μεταβλητές που έχουν συμπεριληφθεί.
4. Η μικρότερη από τις δυο μερικές F-τιμές συγκρίνεται με ένα προεπιλεγμένο σημείο και η αντίστοιχη μεταβλητή παραμένει στην εξίσωση ή απορρίπτεται σύμφωνα με το αν ο έλεγχος είναι σημαντικός ή όχι. Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε στάδιο, καθώς μια μεταβλητή που ήταν η καλύτερη για να εισαχθεί στην εξίσωση σε ένα προηγούμενο στάδιο μπορεί να προκύψει περιττή σε επόμενο στάδιο λόγω της σχέσης της με τις υπόλοιπες μεταβλητές που βρίσκονται στην εξίσωση παλινδρόμησης.
5. Η διαδικασία σταματά όταν καμία μεταβλητή δεν απαλείφεται και η επόμενη καλύτερη υποψήφια μεταβλητή δεν μπορεί να εισαχθεί στην εξίσωση παλινδρόμησης.

Η διαδικασία της προς τα πίσω απαλοιφής και της παλινδρόμησης κατά βήματα αντιπροσωπεύουν κοινές στατιστικές μεθόδους που επιτρέπουν στους ερευνητές να επιλέξουν και να αξιολογήσουν μοντέλα με ένα υποσύνολο ανεξάρτητων μεταβλητών. Οδηγούν σε μικρά

και εύκολα ερμηνεύσιμα μοντέλα με περιορισμένο υπολογιστικό φόρτο. Ωστόσο, οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι σταδιακής παλινδρόμησης έχουν ευρέως επικριθεί, καθώς δεν εγγυώνται ότι προσδιορίζεται το καλύτερο ή το βέλτιστο με κάποια έννοια μοντέλο (Montgomery et al 2006). Όταν αφαιρεθεί μια ανεξάρτητη μεταβλητή, τα εναλλακτικά μοντέλα που τη χρησιμοποιούν δεν μπορούν να εξεταστούν περαιτέρω (Drapez και Smith 1998). Δεδομένου ότι όλες οι σταδιακές μέθοδοι δεν οδηγούν απαραίτητα στην ίδια επιλογή τελικού μοντέλου (Seber και Lee 2003), δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται τυφλά για τον προσδιορισμό του «καλύτερου» μοντέλου (Rawlings et al 1998). Απαιτείται, συνεπώς, λογική αιτιολόγηση της επιλογής των μεταβλητών και κριτική εξέταση των μοντέλων μέσω ελέγχου των υπολοίπων. Οποιοδήποτε τελικό μοντέλο πρέπει να ελέγχεται λεπτομερώς πριν υιοθετηθεί, καθώς η τυφλή αποδοχή του είναι πιθανό να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

4.5 Η εφαρμογή της μεθόδου Bootstrap στην ανάλυση παλινδρόμησης

Όταν οι παραδοχές ενός τυπικού μοντέλου παλινδρόμησης πληρούνται, διαδικασίες όπως τα τυπικά σφάλματα, τα διαστήματα εμπιστοσύνης και τα διαστήματα πρόβλεψης είναι διαθέσιμες για τον έλεγχο της ακρίβειας των παραμέτρων παλινδρόμησης και της εκτίμησης του μέσου. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις προσαρμογής μοντέλων παλινδρόμησης, είτε δεν υφίστανται τυπικές διαθέσιμες διαδικασίες, είτε τα διαθέσιμα αποτελέσματα βασίζονται στην ασυμπτωτική θεωρία και αποτελούν τεχνικές προσέγγισης.

Πιθανολογικές στατιστικές τεχνικές, όπως η «bootstrap» αναπτύχθηκαν για να παρέχουν αξιόπιστες εκτιμήσεις των τυπικών σφαλμάτων των παραμέτρων παλινδρόμησης στις παραπάνω περιπτώσεις. Προσπαθούν να αξιολογήσουν τη μεταβλητότητα της εκτίμησης και να ποσοτικοποιήσουν τελικά το επίπεδο αβεβαιότητάς της. Η μέθοδος bootstrap αναπτύχθηκε αρχικά από τον Efron (1979;1982). Σημαντική έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους Davison και Hinkley (1997), Efron (1987), Efron και Tibshirani (1986;1993) και Wu (1986). Η bootstrap ανήκει σε ευρύτερη κατηγορία μεθόδων που λαμβάνουν εκ νέου δείγμα από το αρχικό σύνολο στοιχείων με αναδιάταξη του αρχικού δείγματος. Αντιπροσωπεύει εντατική στη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή τεχνική, που χρησιμοποιείται όχι μόνο από τους στατιστικούς, αλλά εφαρμόζεται επίσης από ερευνητές στην εφαρμοσμένη μηχανική, στις βιολογικές, ιατρικές και κοινωνικές επιστήμες και στη διοίκηση επιχειρήσεων (Davison και Hinkley 1997). Η αποδέσμευσή της από περιοριστικές υποθέσεις παραμέτρων και απλουστευμένα πρότυπα είναι το ελκυστικότερο χαρακτηριστικό γνώρισμά της (Chernick 1999). Η bootstrap επιτρέπει στους ερευνητές να αξιολογήσουν την αβεβαιότητα και την ακρίβεια των εκτιμηθέντων παραμέτρων

από μικρά δείγματα χωρίς οποιεσδήποτε προγενέστερες υποθέσεις για την κατανομή (Hughes και Paez 2006). Απαιτεί λιγότερες υποθέσεις σε σύγκριση με τις κλασσικές στατιστικές μεθόδους (Johnson 2001) και έχει εκτενώς χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του τυπικού σφάλματος μέσης τιμής και της εμπειρικής κατανομής πιθανότητας πληθυσμού, τον προσδιορισμό διαστημάτων εμπιστοσύνης και πρόβλεψης, τον έλεγχο υποθέσεων και την εκτίμηση σφάλματος πρόβλεψης (Sonmez 2008). Πρόσφατη εφαρμογή της μεθόδου bootstrap εντοπίζεται στους Hughes και Paez (2006).

Έστω ότι εξετάζεται η ακρίβεια της εκτίμησης ενός συντελεστή παλινδρόμησης με χρήση της μεθόδου bootstrap. Η εξίσωση παλινδρόμησης χρησιμοποιεί δείγμα n παρατηρήσεων. Η εν λόγω μέθοδος προϋποθέτει την επιλογή δείγματος μεγέθους n που ονομάζεται «δείγμα bootstrap» με αντικατάσταση από το αρχικό δείγμα. Δεδομένου ότι επιλέγεται με αντικατάσταση, το δείγμα bootstrap περιέχει παρατηρήσεις από το αρχικό δείγμα, μερικές από τις οποίες επαναλαμβάνονται περισσότερες από μια φορές και μερικές εξαλείφονται. Το μοντέλο παλινδρόμησης προσαρμόζεται στη συνέχεια στο δείγμα bootstrap και εξάγεται η εκτίμηση του συντελεστή παλινδρόμησης, έστω b_1^* . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Δείγμα bootstrap επιλέγεται σε κάθε επανάληψη, προσαρμόζεται το μοντέλο και εξάγεται ο συντελεστής παλινδρόμησης b_i^* για $i=1,2,\dots, m$ δείγματα bootstrap. Η επεξεργασία του δείγματος των συντελεστών παλινδρόμησης οδηγεί σε διαστήματα εμπιστοσύνης και σε στατιστικά στοιχεία όπως μέση τιμή και τυπικό σφάλμα. Δεδομένου ότι τα δείγματα των επαναλήψεων λαμβάνονται από το αρχικό δείγμα, η μέθοδος bootstrap ονομάζεται διαδικασία αναδιάταξης δείγματος (resampling procedure).

5 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

Ως βάση δεδομένων (database) ορίζεται η τυποποιημένη συλλογή αλληλοσχετιζόμενων δεδομένων. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρεται στην ανάπτυξη της Βάσης Δεδομένων Οδικών Γεφυρών (ΒΔΟΓ) της παρούσας έρευνας. Για τη δημιουργία της ΒΔΟΓ πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δράσεις:

- Ανάπτυξη της εφαρμογής της ΒΔΟΓ.
- Συλλογή δεδομένων γεφυρών.
- Αξιολόγηση στοιχείων ως προς την ορθότητά τους.
- Εισαγωγή στη ΒΔΟΓ των χρήσιμων δεδομένων των γεφυρών.

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει σύντομη αναφορά στα γενικά στοιχεία και τον εννοιολογικό σχεδιασμό των βάσεων δεδομένων που βασίστηκε στους Elmasri και Navathe (2000). Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία συλλογής των στοιχείων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις γέφυρες της Εγνατίας Οδού από τις οποίες αντλήθηκε το δείγμα δεδομένων. Περιγράφονται τα πρότυπα σχεδιασμού γεφυρών που υιοθετήθηκαν και οι διαδικασίες μελέτης των έργων και ελέγχου της κατασκευής που εφαρμόστηκαν. Παρουσιάζεται στη συνέχεια αναλυτικά η εφαρμογή που αναπτύχθηκε για τη ΒΔΟΓ. Αναλύονται η δομή της βάσης (πίνακες, συσχετίσεις), η χρήση βιβλιοθηκών στοιχείων, η εισαγωγή δεδομένων με φόρμες, ο έλεγχος ορθότητάς τους και η διεξαγωγή αναζητήσεων και παρουσίαση των αποτελεσμάτων με αναφορές.

Η εφαρμογή της ΒΔΟΓ υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα Access έκδοση 2003 της εταιρείας Microsoft, το οποίο αποτελεί ένα από τα πλέον δημοφιλή προγράμματα βάσεων δεδομένων. Για την εκτέλεση της εφαρμογής απαιτείται μόνο η εγκατάσταση του συγκεκριμένου προγράμματος.

5.1 Σύντομη αναφορά στις βάσεις δεδομένων

5.1.1 Γενικά στοιχεία βάσεων δεδομένων

Η βάση δεδομένων είναι μια συλλογή από σχετιζόμενα δεδομένα, δηλαδή από γεγονότα που μπορούν να καταγραφούν και έχουν κάποια υπονοούμενη σημασία. Μια βάση δεδομένων έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Αναπαριστά άποψη του πραγματικού κόσμου που ονομάζεται μικρόκοσμος ή πεδίο αναφοράς. Οι αλλαγές στο μικρόκοσμο αντανακλώνται στη βάση δεδομένων.

- Είναι μια λογικά συνεκτική συλλογή δεδομένων με εγγενή σημασία. Μια τυχαία διευθέτηση δεδομένων δεν αποτελεί βάση δεδομένων.
- Σχεδιάζεται, κατασκευάζεται και αποκτά δεδομένα για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό. Προορίζεται για συγκεκριμένη ομάδα χρηστών και για προκαθορισμένες εφαρμογές για τις οποίες οι χρήστες ενδιαφέρονται.

Συνοψίζοντας, κάθε βάση δεδομένων έχει κάποια πηγή από την οποία προέρχονται τα δεδομένα, αλληλεπιδρά με γεγονότα του πραγματικού κόσμου και απευθύνεται σε ακροατήριο που ενδιαφέρεται ενεργά για το περιεχόμενό της.

Σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων (ΣΔΒΔ database management system – DBMS) είναι ένα σύνολο προγραμμάτων που επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν και να συντηρήσουν μια βάση δεδομένων. Το ΣΔΒΔ είναι ένα γενικής χρήσης σύστημα λογισμικού που διευκολύνει τις διαδικασίες ορισμού, κατασκευής και χειρισμού βάσεων δεδομένων. Ο ορισμός μιας βάσης δεδομένων περιλαμβάνει την προδιαγραφή των τύπων, των δομών και των περιορισμών των δεδομένων που θα αποθηκευτούν. Κατασκευή μιας βάσης δεδομένων είναι η διαδικασία αποθήκευσης των δεδομένων σε μέσο αποθήκευσης που ελέγχεται από το ΣΔΒΔ. Ο χειρισμός μιας βάσης δεδομένων περιλαμβάνει λειτουργίες όπως υποβολή ερωτήσεων για ανάκτηση συγκεκριμένων δεδομένων, ενημέρωση της βάσης ώστε να αντανακλά αλλαγές στο μικρόκοσμο και παραγωγή αναφορών από τα δεδομένα.

Τα υψηλού επιπέδου (high-level) ή εννοιολογικά (conceptual) μοντέλα δεδομένων προσεγγίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι περισσότεροι χρήστες αντιλαμβάνονται τα δεδομένα. Τα χαμηλού επιπέδου (low-level) ή φυσικά (physical) μοντέλα δεδομένων περιγράφουν τις λεπτομέρειες του τρόπου αποθήκευσης των δεδομένων στον υπολογιστή. Οι έννοιες που περιέχονται από τα χαμηλού επιπέδου μοντέλα δεδομένων απευθύνονται γενικά σε ειδικούς υπολογιστών και όχι στους τυπικούς τελικούς χρήστες. Μεταξύ των δυο άκρων υφίσταται κλάση παραστατικών (representational) μοντέλων ή μοντέλων υλοποίησης (implementation) που κατανοούνται μεν από τους τελικούς χρήστες, αλλά δεν είναι τόσο απομακρυσμένα από τον τρόπο αποθήκευσης των δεδομένων στον υπολογιστή. Τα παραστατικά μοντέλα δεδομένων αποκρύπτουν ορισμένες λεπτομέρειες αποθήκευσης των δεδομένων, αλλά δύναται να υλοποιηθούν σε ένα υπολογιστικό σύστημα με άμεσο τρόπο. Τα παραστατικά μοντέλα δεδομένων χρησιμοποιούνται ολοένα και πιο συχνά στα σύγχρονα εμπορικά ΣΔΒΔ. Περιλαμβάνουν το ευρέως χρησιμοποιούμενο σχεσιακό μοντέλο δεδομένων.

5.1.2 Εννοιολογικός σχεδιασμός βάσεων δεδομένων

Ο εννοιολογικός σχεδιασμός της βάσης δεδομένων (conceptual database design) είναι το πρώτο βήμα της διαδικασίας σχεδιασμού το οποίο ακολουθεί τη συλλογή και ανάλυση των απαιτήσεων των χρηστών. Περιλαμβάνει τη δημιουργία του εννοιολογικού σχήματος της βάσης με χρήση μοντέλου δεδομένων υψηλού επιπέδου. Το σχήμα περιέχει λεπτομερείς περιγραφές των τύπων δεδομένων, των συσχετίσεων και των περιορισμών. Ένα από τα πλέον δημοφιλή υψηλού επιπέδου μοντέλα δεδομένων είναι το μοντέλο Οντοτήτων – Συσχετίσεων (ΟΣ - Entity-relationship ER).

Οι οντότητες, τα γνωρίσματα και οι συσχετίσεις αποτελούν βασικές έννοιες των εννοιολογικών μοντέλων δεδομένων. Μια οντότητα (entity) αντιπροσωπεύει ένα αντικείμενο ή μια έννοια του πραγματικού κόσμου με ανεξάρτητη ύπαρξη. Ένα γνώρισμα (attribute) αναφέρεται σε μια ιδιότητα που περιγράφει περαιτέρω την οντότητα και έχει συγκεκριμένη τιμή. Η συσχέτιση (relationship) μεταξύ δυο ή περισσότερων οντοτήτων αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

Μια βάση δεδομένων συνήθως περιέχει ομάδες από παρόμοιες οντότητες. Για παράδειγμα, μια εταιρεία στην οποία εργάζονται εκατοντάδες εργαζόμενοι, αποθηκεύει παρόμοιες πληροφορίες για κάθε εργαζόμενο. Αυτές οι οντότητες εργαζομένων μοιράζονται τα ίδια γνωρίσματα, αλλά κάθε οντότητα έχει τη δική της τιμή για κάθε γνώρισμα. Ένας τύπος οντοτήτων (entity type) ορίζει ένα σύνολο από οντότητες με τα ίδια γνωρίσματα.

Ο περιορισμός κλειδιού (key constraint) για τα γνωρίσματα θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικός για τις οντότητες. Ένας τύπος οντοτήτων συνήθως έχει κάποιο γνώρισμα, του οποίου οι τιμές είναι διακεκριμένες για κάθε ξεχωριστή οντότητα. Το γνώρισμα αυτό ονομάζεται γνώρισμα κλειδί (key attribute) και οι τιμές του χρησιμοποιούνται για τον μονοσήμαντο προσδιορισμό κάθε οντότητας.

Μια συσχέτιση R μεταξύ n τύπων οντοτήτων E_1, E_2, \dots, E_n ορίζει ένα σύνολο συνδέσεων ή συσχετίσεων μεταξύ των τύπων οντοτήτων.

5.2 Συλλογή πληροφοριών

Η Εγνατία Οδός διασχίζει αρκετά βουνά, παρακάμπτει δύσκολες επίγειες μορφολογίες και τέμνει σχεδόν κάθετα τις κύριες γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας. Τα τεχνικά της έργα αντιμετώπισαν σύνθετες και διαφορετικές γεωλογικές δομές. Ως εκ τούτου, η Εγνατία Οδός προσφέρει μεγάλη ποικιλία πρόσφατα κατασκευασμένων σύγχρονων γεφυρών. Το δομημένο

ερωτηματολόγιο που δημιουργήθηκε από τον Φραγκάκη (2000) και επεκτάθηκε στη συνέχεια ώστε να περιληφθούν γεωτεχνικά στοιχεία, χρησιμοποιήθηκε για να συλλεχθούν και να καταγραφούν δεδομένα για κάθε έργο. Το ερωτηματολόγιο περιλάμβανε πραγματικές δομικές πληροφορίες για τη γέφυρα, όπως ποσότητες σκυροδέματος, χάλυβα οπλισμού και προέντασης των επιμέρους τμημάτων, παραμέτρους σχεδιασμού όπως το μήκος ανοιγμάτων, το πλάτος καταστρώματος, το ύψος μεσοβάθρων και ακροβάθρων, καθώς επίσης και τη δαπάνη κατασκευής για τον ΚτΕ και τον πραγματικό χρόνο κατασκευής. Τα ερωτηματολόγια απεστάλησαν αρχικά στον αρμόδιο για κάθε έργο διευθυντή κατασκευής και στους πολιτικούς μηχανικούς της αναδόχου εταιρείας. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις στα εργοτάξια, προκειμένου να διερευνηθούν τα συμπληρωμένα ερωτηματολόγια, να ελεγχθεί και να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια των παρεχόμενων στοιχείων. Σε αρκετές περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις με τους μηχανικούς ώστε να διευκρινιστούν ειδικές συνθήκες του έργου και χαρακτηριστικά της μελέτης και της κατασκευής. Οι πληροφορίες που καταγράφηκαν περιέλαβαν όλες τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Αντιπροσωπεύουν τα επίσημα τελικά στοιχεία των γεφυρών όπως εγκρίθηκαν από τον ΚτΕ και πραγματικά κατασκευάστηκαν.

5.3 Γέφυρες Εγνατίας Οδού

Η Εγνατία Οδός (Εγνατία Οδός Α.Ε. 2010) είναι ένας σύγχρονος αυτοκινητόδρομος μήκους 670 χιλιομέτρων που κατασκευάστηκε πρόσφατα στην Ελλάδα με συνολική δαπάνη κατασκευής ύψους 6 δις. €. Ξεκινά από την Ηγουμενίτσα στο Ιόνιο Πέλαγος, διασχίζει την Ήπειρο, τη Μακεδονία και καταλήγει στη Θράκη στα ελληνικό-τουρκικά σύνορα. Συνδέεται με εννέα κάθετους άξονες με άλλες χώρες της νοτιοανατολικής Ευρώπης και συνδέει το ευρωπαϊκό δίκτυο μεταφορών με τη Μέση Ανατολή. Ως εκ τούτου, ανήκει στα δεκατέσσερα προγράμματα προτεραιότητας της Ευρωπαϊκής Ένωσης και αποτελεί μέρος του διευρωπαϊκού δικτύου μεταφορών.

Το ποικιλόμορφο έδαφος που διασχίζει η Εγνατία Οδός σε συνδυασμό με τις ειδικές περιβαλλοντικές συνθήκες που αντιμετωπίστηκαν, επέβαλαν την κατασκευή μεγάλου αριθμού γεφυρών με συνολικό μήκος 42 χιλιομέτρων (Εγνατία Οδός Α.Ε. 2010), το οποίο αντιστοιχεί σε 6% περίπου του οδικού άξονα. Η Εγνατία Οδός περιλαμβάνει 646 γέφυρες (Konstantinidis και Maravas 2003), εκ των οποίων οι 177 έχουν συνολικό μήκος μεγαλύτερο από 50 μέτρα (Εγνατία Οδός Α.Ε. 2010). Οι γέφυρες της Εγνατίας Οδού κατασκευάστηκαν με οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα και ολοκληρώθηκαν ως επί το πλείστον μεταξύ των ετών 1996 και

2008. Το μεγαλύτερο συνολικό μήκος γέφυρας υπερβαίνει τα 1000 μέτρα, ενώ το μεγαλύτερο άνοιγμα φθάνει τα 235 μέτρα. Σύμφωνα με την πρακτική που ακολουθείται στην κατασκευή των γερμανικών αυτοκινητοδρόμων, κάθε οδόστρωμα φέρεται από ξεχωριστή γέφυρα με συνολικό πλάτος που ποικίλλει από 10.00 έως 17.75 μέτρα. Τα καταστρώματα γεφυρών κατατάσσονται σε έναν από τρεις τύπους: προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς με πλάκα συνέχειας από οπλισμένο σκυρόδεμα, πλάκα με διάκενα και συνεχές μονοκύψελο κιβώτιο. Οι τρεις κυριότερες μέθοδοι κατασκευής είναι η τοποθέτηση των προκατασκευασμένων δοκών με προωθούμενο φορείο ή γερανό, η συμβατική κατασκευή με επιτόπια σκυροδέτηση και χρήση ικριωμάτων και η συμμετρική προβολοδόμηση με επιτόπια σκυροδέτηση. Η σταδιακή – τμηματική προώθηση και ο προωθούμενος μεταλλότυπος έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί.

Όλα τα τεχνικά έργα της Εγνατίας Οδού μελετήθηκαν για ελάχιστη διάρκεια ζωής 120 ετών. Σύμφωνα με την τρέχουσα ελληνική νομοθεσία, ο σχεδιασμός των γεφυρών εκτελέστηκε σύμφωνα με τα γερμανικά πρότυπα DIN. Όσον αφορά τις σεισμικές φορτίσεις, ο ελληνικός σεισμικός κανονισμός για το σχεδιασμό γεφυρών (E39/99) χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ 2000). Αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα πρότυπα:

DIN 1072 – Φόρτιση γεφυρών

DIN 1045 – Αοπλο και οπλισμένο σκυρόδεμα – Μελέτη και Κατασκευή

DIN 1075 – Γέφυρες από σκυρόδεμα – Διαστασιολόγηση και Κατασκευή

DIN 4227 – Προεντεταμένο σκυρόδεμα

Η εταιρεία «Εγνατία Οδός Α.Ε.» (ΕΟΑΕ) ιδρύθηκε το 1995 και διαχειρίστηκε το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία, τη συντήρηση, και την εκμετάλλευση του αυτοκινητοδρόμου (Abeyasinghe et Al 1999). Η εταιρεία αποτέλεσε πιλοτικό έργο στο πλαίσιο της προσπάθειας αναβάθμισης της εκτέλεσης δημοσίων έργων στην Ελλάδα και χρησιμοποίησε πληθώρα εξωτερικών συνεργατών. Η μελέτη των γεφυρών πραγματοποιήθηκε από ελληνικά ή διεθνή γραφεία που διορίστηκαν μετά από διεθνείς διαγωνισμούς. Η διαδικασία έγκρισης των μελετών περιλάμβανε τρεις φάσεις. Ο πρώτος έλεγχος πραγματοποιούνταν από εξειδικευμένο προσωπικό της ΕΟΑΕ και ολοκληρωνόταν μέσα σε πέντε ημέρες από την υποβολή. Κάθε μεμονωμένη οριστική μελέτη ελέγχονταν στη συνέχεια από ανεξάρτητο γραφείο συμβούλων που διοριζόταν κατόπιν διεθνούς διαγωνισμού, πραγματοποιούσε ανεξάρτητους υπολογισμούς και υπέβαλε έκθεση με τα συμπεράσματα στην ΕΟΑΕ. Ο διευθυντής κατασκευής έλεγχε, τελικά,

κάθε μελέτη όσον αφορά στην προσαρμογή της στις τοπικές συνθήκες, την κατασκευασιμότητα του έργου και τις τυχόν ειδικές τοπικές συνθήκες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη μελέτη.

5.4 Ανάπτυξη βάσης δεδομένων οδικών γεφυρών (ΒΔΟΓ)

5.4.1 Δομή ΒΔΟΓ

Οι οντότητες της ΒΔΟΓ με τα γνωρίσματά τους αναπαρίστανται με τη χρήση πινάκων. Οι Πίνακες 5-1 έως 5-8 που ακολουθούν παρουσιάζουν για κάθε οντότητα που ορίστηκε στη ΒΔΟΓ τα γνωρίσματά της, τον ορισμό κάθε γνωρίσματος και τον τύπο πεδίου.

1) Πίνακας Bridge (Γέφυρα)

Ο πίνακας περιέχει τα γενικά στοιχεία κάθε γέφυρας. Ο αριθμός της γέφυρας (ID) είναι το γνώρισμα κλειδί που ορίζεται αυτόματα από την εφαρμογή.

Πίνακας 5-1: Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας γέφυρα

Όνομα γνωρίσματος	Ορισμός γνωρίσματος	Τύπος πεδίου
ID	Αριθμός γέφυρας	Αυτόματη αρίθμηση
Name	Όνομα	πεδίο κειμένου
Location	Τοποθεσία	πεδίο κειμένου
Section	Τμήμα	πεδίο κειμένου
AutoRoute	Αυτοκινητόδρομος	πεδίο κειμένου
kmPosition	Χιλιμετρική θέση	πεδίο κειμένου
DataSource	Πηγή δεδομένων	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
MaxSpan	Μέγιστο άνοιγμα	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
MaxPierHeight	Μέγιστο ύψος βάθρων	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
SeismicZone	Σεισμική ζώνη	πεδίο κειμένου
Type	Τύπος γέφυρας	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
Obstacle	Εμπόδιο	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
Contractor	Ανάδοχος	πεδίο κειμένου
Designer	Μελετητής	πεδίο κειμένου
Checker	Ελεγκτής	πεδίο κειμένου
Comments	Σχόλια	πεδίο κειμένου

2) Πίνακας Superstructure (Ανωδομή)

Ο πίνακας περιέχει τα δεδομένα για την ανωδομή της γέφυρας. Συνδέεται με τον πίνακα της γέφυρας μέσω του BridgeID.

Πίνακας 5-2: Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας ανωδομή

Όνομα γνωρίσματος	Ορισμός γνωρίσματος	Τύπος πεδίου
BridgeID	Αριθμός γέφυρας	
SuperstructureType	Τύπος ανωδομής	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
Length	Μήκος καταστρώματος Καθαρό πλάτος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
NetWidth	καταστρώματος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
TotalWidth	Ολικό πλάτος καταστρώματος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
ConcreteVolume	Όγκος σκυροδέματος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ ³ .
ReinforcedSteelWeight	Βάρος χάλυβα οπλισμού	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε kg.
PrestressdSteel	Βάρος χάλυβα προέντασης	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε kg.
ConcreteType	Τύπος σκυροδέματος	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
Comments	Σχόλια	πεδίο κειμένου

3) Πίνακας Pavement (Πεζοδρόμιο)

Ο πίνακας περιλαμβάνει τα δεδομένα για τα πεζοδρόμια του καταστρώματος της γέφυρας. Περιέχει ως ξεχωριστά γνωρίσματα το πλάτος αριστερά και δεξιά του καταστρώματος που διαφοροποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις, καθώς και τον τύπο σκυροδέματος που είναι συνήθως χαμηλότερης ποιότητας σε σχέση με το κατάστρωμα της γέφυρας. Συνδέεται με τον πίνακα της γέφυρας μέσω του BridgeID.

Πίνακας 5-3: Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας πεζοδρόμιο

Όνομα γνωρίσματος	Ορισμός γνωρίσματος	Τύπος πεδίου
BridgeID	Αριθμός γέφυρας	
MaxTotalWidthLeft	Μέγιστο ολικό πλάτος αριστερά	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
MaxTotalWidthRight	Μέγιστο ολικό πλάτος δεξιά	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
ConcreteVolume	Όγκος σκυροδέματος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ ³ .
ReinforcedSteelWeight	Βάρος χάλυβα οπλισμού	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε kg.
ConcreteType	Τύπος σκυροδέματος	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
Comments	Σχόλια	πεδίο κειμένου

4) Πίνακας Span (Ανοιγμα)

Ο πίνακας περιέχει τα δεδομένα για τα επιμέρους ανοίγματα της γέφυρας. Ο αριθμός του ανοίγματος (ID) είναι το γνώρισμα κλειδί που ορίζεται αυτόματα από την εφαρμογή. Συνδέεται με τον πίνακα της γέφυρας μέσω του BridgeID.

Πίνακας 5-4: Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας άνοιγμα

Όνομα γνωρίσματος	Ορισμός γνωρίσματος	Τύπος πεδίου
ID	Αριθμός ανοίγματος	Αυτόματη αρίθμηση
BridgeID	Αριθμός γέφυρας	
SpanType	Τύπος ανοίγματος	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
ConstructionMethodType	Τύπος μεθόδου κατασκευής	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
Length	Μήκος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
ConcreteVolume	Όγκος σκυροδέματος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ ³ .
ReinforcedSteelWeight	Βάρος χάλυβα οπλισμού	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε kg.
PrestressedSteelWeight	Βάρος χάλυβα προέντασης	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε kg.
Comments	Σχόλια	πεδίο κειμένου

5) Πίνακας Pier (Βάθρο)

Ο πίνακας περιέχει τα δεδομένα για τα βάθρα (μεσόβαθρα και ακρόβαθρα) της γέφυρας. Ο αριθμός του βάθρου (ID) είναι το γνώρισμα κλειδί που ορίζεται αυτόματα από την εφαρμογή. Κάθε βάθρο υποστηρίζει είτε δυο ανοίγματα αν είναι μεσόβαθρο, είτε ένα άνοιγμα αν είναι ακρόβαθρο. Ως εκ τούτου, ο πίνακας του βάθρου συνδέεται με τον πίνακα του ανοίγματος μέσω του LeftSpanID και RightSpanID.

Πίνακας 5-5: Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας βάθρο

Όνομα γνωρίσματος	Ορισμός γνωρίσματος	Τύπος πεδίου
ID	Αριθμός βάθρου	Αυτόματη αρίθμηση
PierType	Τύπος βάθρου	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
LeftSpanID	Αριθμός ανοίγματος αριστερά	
RightSpanID	Αριθμός ανοίγματος δεξιά	
PierConcreteType	Τύπος σκυροδέματος βάθρου	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
CrossSection	Τύπος διατομής	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
CrossBeamExists	Ύπαρξη δοκού έδρασης	πεδίο κειμένου-check box
ConnectionType	Τύπος σύνδεσης με ανωδομή	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
Height	Συνολικό ύψος βάθρου	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
ConcreteVolume	Όγκος σκυροδέματος βάθρου	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ ³ .
ReinforcedSteelWeight	Βάρος χάλυβα οπλισμού βάθρου	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε kg.
FoundationType	Τύπος θεμελίωσης	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
CrossBeamHeight	Ύψος δοκού έδρασης	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
CrossBeamReinforcedSteelWeight	Βάρος χάλυβα οπλισμού δοκού έδρασης	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε kg.
CrossBeamConcreteVolume	Όγκος σκυροδέματος δοκού έδρασης	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ ³ .
CrossbeamConcreteType	Τύπος σκυροδέματος δοκού έδρασης	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
Comments	Σχόλια	πεδίο κειμένου

6) Πίνακας SpreadFoundations (Επιφανειακή Θεμελίωση)

Ο πίνακας αυτός περιέχει τα δεδομένα για τις επιφανειακές θεμελιώσεις των βάθρων. Δεδομένου ότι κάθε βάθρο περιλαμβάνει μια μόνο θεμελίωση, συνδέεται με τον πίνακα του βάθρου μέσω του PierID. Ο τύπος εδάφους δίνεται από το χρήστη με βάση την κατάταξη των εδαφών που προτείνεται στην παρούσα έρευνα (Πίνακας 6-2).

Πίνακας 5-6: Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας επιφανειακή θεμελίωση

Όνομα γνωρίσματος	Ορισμός γνωρίσματος	Τύπος πεδίου
PierID	Αριθμός βάθρου	
Height	Ύψος πεδίου	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
ConcreteVolume	Όγκος σκυροδέματος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ ³ .
ReinforcedSteelWeight	Βάρος χάλυβα οπλισμού	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε kg.
ConcreteType	Τύπος σκυροδέματος	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
GroundType	Τύπος εδάφους	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
Comments	Σχόλια	πεδίο κειμένου

7) Πίνακας ShaftFoundations (Φρέατα)

Ο πίνακας περιέχει τα δεδομένα για τις θεμελιώσεις των βάθρων με φρέατα. Συνδέεται με τον πίνακα του βάθρου μέσω του PierID, ενώ ο τύπος εδάφους δίνεται από το χρήστη με βάση την προτεινόμενη κατάταξη των εδαφών του Πίνακα 6-2.

Πίνακας 5-7: Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας φρέατα

Όνομα γνωρίσματος	Ορισμός γνωρίσματος	Τύπος πεδίου
PierID	Αριθμός βάθρου	
Depth	Βάθος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
Diameter	Διάμετρος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
ConcreteVolume	Όγκος σκυροδέματος φρέατος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ ³ .
ReinforcedSteelWeight	Βάρος χάλυβα οπλισμού φρέατος	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε kg.
GroundType	Τύπος εδάφους	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
ConcreteType	Τύπος σκυροδέματος	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
Comments	Σχόλια	πεδίο κειμένου

8) Πίνακας PileFoundations (Θεμελίωση με πασσάλους)

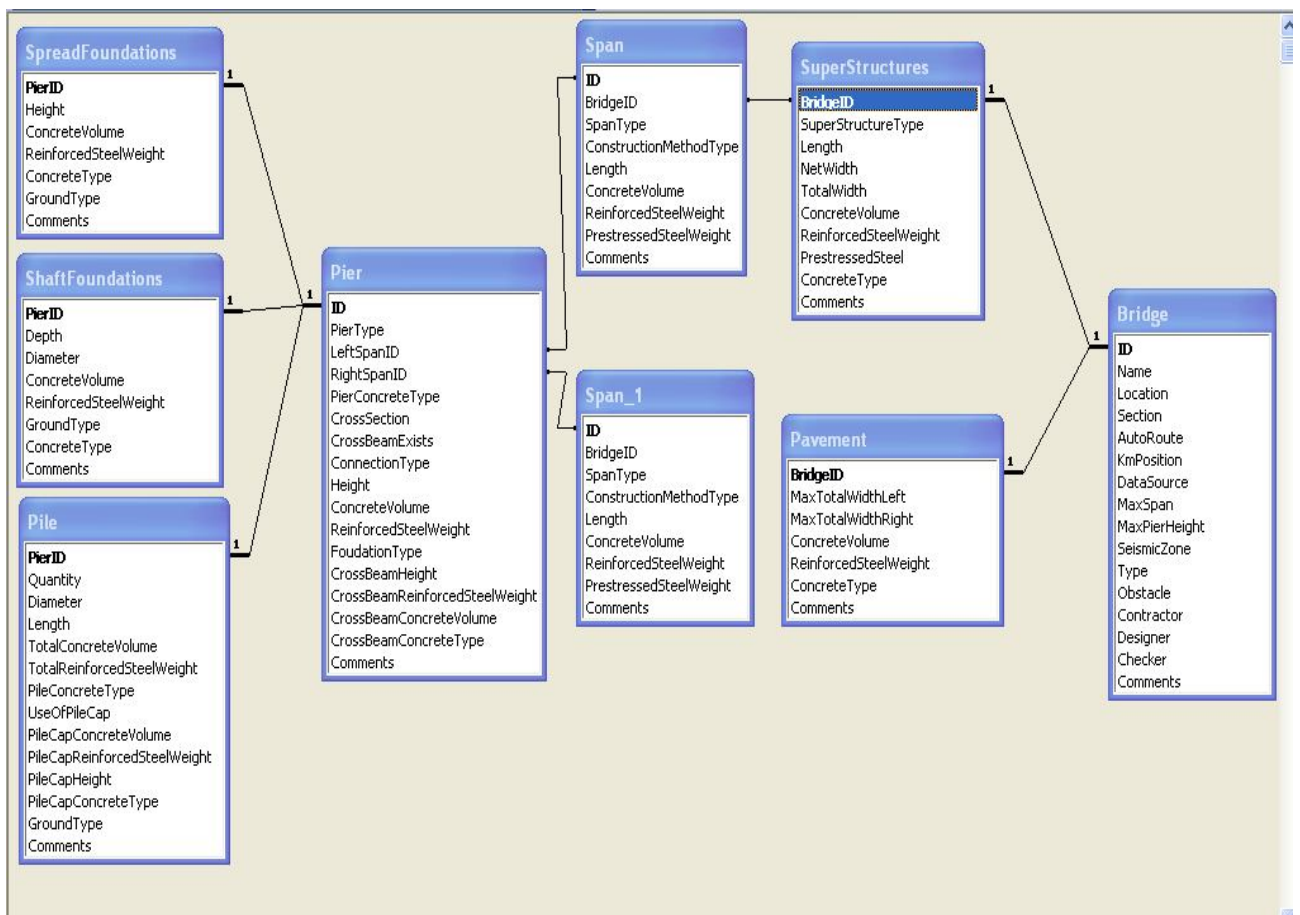
Ο πίνακας περιέχει τα δεδομένα για τις θεμελιώσεις των βάθρων με πασσάλους. Συνδέεται με τον πίνακα του βάθρου μέσω του PierID.

Πίνακας 5-8: Γνωρίσματα και χαρακτηριστικά οντότητας πάσσαλοι

Όνομα γνωρίσματος	Ορισμός γνωρίσματος	Τύπος πεδίου
PierID	Αριθμός βάθρου	
Quantity	Αριθμός πασσάλων	Αριθμός ακέραιος
Diameter	Διάμετρος πασσάλων	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
Length	Συνολικό Μήκος πασσάλων	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
TotalConcreteVolume	Συνολικός όγκος σκυροδέματος πασσάλων	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ ³ .
TotalReinforcedSteelWeight	Συνολικό βάρος οπλισμού πασσάλων	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε kg.
PileConcreteType	Τύπος σκυροδέματος πασσάλων	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
UseofPileCap	Χρήση κεφαλόδεσμου	πεδίο κειμένου-check box
PileCapConcreteVolume	Όγκος σκυροδέματος κεφαλόδεσμου	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ ³ .
PileCapReinforcedSteelWeight	Βάρος χάλυβα οπλισμού κεφαλόδεσμου	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε kg.
PileCapHeight	Ύψος κεφαλόδεσμου	Αριθμός με δυο δεκαδικά σε μ.
PileCapConcreteType	Τύπος σκυροδέματος κεφαλόδεσμου	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
GroundType	Τύπος εδάφους	πεδίο κειμένου-αυτόματη λίστα
Comments	Σχόλια	πεδίο κειμένου

5.4.2 Συσχετίσεις ΒΔΟΓ

Οι οντότητες της ΒΔΟΓ συνδέονται μεταξύ τους με συσχετίσεις. Οι συσχετίσεις αποτυπώνονται στο διάγραμμα οντοτήτων – συσχετίσεων που αποτελεί θεμελιώδες τμήμα του μοντέλου δεδομένων. Όσον αφορά τη ΒΔΟΓ, μια γέφυρα περιλαμβάνει ακριβώς μια ανωδομή και ένα πεζοδρόμιο. Μια ανωδομή περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα ανοίγματα και επομένως, η συσχέτιση ανωδομής – ανοιγμάτων είναι 1 προς πολλά (one to many). Ένα άνοιγμα σχετίζεται με ένα ή περισσότερα βάθρα, ενώ ένα βάθρο περιλαμβάνει ακριβώς μια θεμελίωση που δύναται να είναι είτε επιφανειακή, είτε βαθιά με φρέαρ ή πασσάλους. Το Σχήμα 5-1 παρουσιάζει το διάγραμμα οντοτήτων – συσχετίσεων της ΒΔΟΓ.



Σχήμα 5-1: Διάγραμμα οντοτήτων – συσχετίσεων ΒΔΟΓ

Σημείωση: Ο πίνακας *Span_1* δημιουργήθηκε αυτόματα από το πρόγραμμα λόγω περιορισμών και χρησιμοποιείται μόνο στο πλαίσιο του διαγράμματος οντοτήτων – συσχετίσεων. Είναι εικονικός, δεν αναπαριστάει ξεχωριστή οντότητα και δε χρησιμοποιείται για την αποθήκευση δεδομένων. Η οντότητα άνοιγμα (*Span*) είναι μια και συνδέεται με την οντότητα ανωδομή (*Superstructures*) της γέφυρας. Η οντότητα βάθρο(*Pier*) συνδέεται με το άνοιγμα μέσω του ανοίγματος αριστερά και δεξιά του βάθρου. Το πρόγραμμα εκφράζει τη συγκεκριμένη συσχέτιση στο διάγραμμα οντοτήτων – συσχετίσεων μέσω της χρήσης του εικονικού πίνακα *Span_1* .

5.5 Εισαγωγή δεδομένων

5.5.1 Φόρμες εισαγωγής δεδομένων

Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε προσφέρει τη δυνατότητα στο χρήστη να καταγράψει τα στοιχεία απευθείας στους πίνακες. Η οθόνη, όμως, κάθε πίνακα εμφανίζει και όλες τις προηγούμενες εγγραφές, με αποτέλεσμα να υφίσταται κίνδυνος αλλοίωσης των ήδη υπάρχοντων στοιχείων. Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκαν ανεξάρτητες φόρμες για κάθε πίνακα για την εισαγωγή των στοιχείων στη ΒΔΟΓ. Οι φόρμες προσφέρουν εύχρηστο και φιλικό γραφικό περιβάλλον στο χρήστη, είναι κενές για κάθε νέα εγγραφή και επομένως μειώνεται σημαντικά ο κίνδυνος επέμβασης στα προηγούμενα στοιχεία και επιτρέπουν γρήγορη εισαγωγή δεδομένων. Τα Σχήματα 5-2 έως 5-5 παρουσιάζουν τις φόρμες εισαγωγής στοιχείων για τους πίνακες *bridge*, *span*, *pier* και *pile*.

ID	(Αυτόματη Αρίθμηση)	Contractor	<input type="text"/>
Name	<input type="text"/>	Designer	<input type="text"/>
Location	<input type="text"/>	Checker	<input type="text"/>
Section	<input type="text"/>	Comments	<input type="text"/>
AutoRoute	<input type="text"/>		
KimPosition	<input type="text"/>		
DataSource	<input type="text"/> ▼		
MaxSpan	<input type="text"/> 0		
MaxPierHeight	<input type="text"/> 0		
SeismicZone	<input type="text"/>		
Type	<input type="text"/> ▼		
Obstacle	<input type="text"/> ▼		

Σχήμα 5-2: Φόρμα εισαγωγής στοιχείων πίνακα *bridge*

ID	<input type="text" value="(Αυτόματη Αρίθμηση)"/>
BridgeID	<input type="text" value="0"/> ▾
SpanType	<input type="text" value=""/> ▾
ConstructionMethodT	<input type="text" value=""/> ▾
Length	<input type="text" value="0"/>
ConcreteVolume	<input type="text" value="0"/>
ReinforcedSteelWeig	<input type="text" value="0"/>
PrestressedSteelWei	<input type="text" value="0"/>
Comments	<input type="text"/>

Σχήμα 5-3: Φόρμα εισαγωγής στοιχείων πίνακα span

ID	<input type="text" value="(Αυτόματη Αρί)"/>	CrossBeamHeight	<input type="text" value="0"/>
PierType	<input type="text" value=""/> ▾	CrossBeamWeight	<input type="text" value="0"/>
LeftSpanID	<input type="text" value="0"/> ▾	CrossBeamVolumeOfConcrete	<input type="text" value="0"/>
RightSpanID	<input type="text" value="0"/> ▾	CrossBeamTypeOfConcrete	<input type="text" value=""/> ▾
PierConcreteType:	<input type="text" value=""/> ▾	Comments	<input type="text"/>
CrossSection	<input type="text" value=""/> ▾		
CrossBeamExists	<input type="checkbox"/>		
ConnectionType	<input type="text" value=""/> ▾		
Height	<input type="text" value="0"/>		
ConcreteVolume	<input type="text" value="0"/>		
ReinforcedSteelWeight	<input type="text" value="0"/>		
FoudationType	<input type="text" value=""/> ▾		

Σχήμα 5-4: Φόρμα εισαγωγής στοιχείων πίνακα pier

PierID	<input type="text" value="1"/>	GroundType	<input type="text"/>
Quantity	<input type="text" value="0"/>	Comments	<input type="text"/>
Diameter	<input type="text" value="0"/>		
Length	<input type="text" value="0"/>		
TotalConcreteVolume	<input type="text" value="0"/>		
TotalReinforcedSteelWeight	<input type="text" value="0"/>		
PileConcreteType	<input type="text"/>		
UseOfPileCap	<input type="checkbox"/>		
PileCapConcreteVolume	<input type="text" value="0"/>		
PileCapReinforcedSteelWeight	<input type="text" value="0"/>		
PileCapHeight	<input type="text" value="0"/>		
PileCapConcreteType	<input type="text"/>		

Σχήμα 5-5: Φόρμα εισαγωγής στοιχείων πίνακα pile

5.5.2 Βιβλιοθήκες στοιχείων

Οι βιβλιοθήκες στοιχείων δημιουργήθηκαν για τη διευκόλυνση της εισαγωγής δεδομένων από το χρήστη και για την αποφυγή διαφοροποιήσεων στα δεδομένα από παραλλαγές κεφαλαίων και πεζών χαρακτήρων, σφάλματα ορθογραφικά και τονισμού. Περιέχουν τις πιο συνηθισμένες τιμές κάποιων γνωρισμάτων όπως εντοπίστηκαν κατά τη συλλογή και επεξεργασία των στοιχείων που συλλέχθηκαν από τις γέφυρες της Εγνατίας Οδού. Οι βιβλιοθήκες εμφανίζονται με τη μορφή drop-down μενού στις φόρμες εισαγωγής στοιχείων και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-9.

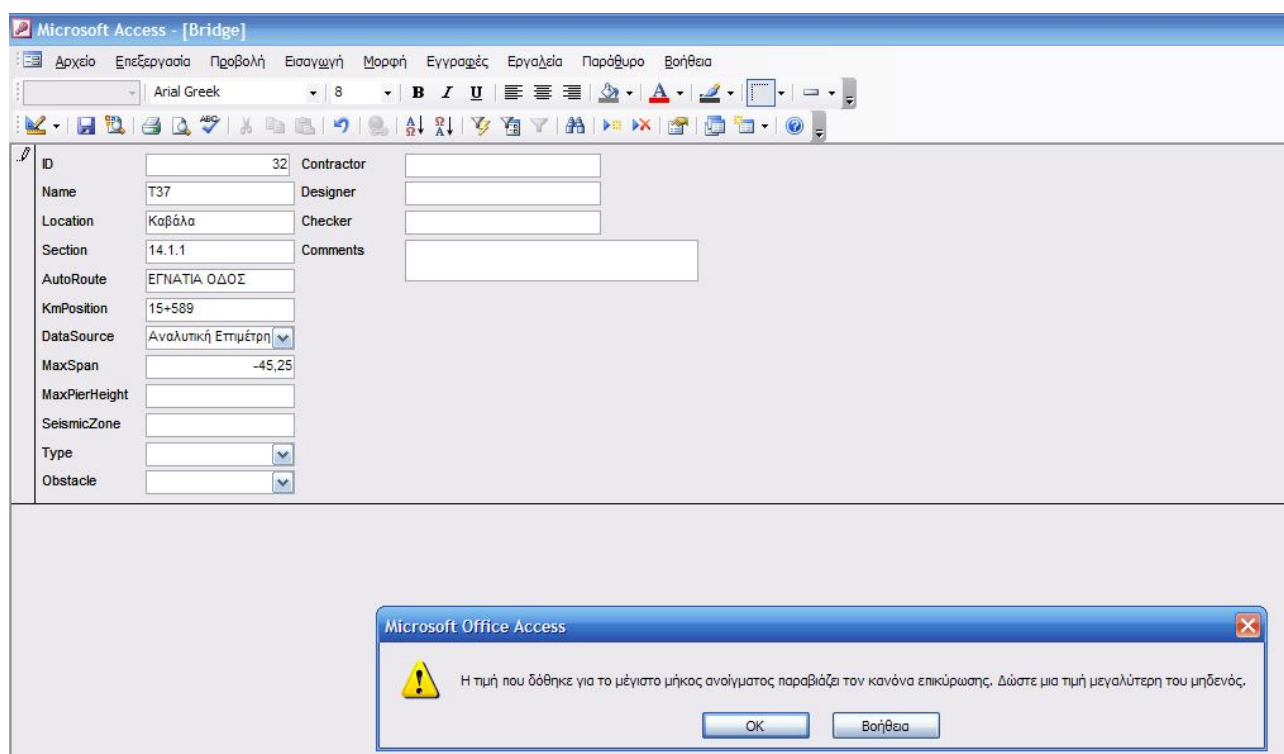
Πίνακας 5-9: Βιβλιοθήκες στοιχείων και καθορισμένες τιμές

α/α	Όνομα γνωρίσματος	Τιμές γνωρίσματος
1	DataSourceType	ΠΠΑΕ, Προμέτρηση, Αναλυτική Επιμέτρηση
2	BridgeType	Οδική Γέφυρα, Άνω Διάβαση, Κάτω Διάβαση, Σιδηροδρομική Γέφυρα, Πεζογέφυρα
3	ObstacleType	Χαράδρα, Ποταμός, Κοιλάδα
4	ConcreteType	B10, B15, B25, B35, B45
5	PierType	Μεσόβαθρο, Ακρόβαθρο
6	CrossSectionType	Κυκλική, Ορθογωνική Συμπαγής, Ορθογωνική με κενό, Συμπαγές Βάθρο, Λεπίδες
7	ConnectionType	Μονολιθική, Εφέδρανα
8	FoundationType	Πάσσαλοι, Φρέαρ, Πέδιλο
9	GroundType	IA, IB1, IB2, IC, ID1, ID2, IE1, IE2, IE3, IIA1, IIA2, IIB1, IIB2, IIC
10	ConstructionMethodType	Προβολοδόμηση, Συμβατική κατασκευή, Προκατασκευασμένες δοκοί, Τμηματική προώθηση, Προωθούμενος μεταλλότυπος, Μικτή
11	SpanType	Ακραίο, Μεσαίο
12	SuperStructureType	Μονοκυψελωτό κιβώτιο, Δικυψελωτό κιβώτιο, Πλάκα με κενά, Συμπαγής πλάκα, Προκατασκευασμένη δοκός με πλάκα συνέχειας

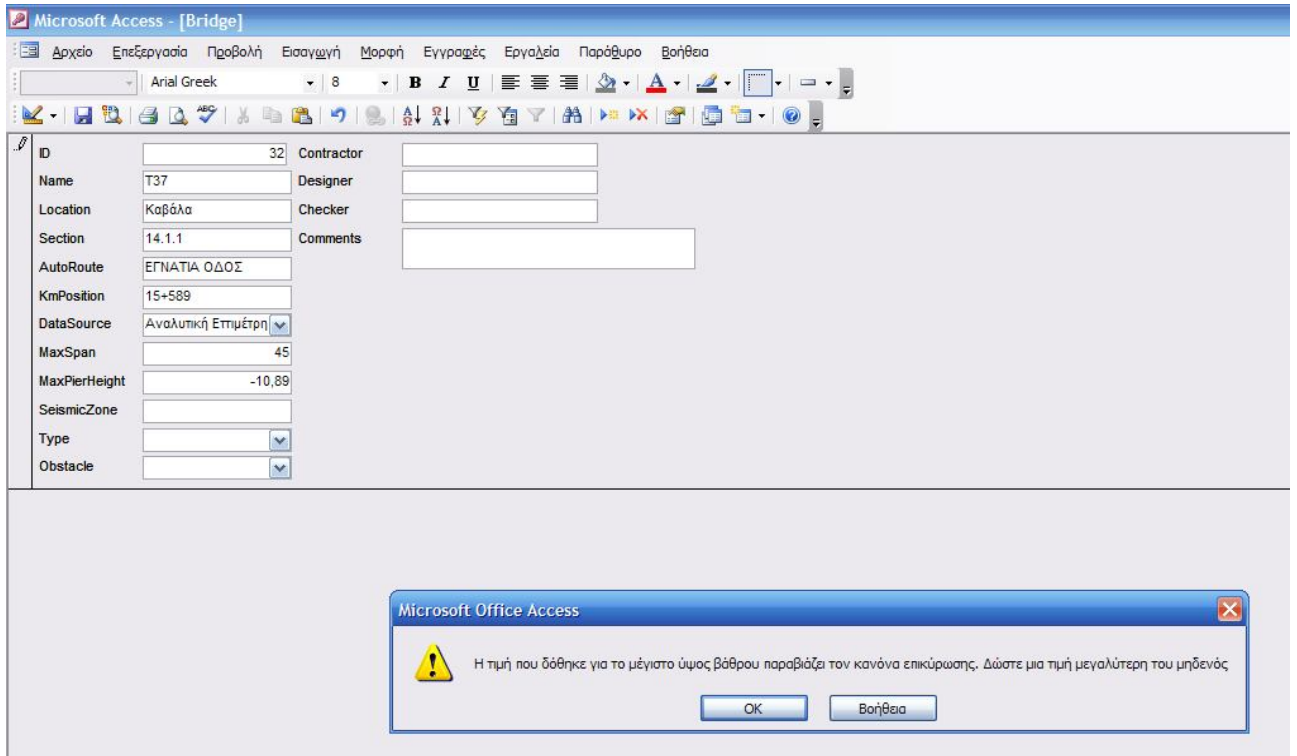
5.6 Έλεγχος ορθότητας δεδομένων

Η ΒΔΟΓ περιέχει αρκετούς περιορισμούς ορθότητας (integrity constraints) των δεδομένων. Οι περιορισμοί αυτοί πηγάζουν είτε από τη σημασία και τα σημασιολογικά (semantics) των δεδομένων και του μικρόκοσμου που αναπαριστούν, είτε από τις συσχετίσεις μεταξύ των πινάκων. Το διάγραμμα οντοτήτων – συσχετίσεων αποτελεί την αρχική απεικόνιση των περιορισμών ορθότητας. Μια εγγραφή σε έναν πίνακα σχετίζεται με εγγραφές από άλλους πίνακες. Παράλληλα, κάθε γνώρισμα οντότητας έχει πεδίο ορισμού το οποίο προσδιορίζει το σύνολο τιμών που μπορεί να λάβει το γνώρισμα αυτό σε κάθε ατομική οντότητα.

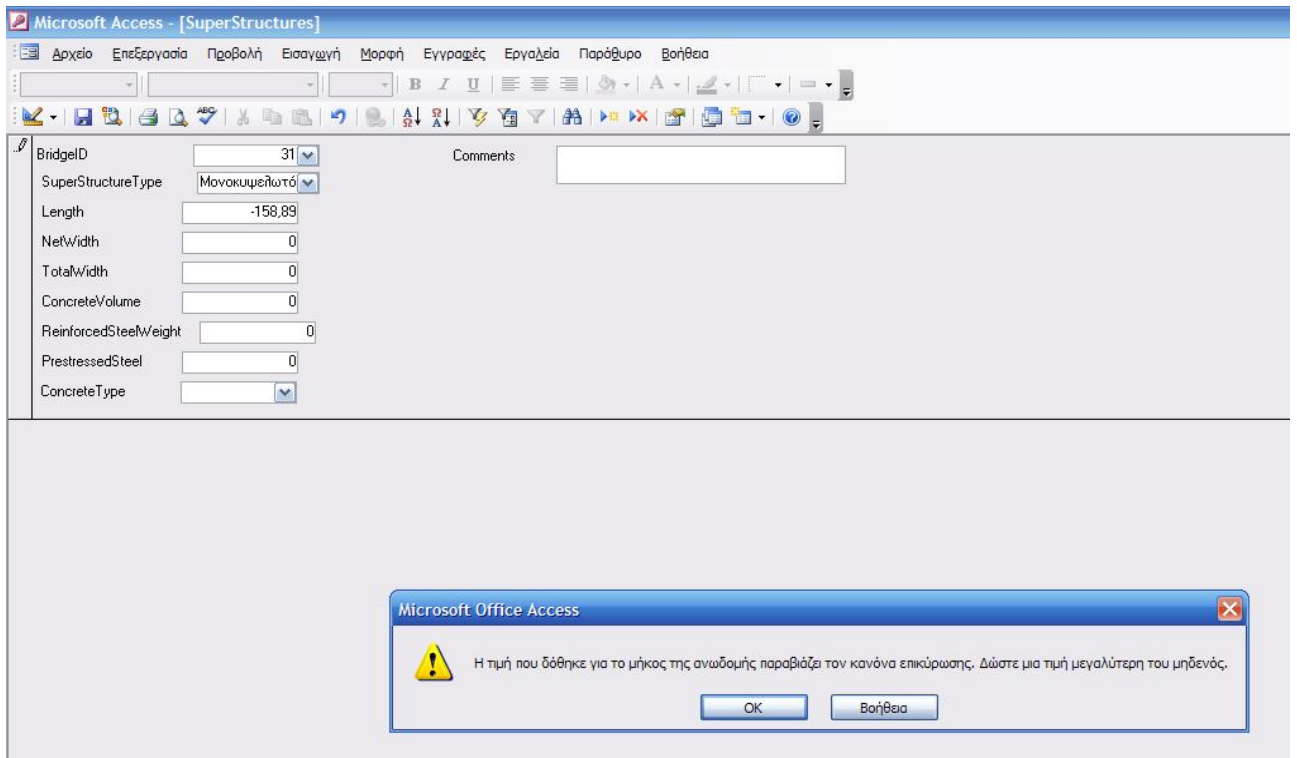
Το πρώτο επίπεδο ελέγχου της ορθότητας δεδομένων βρίσκεται στο επιτρεπόμενο σύνολο τιμών κάθε γνωρίσματος. Είναι προφανές από τη φυσική σημασία των γνωρισμάτων ότι τα περισσότερα από αυτά δύνανται να λαμβάνουν μόνο θετικές τιμές. Τα Σχήματα 5-6 έως 5-8 παρουσιάζουν το μήνυμα ελέγχου που παράγεται αυτόματα από την εφαρμογή όταν το μέγιστο άνοιγμα και ύψος βάρων της γέφυρας, καθώς και το μήκος της ανωδομής δε λαμβάνουν θετικές τιμές.



Σχήμα 5-6: Μήνυμα σφάλματος περιορισμού ορθότητας μέγιστου μήκους ανοίγματος



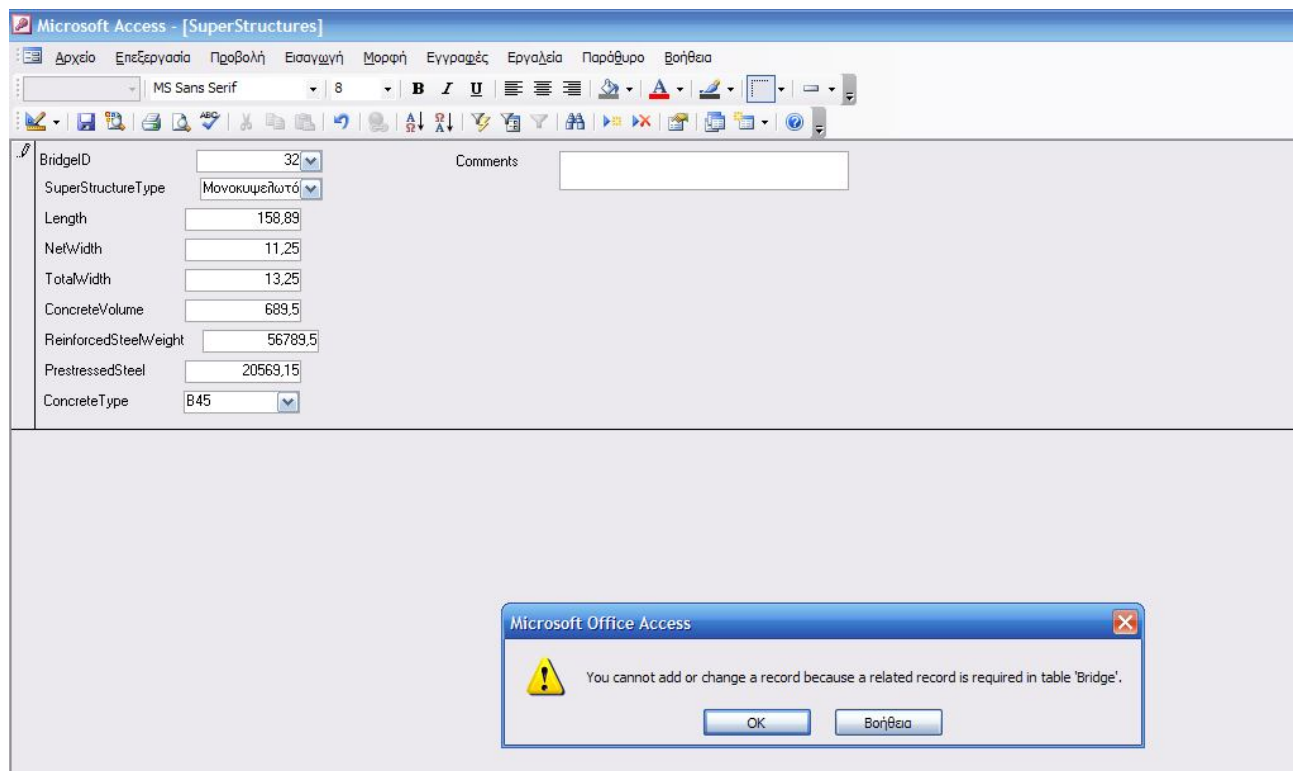
Σχήμα 5-7: Μήνυμα σφάλματος περιορισμού ορθότητας μέγιστου ύψους βάθρου



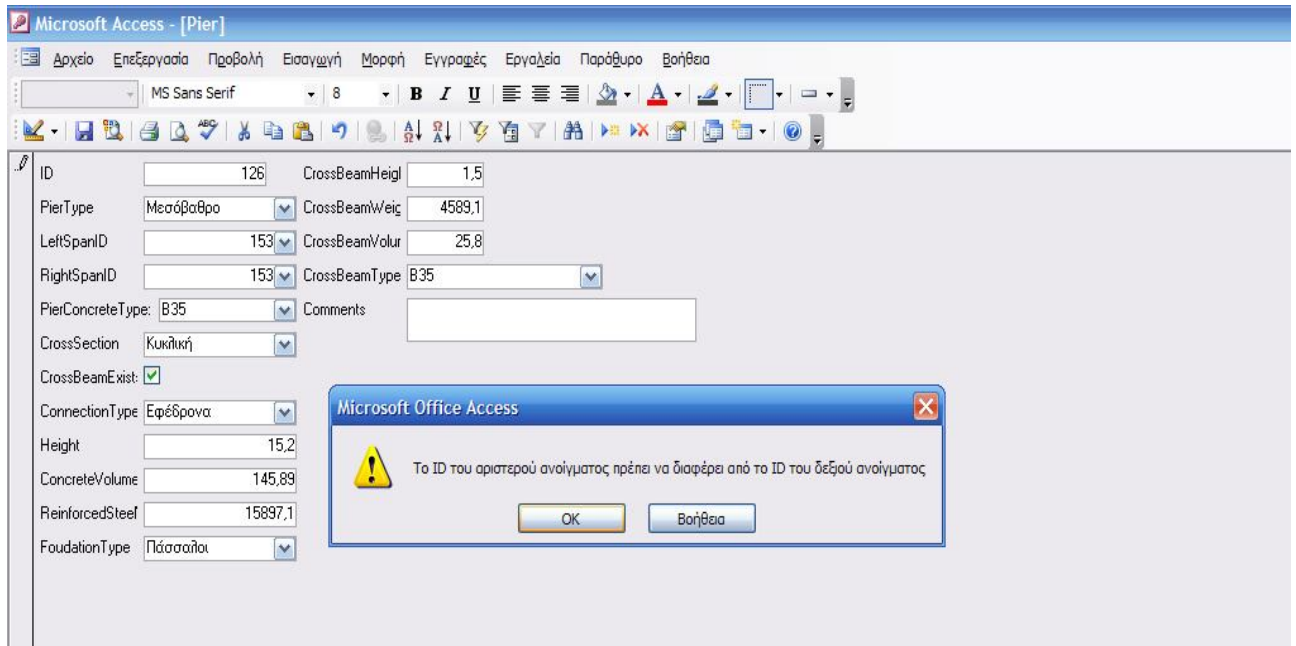
Σχήμα 5-8: Μήνυμα σφάλματος περιορισμού ορθότητας μήκους ανωδομής

Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 5.4.2., οι πίνακες συνδέονται μεταξύ τους με συσχετίσεις. Επομένως, τα δεδομένα που εισάγονται πρέπει να ικανοποιούν τους περιορισμούς ορθότητας που απορρέουν από τις συσχετίσεις. Για παράδειγμα, ο πίνακας superstructures σχετίζεται με τον πίνακα bridge μέσω του πεδίου BridgeID. Η τιμή που δίνεται στο πεδίο BridgeID πρέπει να έχει ήδη οριστεί και να υφίσταται στον πίνακα bridge. Το Σχήμα 5-9 παρουσιάζει το μήνυμα σφάλματος της εφαρμογής όταν δεν ικανοποιείται ο συγκεκριμένος περιορισμός. Ανάλογοι περιορισμοί ορθότητας έχουν οριστεί στα πεδία που χρησιμοποιούνται για τη συσχέτιση πινάκων στη βάση δεδομένων. Ακόμη, κάθε μεσόβαθρο υποστηρίζει ένα άνοιγμα της γέφυρας αριστερά και ένα δεξιά. Τα δυο αυτά ανοίγματα είναι διαφορετικά μεταξύ τους και επομένως τα γνωρίσματα LeftSpanID και RightSpanID του πίνακα pier πρέπει να διαφέρουν. Το Σχήμα 5-10 παρουσιάζει το μήνυμα σφάλματος όταν δεν πληρείται ο συγκεκριμένος περιορισμός.

Οι βιβλιοθήκες στοιχείων με τα drop-down μενού αποτελούν πρόσθετους περιορισμούς ορθότητας των δεδομένων. Οι τιμές των στοιχείων που έχουν οριστεί στις βιβλιοθήκες είναι οι επιτρεπόμενες για τα πεδία, ενώ η επιλογή τιμών από τα μενού των βιβλιοθηκών είναι υποχρεωτική για το χρήστη της ΒΔΟΓ.



Σχήμα 5-9: Μήνυμα σφάλματος περιορισμού ορθότητας πεδίου BridgeID



Σχήμα 5-10: Μήνυμα σφάλματος περιορισμού ορθότητας πεδίου LeftSpanID

5.7 Εξαγόμενες αναφορές της ΒΔΟΓ

Η ΒΔΟΓ προσφέρει τη δυνατότητα εξαγωγής στοιχείων και παρουσίασής τους με τη μορφή αναφορών. Ο χρήστης απαντά σε καθορισμένα ερωτήματα, επιλέγονται τα κατάλληλα δεδομένα και παράγονται αυτόματα αναφορές. Δημιουργήθηκαν οι παρακάτω τυπικές αναφορές:

5.7.1 Γενικές αναφορές

Ο χρήστης επιλέγει τον αυτοκινητόδρομο (AutoRoute) ή τον αυτοκινητόδρομο και το επιμέρους τμήμα (Section). Η αναφορά περιέχει τα γενικά χαρακτηριστικά των γεφυρών, όπως το όνομα, το συνολικό μήκος και πλάτος, την επιφάνεια, το μέγιστο μήκος ανοίγματος, το μέγιστο ύψος βάθρου, τον τύπο της ανωδομής, τη μέθοδο κατασκευής και τον τύπο θεμελίωσης. Το Σχήμα 5-11 παρουσιάζει ένα απόσπασμα της αναφοράς.

Γενική Αναφορά Γεφυρών

a/a	Όνομα	Συνολικό Μήκος (m)	Πλάτος (m)	Επιφάνεια (m ²)	Μέγιστο Ανοίγμα (m)	Μέγιστο Ύψος Βάθρου	Τύπος Ανωδομής	Μέθοδος Κατασκευής	Τύπος Θεμελίωσης
1	305-307 ΑΜΑΞΑΔΩΝ	86,00	14,00	1204,00	32,00	12,00	Δικυψελωτό κιβώτιο	Συμβατική Κατασκευή	Πάσσαλοι
2	6+550-ΑΚ	137,58	12,75	1754,15	34,40	13,11	Προκατασκευασμένη Δοκός με Πλάκα Συνεχείας	Προκατασκευασμένες Δοκοί	Πάσσαλοι
3	6+550-ΔΚ	137,58	12,75	1754,15	34,40	12,59	Προκατασκευασμένη Δοκός με Πλάκα Συνεχείας	Προκατασκευασμένες Δοκοί	Πάσσαλοι
4	Βοτονοσίου-ΑΚ	490,00	13,00	6370,00	230,00	46,19	Μονοκυκλωτό Κιβώτιο	Προβολοδόμηση	Φρέαρ
5	Βοτονοσίου-ΔΚ	477,75	13,00	6210,75	224,25	52,47	Μονοκυκλωτό Κιβώτιο	Προβολοδόμηση	Φρέαρ
6	Γ4 ΜΑΝΘΕΙΑΣ-ΑΚ	91,00	12,70	1155,70	41,00	11,04	Μονοκυκλωτό Κιβώτιο	Συμβατική Κατασκευή	Πάσσαλοι
7	Γ4 ΜΑΝΘΕΙΑΣ-ΔΚ	91,00	12,70	1155,70	41,00	11,07	Μονοκυκλωτό Κιβώτιο	Συμβατική Κατασκευή	Πάσσαλοι
8	Γ7-ΑΚ	131,30	12,70	1667,51	33,50	35,54	Προκατασκευασμένη Δοκός με Πλάκα Συνεχείας	Προκατασκευασμένες Δοκοί	Πάσσαλοι
9	Ειρήνης - ΑΚ	180,00	13,90	2502,00	45,00	9,31	Μονοκυκλωτό Κιβώτιο	Συμβατική Κατασκευή	Πάσσαλοι

Σχήμα 5-11: Απόσπασμα γενικής αναφοράς γεφυρών

5.7.2 Αναφορές επιμέρους τμημάτων της γέφυρας

Η εφαρμογή εξάγει διαφορετικές αναφορές για τα επιμέρους τμήματα της γέφυρας και ειδικότερα την ανωδομή, τα ανοίγματα, τα βάθρα και τις θεμελιώσεις. Όσον αφορά στην ανωδομή, ο χρήστης επιλέγει τον τύπο καταστρώματος και τη μέθοδο κατασκευής και η αναφορά που παρουσιάζεται ενδεικτικά στα Σχήματα 5-12 και 5-13 περιέχει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανωδομής (μήκος, πλάτος, επιφάνεια) και τις ποσότητες εργασιών (όγκος σκυροδέματος, βάρος χάλυβα οπλισμού και βάρος χάλυβα προέντασης).

Αναφορά Ανωδομών για Μονοκυψελωτό Κιβώτιο και Συμβατική Κατασκευή

<i>a/a</i>	<i>Όνομα Γέφυρας</i>	<i>Ολικό Μήκος (m)</i>	<i>Ολικό Πλάτος (m)</i>	<i>Επιφάνεια (m²)</i>	<i>Όγκος Σκυροδέματος (m³)</i>	<i>Βάρος Χάλυβα Οπλισμού (kg)</i>	<i>Βάρος Χάλυβα Προέντασης (kg)</i>
1	Γ4 ΜΑΝΘΕΙΑΣ-ΑΚ	91,00	12,70	1155,70	1026,78	103341,30	52834,09
2	Γ4 ΜΑΝΘΕΙΑΣ-ΔΚ	91,00	12,70	1155,70	1026,78	103341,30	52834,09
3	Ειρήνης - ΑΚ	180,00	13,90	2502,00	1596,82	189219,15	85259,63
4	Ειρήνης - ΔΚ	180,00	13,90	2502,00	1596,82	189219,15	85259,63
5	Κ.Δ. Σιδηροδρομικής γραμμής	90,00	13,95	1255,50	665,32	88528,98	32901,59
6	Τ12 ΠΡΟΦΗΤΗ ΗΛΙΑ-ΑΚ	145,00	13,95	2022,75	2064,23	216710,36	110706,51
7	Τ12 ΠΡΟΦΗΤΗ ΗΛΙΑ-ΔΚ	145,00	13,95	2022,75	2064,23	216710,36	110706,51
8	Τ14	95,60	12,10	1156,76	892,43	0,00	30908,93
9	Τ3	113,00	13,95	1576,35	1570,60	129351,50	60626,62

Σχήμα 5-12: Απόσπασμα αναφοράς ανωδομής για Μονοκυψελωτό Κιβώτιο και Συμβατική Κατασκευή

Αναφορά Ανωδομών για Προκατασκευασμένη Δοκός και Προκατασκευασμένες Δοκοί

<i>α/α</i>	<i>Όνομα Γέφυρας</i>	<i>Ολικό Μήκος (m)</i>	<i>Ολικό Πλάτος (m)</i>	<i>Επιφάνεια (m²)</i>	<i>Όγκος Σκυροδέματος (m³)</i>	<i>Βάρος Χάλυβα Οπλισμού (kg)</i>	<i>Βάρος Χάλυβα Προέντασης (kg)</i>
1	6+550-AK	137,58	12,75	1754,15	1179,50	168827,20	33505,20
2	6+550-ΔK	137,58	12,75	1754,15	1179,50	168827,20	33505,20
3	Γ7-AK	131,30	12,70	1667,51	1119,41	158950,98	27767,80
4	ΚΟΜΨΑΤΟΥ-AK	416,00	15,07	6269,12	3885,83	601075,54	159793,27
5	ΚΟΜΨΑΤΟΥ-ΔK	416,00	15,05	6260,80	3885,83	601075,54	159793,27
6	ΚΟΣΥΝΘΟΥ-AK	178,00	15,50	2759,00	1855,72	329256,80	81275,70
7	ΚΟΣΥΝΘΟΥ-ΔK	178,00	15,50	2759,00	1855,72	338698,84	81275,70
8	T2-AK	140,00	12,70	1778,00	1101,16	149323,36	40383,52
9	T2-ΔK	140,00	12,70	1778,00	1101,16	149323,36	40383,52
10	T6-AK	209,32	12,70	2658,36	1626,78	221463,60	59584,80
11	T6-ΔK	209,32	12,70	2658,36	1626,78	221463,60	59584,80

Σχήμα 5-13: Απόσπασμα αναφοράς ανωδομής για Προκατασκευασμένες Δοκούς με Πλάκα Συνεχείας

Η αναφορά των ανοιγμάτων της γέφυρας έχει ως παράμετρο επιλογής τη μέθοδο κατασκευής και περιέχει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ανοιγμάτων και τις ποσότητες εργασιών (Σχήμα 5-14). Η αναφορά των βάθρων εξάγεται με βάση το εύρος του ύψους που ορίζει ο χρήστης και περιέχει το ύψος βάθρου, τον τύπο διατομής, τον τρόπο σύνδεσης με το κατάστρωμα, το μήκος των ανοιγμάτων εκατέρωθεν του βάθρου, το μήκος του καταστρώματος που υποστηρίζεται και τις ποσότητες εργασιών (Σχήμα 5-15).

Αναφορά Ανοιγμάτων για Προκατασκευασμένες Δοκοί

<i>a/a</i>	<i>Μήκος (m)</i>	<i>Όγκο Πλάτος(m)</i>	<i>Όγκος Σκυροδέματος (m3)</i>	<i>Βάρος Χαλ. Οπλισμού (kg)</i>	<i>Βάρος Χαλ. Προέντασης (kg)</i>
1	32,15	12,70	274,10	38979,97	6941,95
2	33,50	12,70	285,61	40616,77	6941,95
3	33,50	12,70	285,61	40616,77	6941,95
4	32,15	12,70	274,10	38979,97	6941,95
5	35,00	15,50	371,14	67851,36	16255,14
6	36,00	15,50	371,14	67851,36	16255,14
7	36,00	15,50	371,14	67851,36	16255,14
8	36,00	15,50	371,14	67851,36	16255,14
9	35,00	15,50	371,14	67851,36	16255,14
10	35,00	15,50	371,14	67739,77	16255,14
11	36,00	15,50	371,14	67739,77	16255,14
12	36,00	15,50	371,14	67739,77	16255,14
13	36,00	15,50	371,14	67739,77	16255,14
14	35,00	15,50	371,14	67739,77	16255,14

Σχήμα 5-14: Απόσπασμα αναφοράς ανοιγμάτων για Προκατασκευασμένες Δοκούς

Αναφορά βάθρων για ύψος μικρότερο από 15 μέτρα

α/α	Υψος (m)	Μήκος Αρ. Ανοίγμ. (m)	Μήκος Δεξ. Ανοίγμ. (m)	Υποστηρ. Μήκος Καταστρ. (m)	Όγκος Σκυροδέματος (m ³)	Βάρος Χαλ. Οπλισμού (kg)	Τύπος Σύνδεσης	Διατομή
1	4,13	35,20	35,20	35,20	114,94	11156,13	Εφέδρωνα	Συμπαγές Βάθρο
2	4,30	35,20	35,20	35,20	114,94	11054,28	Εφέδρωνα	Συμπαγές Βάθρο
3	4,84	40,00	65,00	52,50	34,19	23354,29	Μονολιθική	Κυκλική
4	5,18	40,00	65,00	52,50	36,60	24994,89	Μονολιθική	Κυκλική
5	5,35	65,00	40,00	52,50	37,80	25815,18	Μονολιθική	Κυκλική
6	5,56	32,00	32,00	32,00	137,39	16698,64	Εφέδρωνα	Συμπαγές Βάθρο
7	5,58	65,00	40,00	52,50	39,35	26924,99	Μονολιθική	Κυκλική
8	5,59	32,00	32,00	32,00	137,97	16823,58	Εφέδρωνα	Συμπαγές Βάθρο
9	5,61	32,00	32,00	32,00	138,36	16883,77	Εφέδρωνα	Συμπαγές Βάθρο
10	5,73	32,00	32,00	32,00	140,68	17209,21	Εφέδρωνα	Συμπαγές Βάθρο
11	7,80	45,00	45,00	45,00	52,18	6586,89	Εφέδρωνα	
12	7,81	45,00	45,00	45,00	52,22	6586,89	Εφέδρωνα	
13	7,88	43,20	54,38	48,79	57,31	7898,07	Εφέδρωνα	Ορθογωνική με κενό
14	7,92	49,00	32,00	40,50	87,12	35645,50	Εφέδρωνα	

Σχήμα 5-15: Απόσπασμα αναφοράς μεσοβάθρων με ύψος μικρότερο από 15.00 μέτρα

Όσον αφορά στις θεμελιώσεις των βάθρων, οι εξαγόμενες αναφορές περιέχουν τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε τύπου θεμελίωσης, καθώς και τους παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό του, όπως τον τύπο εδάφους, το ύψος του βάθρου, τη σύνδεσή του με το κατάστρωμα, το πλάτος και το μήκος του υποστηριζόμενου καταστρώματος. Το Σχήμα 5-16 παρουσιάζει απόσπασμα της αναφοράς των φρεάτων θεμελίωσης.

Αναφορά Φρεάτων θεμελίωσης

α/α	Τύπος Εδάφους	Βάθος (m)	Όγκος Σκυροδ. (m ³)	Βάρος Χαλ. Οπλισμού (kg)	Υψος Βάθρου (m)	Μήκος Αρ. Ανοίγμ. (m)	Μήκος Δεξ. Ανοίγμ. (m)	Υποστηριζόμενο Μήκ. Καταστρ. (m)	Τύπος Σύνδεσης	Ολικό Πλάτος (m)
1	IC	20,00	1735,73	109143,76	46,19	230,00	130,00	180,00	ΜονοΝθική	13,00
2	IC	20,00	1784,17	138329,16	44,58	126,75	224,25	175,50	ΜονοΝθική	13,00
3	IC	25,00	2173,91	143772,80	45,00	130,00	230,00	180,00	ΜονοΝθική	13,00
4	IC	25,20	2199,24	119426,24	52,47	224,25	126,75	175,50	ΜονοΝθική	13,00

Σχήμα 5-16: Απόσπασμα αναφοράς φρεάτων θεμελίωσης

5.7.3 Αναφορές καταναλώσεων οπλισμού

Η εφαρμογή εξάγει αναφορές για τις καταναλώσεις χάλυβα οπλισμού και προέντασης στα επιμέρους τμήματα της γέφυρας. Οι αναφορές αυτές προσφέρουν πολύτιμη πληροφόρηση στους μελετητές γεφυρών και στους ελεγκτές μελετών, καθώς παρέχουν γρήγορες εκτιμήσεις της αναγκαίας ποσότητας οπλισμού. Ο τύπος καταστρώματος και η μέθοδος κατασκευής αποτελούν τις παραμέτρους επιλογής για την ανωδομή. Απόσπασμα της αναφοράς κατανάλωσης οπλισμού ανωδομής μονοκυψελωτού κιβωτίου κατασκευασμένης με προβολοδόμηση και προκατασκευασμένων δοκών παρουσιάζεται στα Σχήματα 5-17 και 5-18 αντίστοιχα.

Κατανάλωση οπλισμού για Μονοκυψελωτό Κιβώτιο και Προβολοδόμηση

α/α	Ολικό Μήκος (m)	Ολικό Πλάτος (m)	Επιφάνεια (m ²)	Κατανάλωση Χαλ. Οπλισμού (kg/m ³)	Κατανάλωση Χαλ. Προέντασης (kg/m ³)
1	257,47	12,95	3334,24	165,699	41,977
2	260,01	12,95	3367,13	165,438	42,041
3	477,75	13,00	6210,75	220,154	68,438
4	490,00	13,00	6370,00	220,783	67,931

Σχήμα 5-17: Απόσπασμα αναφοράς κατανάλωσης οπλισμού για γέφυρες μονοκυψελωτού κιβωτίου κατασκευασμένες με προβολοδόμηση

Κατανάλωση οπλισμού για Προκατασκευασμένη Δοκός και Προκατασκευασμένες Δοκοί με Πλάκα Συνεχείας

<i>a/a</i>	<i>Ολικό Μήκος (m)</i>	<i>Ολικό Πλάτος (m)</i>	<i>Επιφάνεια (m²)</i>	<i>Κατανάλωση Χαλ. Οπλισμού (kg/m³)</i>	<i>Κατανάλωση Χαλ. Προέντασης (kg/m³)</i>
1	70,40	13,95	982,08	87,591	45,361
2	131,30	12,70	1667,51	141,995	24,805
3	137,58	12,75	1754,15	143,134	28,406
4	140,00	12,70	1778,00	135,605	36,673
5	142,40	12,75	1815,60	145,600	38,703
6	168,21	12,75	2144,68	146,130	35,503
7	178,00	15,50	2759,00	177,428	43,797
8	178,00	15,50	2759,00	182,516	43,797
9	209,32	12,70	2658,36	136,136	36,627
10	416,00	15,05	6260,80	154,683	41,122
11	416,00	15,07	6269,12	154,683	41,122

Σχήμα 5-18: Απόσπασμα αναφοράς κατανάλωσης οπλισμού για γέφυρες με προκατασκευασμένες δοκούς και πλάκα συνεχείας

Οι αναφορές καταναλώσεων οπλισμού στα ανοίγματα εξάγονται με βάση τη μέθοδο κατασκευής που επιλέγεται και περιέχουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ανοιγμάτων και την κατανάλωση οπλισμού ανά μονάδα όγκου (Σχήμα 5-19). Τέλος, οι αντίστοιχες αναφορές στα βάθρα εξάγονται με βάση τη διατομή και το εύρος ύψους που ορίζει ο χρήστης (Σχήμα 5-20).

Κατανάλωση οπλισμού στα ανοίγματα γεφυρών - Προβολοδόμηση

a/a	Μήκος (m)	Ολικό Πλάτος (m)	Επιφάνεια (m ²)	Κατανάλωση Χαλ. Οπλισμού (kg/m ³)	Κατανάλωση Χαλ. Προέντασης (kg/m ³)
1	59,93	12,95	776,09	174,235	44,140
2	100,10	12,95	1296,30	174,234	44,140
3	59,98	12,95	776,74	174,236	44,140
4	61,19	12,95	792,41	173,738	44,151
5	100,40	12,95	1300,18	173,739	44,151
6	59,88	12,95	775,45	173,740	44,151
7	130,00	13,00	1690,00	221,422	62,149
8	230,00	13,00	2990,00	220,783	67,931

Σχήμα 5-19: Απόσπασμα αναφοράς κατανάλωσης οπλισμού στα ανοίγματα γεφυρών κατασκευασμένα με προβολοδόμηση

Κατανάλωση οπλισμού βάθρων ύψους < 15 μέτρα

Διατομής: Συμπαγές Βάθρο

a/a	Ύψος (m)	Μήκος Αρ. Ανοίγμ. (m)	Μήκος Δεξ. Ανοίγμ. (m)	Υποστηριζόμενο Μήκος Καταστρ. (m)	Τύπος Σύνδεσης	Κατανάλωση Χαλ. Οπλισμού (kg/m ³)
1	4,13	35,20	35,20	35,20	Εφέδρανα	97,060
2	4,30	35,20	35,20	35,20	Εφέδρανα	96,174
3	5,56	32,00	32,00	32,00	Εφέδρανα	121,542
4	5,59	32,00	32,00	32,00	Εφέδρανα	121,937
5	5,61	32,00	32,00	32,00	Εφέδρανα	122,028
6	5,73	32,00	32,00	32,00	Εφέδρανα	122,329
7	8,03	32,00	32,00	32,00	Εφέδρανα	131,217
8	8,29	32,00	32,00	32,00	Εφέδρανα	131,872
9	8,29	32,00	32,00	32,00	Εφέδρανα	114,280
10	8,37	32,00	32,00	32,00	Εφέδρανα	113,933

Σχήμα 5-20: Απόσπασμα αναφοράς κατανάλωσης οπλισμού στα βάθρα γεφυρών με συμπαγή διατομή και ύψους μικρότερο από 15.00 μέτρα

6 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΑΠΑΝΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΜΕΣΟΒΑΘΡΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

Οι θεμελιώσεις παρουσιάζουν αξιόλογη επίδραση στο κόστος κατασκευής σύγχρονων οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα. Η δαπάνη τους κυμαίνεται από 19% έως 27% της συνολικής δαπάνης ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής και το σύστημα σχεδιασμού της γέφυρας (Fragkakis και Lambropoulos 2004). Το αντίστοιχο ποσοστό εκτιμάται σε 18% σύμφωνα με τον Menn (1990). Παρά την υψηλή τους επίδραση, η εκτίμηση της δαπάνης κατασκευής τους έχει αποτελέσει αντικείμενο περιορισμένου αριθμού μελέτων μέχρι σήμερα, λόγω του μεγάλου αριθμού των παραγόντων που επηρεάζουν το σχεδιασμό των θεμελιώσεων, όπως τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού της ανωδομής (μήκος και πλάτος κάθε ανοίγματος της γέφυρας) και των μεσοβάθρων (ύψος και σύνδεση με το κατάστρωμα), τις γεωλογικές συνθήκες σε κάθε θέση θεμελίωσης, το εφαρμοζόμενο σύστημα θεμελίωσης και τις σεισμικές παραμέτρους. Οι περισσότεροι μελετητές εστιάζουν σε εκτιμήσεις κόστους και ποσοτήτων εργασιών της ανωδομής, προκειμένου να εξαλειφθούν οι εξαρτώμενοι από τη θέση του έργου παράγοντες, όπως οι εδαφικές και υδρολογικές συνθήκες, τα απότομα πρηνή, η εγγύτητα σε ενεργά ρήγματα, οι μετατοπίσεις του εδάφους και οι υδάτινες ροές.

Η δαπάνη θεμελίωσης των γεφυρών περιλαμβάνει τη δαπάνη των χωματουργικών εργασιών και τη δαπάνη της κύριας κατασκευής. Η πρώτη συνδέεται με τις εκσκαφές και τις ειδικές γεωτεχνικές εργασίες, όπως τη σταθεροποίηση πρηνών και την ενίσχυση του εδάφους. Η δεύτερη αναφέρεται στην καθεαυτή κατασκευή της θεμελίωσης και δύναται να υπολογιστεί με την εφαρμογή των κατάλληλων τιμών μονάδας στις ποσότητες εργασιών του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού. Η δαπάνη των χωματουργικών εργασιών κυμαίνεται μεταξύ 15% και 30% της συνολικής δαπάνης θεμελίωσης γεφυρών (Fragkakis και Lambropoulos 2004).

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο ανταποκρίνεται στην ανάγκη για εύχρηστες και αξιόπιστες εκτιμήσεις δαπάνης θεμελιώσεων γεφυρών στα αρχικά στάδια του έργου. Παρουσιάζεται εννοιολογικό μοντέλο εκτίμησης δαπάνης που στηρίζεται σε πληροφορίες γνωστές πριν τον προσδιορισμό λεπτομερών σχεδίων και προδιαγραφών. Προτείνονται επίσης σύστημα ταξινόμησης εδαφών και ένα έμπειρο σύστημα, τα οποία από κοινού επιτρέπουν την επιλογή του κατάλληλου τύπου θεμελίωσης. Τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία συλλέχθηκαν από κατασκευασμένες γέφυρες της Εγνατίας Οδού. Συνεντεύξεις με ειδικούς και εμπειρογνώμονες μελέτης και κατασκευής γεφυρών οδήγησαν στον προσδιορισμό των σημαντικών μεταβλητών για κάθε τύπο θεμελίωσης. Η συμφωνία των αποτελεσμάτων με την άποψη των ειδικών εξετάστηκε με τη μεθοδολογία παλινδρόμησης με προς τα πίσω απαλοιφή. Η στατιστική

ανάλυση επέτρεψε την ανάπτυξη μοντέλων εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού για τους κυριότερους τύπους θεμελίωσης.

6.1 Γεωλογία της Εγνατίας Οδού

Η Εγνατία Οδός διασχίζει αρκετά βουνά και τέμνει σχεδόν εγκάρσια τις βασικές γεωλογικές ζώνες της Ελλάδας. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί έχουν υποστεί έντονες τεκτονικές παραμορφώσεις που οφείλονται σε ρηγμάτωση, πτύχωση ή εφίπλευση, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στις περισσότερες περιπτώσεις σύνθετες και ποικίλες γεωλογικές δομές που επηρεάζουν τη μελέτη και κατασκευή κάθε τύπου έργου πολιτικού μηχανικού (Hoek et al. 2006). Επομένως, η αξιοσημείωτη ποικιλία των γεωλογικών συνθηκών κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου καθιστά αδύνατη την ακριβή πρόβλεψη των εδαφικών χαρακτηριστικών στις θέσεις θεμελίωσης γεφυρών πριν την εκτέλεση λεπτομερών γεωλογικών και γεωτεχνικών μελετών.

6.2 Προτεινόμενη κατάταξη εδαφών

Δεδομένου ότι οι εδαφικές συνθήκες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό της θεμελίωσης των βάθρων γεφυρών, καθίσταται αναγκαία η εύχρηστη μέθοδος κατηγοριοποίησής τους για την ανάπτυξη του μοντέλου εκτίμησης δαπάνης. Ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000 – ΕΑΚ 2000 (ΟΑΣΠ 2001) χωρίζει την Ελλάδα σε τρεις σεισμικές ζώνες με διαφορετικές ανώτερες επιταχύνσεις εδάφους και παραμέτρους σχεδιασμού. Ο ΕΑΚ αναθεωρήθηκε το 2003 με νέο χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας και προτείνει την κατάταξη των εδαφών σε πέντε κατηγορίες, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6-1.

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, αναπτύχθηκε αναλυτική κατάταξη των εδαφών, η οποία στηρίζεται σε πληροφορίες γνωστές στα αρχικά στάδια του έργου. Βασίζεται στη μέθοδο που προτάθηκε από τους Tsiambaos και Saroglou (2009). Βραχώδεις και εδαφικοί σχηματισμοί αποτελούν τις δυο βασικές κατηγορίες, οι οποίες χωρίζονται στη συνέχεια σύμφωνα με τη λιθολογία, δομή, αντοχή και χαρακτηριστικά παραμορφωσιμότητας. Οι βραχώδεις μάζες κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (GSI) όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Ο Πίνακας 6-2 παρουσιάζει τους προτεινόμενους τύπους εδαφών.

Η χρήση φιλικών εργαλείων για την εκτίμηση αντοχής γεωλογικών σχηματισμών αποτελεί βασικό παράγοντα της προτεινόμενης κατηγοριοποίησης. Η αντοχή και παραμορφωσιμότητα της ρωγματομένης (τεμαχώδους) βραχομάζας εξαρτάται γενικώς από την αντοχή και παραμορφωσιμότητα του άρρηκτου πετρώματος, καθώς και από τα χαρακτηριστικά

και την αντοχή των ασυνεχειών που τεμαχίζουν τη βραχομάζα. Η προτεινόμενη κατηγοριοποίηση εδαφών χρησιμοποίησε για τους βραχώδεις σχηματισμούς την ταξινόμηση σύμφωνα με τον GSI. Η συγκεκριμένη ταξινόμηση αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1990 από τον Hoek (1994) και τους Hoek, Kaiser και Bawden (1995) και επεκτάθηκε για τις ασθενείς βραχομάζες από τους Hoek, Marinos και Benissi (1998) και Marinos και Hoek (2000) ώστε να συμπεριλάβει φυλλώδεις και διατημένους, χαμηλής αντοχής και έντονα τεκτονισμένους γεωλογικούς σχηματισμούς. Επεκτάθηκε στη συνέχεια από τους Marinos και Hoek (2001) για το φλύσχη και από τους Marinos, Marinos και Hoek για τις μολάσσες (2004) και οφιόλιθους (2005). Ο GSI εφαρμόζεται για ισοτροπικές βραχώδεις μάζες που διαθέτουν ικανοποιητικό αριθμό ασυνεχειών με τυχαίο προσανατολισμό. Το συγκεκριμένο σύστημα κατάταξης συνδυάζει τις δυο θεμελιώδεις γεωλογικές παραμέτρους για την περιγραφή και το χαρακτηρισμό των βραχώδων μαζών, τη δομή της βραχομάζας και την κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-1. Η πρώτη παράμετρος χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχώδων τεμαχίων, ενώ η δεύτερη το μέγεθος της διατημητικής αντοχής τους.

Σύμφωνα με τον Μαρίνο (2007), ο GSI καθιερώθηκε πολύ γρήγορα λόγω της απλότητάς του, της επιβεβαίωσής του από την εμπειρία και της δυνατότητας περιγραφής πολύ ασθενών βραχομαζών. Ο δείκτης αυτός επιτρέπει την αξιολόγηση των μεταβολών των συνθηκών που εκδηλώνονται μέσα στον ίδιο τύπο πετρώματος, καθώς και την ποσοτικοποίηση πολυάριθμων χαρακτηριστικών των πετρωμάτων, με αποτέλεσμα τη μείωση της μηχανικής αβεβαιότητας. Υπολογίζεται με βάση τη μακροσκοπική εξέταση της βραχομάζας από επιφανειακές εμφανίσεις και εκσκαφές, όπως χαράξεις δρόμων, μέτωπα σηράγγων και πυρήνες γεωτρήσεων. Τα οφέλη στην προτεινόμενη κατηγοριοποίηση εδαφών που απορρέουν από τη χρήση του GSI είναι τα ακόλουθα:

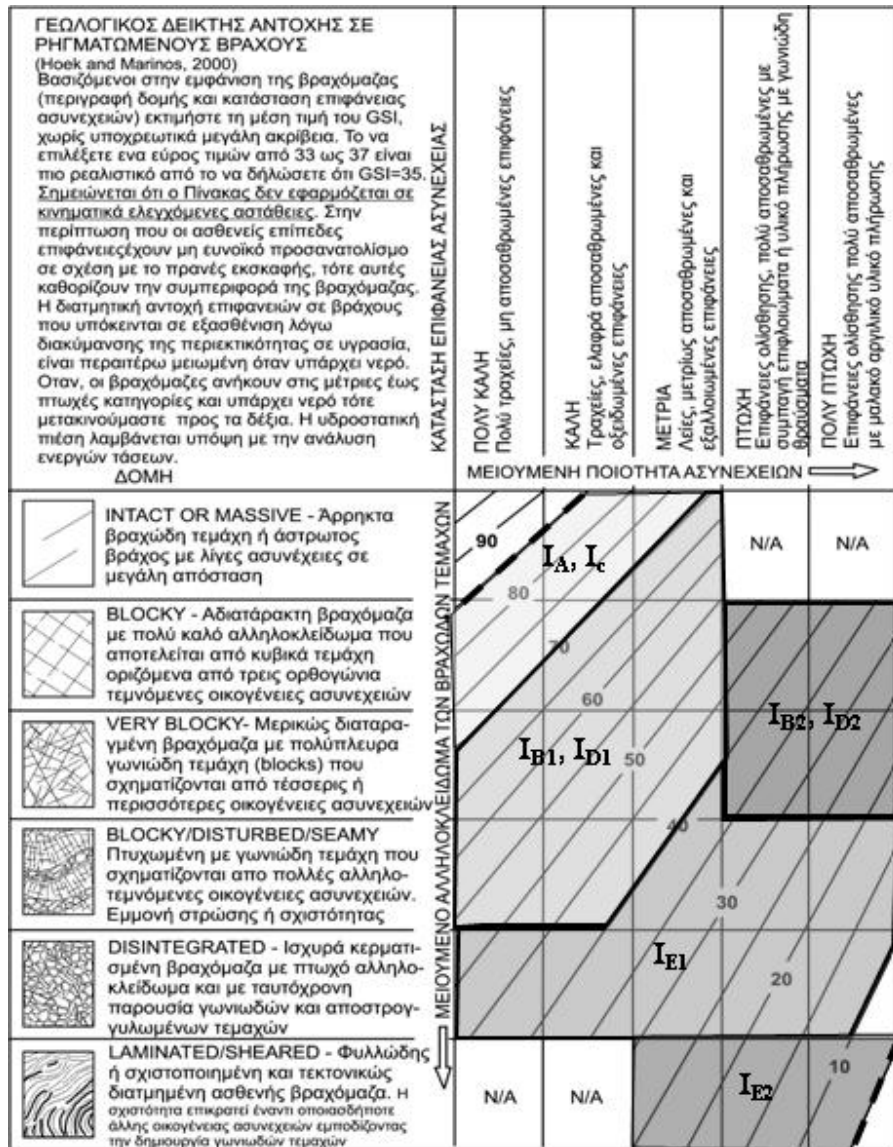
- Προσδιορισμός των πιο σημαντικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά βραχομάζας.
- Διεθνής εφαρμογή και αποδοχή της.
- Απλότητα και σαφήνεια στην εφαρμογή της.
- Αντιστοίχιση ποιοτικών εκφράσεων με αριθμούς.
- Δημιουργία κοινής βάσης επικοινωνίας μεταξύ μηχανικών και γεωλόγων.

Πίνακας 6-1: Κατάταξη των εδαφών κατά ΕΑΚ 2000

Κατηγορία	Περιγραφή
A	<ul style="list-style-type: none"> • Βραχώδεις ή ημιβραχώδεις σχηματισμοί εκτεινόμενοι σε αρκετή έκταση και βάθος, με την προϋπόθεση ότι δεν παρουσιάζουν έντονη αποσάθρωση • Στρώσεις πυκνού κοκκώδους υλικού με μικρό ποσοστό ιλυοαργιλικών προσμίξεων, πάχους μικρότερου των 70μ. • Στρώσεις πολύ σκληρής προσυμπιεσμένης αργίλου, πάχους μικρότερου των 70μ.
B	<ul style="list-style-type: none"> • Εντόνως αποσαθρωμένα βραχώδη ή εδάφη που από μηχανική άποψη μπορούν να εξομοιωθούν με κοκκώδη. • Στρώσεις κοκκώδους υλικού μέσης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 5μ. ή μεγάλης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 70μ. • Στρώσεις σκληρής προσυμπιεσμένης αργίλου, πάχους μεγαλύτερου των 70 μ.
Γ	<ul style="list-style-type: none"> • Στρώσεις κοκκώδους υλικού μικρής σχετικής πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 5μ. ή μέσης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 70μ. • Ιλυοαργιλικά εδάφη μικρής αντοχής σε πάχος μεγαλύτερο των 5μ.
Δ	<ul style="list-style-type: none"> • Έδαφος με μαλακές αργίλους υψηλού δείκτη πλασιμότητας ($I_p > 50$) συνολικού πάχους μεγαλύτερου των 10μ.
X	<ul style="list-style-type: none"> • Χαλαρά λεπτόκοκκα αμμοϊλιώδη εδάφη υπό τον υδάτινο ορίζοντα, που ενδέχεται να ρευστοποιηθούν (εκτός αν ειδική μελέτη αποκλείσει τέτοιο κίνδυνο, ή γίνει βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων) • Εδάφη που βρίσκονται δίπλα σε εμφανή τεκτονικά ρήγματα. • Απότομες κλιτείς καλυπτόμενες με προϊόντα χαλαρών πλευρικών κορημάτων. • Χαλαρά κοκκώδη ή μαλακά ιλυοαργιλικά εδάφη, εφόσον έχει αποδειχθεί ότι είναι επικίνδυνα από άποψη δυναμικής συμπεκνώσεως ή απώλειας αντοχής. • Πρόσφατες χαλαρές επιχωματώσεις (μπάζα). Οργανικά εδάφη. • Εδάφη κατηγορίας Γ με επικινδύνως μεγάλη κλίση

Πίνακας 6-2: Προτεινόμενη κατηγοριοποίηση εδαφών

I. Βραχώδεις Σχηματισμοί	
I _A	Συμπαγή μεταμορφωμένα και εκρηξιγενή πετρώματα, υγρή έως μέτρια αποσαθρωμένα (GSI>70).
I _{B1}	Ρωγματομένα μεταμορφωμένα και εκρηξιγενή και πετρώματα, υγρή έως μέτρια αποσαθρωμένα (70>GSI>50).
I _{B2}	Ως ανωτέρω, αλλά εντόνως αποσαθρωμένα (50>GSI>30).
I _{C1}	Συμπαγή ιζηματογενή πετρώματα υγρή έως μέτρια αποσαθρωμένα (GSI>70).
I _{D1}	Ρωγματομένα ιζηματογενή πετρώματα, υγρή έως μέτρια αποσαθρωμένα (70>GSI>50).
I _{D2}	Ως ανωτέρω, αλλά εντόνως αποσαθρωμένα (50>GSI>30).
I _{E1}	Κατακερατισμένα πετρώματα (RQD<10%, 20>GSI>50).
I _{E2}	Πετρώματα σχιστοποιημένα ή με φυλλώδη δομή, έντονα πτυχωμένα και διατμημένα (20>GSI>5).
I _{E3}	Ιλυόλιθοι, αργιλικόι σχιστόλιθοι, μάργες, φλύσχης συχνά σε εναλασσόμενες στρώσεις
II. Εδαφικοί Σχηματισμοί	
II _{A1}	Πυκνά αμμοχάλικα ή πυκνή άμμος.
II _{A2}	Σκληρή άργιλος (ή αμμόδης άργιλος).
II _{B1}	Μέσης πυκνότητας αμμοχάλικα ή άμμοι.
II _{B2}	Στυφρή άργιλος (ή αμμόδης άργιλος).
II _C	Πρόσφατες χαλαρές αποθέσεις σε κοίτες χειμάρρων και ποταμών (αμμοχάλικα, αμμοίλυες, μαλακές άργιλοι).
III. Ειδικές Περιπτώσεις	
III _A	Καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι ή μάρμαρα.
III _B	Γύψοι ή ενστρώσεις - θύλακες γύψου σε άλλους σχηματισμούς (ασβεστολίθους, μάργες κ.λ.π.).
III _C	Απότομες κλιτύες με χαλαρά πλευρικά κορήματα.
III _D	Γεινίαση με ενεργά ρήγματα.



Σχήμα 6-1: Γράφημα GSI για διαφορετικές κατηγορίες εδαφών του Πίνακα 6-2

6.3 Επιλογή τύπου θεμελίωσης

Η επιλογή του τύπου θεμελίωσης περιλαμβάνει δυο βασικά στάδια:

- Την επιλογή της επιφανειακής ή βαθιάς θεμελίωσης ως βασικού τύπου.
- Την επιλογή του ειδικότερου τύπου θεμελίωσης.

Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το βάθος έδρασης των θεμελιώσεων σύμφωνα με τους Αναγνωστόπουλο και Παπαδόπουλο (1989), είναι οι ακόλουθοι:

- Ικανοποιητικός συντελεστής ασφάλειας έναντι θραύσης του εδάφους.
- Μείωση των καθιζήσεων.
- Παρουσία φυτικών γαιών ή οργανικών εδαφικών στρώσεων.
- Παγοπληξία των θεμελιώσεων.
- Διογκούμενα εδάφη.
- Θέση όμορων κατασκευών.
- Στάθμη υπόγειων υδάτων.
- Κατασκευαστικοί παράγοντες, αρχιτεκτονικές και λειτουργικές απαιτήσεις κατασκευής.

Ο τύπος ανωδομής και οι φορτίσεις της, τοπικοί παράγοντες, καθώς και στοιχεία που προκύπτουν από την έρευνα υπεδάφους λαμβάνονται υπόψη μεταξύ άλλων κατά την επιλογή του ειδικότερου τύπου θεμελίωσης.

Συνοψίζοντας, η επιλογή του τύπου θεμελίωσης αποτελεί πολύπλοκη διαδικασία στην οποία εμπλέκονται πολλοί παράγοντες και η οποία προϋποθέτει πολλαπλές γνώσεις από το μελετητή. Η εμπειρία, όμως, προσφέρει σημαντική βοήθεια στο μελετητή. Σύμφωνα με τους Poulos και Davis (1980), η ανεπάρκεια ή ενδεχομένως υπερεπάρκεια της θεμελίωσης μπορεί να αποφευχθεί με ταυτόχρονη αξιοποίηση της εμπειρίας και των θεωρητικών γνώσεων. Δεδομένου ότι η επιλογή του τύπου θεμελίωσης των βάθρων γεφυρών στο προτεινόμενο μοντέλο εκτίμησης δαπάνης αναφέρεται στα προκαταρκτικά στάδια σχεδιασμού του έργου, στα οποία τα διαθέσιμα στοιχεία είναι περιορισμένα, η εμπειρία σχεδιασμού θεμελιώσεων από τις κατασκευασμένες γέφυρες της Εγνατίας Οδού προσφέρει πολύτιμα συμπεράσματα.

Η βάση δεδομένων γεφυρών περιλαμβάνει πλήρη στοιχεία από 78 κατασκευές και 157 θεμελιώσεις μεσοβάθρων. Ο Πίνακας στο Παράρτημα I περιλαμβάνει ένα αντιπροσωπευτικό

δείγμα της βάσης δεδομένων και περιέχει τον τύπο εδάφους, τη ζώνη σεισμικότητας, τις ποσότητες εργασιών και τον τύπο κάθε θεμελίωσης μεσοβάθρου, καθώς και βασικές παραμέτρους σχεδιασμού, όπως το ύψος του βάθρου, το πλάτος και μήκος του καταστρώματος που υποστηρίζεται και τον τύπο σύνδεσης του βάθρου με την ανωδομή. Οι εδαφικές συνθήκες για κάθε γέφυρα έχουν συνοψιστεί με τη χρήση του τύπου εδάφους σύμφωνα με την προτεινόμενη κατάταξη που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 6-2.

Η βάση δεδομένων αντιπροσωπεύει πραγματική κατασκευαστική εμπειρία και περιλαμβάνει τις αλλαγές που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της κατασκευής λόγω απρόβλεπτων συνθηκών. Ο ίδιος τύπος θεμελίωσης (πέδιλα, πάσσαλοι ή φρέαρ) για όλα τα μεσόβαθρα της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε στο 83% του δείγματος. Το συγκεκριμένο γεγονός δείχνει ότι διαφορετικά συστήματα θεμελίωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ίδια γέφυρα ακόμη και για ομογενείς εδαφικές συνθήκες. Για παράδειγμα, στην περίπτωση κατασκευής που γεφυρώνει ποταμό και στην οποία οι εδαφικές συνθήκες επιτρέπουν την επιφανειακή θεμελίωση, η θεμελίωση με πέδιλα μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για τα βάθρα εκτός της κοίτης. Πάσσαλοι χρησιμοποιούνται για θεμελιώσεις εντός της κοίτης, ώστε να προστατευτούν οι κατασκευές από υποσκαφή.

92 τύποι θεμελίωσης καταγράφηκαν συνολικά στις 78 γέφυρες. Οι έγχυτοι πάσσαλοι από οπλισμένο σκυρόδεμα που συνδέονται με κεφαλόδεσμο αποτελούν το πιο συχνό σύστημα θεμελίωσης. Με εξαίρεση τρεις περιπτώσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν μικροπάσσαλοι με διάμετρο 45 εκατοστών, η διάμετρος των πασσάλων κυμαίνεται από 80 έως 150 εκατοστά. Ο κεφαλόδεσμος χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των πασσάλων και τη μεταφορά των φορτίων από το βάθρο στους πασσάλους. Έχει ορθογωνικό σχήμα στις περισσότερες περιπτώσεις και ύψος που κυμαίνεται από 1.50 έως 3.00 μ. Η επιφανειακή θεμελίωση χρησιμοποιείται πιο σπάνια για τη θεμελίωση μεσοβάθρων γεφυρών.

Ο Πίνακας 6-3 παρουσιάζει το σύστημα θεμελίωσης σε σχέση με τον τύπο εδάφους. Οι τρεις τύποι θεμελίωσης χρησιμοποιούνται στους περισσότερους βραχώδεις σχηματισμούς, ενώ στους εδαφικούς σχηματισμούς, ο μόνος τύπος θεμελίωσης που χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις είναι οι πάσσαλοι. Ο Πίνακας 6-3 επιβεβαιώνει ότι η επιλογή του συστήματος θεμελίωσης δεν εξαρτάται μόνο από τις εδαφικές συνθήκες. Αποτελεί σύνθετη διαδικασία στην οποία ο μελετητής λαμβάνει υπόψη αρκετές διαφορετικές παραμέτρους, όπως τις συνθήκες στο εργοτάξιο, τη μορφολογία εδάφους, τη διαθεσιμότητα εξοπλισμού και τις κατασκευαστικές δυσκολίες. Για παράδειγμα, στην περίπτωση γέφυρας με μεγάλα ανοίγματα και ψηλά βάθρα πάνω από βαθιά κοιλάδα, η παρουσία βραχωδών σχηματισμών επιτρέπει τη χρήση και των τριών

τύπων θεμελίωσης. Η επιφανειακή θεμελίωση ή οι πάσσαλοι απαιτούν σημαντικό όγκο εκσκαφών και ειδικά γεωτεχνικά έργα για τη σταθεροποίηση του πρανούς και τη δημιουργία της απαραίτητης επιφάνειας εργασίας. Ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται φρέατα, ώστε να μειωθεί ο όγκος εκσκαφών και να επιτευχθεί οικονομία. Στην περίπτωση ρηχής κοιλάδας με παρόμοιες εδαφικές συνθήκες, ο όγκος εκσκαφών μπορεί να μην αποτελεί τον αποφασιστικό παράγοντα επιλογής του τύπου θεμελίωσης. Η διάτρηση του εδάφους για την κατασκευή των πασσάλων μπορεί να είναι δύσκολη και ο εργολάβος να μη διαθέτει ειδικό εξοπλισμό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται εκρηκτικά για την εκσκαφή του φρέατος.

Πίνακας 6-3: Συσχέτιση τύπου θεμελίωσης – τύπου εδάφους

Τύπος Εδάφους	I _A	I _{B1}	I _{B2}	I _C	I _{D1}	I _{D2}	I _{E1}	I _{E2}	I _{E3}	II _{A1}	II _{A2}	II _{B1}	II _{B2}	II _C
Φρέαρ	1	9	8	1	2				6					
Επιφανειακή θεμελίωση	1	2	4	1	3			2			1			
Πάσσαλοι		4	4	2	4	2			9	10	6	5	5	

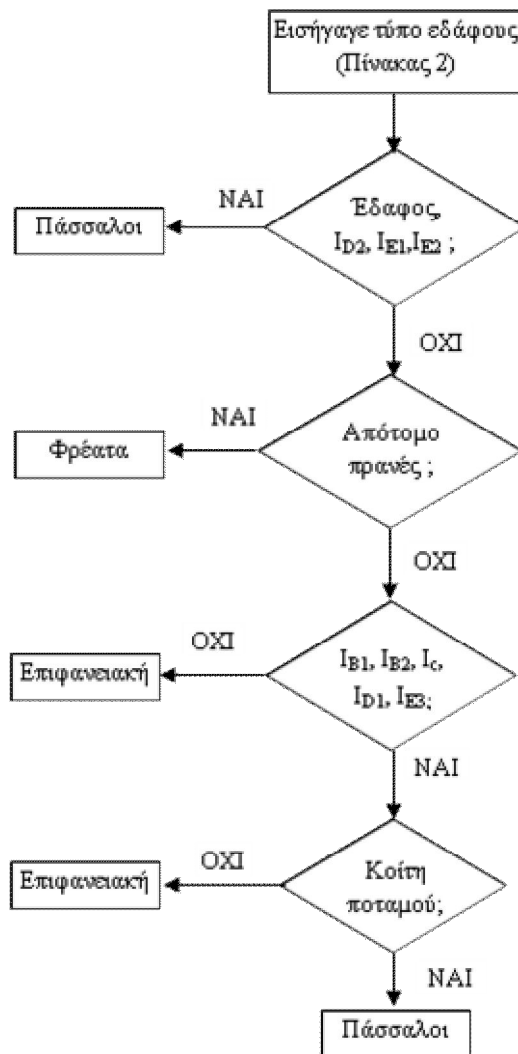
6.4 Προτεινόμενο μοντέλο εκτίμησης δαπάνης

Το προτεινόμενο μοντέλο εκτίμησης δαπάνης θεμελιώσεων οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα περιλαμβάνει τρία διακριτά στάδια: επιλογή του τύπου θεμελίωσης, υπολογισμό των ποσοτήτων εργασιών και υπολογισμό της δαπάνης κατασκευής.

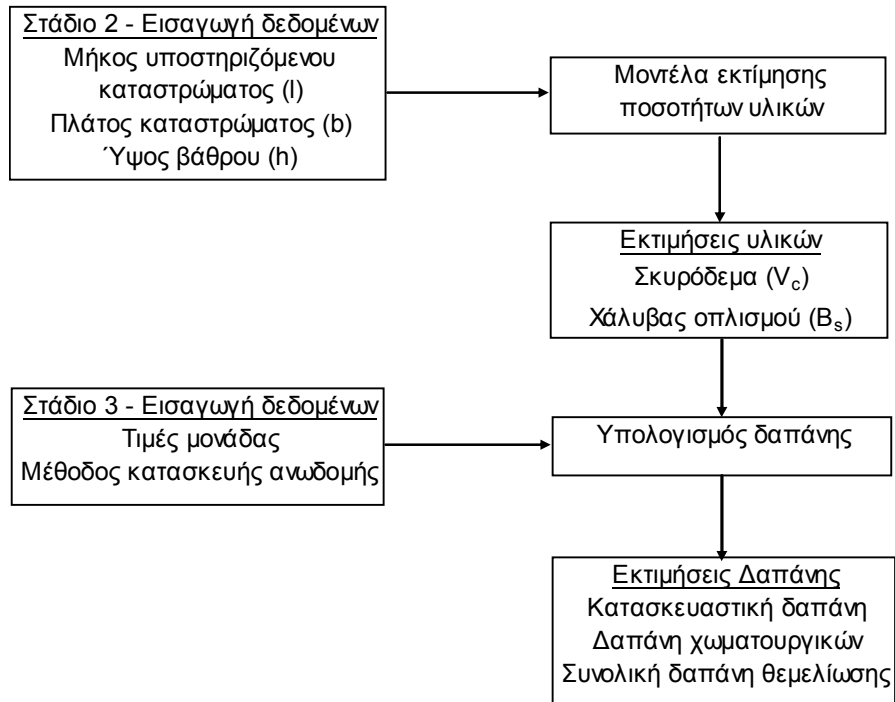
Η επιλογή του τύπου θεμελίωσης βασίζεται στη συσχέτιση του τύπου εδάφους με το σύστημα θεμελίωσης που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 6-3, σε συνδυασμό με έμπειρο σύστημα που λαμβάνει υπόψη παράγοντες εξαρτώμενους από την τοποθεσία της γέφυρας. Η αναλυτική διαδικασία επιλογής του συστήματος θεμελίωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-2. Ο χρήστης εισάγει τον τύπο εδάφους σύμφωνα με την προτεινόμενη κατηγοριοποίηση εδαφών και στη συνέχεια απαντά σε κριτήρια επιλογής ώστε να καταλήξει στον τύπο θεμελίωσης που θα χρησιμοποιηθεί. Τα κριτήρια επιλογής εμπεριέχουν τη γνώση ειδικών γεωτεχνικών μηχανικών και μελετητών γεφυρών, καθώς και την προηγούμενη κατασκευαστική εμπειρία που περιέχεται στη βάση δεδομένων.

Το δεύτερο στάδιο του προτεινόμενου μοντέλου, ο υπολογισμός των ποσοτήτων εργασιών των θεμελιώσεων, βασίζεται στη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από μεγάλο δείγμα σύγχρονων οδικών γεφυρών, η οποία οδήγησε σε μοντέλα πρόβλεψης. Ο χρήστης εισάγει το μήκος και το πλάτος υποστηριζόμενου καταστρώματος, καθώς και το ύψος του βάθρου. Το μοντέλο χρησιμοποιεί τις κατάλληλες συναρτήσεις εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών σύμφωνα με τον τύπο θεμελίωσης που επιλέχθηκε στο πρώτο στάδιο και εξάγει τις ποσότητες εργασιών.

Ο χρήστης, τέλος, ορίζει τις τιμές μονάδας σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού, καθώς και τη μέθοδο κατασκευής της ανωδομής της γέφυρας. Οι αντίστοιχες κατασκευαστικές δαπάνες προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό των εκτιμώμενων ποσοτήτων με τις τιμές μονάδας. Οι τιμές μονάδας που θα εφαρμοστούν επηρεάζονται από το σκοπό της εκτίμησης κόστους. Ο ΚτΕ χρησιμοποιεί τις δικές του τιμές μονάδας (tender unit prices) προκειμένου να υπολογίσει τη δαπάνη προϋπολογισμού των έργων και να λάβει αποφάσεις σκοπιμότητας και κατανομής κεφαλαίων. Ο εργολάβος, από την άλλη πλευρά, δύναται να χρησιμοποιήσει τις πραγματικές τιμές μονάδας βασισμένες σε δεδομένα κόστους από προηγούμενα ανάλογα έργα, ώστε να υπολογίσει το πραγματικό κατασκευαστικό κόστος για την εταιρεία του. Το μοντέλο υπολογίζει τη δαπάνη των χωματουργικών έργων ως ποσοστό της δαπάνης κατασκευής θεμελιώσεων (Fragkakis και Lambropoulos 2004). Η συνολική δαπάνη θεμελιώσεων ισούται με το άθροισμα της κατασκευαστικής δαπάνης και της δαπάνης των χωματουργικών. Τα στάδια 2 και 3 του μοντέλου εκτίμησης δαπάνης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-3.



Σχήμα 6-2: Στάδιο 1 του μοντέλου εκτίμησης δαπάνης



Σχήμα 6-3: Στάδια 2 και 3 του μοντέλου εκτίμησης δαπάνης

6.5 Στατιστική ανάλυση

Η μελέτη της θεμελίωσης κάθε βάθρου και οι αντίστοιχες ποσότητες εργασιών επηρεάζονται γενικά από πολυάριθμες μεταβλητές σχετικές με την ανωδομή και την υποδομή γεφυρών. Προκειμένου να επιλεγθούν οι ανεξάρτητες μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν στη στατιστική ανάλυση, πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις με εμπειρογνώμονες γεωτεχνικούς μηχανικούς, πολιτικούς μηχανικούς με σημαντική εμπειρία στη μελέτη γεφυρών, γεωλόγους, ακαδημαϊκούς καθώς και με διευθυντές και επιβλέποντες κατασκευής. Αυτή η συστηματική διαδικασία οδήγησε στον προσδιορισμό των εδαφικών συνθηκών, των σεισμικών παραμέτρων σχεδιασμού, του ύψους μεσοβάθρων (h), της χρήσης εφεδράνων για τη σύνδεση των μεσοβάθρων με το κατάστρωμα της γέφυρας (b_c), του μήκους του καταστρώματος που υποστηρίζεται από το μεσοβάθρο (l_{sup}), καθώς επίσης και του πλάτους της γέφυρας (b), ως τις μεταβλητές που θα συμπεριληφθούν αρχικά στην ανάλυση.

Οι εδαφικές συνθήκες έχουν ήδη συμπεριληφθεί στην επιλογή του τύπου θεμελίωσης. Ταυτόχρονα, το 82% του δείγματος γεφυρών έχει μελετηθεί με παρόμοιες σεισμικές

παραμέτρους. Η βάση δεδομένων γεφυρών δεν περιλαμβάνει ικανοποιητικά δείγματα στοιχείων για όλες τις σεισμικές ζώνες της Ελλάδας και συνεπώς, οι προτεινόμενες εκτιμήσεις δαπάνης δε διαφοροποιούνται ανάλογα με τις σεισμικές παραμέτρους σχεδιασμού. Συνοψίζοντας, η στατιστική ανάλυση συμπεριέλαβε 4 ανεξάρτητες μεταβλητές από τις 6 που είχαν αρχικά προσδιοριστεί.

Το μήκος του καταστρώματος που υποστηρίζεται από κάθε μεσόβαθρο υπολογίστηκε ως ο αριθμητικός μέσος όρος του μήκους των δύο ανοιγμάτων της γέφυρας εκατέρωθεν του βάθρου. Δεδομένου ότι η χρήση εφεδράνων δεν μπορεί να μετρηθεί σε ποσοτική κλίμακα, χρησιμοποιήθηκε κατηγορική – ποιοτική μεταβλητή. Ο όγκος σκυροδέματος (V_c) και το βάρος χάλυβα οπλισμού (B_s) αντιπροσωπεύουν τις δυο εξαρτημένες μεταβλητές.

Οι εμπειρογνώμονες θεώρησαν συγκεκριμένες ανεξάρτητες μεταβλητές ως μη σημαντικές για κάθε τύπο θεμελίωσης και υποστήριξαν ότι πρέπει να αποκλειστούν από την περαιτέρω στατιστική ανάλυση. Υποστήριξαν ακόμη, ότι η πραγματική εμπειρία κατασκευής και μελέτης πρέπει να καθοδηγήσει τη δημιουργία του μοντέλου για κάθε τύπο θεμελίωσης και πρότειναν να συνεχιστεί η στατιστική ανάλυση μόνο με τις σημαντικές μεταβλητές.

Παρά τα γνωστά μειονεκτήματα της σταδιακής παλινδρόμησης με προς τα πίσω απαλοιφή που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.4, αποφασίστηκε η εφαρμογή της μεθόδου αυτής προκειμένου να εξεταστεί εάν τα αποτελέσματα είναι συμβατά με τις προτάσεις των ειδικών. Το αρχικό μοντέλο παλινδρόμησης περιελάμβανε και τις 4 ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι μεταβλητές που δεν ήταν σημαντικές και συνέβαλαν το λιγότερο στο μοντέλο απορρίφθηκαν και η ΑΠ επαναλήφθηκε. Οι Brubaker και McCuen (1990) πρότειναν η απόφαση σημαντικότητας να βασιστεί σε εξέταση του τυπικού σφάλματος των εκτιμήσεων, των συντελεστών παλινδρόμησης και των επιπέδων διασποράς που εξηγούνται από την εξίσωση παλινδρόμησης, καθώς και στην ορθολογιστική εξέταση των συντελεστών παλινδρόμησης. Η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει στατιστικό έλεγχο υπόθεσης για να καθοριστεί η σημαντικότητα κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής σε συνδυασμό με έλεγχο της ορθολογιστικής ικανότητας των συντελεστών παλινδρόμησης (λογική σχέση αιτίου και αιτιατού). Η τιμή του ελέγχου p (τιμή p) χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό της στατιστικής σημαντικότητας με 5% επίπεδο σημαντικότητας. Οι συντελεστές παλινδρόμησης ελέγχθηκαν για θεωρητική ακρίβεια. Προσδιορίστηκε η επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών στις ποσότητες εργασιών θεμελιώσεων των γεφυρών, η οποία συγκρίθηκε στη συνέχεια με το πρόσημο των συντελεστών παλινδρόμησης. Ο συντελεστής προσδιορισμού του μοντέλου παλινδρόμησης (R^2) και η τιμή του

στατιστικού ελέγχου F (τιμή F) χρησιμοποιήθηκαν για να εξετάσουν την προσαρμογή του μοντέλου.

6.6 Ποσότητες εργασιών φρεάτων

Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει πλήρη στοιχεία για 26 φρέατα που χρησιμοποιούνται για τη θεμελίωση βάθρων γεφυρών. Το ύψος των βάθρων κυμαίνεται από 15.22 μ. έως 87.83 μ. Τα φρέατα χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις για τη θεμελίωση γεφυρών αυτοκινητόδρομων που διασχίζουν δύσκολες επίγειες μορφολογίες. Αυτές οι γέφυρες κατασκευάζονται συνήθως με τη μέθοδο της συμμετρικής προβολοδόμησης, στην οποία η σταθερότητα του προβόλου εξασφαλίζεται σε κάθε στάδιο της κατασκευής από προεντεταμένα καλώδια που τοποθετούνται σύμφωνα με το διάγραμμα ροπών του προβόλου (Mathivat 1983). Το μήκος του υποστηριζόμενου καταστρώματος της γέφυρας που ισούται με το μήκος των δυο προβόλων εκατέρωθεν του μεσοβάθρου, αντιπροσωπεύει τον κρίσιμότερο παράγοντα που επηρεάζει τη μελέτη της θεμελίωσης των βάθρων με φρέατα.

Το πρώτο μοντέλο παλινδρόμησης (RM1) συμπεριλάμβανε όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές και ήταν στην ακόλουθη μορφή:

$$V_c = a + \beta_0 \times h + \beta_1 \times l_{\text{sup}} + \beta_2 \times b + \beta_3 \times b_e \quad (6-1)$$

Οι στατιστικές της παλινδρόμησης, συμπεριλαμβανομένου του συντελεστή προσδιορισμού, της σημαντικότητας του ελέγχου F και των τιμών p παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-4. Η τιμή p που αντιστοιχεί στο ύψος των μεσοβάθρων (0.743) έδειξε ότι η συγκεκριμένη μεταβλητή δεν έχει αξιόλογη συμβολή στο μοντέλο και ως εκ τούτου αφαιρέθηκε. Το δεύτερο μοντέλο παλινδρόμησης (RM2) περιλάμβανε τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές. Το πλάτος του καταστρώματος και η χρήση εφεδράνων αφαιρέθηκαν μετά τις επαναλήψεις RM2 και RM3 αντίστοιχα. Οι στατιστικές παλινδρόμησης για το RM4 έδειξαν ότι το μήκος του υποστηριζόμενου καταστρώματος της γέφυρας παρουσιάζει σημαντική επίδραση στον όγκο σκυροδέματος της θεμελίωσης των βάθρων με φρέατα.

Η ίδια στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για το βάρος χάλυβα οπλισμού. Οι τιμές p 0.979, 0.791 και 0.292, που αντιστοιχούν στο ύψος των μεσοβάθρων, στη χρήση εφεδράνων και στο πλάτος του καταστρώματος αντίστοιχα, έδειξαν ότι οι μεταβλητές αυτές δεν είναι στατιστικά σημαντικές και επομένως αφαιρέθηκαν μια κάθε φορά. Το τελικό μοντέλο RM4 περιείχε μόνο το μήκος του υποστηριζόμενου καταστρώματος ως στατιστικά σημαντική ανεξάρτητη μεταβλητή.

Οι ακόλουθες εξισώσεις παρέχουν εκτιμήσεις του όγκου σκυροδέματος και του βάρους χάλυβα οπλισμού για θεμελιώσεις φρεάτων και ισχύουν για τιμές του υποστηριζόμενου μήκους γεφυρών μεταξύ 36.90 μ. και 220.40 μ.

$$V_c = 131.813 + 8.841 \times l_{\text{sup}} \quad (6-2)$$

$$B_s = 3437.605 + 565.336 \times l_{\text{sup}} \quad (6-3)$$

Πίνακας 6-4: Στατιστικές παλινδρόμησης για φρέατα

	Όγκος σκυροδέματος				Βάρος χάλυβα οπλισμού			
	RM1	RM2	RM3	RM4	RM1	RM2	RM3	RM4
l_{sup}	7.9E-06	5.0E-06	1.1E-09	1.1E-12	5.8E-07	3.1E-07	1.1E-12	4.3E-13
b_c	0.041 ^a	0.037 ^a	0.089 ^a		0.811 ^a	0.791 ^a		
b	0.177 ^a	0.166 ^a			0.424 ^a	0.413 ^a	0.292 ^a	
h	0.743 ^a				0.979			
R^2	0.906	0.906	0.897	0.883	0.897	0.897	0.897	0.892
Τιμή F	50.894	70.679	100.408	181.460	45.951	64.183	100.286	198.042
Σημαντικότητα F	1.6E-10	1.9E-11	4.3E-12	1.1E-12	4.3E-10	4.9E-11	4.4E-12	4.3E-13

^a δείχνει αρνητικό συντελεστή παλινδρόμησης για τη μεταβλητή

6.7 Ποσότητες εργασιών πασσάλων

Πλήρη στοιχεία συλλέχθηκαν για 100 περιπτώσεις, στις οποίες επί τόπου έγχυτοι πάσσαλοι που συνδέονται με κεφαλόδεσμο χρησιμοποιήθηκαν για τη θεμελίωση των μεσοβάθρων γεφυρών. Το ύψος των βάθρων κυμαίνεται από 4.13 μ. έως 50.78 μ. Ο κεφαλόδεσμος σχεδιάζεται προκειμένου να αναλάβει τις καμπτικές ροπές, να διανεμηθούν ισότιμα τα φορτία από την ανωδομή στην ομάδα πασσάλων και να σταθεροποιηθούν πλευρικά οι μεμονωμένοι πάσσαλοι. Κατά συνέπεια, οι κάθετες δυνάμεις λόγω του υποστηριζόμενου μήκους των γεφυρών και οι ροπές λόγω των δυνάμεων της ανωδομής και του ύψους των μεσοβάθρων, αντιπροσωπεύουν τους κρισιμότερους παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό του κεφαλόδεσμου. Οι πάσσαλοι χρησιμοποιούνται προκειμένου να μεταφερθούν τα κάθετα φορτία από την ανωδομή στο έδαφος μέσω της κεφαλής τους και της τριβής (Menn 1990). Η μελέτη τους επηρεάζεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού του καταστρώματος (μήκος και πλάτος).

Οι στατιστικές παλινδρόμησης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-5 έδειξαν ότι το ύψος των μεσοβάθρων και η χρήση εφεδράνων δεν αποτελούν στατιστικά σημαντικές μεταβλητές και επομένως αφαιρέθηκαν προκειμένου να επιτευχθούν τα ακόλουθα μοντέλα εκτιμήσεων ποσοτήτων εργασιών για επί τόπου έγχυτους πασσάλους:

$$V_c = -121.870 + 4.343 \times l_{\text{sup}} + 8.883 \times b \quad (6-4)$$

$$B_s = -20140.660 + 642.966 \times l_{\text{sup}} + 1379.438 \times b \quad (6-5)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για τιμές του υποστηριζόμενου μήκους καταστρώματος μεταξύ 23.00 μ. και 100.00 μ. και πλάτους γεφυρών μεταξύ 10.00 μ. και 17.75 μ.

Πίνακας 6-5: Στατιστικές παλινδρόμησης για πασσάλους

	Όγκος σκυροδέματος			Βάρος χάλυβα οπλισμού		
	RM1	RM2	RM3	RM1	RM2	RM3
l_{sup}	8.6E-25	7.8E-29	3.8E-33	2.6E-28	6.1E-32	4.4E-35
b	0.019	7.4E-03	0.013	0.060	0.059	5.8E-03
b_e	0.208 ^a	0.202 ^a		0.825 ^a		
h	0.986 ^a			0.215 ^a	0.200 ^a	
R^2	0.779	0.779	0.775	0.798	0.798	0.795
Τιμή F	83.874	113.009	167.566	94.164	126.792	188.068
Σημαντικότητα F	2.6E-30	2.2E-31	3.4E-32	3.4E-32	2.9E-33	4.2E-34

^a δείχνει αρνητικό συντελεστή παλινδρόμησης για τη μεταβλητή

Η σταδιακή παλινδρόμηση με προς τα πίσω απαλοιφή χρησιμοποιήθηκε και για τις ποσότητες εργασιών του κεφαλόδεσμου. Τα σχετικά στατιστικά στοιχεία δίνονται στον Πίνακα 6-6. Και στις δύο περιπτώσεις, το μήκος του υποστηριζόμενου καταστρώματος της γέφυρας και το ύψος των μεσοβάθρων εμφανίστηκαν ως στατιστικώς σημαντικές μεταβλητές (Εξισώσεις 6-6, 6-7).

$$V_c = -71.426 + 5.588 \times l_{\text{sup}} + 1.970 \times h \quad (6-6)$$

$$B_s = -29550.221 + 1259.448 \times l_{\text{sup}} + 273.758 \times h \quad (6-7)$$

Πίνακας 6-6: Στατιστικές παλινδρόμησης για κεφαλόδεσμο

	Όγκος σκυροδέματος			Βάρος χάλυβα οπλισμού		
	RM1	RM2	RM3	RM1	RM2	RM3
l_{sup}	9.04E-36	4.5E-39	2.7E-39	8.7E-26	2.0E-26	2.4E-30
h	2.6E-04	1.6E-04	3.2E-04	0.036	0.029	0.042
b	0.265	0.193		0.252		
be	0.480			0.188 ^a	0.274 ^a	
R^2	0.890	0.890	0.888	0.816	0.813	0.811
Τιμή F	192.385	257.682	382.835	105.274	139.446	208.107
Σημαντικότητα F	1.2E-44	8.8E-46	9.3E-47	4.9E-34	7.3E-35	8.1E-36

^a δείχνει αρνητικό συντελεστή παλινδρόμησης για τη μεταβλητή

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για τιμές του υποστηριζόμενου μήκους καταστρώματος μεταξύ 23.00 μ. και 100.00 μ. και ύψους μεσοβάθρων μεταξύ 4.13 μ. και 50.78 μ.

6.8 Ποσότητες εργασιών επιφανειακών θεμελιώσεων

Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει πλήρη στοιχεία από 31 επιφανειακές θεμελιώσεις μεσοβάθρων οδικών γεφυρών. Οι επιφανειακές θεμελιώσεις σχεδιάζονται προκειμένου να αποτραπούν υπερβολικές μετατοπίσεις, ανατροπή της κατασκευής και φέρουσες πιέσεις μεγαλύτερες από τη διαθέσιμη αντοχή τους (Menn 1990). Κατά συνέπεια, οι κάθετες δυνάμεις λόγω του υποστηριζόμενου μήκους καταστρώματος και οι ροπές λόγω των δυνάμεων της ανωδομής και του ύψους των μεσοβάθρων, αντιπροσωπεύουν τους κρισιμότερους παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό των επιφανειακών θεμελιώσεων.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-7 δείχνουν ότι η χρήση εφεδράνων και το πλάτος του καταστρώματος δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Οι μεταβλητές αυτές αφαιρέθηκαν και το τελικό μοντέλο περιλαμβάνει το ύψος των μεσοβάθρων και το υποστηριζόμενο μήκος καταστρώματος ως τις στατιστικώς σημαντικές μεταβλητές (Εξισώσεις 6-8 και 6-9).

$$V_c = -189.811 + 8.633 \times h + 5.365 \times l_{sup} \quad (6-8)$$

$$B_s = -83011.798 + 1519.043 \times h + 2808.408 \times l_{sup} \quad (6-9)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για τιμές του υποστηριζόμενου μήκους καταστρώματος μεταξύ 30.00 μ. και 117.50 μ. και ύψους μεσοβάθρων μεταξύ 7.92 μ. και 45.10 μ.

Πίνακας 6-7: Στατιστικές παλινδρόμησης για επιφανειακή θεμελίωση

	Όγκος σκυροδέματος			Βάρος χάλυβα οπλισμού		
	RM1	RM2	RM3	RM1	RM2	RM3
h	3.7E-05	2.4E-05	5.2E-06	8.3E-03	6.0E-03	0.010
l _{sup}	6.8E-07	3.9E-07	6.2E-09	8.8E-06	5.5E-06	2.0E-08
b	0.848 ^a	0.839 ^a		0.362	0.282	
b _e	0.991			0.559 ^a		
R ²	0.908	0.908	0.908	0.863	0.861	0.855
Τιμή F	64.274	88.994	138.199	41.191	56.155	83.016
Σημαντικότητα F	4.2E-13	4.1E-14	3.1E-15	6.8E-11	9.9E-12	1.7E-12

^a δείχνει αρνητικό συντελεστή παλινδρόμησης για τη μεταβλητή

Και στους τρεις τύπους θεμελίωσης, τα αποτελέσματα της σταδιακής ανάλυσης παλινδρόμησης ήταν σύμφωνα με την άποψη των ειδικών σχετικά με την επιλογή των σημαντικών μεταβλητών. Επομένως, τα τελικά μοντέλα παλινδρόμησης που προσδιορίστηκαν εκφράζουν πραγματική εμπειρία μελέτης θεμελιώσεων γεφυρών.

6.9 Έλεγχος των υποθέσεων της γραμμικής παλινδρόμησης

Ο συντελεστής προσδιορισμού υπερβαίνει το 77% σε όλα τα μοντέλα πρόβλεψης, εκφράζοντας ικανοποιητική προσαρμογή των προτεινόμενων μοντέλων στα δεδομένα. Οι εκτιμηθείσες τιμές των στατιστικών ελέγχων p και F δείχνουν επίσης ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές και τα επιλεγμένα μοντέλα παλινδρόμησης είναι στατιστικώς σημαντικά.

Οι υποθέσεις για την ορθή εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης απαιτούν τον όρο σφάλματος του μοντέλου να ακολουθεί την κανονική κατανομή, να έχει μέση τιμή ίση με μηδέν και σταθερή διασπορά (Gujarati 1999). Τα υπόλοιπα των προτεινόμενων μοντέλων υπολογίστηκαν και ελέγχθηκαν τα διαγράμματα κατανομής τους. Η υπόθεση της κανονικότητας εξετάστηκε, όχι μόνο μέσω της μορφής των διαγραμμάτων υπολοίπων, αλλά και με τη χρήση του ελέγχου «Shapiro-Wilks» (Shapiro και Wilk 1965). Ο συγκεκριμένος έλεγχος εξετάζει την υπόθεση ότι το δείγμα έχει κανονική κατανομή και η τιμή του ελέγχου p που υπολογίζεται δείχνει την πιθανότητα να απορριφθεί εσφαλμένως η παραπάνω υπόθεση. Το λογισμικό «Analyse-it» έκδοση 2.12 που αναπτύχθηκε από την εταιρεία «Analyse-it Software, Ltd» χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο και οι τιμές W και p που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-8,

επιβεβαιώνουν την υπόθεση κανονικότητας των όρων σφάλματος σε επίπεδο σημαντικότητας 5%. Επιπλέον, η μέση τιμή των υπολοίπων προσέγγισε τη μηδενική τιμή όπως απαιτείται.

Πίνακας 6-8: Τιμή W , τιμή p και μέση τιμή υπολοίπων

	Θεμελίωση	Τιμή W	Τιμή p	Μέση τιμή
V_c	Πάσσαλοι	0.98	0.106	-0.04410
	Κεφαλόδεσμος	0.98	0.154	-0.00865
	Επιφανειακή	0.95	0.156	-0.00005
	Φρέαρ	0.97	0.566	0.00004
B_s	Πάσσαλοι	0.99	0.513	-0.00004
	Κεφαλόδεσμος	0.90	0.085	-0.00414
	Επιφανειακή	0.96	0.306	0.07706
	Φρέαρ	0.93	0.061	0.00502

Η σταθερή διασπορά του όρου σφάλματος, δηλαδή η ομοσκεδαστικότητα των μοντέλων παλινδρόμησης, εξετάστηκε με τη χρήση του γενικού ελέγχου ετεροσκεδαστικότητας του White (White 1980). Η στατιστική ελέγχου που ισούται με το γινόμενο του μεγέθους του δείγματος επί το συντελεστή προσδιορισμού της εναλλακτικής παλινδρόμησης, η πιθανότητα επίτευξης της τιμής X^2 της στατιστικής ελέγχου και το αποτέλεσμα του ελέγχου για 5% επίπεδο σημαντικότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-9.

Πίνακας 6-9: Στατιστική ελέγχου, τιμή p και αποτέλεσμα ελέγχου

	Θεμελίωση	Στατιστική ελέγχου	Τιμή p	Αποτέλεσμα
V_c	Πάσσαλοι	7.869	>0.100	Ομοσκεδαστικότητα
	Κεφαλόδεσμος	25.308	<0.005	Ετεροσκεδαστικότητα
	Επιφανειακή	23.927	<0.005	Ετεροσκεδαστικότητα
	Φρέαρ	5.649	>0.050	Ομοσκεδαστικότητα
B_s	Πάσσαλοι	27.941	<0.005	Ετεροσκεδαστικότητα
	Κεφαλόδεσμος	80.968	<0.005	Ετεροσκεδαστικότητα
	Επιφανειακή	24.978	<0.005	Ετεροσκεδαστικότητα
	Φρέαρ	1.032	>0.500	Ομοσκεδαστικότητα

Παρά την παρουσία ετεροσκεδαστικότητας, οι συνηθισμένοι εκτιμητές των ελαχίστων τετραγώνων παραμένουν αμερόληπτοι και γραμμικοί (Gujarati 1999) και οι συντελεστές παλινδρόμησης που υπολογίστηκαν διατηρούν την ισχύ τους. Εντούτοις, τα συνηθισμένα διαστήματα εμπιστοσύνης και οι έλεγχοι υποθέσεων κρίνονται αναξιόπιστοι. Δεδομένου ότι η ΑΠ με προς τα πίσω απαλοιφή που εφαρμόστηκε, χρησιμοποίησε ως παράμετρο αποβολής τις τιμές p για κάθε συντελεστή παλινδρόμησης, η παρουσία ετεροσκεδαστικότητας καθιστά την παραπάνω διαδικασία αναξιόπιστη. Το πρόβλημα αυτό διορθώθηκε με τη χρήση των διορθωμένων τυπικών σφαλμάτων του White. Η προσέγγιση αυτή βελτιώνει την εκτίμηση των τυπικών σφαλμάτων χωρίς να προϋποθετεί το μετασχηματισμό του μοντέλου όπως απαιτεί η μέθοδος των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων. Τα «HC3» διορθωμένα τυπικά σφάλματα του White για μικρά δείγματα υπολογίστηκαν και για τις οκτώ περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα της σταδιακής ανάλυσης παλινδρόμησης με προς τα πίσω απαλοιφή δε μεταβλήθηκαν. Ο Πίνακας 6-10 παρουσιάζει ενδεικτικά τα «HC3» διορθωμένα τυπικά σφάλματα του White για τον όγκο σκυροδέματος και το βάρος χάλυβα οπλισμού επιφανειακών θεμελιώσεων.

Πίνακας 6-10: «HC3» διορθωμένες τιμές p για επιφανειακή θεμελίωση

	Μοντέλο	h	l_{sup}	b	b_e
V_c	RM1	7.0E-06	1.0E-06	0.90	1.00
	RM2	4.0E-06	8.0E-07	0.90	
	RM3	5.0E-07	9.0E-07		
B_s	RM1	6.0E-03	1.0E-04	0.50	0.60
	RM2	3.0E-03	8.0E-05	0.40	
	RM3	4.0E-03	2.0E-05		

6.10 Παραμετρικά εύρη των συντελεστών παλινδρόμησης

Η μέθοδος bootstrap χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των προτεινόμενων μοντέλων εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών. Το αρχικό δείγμα δεδομένων για κάθε τύπο θεμελίωσης αναδιατάχθηκε ώστε να δημιουργηθεί νέο δείγμα ίδιου μεγέθους, στο οποίο τα στοιχεία επιλέγονται τυχαία από το αρχικό δείγμα με αντικατάσταση. Η ΑΠ πραγματοποιήθηκε στο δείγμα αυτό και καταγράφηκαν οι συντελεστές παλινδρόμησης. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε 1000 φορές, ώστε να ληφθούν 1000 τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης. Τα

90% διαστήματα εμπιστοσύνης των συντελεστών παλινδρόμησης για τα προτεινόμενα μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών παρουσιάζονται στους Πίνακες 6-11 και 6-12, ενώ ο Πίνακας 6-13 παρουσιάζει την τιμή του 50^{ου} εκατοστημορίου (50th percentile). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης bootstrap επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία των προτεινόμενων μοντέλων εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών, δεδομένου ότι οι τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης εμπεριέχονται στα 90% διαστήματα εμπιστοσύνης και προσεγγίζουν τις τιμές του 50^{ου} εκατοστημορίου.

Πίνακας 6-11: 90 % διαστήματα εμπιστοσύνης συντελεστών παλινδρόμησης μοντέλων σκυροδέματος

	Πάσσαλοι		Κεφαλόδεσμος		Επιφανειακή		Φρέαρ	
	5%	95%	5%	95%	5%	95%	5%	95%
a	-216.974	-47.012	-89.553	-51.194	-241.770	-48.958	-28.213	286.448
β_1	3.884	4.802	4.998	6.037	3.233	6.224	7.508	10.456
β_0			0.874	3.726	5.983	10.584		
β_2	3.602	15.629						

Πίνακας 6-12: 90 % διαστήματα εμπιστοσύνης συντελεστών παλινδρόμησης μοντέλων χάλυβα σπλισμού

	Πάσσαλοι		Κεφαλόδεσμος		Επιφανειακή		Φρέαρ	
	5%	95%	5%	95%	5%	95%	5%	95%
a	-38033.485	-5520.123	-37785.337	-20599.603	-103146.928	-27958.103	-3970.913	10992.353
β_1	580.620	696.020	1056.761	1458.380	1980.971	3152.014	487.465	631.232
β_0			-47.256	754.107	503.511	2186.379		
β_2	414.277	2582.412						

Πίνακας 6-13: Τιμή 50^{ου} εκατοστημορίου συντελεστών παλινδρόμησης

	V _c				B _s			
	Πάσσαλοι	Κεφαλόδ.	Επιφανειακή	Φρέαρ	Πάσσαλοι	Κεφαλόδ.	Επιφανειακή	Φρέαρ
<i>a</i>	-124.987	-70.939	-185.661	124.286	-20098.184	-29339.430	-82382.455	3673.338
<i>β</i> ₁	4.334	5.549	5.267	8.904	643.135	1240.263	2781.761	563.885
<i>β</i> ₀		1.959	8.384			270.490	1460.046	
<i>β</i> ₂	9.021				1394.467			

6.11 Συμπεράσματα

Το προτεινόμενο μοντέλο προϋπολογισμού δαπάνης εφαρμόζεται στους βασικότερους τύπους θεμελίωσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα για την παροχή διαφορετικών εκτιμήσεων στον ΚτΕ, στο μελετητή της γέφυρας και στον ανάδοχο κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών σταδίων του έργου. Τα απαραίτητα δεδομένα περιλαμβάνουν βασικές παραμέτρους σχεδιασμού που είναι ήδη γνωστές.

Αντί να εφαρμοστούν άμεσα συγκεκριμένα μοντέλα παλινδρόμησης βασισμένα στην άποψη των ειδικών και να εξαχθούν τα μοντέλα εκτίμησης των ποσοτήτων εργασιών, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της σταδιακής παλινδρόμησης με προς τα πίσω απαλοιφή. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας ήταν σύμφωνα με την άποψη των εμπειρογνομόνων, ενώ η προσαρμογή των μοντέλων στα δεδομένα κρίθηκε ικανοποιητική. Εξετάστηκαν, τέλος, οι βασικές υποθέσεις της ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης και επιβεβαιώθηκε η ισχύ των προτεινόμενων μοντέλων.

7 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΑΠΑΝΗΣ ΜΕΣΟΒΑΘΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΩΔΟΜΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο καλύπτει την εκτίμηση της δαπάνης ανωδομής και μεσοβάθρων οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών σταδίων μελέτης του έργου. Προτείνεται μέθοδος εκτίμησης δαπάνης που στηρίζεται σε πληροφορίες γνωστές προτού πραγματοποιηθεί πλήρης μελέτη του έργου. Μοντέλα πρόβλεψης των ποσοτήτων εργασιών των μεσοβάθρων και της ανωδομής για τρεις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους κατασκευής γεφυρών αναπτύσσονται με χρήση ΑΠ. Τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία συλλέχθηκαν από γέφυρες της Εγνατίας Οδού.

Δεδομένου ότι η ανωδομή παρουσιάζει τη μεγαλύτερη επίδραση στη συνολική δαπάνη κατασκευής οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα με ποσοστό που κυμαίνεται από 34% έως 50% της συνολικής δαπάνης ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής (Fragkakis και Lambropoulos 2004), εφαρμόστηκε τεχνική επικύρωσης με 10 μέρη (10-fold validation method) για την αξιολόγηση της απόδοσης πρόβλεψης των προτεινόμενων μοντέλων της ανωδομής. Χρησιμοποιήθηκε, ακόμη, η μέθοδος αναδιάταξης δείγματος bootstrap σε συνδυασμό με ΑΠ για να παραχθούν εύρη εκτιμήσεων της δαπάνης ανωδομής. Η συγκεκριμένη πιθανολογική τεχνική χρησιμοποιήθηκε για τη μείωση του επιπέδου αβεβαιότητας που περιλαμβάνεται στις εκτιμήσεις.

7.1 Προτεινόμενη μέθοδος για προκαταρκτικές εκτιμήσεις δαπάνης

Η προτεινόμενη μέθοδος εκτίμησης της δαπάνης ανωδομής και μεσοβάθρων περιλαμβάνει δυο στάδια: την εκτίμηση των ποσοτήτων εργασιών και τον υπολογισμό της σχετικής δαπάνης κατασκευής. Το πρώτο στάδιο βασίζεται σε μοντέλα πρόβλεψης από στατιστική επεξεργασία συλλεχθέντων στοιχείων. Ο αριθμός ανοιγμάτων ή προβόλων της γέφυρας, το μήκος κάθε ανοίγματος ή προβόλου, το πλάτος γέφυρας και η μέθοδος κατασκευής αποτελούν τα στοιχεία που πρέπει να εισαχθούν από το χρήστη στην περίπτωση της ανωδομής. Στην περίπτωση των μεσοβάθρων, απαιτείται επιπρόσθετα και το ύψος τους. Στη συνέχεια εφαρμόζονται τα κατάλληλα μοντέλα πρόβλεψης για να εξαχθούν οι ποσότητες εργασιών. Τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου αποτελούνται από βασικές παραμέτρους σχεδιασμού που είναι γνωστές κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών σταδίων του έργου. Με βάση τοπογραφικούς χάρτες, τη χάραξη και τις προδιαγραφές του υπό αξιολόγηση αυτοκινητοδρόμου, ο χρήστης δύναται να υπολογίσει το μήκος και πλάτος της γέφυρας, το μήκος ανοιγμάτων και το ύψος μεσοβάθρων για κάθε θέση βάθρου που επιλέγει.

Το δεύτερο στάδιο απαιτεί ως εισαγωγή στοιχείων τις τιμές μονάδας κόστους του σκυροδέματος (c_c), του χάλυβα προέντασης (c_p) και του χάλυβα οπλισμού (c_s). Οι σχετικές δαπάνες κατασκευής (C_c , C_p και C_s αντίστοιχα) παράγονται από τον πολλαπλασιασμό των εκτιμηθέντων ποσοτήτων εργασιών με τις τιμές μονάδας. Όπως και στην περίπτωση του μοντέλου εκτίμησης δαπάνης θεμελιώσεων, ο σκοπός της εκτίμησης και ο χρήστης επηρεάζουν τις τιμές μονάδας που θα εφαρμοστούν. Το μοντέλο παρέχει επίσης παραμετρικά εύρη εκτίμησης της συνολικής δαπάνης κατασκευής (TC) της ανωδομής.

Η προτεινόμενη μέθοδος προκαταρκτικής εκτίμησης δαπάνης ανωδομής και μεσοβάθρων γεφυρών βασίζεται στην ανάπτυξη βάσης δεδομένων σύγχρονων οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα. Η βάση δεδομένων γεφυρών περιλαμβάνει σήμερα πλήρη στοιχεία από 322 μεσόβαθρα και 68 καταστρώματα, εκ των οποίων 31 κατασκευές αποτελούνται από προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς και πλάκα συνέχειας, 22 κατασκευές από καταστρώματα μονοκύψελου κιβωτίου κατασκευασμένα με επιτόπια σκυροδέτηση και 15 γέφυρες από καταστρώματα κατασκευασμένα με προβολοδόμηση. Ο πίνακας στο παράρτημα II περιλαμβάνει ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 19 γεφυρών από τη βάση δεδομένων. Η βάση δεδομένων αντιπροσωπεύει την τελική κατασκευή και περιλαμβάνει όλες τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια υλοποίησης του έργου. Ως εκ τούτου, καταγράφηκαν τα πραγματικά κατασκευαστικά στοιχεία και οι ποσότητες εργασιών που σε πολλές περιπτώσεις ήταν διαφορετικές από εκείνες που προέβλεπε η μελέτη.

7.2 Ανάπτυξη μοντέλων ανωδομής

7.2.1 Στατιστική ανάλυση

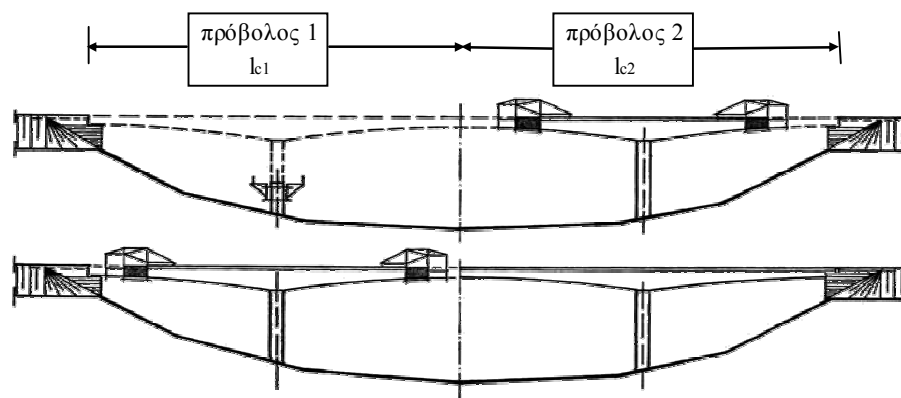
Ο σχεδιασμός της ανωδομής γεφυρών επηρεάζεται γενικά από πολυάριθμες μεταβλητές, όπως τις σεισμικές παραμέτρους σχεδιασμού, τη χάραξη της γέφυρας, τη μεθοδολογία κατασκευής, τη διαμόρφωση της διαμήκους προέντασης, το πλάτος καταστρώματος, τη διαμόρφωση και χρήση αρμών διαστολής στη γέφυρα και το μήκος του ανοίγματος που υποστηρίζεται από τα μεσόβαθρα (Menn 1990). Δεδομένου ότι η προτεινόμενη μέθοδος αναφέρεται στην προκαταρκτική εκτίμηση δαπάνης κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων που προηγούνται του αναλυτικού σχεδιασμού του έργου, η παρούσα έρευνα εστίασε μόνο στις σεισμικές παραμέτρους σχεδιασμού, στο πλάτος καταστρώματος και στο μήκος του ανοίγματος που υποστηρίζεται από τα μεσόβαθρα. Η πλειονότητα των κατασκευαστικών έργων (78% των γεφυρών που απαρτίζουν το δείγμα στοιχείων) έχει μελετηθεί με παρόμοιες σεισμικές παραμέτρους. Επομένως, αποφασίστηκε να αποκλειστεί η συγκεκριμένη παράμετρος από την

ανάλυση και να μην διαφοροποιηθούν τα προτεινόμενα μοντέλα με βάση τις σεισμικές παραμέτρους σχεδιασμού. Συνοψίζοντας, το μήκος του ανοίγματος και το πλάτος της γέφυρας είναι οι δυο ανεξάρτητες μεταβλητές που περιλαμβάνονται στη στατιστική ανάλυση. Ο όγκος σκυροδέματος (V_c), το βάρος χάλυβα οπλισμού (B_s) και το βάρος χάλυβα προέντασης (B_p) αντιπροσωπεύουν τις τρεις εξαρτημένες μεταβλητές.

Οι γέφυρες με ανωδομή αποτελούμενη από προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς και πλάκα συνέχειας από οπλισμένο σκυρόδεμα σχεδιάζονται στις περισσότερες περιπτώσεις με ανοίγματα ίσου μήκους, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός παρόμοιων προκατασκευασμένων στοιχείων, να επιτευχθεί τυποποίηση της διαδικασίας κατασκευής και να μειωθεί ο χρόνος κατασκευής επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση κόστους. Το αρχικό δείγμα δεδομένων εξέτασε όλα τα ανοίγματα των 31 γεφυρών που κατασκευάστηκαν με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Κατέληξε τελικά με πλήρη στοιχεία για 47 ανοίγματα ανωδομής μετά την αφαίρεση των διπλών εγγραφών. Οι ποσότητες εργασιών περιλαμβάνουν τις προκατασκευασμένες δοκούς, τα διαφράγματα, τις προκατασκευασμένες πρόπλακες και την πλάκα συνέχειας.

Σχετικά με τις οδικές γέφυρες με μονοκύψελο κιβώτιο που κατασκευάζονται με επιτόπια σκυροδέτηση, μετά την εξέταση όλων των ανοιγμάτων και την αφαίρεση διπλών εγγραφών, το τελικό δείγμα περιλαμβάνει πλήρη στοιχεία για 47 ανοίγματα. Οι ποσότητες εργασιών δεν περιλαμβάνουν τα πεζοδρόμια, καθώς κατασκευάζονται με σκυρόδεμα χαμηλότερης αντοχής σε σχέση με το υπόλοιπο κατάστρωμα και εξαρτώνται από τις προδιαγραφές του αυτοκινητοδρόμου.

Η μέθοδος κατασκευής της προβολοδόμησης, όπως αναλύθηκε διεξοδικά στην ενότητα 2.5.3, αναφέρεται στην κατασκευή του καταστρώματος της γέφυρας με ακολουθία τμημάτων, συνήθως ξεκινώντας από ένα ή περισσότερα μεσοβάθρα, όπου κάθε τμήμα που τοποθετείται ισορροπεί το βάρος του επόμενου τμήματος στην αντίθετη πλευρά του μεσοβάθρου και περιστασιακά το βάρος του ξυλότυπου (Mathivat 1983). Η σταθερότητα του προβόλου εξασφαλίζεται σε κάθε βήμα της κατασκευής από καλώδια προέντασης που τοποθετούνται σύμφωνα με το διάγραμμα ροπών του και κατά συνέπεια, οι ποσότητες εργασιών της ανωδομής εξαρτώνται από το μήκος του προβόλου. Το Σχήμα 7-1 παρουσιάζει την τμηματική κατασκευή με προβολοδόμηση γέφυρας τριών ανοιγμάτων με δυο προβόλους. Το μήκος των προβόλων συμβολίζεται με l_{c1} και l_{c2} αντίστοιχα. Η βάση δεδομένων γεφυρών περιλαμβάνει 15 τεχνικά έργα που κατασκευάστηκαν με συμμετρική προβολοδόμηση. Το δείγμα στοιχείων αποτελείται τελικά από 33 προβόλους μετά την αφαίρεση των διπλών εγγραφών. Οι ποσότητες εργασιών δεν περιλαμβάνουν τα πεζοδρόμια.



Σχήμα 7-1: Τμηματική κατασκευή γέφυρας με προβολοδόμηση

Οι συντελεστές συσχέτισης (Pearson product-moment correlation coefficients) μεταξύ των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών υπολογίστηκαν για όλες τις περιπτώσεις. Έδειξαν ότι το μήκος ανοίγματος ή πρόβολου εμφανίζει τη μεγαλύτερη επίδραση στις ποσότητες εργασιών ανωδομής και ότι δεν υφίσταται εμφανές πρόβλημα λόγω πολυσυγγραμμικότητας. Κατά συνέπεια, προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών και να απλοποιηθεί η ΑΠ, το προσαρμοσμένο μήκος ανοίγματος ορίστηκε ως ακολούθως:

$$l_{sadj} = l_s \times \left(\frac{b}{b_{med}} \right) \quad (7-1)$$

όπου l_{sadj} είναι το προσαρμοσμένο μήκος ανοίγματος, l_s το μήκος του ανοίγματος, b το πλάτος του καταστρώματος και b_{med} η διάμεσος του πλάτους καταστρώματος της βάσης δεδομένων. Το προσαρμοσμένο μήκος πρόβολου (l_{cadj}), σε αναλογία με το προσαρμοσμένο μήκος ανοίγματος, χρησιμοποιήθηκε για τις γέφυρες που αποτελούνται από μονοκύπελα κιβώτια και κατασκευάζονται με προβολοδόμηση. Το μοντέλο παλινδρόμησης που εξετάστηκε περιελάμβανε μια ανεξάρτητη μεταβλητή και είχε την ακόλουθη μορφή:

$$Y = a + \beta_4 \times X \quad (7-2)$$

όπου Y αντιπροσωπεύει την εξαρτημένη μεταβλητή (V_c , B_s και B_p) και X αντιπροσωπεύει την ανεξάρτητη μεταβλητή (l_{sadj} ή l_{cadj}).

Η προσέγγιση που εφαρμόστηκε περιλαμβάνει στατιστική δοκιμή υπόθεσης για τον καθορισμό της σημαντικότητας κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής σε συνδυασμό με έλεγχο ορθότητας των σχέσεων αιτίου και αιτιατού. Η τιμή του ελέγχου p χρησιμοποιήθηκε για τον

καθορισμό στατιστικής σημαντικότητας, ενώ οι συντελεστές παλινδρόμησης ελέγχθηκαν για θεωρητική ακρίβεια ώστε να απεικονίζουν την επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών στις ποσότητες εργασιών της ανωδομής της γέφυρας. Ο προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και τιμή του στατιστικού ελέγχου F χρησιμοποιήθηκαν για την εξέταση της προσαρμογής του μοντέλου.

Τα στατιστικά στοιχεία παλινδρόμησης για όλες τις περιπτώσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-1. Αναδεικνύουν τον υψηλό βαθμό προσαρμογής και τη στατιστική σημαντικότητα του μοντέλου παλινδρόμησης και της ανεξάρτητης μεταβλητής σε επίπεδο σημαντικότητας 1%. Ο Πίνακας 7-2 παρουσιάζει τα μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών, καθώς επίσης το εύρος τιμών της ανεξάρτητης μεταβλητής και την τιμή της διαμέσου του πλάτους καταστρώματος. Οι συντελεστές συσχέτισης ενδεικτικά για γέφυρες με προκατασκευασμένες δοκούς δίνονται στον Πίνακα 7-3.

Πίνακας 7-1: Στατιστικά στοιχεία παλινδρόμησης

	Προκατασκευασμένες δοκοί			Κιβώτια με επιτόπια σκυροδέτηση			Συμμετρική προβολοδόμηση		
	V_c	B_s	B_p	V_c	B_s	B_p	V_c	B_s	B_p
Τιμή p	6.5E-19	1.1E-15	1.7E-17	6.4E-16	8.8E-14	1.5E-16	2.4E-19	3.9E-17	3.7E-18
R^2	0.826	0.758	0.799	0.764	0.707	0.779	0.926	0.898	0.912
Τιμή F	219.261	145.403	183.660	149.912	111.838	163.009	404.284	282.911	334.195
Σημαντικ. F	6.5E-19	1.1E-15	1.7E-17	6.4E-16	8.8E-14	1.5E-16	2.4E-19	3.9E-17	3.7E-18

Πίνακας 7-2: Μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών ανωδομής

	Προκατασκευασμένες δοκοί	Κιβώτια με επιτόπια σκυροδέτηση	Συμμετρική προβολοδόμηση
V_c	$V_c = -77.184 + 11.349 \times I_{sadj}$	$V_c = 3.865 + 9.849 \times I_{sadj}$	$V_c = -1705.124 + 28.807 \times I_{cadj}$
B_s	$B_s = -6306.255 + 1336.155 \times I_{sadj}$	$B_s = 8274.962 + 950.703 \times I_{sadj}$	$B_s = -460706.124 + 6729.826 \times I_{cadj}$
B_p	$B_p = -5035.551 + 432.707 \times I_{sadj}$	$B_p = -7047.660 + 604.149 \times I_{sadj}$	$B_p = -150397.754 + 2113.073 \times I_{cadj}$
Εύρος	$20.53 < I_{sasj} < 46.34$	$17.88 < I_{sasj} < 67.17$	$91.29 < I_{casj} < 204.66$
b_{med}	13.10	13.50	14.00

Πίνακας 7-3: Συντελεστές συσχέτισης για γέφυρες με προκατασκευασμένες δοκούς

	b	I _s	V _c	B _s	B _p	I _{sadj}
b	1.000					
I _s	-0.140	1.000				
V _c	0.334	0.787	1.000			
B _s	0.399	0.711	0.854	1.000		
B _p	0.290	0.797	0.757	0.851	1.000	
I _{sadj}	0.379	0.862	0.911	0.874	0.896	1.000

7.2.2 Έλεγχος υποθέσεων γραμμικής παλινδρόμησης

Οι τιμές R^2 κυμαίνονται μεταξύ 70% και 93%. Δείχνουν ότι τα προτεινόμενα μοντέλα διαθέτουν ικανοποιητική προσαρμογή στα δεδομένα. Οι εκτιμηθείσες τιμές p και F επιβεβαιώνουν ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές και τα μοντέλα παλινδρόμησης είναι στατιστικά σημαντικά, ενώ οι συντελεστές παλινδρόμησης παρουσιάζουν θεωρητική ακρίβεια.

Η σωστή εφαρμογή της μεθοδολογίας γραμμικής παλινδρόμησης με μια ανεξάρτητη μεταβλητή περιλαμβάνει τρεις βασικές προϋποθέσεις. Ο όρος σφάλματος του μοντέλου πρέπει να ακολουθεί την κανονική κατανομή, να έχει μέση τιμή ίση με μηδέν και σταθερή διασπορά (Gujarati 1999). Τα υπόλοιπα των προτεινόμενων μοντέλων παλινδρόμησης υπολογίστηκαν και η μέση τιμή τους προσέγγισε τη μηδενική τιμή. Εξετάστηκε στη συνέχεια η μορφή των διαγραμμάτων των υπολοίπων και επιβεβαιώθηκε η επάρκεια των μοντέλων παλινδρόμησης. Η υπόθεση κανονικότητας εξετάστηκε με χρήση του ελέγχου Shapiro-Wilks (Shapiro και Wilk 1965). Οι τιμές του ελέγχου p υπολογίστηκαν για κάθε δείγμα υπολοίπων και επιβεβαίωσαν την υπόθεση κανονικότητας των όρων σφάλματος σε 5% επίπεδο σημαντικότητας.

Ο γενικός έλεγχος ετεροσκεδαστικότητας του White (White 1980) χρησιμοποιήθηκε για την εξέταση της σταθερής διασποράς του όρου σφάλματος. Η πιθανότητα (τιμή p) επίτευξης της τιμής X^2 της στατιστικής ελέγχου και το αποτέλεσμα του ελέγχου για 5% επίπεδο σημαντικότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-4. Δείχνουν την παρουσία ετεροσκεδαστικότητας στα δείγματα στοιχείων της προβολοδόμησης και της κατασκευής γεφυρών με επιτόπια σκυροδέτηση.

Πίνακας 7-4: Στατιστική ελέγχου, τιμή p και αποτέλεσμα του ελέγχου White

		Στατιστική ελέγχου	Τιμή p	Αποτέλεσμα
V_c	Προκατασκ. δοκοί	1.535	>0.25	Ομοσκεδαστικότητα
	Επιτόπια σκυροδέτηση	6.177	<0.05	Ετεροσκεδαστικότητα
	Προβολοδόμηση	13.740	<0.005	Ετεροσκεδαστικότητα
B_s	Προκατασκ. δοκοί	1.851	>0.25	Ομοσκεδαστικότητα
	Επιτόπια σκυροδέτηση	7.604	<0.025	Ετεροσκεδαστικότητα
	Προβολοδόμηση	9.167	<0.025	Ετεροσκεδαστικότητα
B_p	Προκατασκ. δοκοί	3.366	>0.10	Ομοσκεδαστικότητα
	Επιτόπια σκυροδέτηση	13.767	<0.005	Ετεροσκεδαστικότητα
	Προβολοδόμηση	16.200	<0.005	Ετεροσκεδαστικότητα

Οι συντελεστές παλινδρόμησης που υπολογίστηκαν διατηρούν την ισχύ τους και οι συνηθισμένοι εκτιμητές ελαχίστων τετραγώνων παραμένουν αμερόληπτοι, συνεπείς και γραμμικοί παρά την παρουσία ετεροσκεδαστικότητας, (Gujarati 1999). Οι εκτιμήσεις όμως της διασποράς είναι προκατειλημμένες, ακυρώνοντας συνεπώς τους ελέγχους σημαντικότητας. Τα διορθωμένα τυπικά σφάλματα του White επιλέχθηκαν για προσαρμογή λόγω ετεροσκεδαστικότητας. Τα «HC3» διορθωμένα τυπικά σφάλματα για μικρά δείγματα και οι αντίστοιχες τιμές p υπολογίστηκαν για όλες τις περιπτώσεις και επιβεβαίωσαν τη στατιστική σημαντικότητα των ανεξάρτητων μεταβλητών.

7.2.3 Επικύρωση των μοντέλων

Η καλή προσαρμογή του μοντέλου παλινδρόμησης και ο έλεγχος υποθέσεων της στατιστικής μεθόδου δεν εγγυώνται την ισχύ του μοντέλου πρόβλεψης. Τεχνικές επικύρωσης (cross validation techniques) χρησιμοποιούνται ευρέως για την επιλογή μεταξύ διάφορων μοντέλων και την αξιολόγηση της απόδοσης πρόβλεψης. Η μέθοδος επικύρωσης με 10 μέρη (10-fold validation method) εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη. Στη συγκεκριμένη μέθοδο το σύνολο των δεδομένων διαιρείται τυχαία σε δέκα υποσύνολα περίπου ίσου μεγέθους. Η ΑΠ εκτελείται στη συνέχεια αγνοώντας ένα από τα υποσύνολα. Το μοντέλο που υπολογίζεται και το υποσύνολο που παραλείφθηκε χρησιμοποιούνται για έλεγχο. Η προαναφερθείσα διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα δέκα υποσύνολα και υπολογίζεται η μέση τιμή του επιλεγμένου κριτηρίου λάθους. Το μέσο ποσοστιαίο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error -

MAPE) επιλέχθηκε ως κριτήριο σφάλματος. Αντιπροσωπεύει το μέσο όρο των αποκλίσεων μεταξύ των προβλεφθεισών και των πραγματικών εκτιμήσεων σε απόλυτες τιμές ως ποσοστό των πραγματικών εκτιμήσεων. Οι τιμές MAPE για τα μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-5. Δείχνουν ότι τα προτεινόμενα μοντέλα προβλέπουν τις πραγματικές τιμές ποσοτήτων εργασιών ανωδομής με μέσο σφάλμα μικρότερο από 20%.

Πίνακας 7-5: Τιμές MAPE μοντέλων πρόβλεψης και συνολικής δαπάνης ανωδομής

	V _c	B _s	B _p	TC
Προκατασκευασμένες δοκοί	11.66%	15.42%	16.14%	7.09%
Κιβώτια με επιτόπια σκυροδέτηση	14.48%	15.26%	19.30%	10.94%
Συμμετρική προβολοδόμηση	14.76%	17.69%	16.03%	16.48%

Οι παραπάνω τιμές MAPE αποδίδονται στην έλλειψη τυποποίησης στην επιλογή της διατομής της ανωδομής γεφυρών. Τα πρότυπα DIN δεν υπαγορεύουν τη χρήση συγκεκριμένων μορφών και διατομών, αλλά προτείνουν διαφορετικές συνθήκες και κριτήρια σχεδιασμού που πρέπει να τηρηθούν στη μελέτη. Κατά συνέπεια, ο μελετητής γεφυρών δύναται να επιλέξει την κατανομή των υλικών και να εξάγει τις ακριβείς διαστάσεις των τμημάτων της διατομής εφόσον πληρούνται τα κριτήρια. Για παράδειγμα, η κατανάλωση υλικών σε δεδομένη κατασκευή συμμετρικής προβολοδόμησης επηρεάζεται από το λόγο των διαστάσεων του κιβωτίου, τη σχέση μεταξύ του συνολικού πλάτους της άνω πλάκας και των επεκτάσεων του προβόλου (cantilever flanges) και τη διαμόρφωση – διάταξη της προέντασης στις άνω και κάτω πλάκες. Για συγκεκριμένη γέφυρα με προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς, η κατανάλωση υλικών επηρεάζεται από διάφορες αποφάσεις σχεδιασμού σχετικές με τη διαμόρφωση της διατομής, όπως ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων δοκών, ο τύπος δοκών (δοκοί τύπου T με πλατύ άνω τμήμα ή δοκοί τύπου I με λεπτό άνω τμήμα) και ο τύπος των προκατασκευασμένων προπλακών. Επιπλέον, η κατασκευή γεφυρών αποτελεί συνήθως τμήμα μεγαλύτερης σύμβασης που περιλαμβάνει κατασκευές με διαφορετικές παραμέτρους. Ο μελετητής επιλέγει τις μορφές ανωδομής για κάθε κατασκευή λαμβάνοντας όμως υπόψη το συνολικό έργο, ώστε να μεγιστοποιηθεί η τυποποίηση των κατασκευαστικών διαδικασιών και να επιτευχθεί εξοικονόμηση κόστους.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου εκτίμησης δαπάνης, οι πραγματικές και οι εκτιμηθείσες τιμές δαπάνης ανωδομής υπολογίστηκαν για κάθε γέφυρα του

δείγματος με τη χρήση τρεχουσών τιμών μονάδας κόστους εργασιών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-6. Τα προτεινόμενα μοντέλα πρόβλεψης εφαρμόστηκαν για να παραχθούν εκτιμήσεις ποσοτήτων εργασιών, οι οποίες οδήγησαν στη συνέχεια σε εκτιμήσεις της συνολικής δαπάνης ανωδομής. Το MAPE υπολογίστηκε για κάθε γέφυρα ώστε να εξαχθεί ο μέσος όρος των τιμών για κάθε μέθοδο κατασκευής. Για παράδειγμα, η μέση τιμή MAPE για την κατασκευή μονοκύψελων κιβωτίων με επιτόπια σκυροδέτηση ήταν 10.94%. Οι τιμές του μέσου ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος της συνολικής δαπάνης της ανωδομής για κάθε μέθοδο κατασκευής παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-5.

Πίνακας 7-6: Τρέχουσες τιμές μονάδας εργασιών

	c_c (€/ m ³)	c_s (€/ kg)	c_p (€/ kg)
Προκατασκευασμένες δοκοί	200.00	1.00	3.80
Κιβώτια με επιτόπια σκυροδέτηση	200.00	1.00	3.80
Συμμετρική προβολοδόμηση	307.00	1.00	3.80

Το σφάλμα θεωρείται αποδεκτό σύμφωνα με τις οδηγίες για κατασκευαστικά έργα του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. (1997), οι οποίες προτείνουν εύρος ακρίβειας $\pm 40\%$ για εκτιμήσεις κόστους προγραμματισμού / εκτίμησης του εφικτού που προετοιμάζονται πριν από τον προκαταρκτικό σχεδιασμό των έργων. Το αντίστοιχο αποδεκτό εύρος ακρίβειας σύμφωνα με τον Ritz (2004) είναι $\pm 25-30\%$.

7.2.4 Παραμετρικά εύρη συντελεστών παλινδρόμησης

Η μέθοδος bootstrap χρησιμοποιήθηκε για να εξαχθούν παραμετρικά εύρη των συντελεστών παλινδρόμησης. Το αρχικό δείγμα δεδομένων για κάθε μέθοδο κατασκευής ανωδομής αναδιατάχθηκε με αντικατάσταση και δημιουργήθηκε νέο δείγμα στο οποίο πραγματοποιήθηκε ΑΠ. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε 1000 φορές και καταγράφηκαν οι συντελεστές παλινδρόμησης. Τα 90% διαστήματα εμπιστοσύνης των συντελεστών παλινδρόμησης για τα προτεινόμενα μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-7. Ο Πίνακας 7-8 παρουσιάζει την τιμή του 50ου εκατοστημορίου (50th percentile). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης bootstrap αναδεικνύουν ότι οι τιμές των

συντελεστών παλινδρόμησης των προτεινόμενων μοντέλων εμπεριέχονται στα 90% διαστήματα εμπιστοσύνης και προσεγγίζουν τις τιμές του 50^{ου} εκατοστημορίου.

Πίνακας 7-7: 90% διαστήματα εμπιστοσύνης συντελεστών παλινδρόμησης

		Προκατ. Δοκοί		Επιτόπια σκυροδέτηση		Προβολοδόμηση	
		5%	95%	5%	95%	5%	95%
V _c	α	-115.261	-40.404	-47.716	65.377	-1979.397	-1194.413
	β ₄	10.243	12.423	7.939	11.375	23.898	31.329
B _s	α	-11957.133	-110.746	2544.069	14898.275	-543327.065	-333804.573
	β ₄	1160.213	1491.703	747.059	1112.815	5551.474	7400.412
B _p	α	-6477.880	-3750.060	-10015.076	-3377.923	-176434.756	-113077.579
	β ₄	397.371	475.073	487.428	697.479	1768.685	2361.652

Πίνακας 7-8: Τιμή 50^{ου} εκατοστημορίου συντελεστών παλινδρόμησης

		Προκατ. Δοκοί	Επιτόπια σκυροδέτηση	Προβολοδόμηση
V _c	α	-76.821	7.471	-1684.200
	β ₄	11.344	9.719	28.566
B _s	α	-6494.866	8502.728	-460041.224
	β ₄	1337.075	941.902	6741.679
B _p	α	-5049.070	-6778.305	-149834.214
	β ₄	432.642	597.079	2112.552

7.3 Ανάπτυξη μοντέλων μεσοβάθρων

7.3.1 Στατιστική ανάλυση

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης. Χρησιμοποιήθηκε προσέγγιση παρόμοια με την περίπτωση της ανωδομής (βλ. Ενότητα 7.2.1). Η τιμή του ελέγχου p , ο προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και η τιμή του στατιστικού ελέγχου F αξιοποιήθηκαν για εξέταση στατιστικής σημαντικότητας των μεταβλητών και του μοντέλου αντίστοιχα. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές ελέχθηκαν για ύπαρξη πολυσυγγραμμικότητας.

Η μελέτη μεσοβάθρου οδικής γέφυρας επηρεάζεται γενικά από τις σεισμικές παραμέτρους σχεδιασμού, το ύψος του μεσοβάθρου (h), το μήκος του καταστρώματος της γέφυρας που υποστηρίζεται από το μεσοβάθρο (l_{sup}) και το πλάτος καταστρώματος (b). Η

παράμετρος των σεισμικών συνθηκών αποκλείστηκε από την ανάλυση καθώς η πλειοψηφία των κατασκευαστικών έργων (85% του δείγματος στοιχείων) μελετήθηκαν με παρόμοιες σεισμικές παραμέτρους. Οι προαναφερθείσες τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές (h , l_{sup} και b) συμπεριλήφθηκαν στη στατιστική ανάλυση. Το μήκος του καταστρώματος της γέφυρας που υποστηρίζεται από κάθε μεσόβαθρο υπολογίστηκε ως ο αριθμητικός μέσος όρος του μήκους των δύο ανοιγμάτων εκατέρωθεν του μεσοβάθρου. Ο όγκος σκυροδέματος (V_c) και το βάρος χάλυβα οπλισμού (B_s) αντιπροσωπεύουν τις δύο εξαρτημένες μεταβλητές.

Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει πλήρη στοιχεία για 322 μεσόβαθρα γεφυρών. Οι συντελεστές συσχέτισης (Pearson product-moment correlation coefficients) για τις ανεξάρτητες μεταβλητές και πρόσθετοι δείκτες, όπως το «VIF» και το «tolerance» παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-9. Μολονότι το μήκος του υποστηριζόμενου καταστρώματος της γέφυρας παρουσίασε αξιόλογη συσχέτιση με το ύψος μεσοβάθρων, το VIF δεν επιβεβαίωσε την ύπαρξη προβλήματος λόγω πολυσυγγραμμικότητας. Οι συντελεστές συσχέτισης έδειξαν επίσης ότι το πλάτος καταστρώματος παρουσιάζει μικρή επίδραση στις ποσότητες εργασιών και για τις δύο περιπτώσεις. Κατά συνέπεια, προκειμένου να απλοποιηθεί η ΑΠ, το προσαρμοσμένο υποστηριζόμενο μήκος καταστρώματος ορίστηκε κατ'αναλογία με την Εξίσωση 7-1 ως ακολούθως:

$$l_{sup\ adj} = l_{sup} \times \left(\frac{b}{b_{med}} \right) \quad (7-3)$$

όπου $l_{sup\ adj}$ είναι το προσαρμοσμένο υποστηριζόμενο μήκος καταστρώματος γέφυρας, l_{sup} είναι το μήκος του καταστρώματος που υποστηρίζεται από το μεσόβαθρο, b το πλάτος καταστρώματος και b_{med} η διάμεσος τιμή του πλάτους καταστρώματος που ισούται με 13.00 μ. για το δείγμα δεδομένων που εξετάστηκε. Το μοντέλο παλινδρόμησης είχε την ακόλουθη μορφή:

$$Y = a + \beta_0 \times h + \beta_5 \times l_{sup\ adj} \quad (7-4)$$

όπου Y αντιπροσωπεύει την εξαρτημένη μεταβλητή (V_c , B_s).

Πίνακας 7-9: Συντελεστές συσχέτισης, tolerance και variance inflation factors για μεσόβαθρα

	b	l_{sup}	h	Tolerance	VIF
b	1.000			0.859	1.164
l_{sup}	-0.045	1.000		0.590	1.694
h	-0.214	0.582	1.000	0.619	1.617

Τα στατιστικά στοιχεία παλινδρόμησης (R^2 , τιμές p για τις δυο ανεξάρτητες μεταβλητές και σημαντικότητα ελέγχου F) παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-10. Αναδεικνύουν τον υψηλό βαθμό προσαρμογής και τη στατιστική σημαντικότητα του μοντέλου παλινδρόμησης και των ανεξάρτητων μεταβλητών σε επίπεδο σημαντικότητας 1%. Οι ακόλουθες εξισώσεις παρέχουν προκαταρκτικές εκτιμήσεις του όγκου σκυροδέματος και του βάρους χάλυβα σπλισμού για μεσόβαθρα οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα:

$$V_c = -119.038 + 9.779 \times h + 2.611 \times l_{sup\ adj} \quad (7-5)$$

$$B_s = -39706.679 + 1863.910 \times h + 880.240 \times l_{sup\ adj} \quad (7-6)$$

Τα παραπάνω μοντέλα ισχύουν για τιμές ύψους μεσοβάθρου μεταξύ 9.18 και 87.83 μ. και προσαρμοσμένου υποστηριζόμενου μήκους καταστρώματος μεταξύ 26.00 και 220.40 μ.

Πίνακας 7-10: Τιμές p, R^2 και τιμές ελέγχου F για μεσόβαθρα γεφυρών

	V_c	B_s
$l_{sup\ adj}$	1.70E-19	2.70E-57
h	4.80E-46	2.10E-56
R^2	0.723	0.849
Τιμή F	419.540	903.411
Σημαντικότητα F	4.90E-90	4.10E-132

7.3.2 Έλεγχος υποθέσεων γραμμικής παλινδρόμησης

Οι τιμές R^2 είναι υψηλές και κυμαίνονται μεταξύ 72% και 85%. Οι εκτιμηθείσες τιμές p και F επιβεβαιώνουν τη στατιστική σημαντικότητα των ανεξάρτητων μεταβλητών και των επιλεγμένων μοντέλων. Το πρόσημο των συντελεστών παλινδρόμησης είναι θετικό, με αποτέλεσμα οι συντελεστές να παρουσιάζουν θεωρητική ακρίβεια.

Σχετικά με τον έλεγχο των τριών βασικών υποθέσεων της μεθοδολογίας γραμμικής παλινδρόμησης, η μορφή των διαγραμμάτων υπολοίπων επιβεβαίωσε καταρχήν την επάρκεια των μοντέλων. Η υπόθεση κανονικότητας εξετάστηκε με τον έλεγχο Shapiro-Wilks (Shapiro και Wilk 1965). Οι τιμές του ελέγχου p υπολογίστηκαν για κάθε δείγμα υπολοίπων και επιβεβαίωσαν την υπόθεση κανονικότητας των όρων σφάλματος σε 5% επίπεδο σημαντικότητας. Η μέση τιμή των υπολοίπων προσέγγισε τη μηδενική τιμή.

Ο γενικός έλεγχος ετεροσκεδαστικότητας του White (White 1980) έδειξε την παρουσία ετεροσκεδαστικότητας και στα δυο δείγματα. Οι συντελεστές παλινδρόμησης που υπολογίστηκαν διατηρούν όμως την ισχύ τους. Τα «HC3» διορθωμένα τυπικά σφάλματα για μικρά δείγματα επιβεβαίωσαν τη στατιστική σημαντικότητα των ανεξάρτητων μεταβλητών.

7.3.3 Παραμετρικά εύρη συντελεστών παλινδρόμησης

Ο Πίνακας 7-11 παρουσιάζει τις τιμές του 5^{ου}, 95^{ου} και 50^{ου} εκατοστημορίου των συντελεστών παλινδρόμησης που προσδιορίστηκαν με εφαρμογή μέθοδου bootstrap. Οι τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης των προτεινόμενων μοντέλων εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών μεσοβάθρων εμπεριέχονται στα 90% διαστήματα εμπιστοσύνης και προσεγγίζουν τις τιμές του 50^{ου} εκατοστημορίου.

Πίνακας 7-11: Τιμές 5^{ου}, 95^{ου} και 50^{ου} εκατοστημορίου συντελεστών παλινδρόμησης

	V_c			B_s		
	5%	95%	50%	5%	95%	50%
α	-150.145	-86.953	-118.608	-43371.842	-35625.404	-39517.295
β_0	8.217	11.162	9.670	1630.212	2079.626	1854.542
β_5	2.100	3.376	2.606	797.668	970.370	876.923

7.4 Μέθοδος bootstrap για εύρη εκτιμήσεων δαπάνης ανωδομής

Η προτεινόμενη παραμετρική μέθοδος εκτίμησης παράγει μια τιμή της δαπάνης ανωδομής γεφυρών. Πιθανοτικές τεχνικές όπως η bootstrap, επιδιώκουν την αξιολόγηση της μεταβλητότητας της εκτίμησης και την ποσοτικοποίηση του επίπεδο της αβεβαιότητάς της. Η συγκεκριμένη τεχνική ανήκει σε ευρύτερη κατηγορία μεθόδων που αναδιατάζουν το αρχικό σύνολο στοιχείων.

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκε bootstrap μέθοδος αναδιάταξης του δείγματος στοιχείων, παρόμοια με εκείνη που εφαρμόστηκε από τον Sonmez (2008), προκειμένου να παραχθούν εύρη εκτίμησης της δαπάνης ανωδομής γεφυρών. Το αρχικό δείγμα στοιχείων για κάθε μοντέλο αναδιατάχθηκε και διαμορφώθηκε νέο σύνολο ίδιου μεγέθους. Τα στοιχεία κάθε συνόλου επιλέχθηκαν τυχαία από το αρχικό δείγμα με αντικαταστάσεις. Συνεπώς, το bootstrap σύνολο στοιχείων αποτελείται από μέλη του αρχικού συνόλου, μερικά από τα οποία μπορούν να επιλεγθούν αρκετές φορές ή και καθόλου σε οποιοδήποτε bootstrap δείγμα.

Το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης της Εξίσωσης 7-2 εφαρμόστηκε στη συνέχεια στο bootstrap σύνολο στοιχείων. Η κλίση και ο σταθερός όρος της εξίσωσης επιλέχθηκαν ως παράμετροι εξέτασης. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε 1000 φορές και οι πολυάριθμες bootstrap επαναλήψεις των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν για να παραχθούν εκτιμήσεις – προβλέψεις των ποσοτήτων εργασιών και της δαπάνης ανωδομής γεφυρών. Οι εκτιμήσεις αυτές οδήγησαν, τελικά, σε συνάρτηση κατανομής πιθανότητας για την προβλεφθείσα τιμή δαπάνης, καθώς επίσης και στα αντίστοιχα εύρη εκτιμήσεων.

7.4.1 Εύρος εκτιμήσεων για παράδειγμα έργου (case project)

Συνδυασμός των προτεινόμενων μοντέλων παλινδρόμησης και της προαναφερθείσας τεχνικής bootstrap χρησιμοποιήθηκε για να παραχθούν εκτιμήσεις ποσοτήτων εργασιών και δαπάνης ανωδομής για παράδειγμα έργου. Το παράδειγμα έργου είναι γέφυρα ενός ανοίγματος με κατάστρωμα από προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς και πλάκα συνέχειας από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι τιμές των παραμέτρων του παραδείγματος δίνονται στον Πίνακα 7-12. Χίλια bootstrap σύνολα στοιχείων με 47 σημεία έκαστο προήλθαν τυχαία με αντικατάσταση από το αρχικό δείγμα δεδομένων και χρησιμοποιήθηκαν για να παραχθούν 1000 συντελεστές παλινδρόμησης. Οι συντελεστές αυτοί εφαρμόστηκαν για την εξαγωγή αντίστοιχων εκτιμήσεων των ποσοτήτων εργασιών ανωδομής του παραδείγματος, οι οποίες οδήγησαν στη συνέχεια σε προβλέψεις της δαπάνης ανωδομής με πολλαπλασιασμό με τις τιμές μονάδας. Ο Πίνακας 7-13 παρουσιάζει τα εύρη εκτίμησης των ποσοτήτων εργασιών και της δαπάνης ανωδομής για επίπεδο

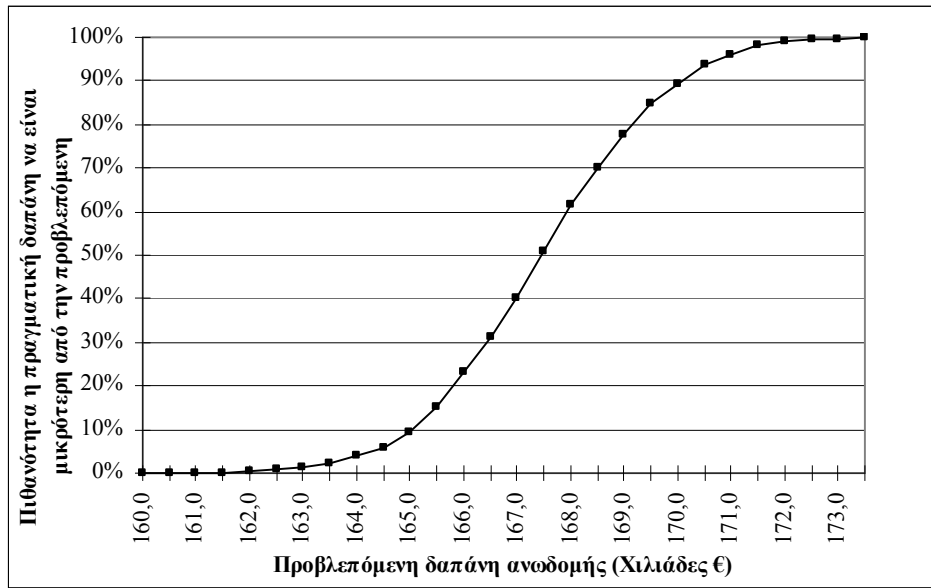
πιθανότητας 90%. Περιέχει ακόμη τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τα προτεινόμενα μοντέλα παλινδρόμησης, οι οποίες προσέγγισαν την τιμή του 50^{ου} εκατοστημορίου. Το Σχήμα 7-2 παρουσιάζει την εμπειρική συνάρτηση κατανομής της προβλεπόμενης δαπάνης ανωδομής.

Πίνακας 7-12: Τιμές των παραμέτρων του παραδείγματος

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
l	40.00	m
b	13.00	m
l _{sadj}	39.69	m
c _c	200.00	€/ m ³
c _p	3.80	€/ kg
c _s	1.00	€/ kg

Πίνακας 7-13: Εύρη εκτίμησης για το παράδειγμα. έργου

	Επίπεδο πιθανότητας			Εκτίμηση Μοντέλου
	5%	50%	95%	
V _c	361.9	373.2	383.4	373.3
B _s	45253.8	46686.7	48078.7	46725.7
B _p	11741.2	12137.8	12632.0	12138.6
C _c	72383.9	74646.9	76684.5	74651.6
C _s	45253.8	46686.7	48078.7	46725.7
C _p	44616.6	46123.5	48001.5	46126.6
TC	162254.3	167457.1	172764.7	167503.9



Σχήμα 7-2: Εμπειρική συνάρτηση πιθανότητας της προβλεπόμενης δαπάνης κατασκευής ανωδομής

8 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΑΠΑΝΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

Το κεφάλαιο αποτελεί συνδυασμό των προηγούμενων ενοτήτων. Παρουσιάζει το σύστημα εκτίμησης δαπάνης κατασκευής οδικών γεφυρών που αναπτύχθηκε στην παρούσα έρευνα. Αναλύονται αρχικά το θεωρητικό υπόβαθρο και τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι παραδοχές σχεδιασμού της γέφυρας, οι παραλλαγές που προσφέρονται προς επιλογή, τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου από το χρήστη και τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Η χρήση του προτεινόμενου συστήματος σε δυο παραδείγματα γεφυρών παρουσιάζεται μέσω αντιπροσωπευτικών εικόνων της εφαρμογής. Το κεφάλαιο καταλήγει με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο εναλλακτικών επιλογών γεφυρών.

8.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Ένα παραμετρικό μοντέλο εκτίμησης δαπάνης αποτελείται από έναν ή περισσότερους αλγόριθμους που εκφράζουν τη δαπάνη ως συνάρτηση μιας ή περισσότερων παραμέτρων που την ποσοτικοποιούν (AACE 2010). Οι αλγόριθμοι αυτοί αναπτύσσονται στις περισσότερες περιπτώσεις με στατιστική ανάλυση ιστορικών πληροφοριών. Το προτεινόμενο σύστημα εκτίμησης δαπάνης οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα περιλαμβάνει δύο στάδια: την εκτίμηση των ποσοτήτων εργασιών όλων των σημαντικών τμημάτων της γέφυρας και τον υπολογισμό της αντίστοιχης δαπάνης κατασκευής.

Το πρώτο στάδιο βασίζεται σε μοντέλα πρόβλεψης των ποσοτήτων εργασιών που προήλθαν από στατιστική ανάλυση των συλλεχθέντων στοιχείων της βάσης δεδομένων οδικών γεφυρών. Χρησιμοποιούνται διαφορετικά μοντέλα για την ανωδομή, τα μεσόβαθρα και τις θεμελιώσεις. Το δεύτερο στάδιο εξάγει τη δαπάνη κατασκευής μέσω του πολλαπλασιασμού των εκτιμηθείσων ποσοτήτων εργασιών με αντίστοιχες τιμές μονάδας. Το σύστημα χρησιμοποιεί επίσης τιμές της ποσοστιαίας κατανομής της συνολικής δαπάνης γεφυρών που προτάθηκε από τους Fragkakis και Lambropoulos (2004) και παρουσιάστηκε αναλυτικά στην ενότητα 3.3.

Ειδικότερα, εφαρμόζονται τα μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών ανωδομής και μεσοβάθρων που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 7.2.1 και 7.3.1, καθώς και το παραμετρικό μοντέλο των Fragkakis et al. (2011) για την εννοιολογική εκτίμηση της δαπάνης θεμελιώσεων μεσοβάθρων γεφυρών που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 6 της παρούσας εργασίας. Η εφαρμογή χρησιμοποιεί την ταξινόμηση εδαφών που προτάθηκε, το έμπειρο σύστημα για την επιλογή του τύπου θεμελίωσης και τα μοντέλα πρόβλεψης των ποσοτήτων εργασιών των θεμελιώσεων.

8.2 Χαρακτηριστικά – απαιτήσεις συστήματος

Ο προγραμματισμός του προτεινόμενου συστήματος πραγματοποιήθηκε σε γλώσσα JAVA, ενώ η υλοποίησή του χρησιμοποιεί την πλατφόρμα Java Virtual Machine (JVM). Η εκτέλεση του συστήματος απαιτεί την εγκατάσταση της πλατφόρμας σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows της Microsoft.

8.3 Εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού

Το προτεινόμενο σύστημα προσφέρει τις ακόλουθες εναλλακτικές λύσεις προς επιλογή για την ανωδομή γεφυρών και τις αντίστοιχες μεθόδους κατασκευής:

- Προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς από σκυρόδεμα που τοποθετούνται με χρήση γερανού ή αυτοκινούμενου γερανοδικτυώματος και πλάκα συνεχείας από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Μονοκύβελος κιβωτιοειδείς διατομές ενός ή περισσότερων ανοιγμάτων κατασκευασμένες συμβατικά με χρήση ικριωμάτων και επιτόπια σκυροδέτηση.
- Μονοκύβελος κιβωτιοειδείς διατομές μεταβλητού ύψους που κατασκευάζονται με συμμετρική προβολοδόμηση με επιτόπια σκυροδέτηση.

Το σύστημα χρησιμοποιεί ακόμη μεσόβαθρα οπλισμένου σκυροδέματος χωρίς διαφοροποίηση διατομής και προσφέρει τις ακόλουθες εναλλακτικές λύσεις για τη θεμελίωση των μεσοβάθρων:

- Επιφανειακή θεμελίωση με πέδιλα οπλισμένου σκυροδέματος.
- Βαθιές θεμελιώσεις με έγχυτους πασσάλους που συνδέονται με κεφαλόδεσμο από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Βαθιές θεμελιώσεις με φρέατα οπλισμένου σκυροδέματος.

8.4 Εισαγωγή δεδομένων

Ο χρήστης εισάγει τα ακόλουθα στοιχεία για κάθε γέφυρα:

- Γενικές πληροφορίες, όπως το όνομα, τη θέση, τον αυτοκινητόδρομο, το τμήμα και τη χιλιομετρική θέση.
- Βασικά στοιχεία σχεδιασμού, όπως το μήκος και πλάτος της γέφυρας και τον αριθμό των ανοιγμάτων.

- Μήκος κάθε ανοίγματος και μέθοδος κατασκευής καταστρώματος.
- Ύψος κάθε μεσοβάθρου.
- Συγκεκριμένο τύπο θεμελίωσης για κάθε μεσόβαθρο. Ο χρήστης εναλλακτικά εισάγει τον τύπο εδάφους και στη συνέχεια απαντά στα κριτήρια επιλογής ώστε να χρησιμοποιήσει το αυτοματοποιημένο έμπειρο σύστημα για την επιλογή του τύπου θεμελίωσης.
- Τιμές μονάδας εργασιών.

Όλα τα απαραίτητα δεδομένα αποτελούνται από βασικές παραμέτρους που είναι γνωστές κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών σταδίων μελέτης του έργου. Με βάση τους τοπογραφικούς χάρτες, τη χάραξη και τις προδιαγραφές του υπό αξιολόγηση αυτοκινητοδρόμου, ο χρήστης δύναται να υπολογίσει το μήκος και πλάτος της γέφυρας, καθώς και το ύψος των μεσοβάθρων για κάθε θέση βάθρου που θα επιλέξει.

8.5 Αποτελέσματα

Το σύστημα παράγει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Ποσότητες εργασιών του καταστρώματος της γέφυρας, των μεσοβάθρων και των θεμελιώσεων τους, είτε ξεχωριστά για κάθε στοιχείο, είτε σωρευτικά και αντίστοιχα παραμετρικά εύρη.
- Εκτιμήσεις της δαπάνης κατασκευής των μεσοβάθρων και των θεμελιώσεων τους, του καταστρώματος, του εξοπλισμού και των χωματουργικών εργασιών της γέφυρας και αντίστοιχα παραμετρικά εύρη.

Το σύστημα δεν εξάγει εκτιμήσεις της δαπάνης κατασκευής των ακροβάθρων γεφυρών, δεδομένου ότι τα στοιχεία αυτά εξαρτώνται άμεσα από τις τοπικές συνθήκες κάθε θέσης κατασκευής και παρουσιάζουν αξιόλογες αποκλίσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε πολλές περιπτώσεις δίδυμων οδικών γεφυρών με ανεξάρτητους φορείς και μεσόβαθρα, επιλέγεται η κατασκευή ενιαίων ακροβάθρων και για τις δυο γέφυρες. Επιπρόσθετα, οι πτερυγότοιχοι διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με τη θέση κάθε έργου. Δύναται να αποτελούν τοίχους αντιστήριξης μεγάλου μήκους στην περίπτωση εκτεταμένων επιχώσεων για τη διαμόρφωση του δρόμου πρόσβασης ή αντιστηρίξεων πρανών. Τέλος, το σύστημα δεν παράγει εκτιμήσεις της δαπάνης κατασκευής των πεζοδρομίων της γέφυρας, καθώς η διατομή των πεζοδρομίων εξαρτάται από τις προδιαγραφές κάθε αυτοκινητοδρόμου και διαφοροποιείται σημαντικά.

8.6 Παραδείγματα εφαρμογής

Έστω ότι αξιολογείται η γεφύρωση κοιλάδας για τη διέλευση αυτοκινητοδρόμου σε δύσβατη περιοχή. Το συνολικό μήκος του τεχνικού έργου προσδιορίζεται σε 200.00 μέτρα από τους τοπογραφικούς χάρτες. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές κατασκευής του αυτοκινητοδρόμου, η γέφυρα πρέπει να έχει καθαρό πλάτος (λωρίδες κυκλοφορίας και λωρίδα έκτακτης ανάγκης) ίσο με 13.00 μέτρα.

Εξετάζονται δυο εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού της γέφυρας:

- Πυκνά μεσόβαθρα και κατασκευή του καταστρώματος με προκατασκευασμένες δοκούς και πλάκα συνεχείας.
- Λιγότερα μεσόβαθρα και κατασκευή του καταστρώματος με τη μέθοδο της συμμετρικής προβολοδόμησης.

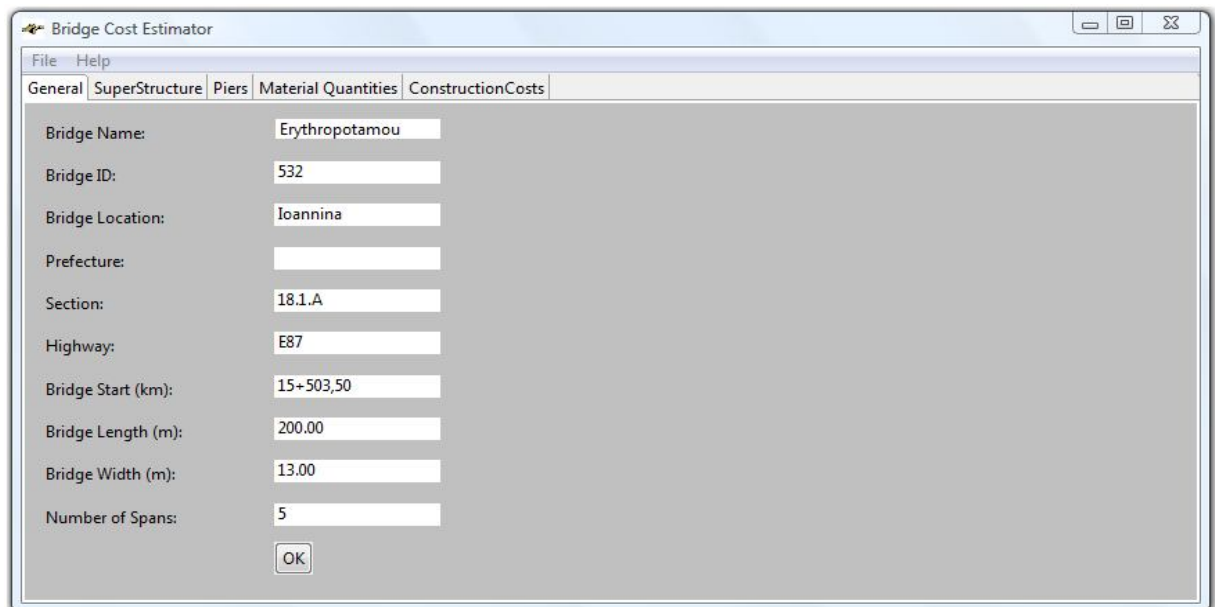
Ακολουθεί η παρουσίαση χρήσης του προτεινόμενου συστήματος για την εκτίμηση της δαπάνης κατασκευής των δυο γεφυρών και η σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων.

8.6.1 Γέφυρα με προκατασκευασμένες δοκούς και πλάκα συνεχείας

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.5.2, το εύρος των ανοιγμάτων κυμαίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις γεφυρών με προκατασκευασμένες δοκούς και πλάκα συνεχείας μεταξύ 25.00 και 40.00 μέτρων. Ως εκ τούτου, το τεχνικό έργο του παραδείγματος εφαρμογής έχει συνολικό μήκος 200.00 μέτρα, πλάτος 13.00 μέτρα και 5 ανοίγματα ίσου μήκους 40.00 μέτρων. Το κατάστρωμα αποτελείται από προκατασκευασμένες προεντεταμένες απλά εδραζόμενες δοκούς που τοποθετούνται με γερανοδικτύωμα και πλάκα συνεχείας από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η εισαγωγή των δεδομένων περιλαμβάνει τρία στάδια:

- Ο χρήστης εισάγει αρχικά τις γενικές πληροφορίες για τη γέφυρα.
- Οδηγείται από την εφαρμογή να συμπληρώσει το μήκος κάθε ανοίγματος και να επιλέξει τη μέθοδο κατασκευής από αυτόματη λίστα επιλογών.
- Το τελικό στάδιο απαιτεί τις πληροφορίες κάθε μεσοβάθρου. Ο χρήστης εισάγει το ύψος του βάθρου και είτε υποδεικνύει τον τύπο θεμελίωσης που θα εφαρμοστεί, είτε καθορίζει τον τύπο εδάφους και στη συνέχεια απαντά στα κριτήρια επιλογής προκειμένου να χρησιμοποιήσει το αυτοματοποιημένο έμπειρο σύστημα για την επιλογή του συστήματος θεμελίωσης.

Το Σχήμα 8-1 παρουσιάζει την εισαγωγή των γενικών πληροφοριών της γέφυρας του παραδείγματος, ενώ το Σχήμα 8-2 περιλαμβάνει τα στοιχεία της ανωδομής. Μόλις ο χρήστης συμπληρώσει τον αριθμό ανοιγμάτων στην αρχική οθόνη και προχωρήσει στο επόμενο βήμα με την επιλογή «OK», το σύστημα δημιουργεί αυτόματα την αντίστοιχη οθόνη της ανωδομής. Η επιλογή «COPY» της οθόνης ανωδομής επιτρέπει την άμεση επιλογή του ίδιου μήκους και συστήματος κατασκευής για όλα τα ανοίγματα. Το Σχήμα 8-3 παρουσιάζει την εισαγωγή στοιχείων των μεσοβάθρων του παραδείγματος. Το υπ' αριθμόν 1 μεσόβαθρο έχει ύψος 15.72 μέτρα και τύπο εδάφους I_{B1} . Δεδομένου ότι η θεμελίωση βρίσκεται σε απότομο πρανές, το σύστημα αυτόματα προτείνει χρήση φρέατος. Αναφορικά με το υπ' αριθμόν 3 μεσόβαθρο, η θεμελίωση εντός κοίτης ποταμού οδηγεί στη χρήση πασσάλων.



The screenshot shows the 'Bridge Cost Estimator' software window. The 'General' tab is selected, and the following fields are filled:

Field	Value
Bridge Name:	Erythropotamou
Bridge ID:	532
Bridge Location:	Ioannina
Prefecture:	
Section:	18.1.A
Highway:	E87
Bridge Start (km):	15+503,50
Bridge Length (m):	200.00
Bridge Width (m):	13.00
Number of Spans:	5

An 'OK' button is located at the bottom of the form.

Σχήμα 8-1: Οθόνη εισαγωγής γενικών δεδομένων για το πρώτο παράδειγμα έργου

	Span Length (in meters)	Span Construction Method
Span 1 :	40	Precast Beams
Span 2 :	40	Precast Beams
Span 3 :	40	Precast Beams
Span 4 :	40	Precast Beams
Span 5 :	40	Precast Beams

Copy

OK

Σχήμα 8-2: Οθόνη εισαγωγής δεδομένων ανωδομής για το πρώτο παράδειγμα έργου

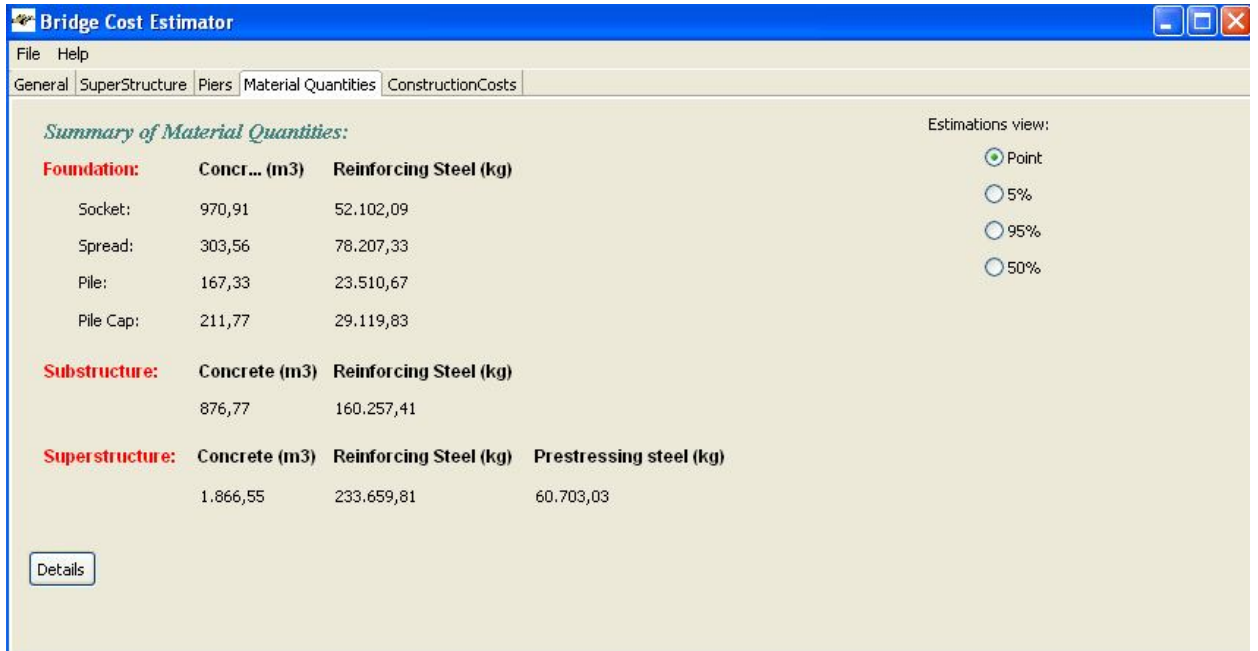
	Pier Height (in meters)	Pier Ground Type	Pier Steep Slopes	Pier River Bed	Pier Foundation Type	Auto Select Pier Foundation Type
Pier 1 :	15.72	IB1	Yes		Socket	Auto
Pier 2 :	32.18	IB1	No	No	Spread	Auto
Pier 3 :	30.29	IB1	No	Yes	Pile	Auto
Pier 4 :	17.44	IB1	Yes		Socket	Auto

OK

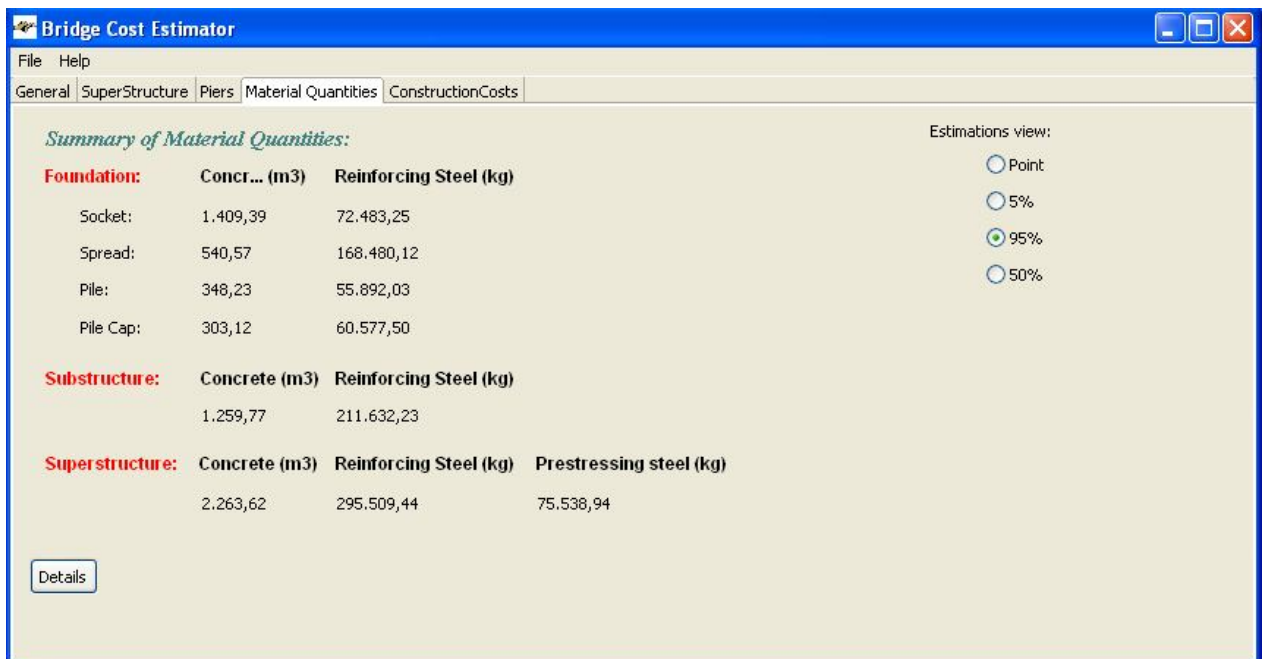
Σχήμα 8-3: Οθόνη εισαγωγής δεδομένων μεσοβάθρων για το πρώτο παράδειγμα έργου

Μετά την ολοκλήρωση εισαγωγής δεδομένων, το σύστημα παρουσιάζει τις ποσότητες εργασιών αθροιστικά για κάθε τύπο θεμελίωσης, την υποδομή και την ανωδομή της γέφυρας (Σχήμα 8-4). Τα κουτιά επιλογών (check boxes) επιτρέπουν την εξέταση του 5^{ου}, 95^{ου} και 50^{ου} εκατοστημορίου (τιμές 5%, 95% και 50% αντίστοιχα) για τις εκτιμήσεις ποσοτήτων εργασιών. Το Σχήμα 8-5 παρουσιάζει τις τιμές του 95^{ου} εκατοστημορίου των ποσοτήτων εργασιών. Η επιλογή «details» (λεπτομέρειες) εξάγει αρχείο κειμένου με τις εκτιμήσεις ποσοτήτων εργασιών για όλα τα τμήματα της γέφυρας ξεχωριστά και τα αντίστοιχα παραμετρικά εύρη. Ο χρήστης αρχικά επιλέγει το όνομα του αρχείου που θα δημιουργηθεί και το τμήμα στον προσωπικό του υπολογιστή στο οποίο θα αποθηκευτεί (Σχήμα 8-6). Το αρχείο κειμένου που δημιουργήθηκε από την εφαρμογή για το παράδειγμα περιλαμβάνεται στο παράρτημα III.

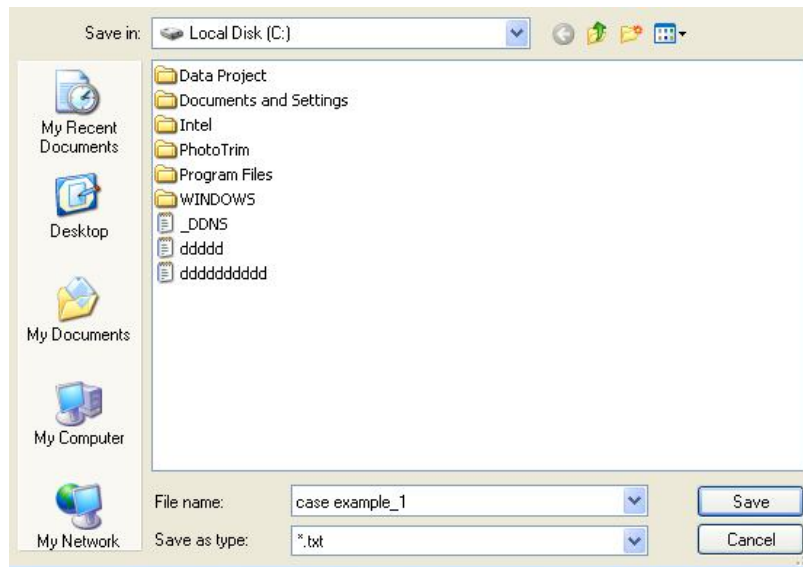
Η τελική οθόνη (Σχήμα 8-7) προτρέπει το χρήστη να εισάγει τις τιμές μονάδας δαπάνης εργασιών. Οι τιμές του παραδείγματος βασίστηκαν στο επικαιροποιημένο ενιαίο τιμολόγιο έργων οδοποιίας που δημοσιεύθηκε στο υπ' αριθμόν 918 Φύλλο Εφημερίδας Κυβερνήσεως τεύχος Β έτους 2008. Μετά την εισαγωγή τους (Σχήμα 8-8), η επιλογή «Recalculate Costs» παράγει την επιμέρους κατανομή της συνολικής δαπάνης κατασκευής της γέφυρας σε χωματουργικές εργασίες, θεμελιώσεις, υποδομή, ανωδομή και εξοπλισμός (Earthworks, Foundations, SubStructure, SuperStructure, Accessories αντίστοιχα). Τα κουτιά επιλογών (check boxes) 5%, 95% και 50% και η επιλογή «Details» έχουν παρόμοιες λειτουργίες με την οθόνη αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών. Το Σχήμα 8-9 παρουσιάζει τη συνολική δαπάνη κατασκευής της γέφυρας του παραδείγματος, ενώ το Σχήμα 8-10 παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τις τιμές του 95^{ου} εκατοστημορίου.



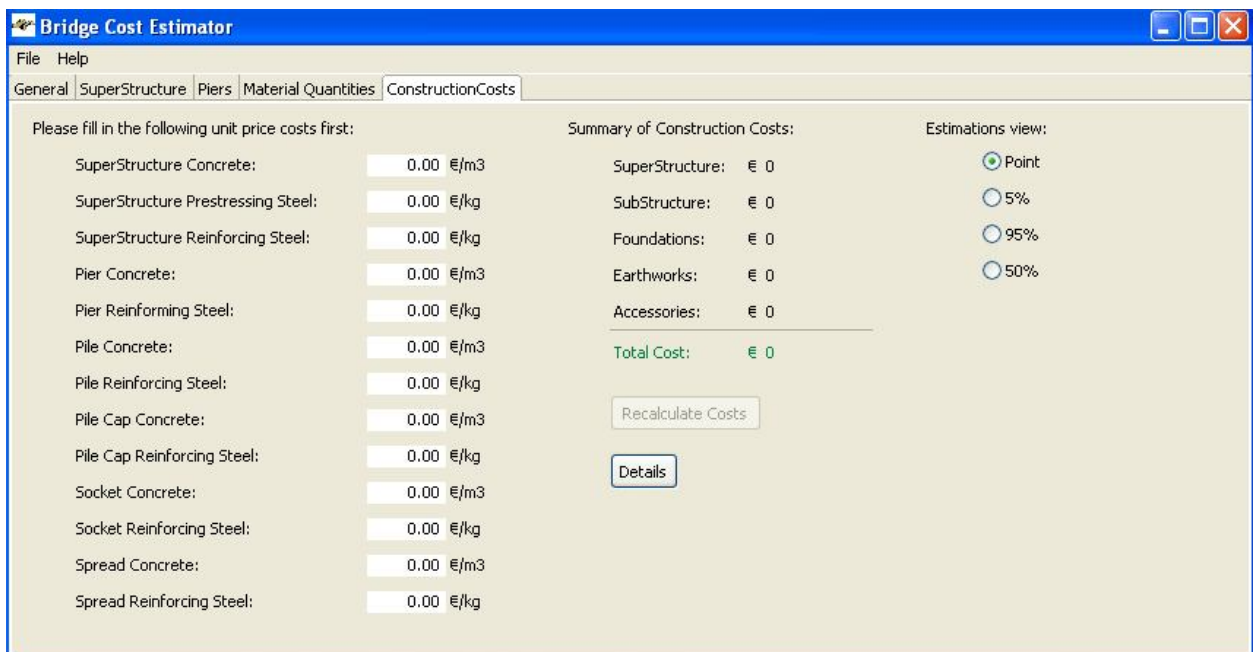
Σχήμα 8-4: Οθόνη αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών πρώτου παραδείγματος έργου



Σχήμα 8-5: Οθόνη αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών πρώτου παραδείγματος έργου (τιμές 95^{ου} εκατοστημορίου)



Σχήμα 8-6: Αποθήκευση αρχείου αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών πρώτου παραδείγματος έργου



Σχήμα 8-7: Τελική οθόνη εισαγωγής τιμών μονάδας και υπολογισμού δαπάνης

Bridge Cost Estimator

File Help

General SuperStructure Piers Material Quantities ConstructionCosts

Please fill in the following unit price costs first:

SuperStructure Concrete:	208.00 €/m3
SuperStructure Prestressing Steel:	3.80 €/kg
SuperStructure Reinforcing Steel:	1.00 €/kg
Pier Concrete:	170.00 €/m3
Pier Reinforcing Steel:	1.00 €/kg
Pile Concrete:	106.80 €/m3
Pile Reinforcing Steel:	1.00 €/kg
Pile Cap Concrete:	106.80 €/m3
Pile Cap Reinforcing Steel:	1.00 €/kg
Socket Concrete:	78.00 €/m3
Socket Reinforcing Steel:	1.00 €/kg
Spread Concrete:	106.80 €/m3
Spread Reinforcing Steel:	1.00 €/kg

Summary of Construction Costs:

SuperStructure:	€ 0
SubStructure:	€ 0
Foundations:	€ 0
Earthworks:	€ 0
Accessories:	€ 0
Total Cost:	€ 0

Estimations view:

Point

5%

95%

50%

Recalculate Costs

Details

Σχήμα 8-8: Εισαγωγή τιμών μονάδας δαπάνης πρώτου παραδείγματος έργου

Bridge Cost Estimator

File Help

General SuperStructure Piers Material Quantities ConstructionCosts

Please fill in the following unit price costs first:

SuperStructure Concrete:	208.00 €/m3
SuperStructure Prestressing Steel:	3.80 €/kg
SuperStructure Reinforcing Steel:	1.00 €/kg
Pier Concrete:	170.00 €/m3
Pier Reinforcing Steel:	1.00 €/kg
Pile Concrete:	106.80 €/m3
Pile Reinforcing Steel:	1.00 €/kg
Pile Cap Concrete:	106.80 €/m3
Pile Cap Reinforcing Steel:	1.00 €/kg
Socket Concrete:	78.00 €/m3
Socket Reinforcing Steel:	1.00 €/kg
Spread Concrete:	106.80 €/m3
Spread Reinforcing Steel:	1.00 €/kg

Summary of Construction Costs:

SuperStructure:	€ 852,565
SubStructure:	€ 309,305
Foundations:	€ 331,574
Earthworks:	€ 58,356
Accessories:	€ 347,597
Total Cost:	€ 1,899,397

Estimations view:

Point

5%

95%

50%

Recalculate Costs

Details

Σχήμα 8-9: Αποτελέσματα τιμών δαπάνης πρώτου παραδείγματος έργου

Please fill in the following unit price costs first:		Summary of Construction Costs:		Estimations view:	
SuperStructure Concrete:	208.00 €/m3	SuperStructure:	€ 1,053,380	<input type="radio"/>	Point
SuperStructure Prestressing Steel:	3.80 €/kg	SubStructure:	€ 425,790	<input type="radio"/>	5%
SuperStructure Reinforcing Steel:	1.00 €/kg	Foundations:	€ 594,658	<input checked="" type="radio"/>	95%
Pier Concrete:	170.00 €/m3	Earthworks:	€ 104,658	<input type="radio"/>	50%
Pier Reinforcing Steel:	1.00 €/kg	Accessories:	€ 347,597		
Pile Concrete:	106.8 €/m3	Total Cost:	€ 2,526,083		
Pile Reinforcing Steel:	1.00 €/kg				
Pile Cap Concrete:	106.8 €/m3				
Pile Cap Reinforcing Steel:	1.00 €/kg				
Socket Concrete:	78.00 €/m3				
Socket Reinforcing Steel:	1.00 €/kg				
Spread Concrete:	106.8 €/m3				
Spread Reinforcing Steel:	1.00 €/kg				

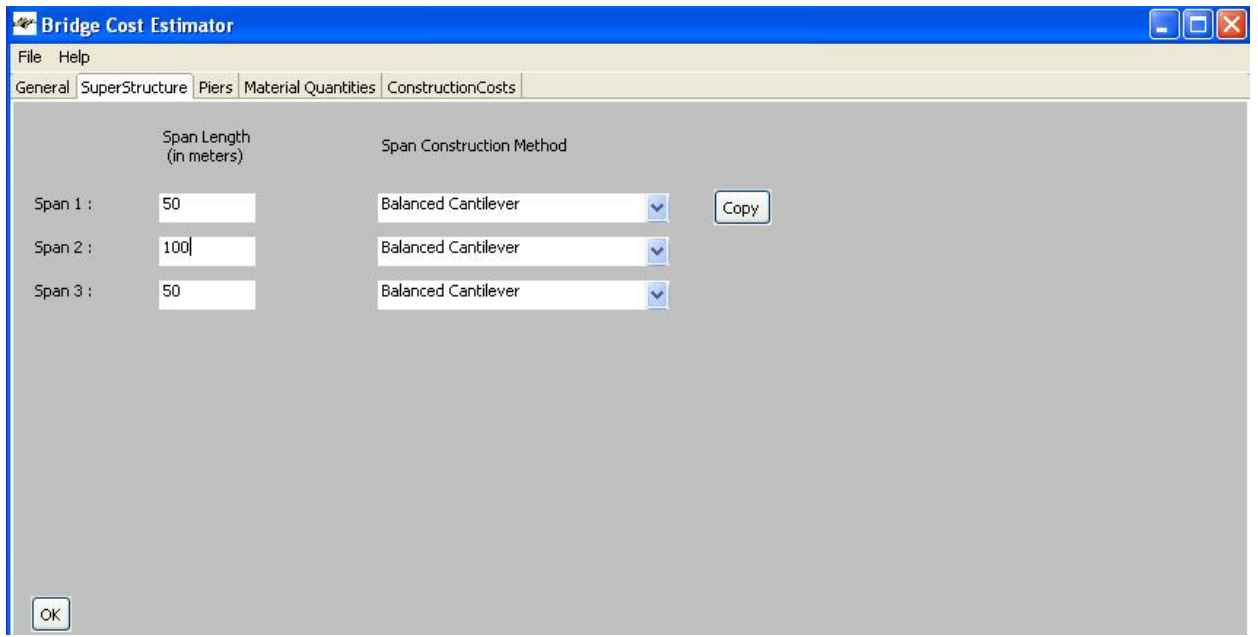
Σχήμα 8-10: Αποτελέσματα τιμών δαπάνης πρώτου παραδείγματος έργου (τιμές 95^{ου} εκατοστημορίου)

8.6.2 Γέφυρα με προβολοδόμηση

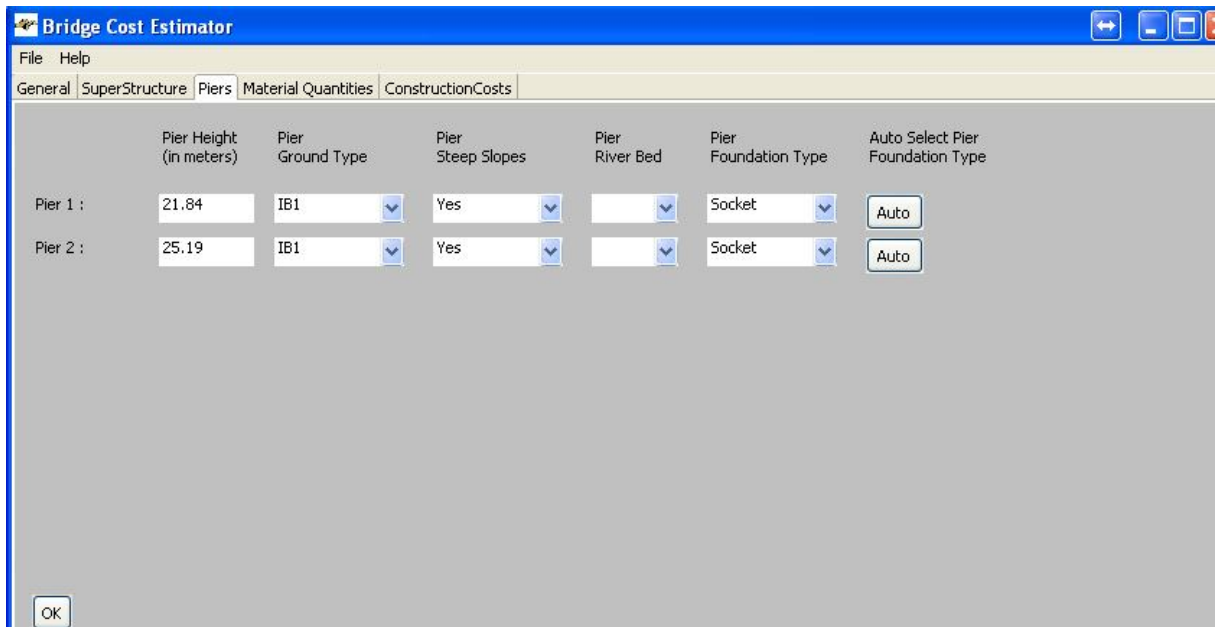
Η δεύτερη εναλλακτική επιλογή τεχνικού έργου περιλαμβάνει ανέγερση δυο μεσοβάθρων και κατασκευή της ανωδομής με τη μέθοδο της συμμετρικής προβολοδόμησης. Η γέφυρα έχει συνολικό μήκος 200.00 μέτρα, πλάτος 13.00 μέτρων και τρία ανοίγματα μήκους 50.00, 100.00 και 50.00 μέτρων αντίστοιχα.

Η εισαγωγή των γενικών δεδομένων της γέφυρας είναι ίδια με την πρώτη εναλλακτική λύση τεχνικού έργου που εξετάστηκε (Σχήμα 8-1). Τα Σχήματα 8-11 και 8-12 παρουσιάζουν την εισαγωγή δεδομένων ανωδομής και μεσοβάθρων αντίστοιχα. Τα μεσόβαθρα του παραδείγματος βρίσκονται σε απότομο πρηνές και ο τύπος εδάφους ορίζεται ως I_{B1}. Ως εκ τούτου, το σύστημα αυτόματα προτείνει χρήση φρεάτων για τη θεμελίωσή τους.

Οι ποσότητες εργασιών αθροιστικά για τη θεμελίωση, υποδομή και ανωδομή της γέφυρας παρουσιάζονται στο Σχήμα 8-13. Το Σχήμα 8-14 εμφανίζει τις αντίστοιχες τιμές του 95^{ου} εκατοστημορίου των ποσοτήτων εργασιών.



Σχήμα 8-11: Οθόνη εισαγωγής δεδομένων ανωδομής δεύτερου παραδείγματος έργου



Σχήμα 8-12: Οθόνη εισαγωγής δεδομένων μεσοβάθρων δεύτερου παραδείγματος έργου

Bridge Cost Estimator

File Help

General SuperStructure Piers Material Quantities ConstructionCosts

Summary of Material Quantities:

Estimations view:

- Point
- 5%
- 95%
- 50%

Foundation:	Concr... (m3)	Reinforcing Steel (kg)	
Socket:	1.589,78	91.675,61	
Spread:	,00	,00	
Pile:	,00	,00	
Pile Cap:	,00	,00	
Substructure:	Concrete (m3)	Reinforcing Steel (kg)	
	613,48	140.282,34	
Superstructure:	Concrete (m3)	Reinforcing Steel (kg)	Prestressing steel (kg)
	1.939,62	328.412,62	91.632,34

Details

Σχήμα 8-13: Ποσότητες εργασιών δεύτερου παραδείγματος έργου

Bridge Cost Estimator

File Help

General SuperStructure Piers Material Quantities ConstructionCosts

Summary of Material Quantities:

Estimations view:

- Point
- 5%
- 95%
- 50%

Foundation:	Concr... (m3)	Reinforcing Steel (kg)	
Socket:	2.141,32	116.669,48	
Spread:	,00	,00	
Pile:	,00	,00	
Pile Cap:	,00	,00	
Substructure:	Concrete (m3)	Reinforcing Steel (kg)	
	857,44	172.109,50	
Superstructure:	Concrete (m3)	Reinforcing Steel (kg)	Prestressing steel (kg)
	3.429,33	706.752,25	212.436,53

Details

Σχήμα 8-14: Ποσότητες εργασιών δεύτερου παραδείγματος έργου (τιμές 95^{ου} εκατοστημορίου)

Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει την εισαγωγή τιμών μονάδας δαπάνης και την εξαγωγή των αντίστοιχων αποτελεσμάτων (Σχήμα 8-15). Η κατανομή της δαπάνης κατασκευής (τιμές 95^{οο} εκατοστημορίου) παρουσιάζονται στο Σχήμα 8-16.

The screenshot shows the 'Bridge Cost Estimator' software interface. The 'ConstructionCosts' tab is active. On the left, there is a list of unit price costs with input fields. On the right, there is a 'Summary of Construction Costs' table and an 'Estimations view' section with radio buttons.

Please fill in the following unit price costs first:		Summary of Construction Costs:		Estimations view:	
SuperStructure Concrete:	407.00 €/m3	SuperStructure:	€ 1.466.038	<input checked="" type="radio"/> Point	
SuperStructure Prestressing Steel:	3.80 €/kg	SubStructure:	€ 244.573	<input type="radio"/> 5%	
SuperStructure Reinforcing Steel:	1.00 €/kg	Foundations:	€ 215.676	<input type="radio"/> 95%	
Pier Concrete:	170.00 €/m3	Earthworks:	€ 93.236	<input type="radio"/> 50%	
Pier Reinforcing Steel:	1.00 €/kg	Accessories:	€ 161.358		
Socket Concrete:	78.00 €/m3	Total Cost:	€ 2.180.881		
Socket Reinforcing Steel:	1.00 €/kg				

Buttons: Recalculate Costs, Details

Σχήμα 8-15: Τιμές μονάδας και αποτελέσματα δαπάνης δεύτερου παραδείγματος έργου

The screenshot shows the 'Bridge Cost Estimator' software interface. The 'ConstructionCosts' tab is active. On the left, there is a list of unit price costs with input fields. On the right, there is a 'Summary of Construction Costs' table and an 'Estimations view' section with radio buttons.

Please fill in the following unit price costs first:		Summary of Construction Costs:		Estimations view:	
SuperStructure Concrete:	407.00 €/m3	SuperStructure:	€ 2.909.746	<input type="radio"/> Point	
SuperStructure Prestressing Steel:	3.80 €/kg	SubStructure:	€ 317.874	<input type="radio"/> 5%	
SuperStructure Reinforcing Steel:	1.00 €/kg	Foundations:	€ 283.690	<input checked="" type="radio"/> 95%	
Pier Concrete:	170.00 €/m3	Earthworks:	€ 122.638	<input type="radio"/> 50%	
Pier Reinforcing Steel:	1.00 €/kg	Accessories:	€ 161.358		
Socket Concrete:	78.00 €/m3	Total Cost:	€ 3.795.306		
Socket Reinforcing Steel:	1.00 €/kg				

Buttons: Recalculate Costs, Details

Σχήμα 8-16: Αποτελέσματα δαπάνης δεύτερου παραδείγματος έργου (τιμές 95^{οο} εκατοστημορίου)

8.6.3 Σύγκριση εναλλακτικών λύσεων

Η εναλλακτική επιλογή της γέφυρας με προβολοδόμηση είναι περισσότερο δαπανηρή σε σχέση με τη λύση των προκατασκευασμένων δοκών. Παρουσιάζει υψηλότερη δαπάνη ανωδομής, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης κατανάλωσης χάλυβα οπλισμού και προέντασης. Εμφανίζει, όμως, χαμηλότερη δαπάνη υποδομής και θεμελιώσεων λόγω του μικρότερου αριθμού μεσοβάθρων, καθώς και μικρότερη δαπάνη εξοπλισμού.

Τα παραπάνω συμπεράσματα από τη σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων είναι συμβατά με την ποσοστιαία κατανομή συνολικής δαπάνης κατασκευής γεφυρών των Fragkakis και Lambropoulos (2004) του Πίνακα 3-6.

8.7 Συμπεράσματα

Το προτεινόμενο σύστημα προσφέρει γρήγορες και αξιόπιστες εκτιμήσεις δαπάνης οδικών γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα. Παρέχει εναλλακτικές επιλογές συστημάτων θεμελίωσης, τύπων καταστρώματος και μεθόδων κατασκευής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων του έργου. Το σύστημα χρησιμοποιεί μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών ανωδομής, μεσοβάθρων και θεμελιώσεων. Επιτρέπει συγκριτικές μελέτες από τεχνική και οικονομική πλευρά μεταξύ των διαφορετικών εναλλακτικών λύσεων στην αρχή του κύκλου ζωής του έργου όταν περιορισμένες πληροφορίες είναι γνωστές. Ως εκ τούτου, αποτελεί χρήσιμο εργαλείο λήψης αποφάσεων για τον μελετητή, τον ΚτΕ και τον ανάδοχο.

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9.1 Σύνοψη συμπερασμάτων προηγούμενων κεφαλαίων

Κατά την επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας διαπιστώθηκε ότι έχουν δημοσιευθεί γενικά πολύ λίγες εργασίες που αναφέρονται στην εκτίμηση της δαπάνης οδικών γεφυρών. Επιπρόσθετα, οι ερευνητικές μελέτες που χρησιμοποιούν πραγματικά κατασκευαστικά και οικονομικά στοιχεία είναι πολύ περιορισμένες. Οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες, είτε αναφέρονται στον προκαταρκτικό σχεδιασμό των γεφυρών με θεωρητικούς κανόνες, είτε εκτελούν με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή διαδικασία δοκιμών με επαναλαμβανόμενες θεωρητικές επιλύσεις, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο τελικός σχεδιασμός από τεχνικής και οικονομικής πλευράς. Οι συγκεκριμένες εκτιμήσεις, όμως, βασίζονται σε θεωρητικές επιλύσεις μαθηματικών αλγορίθμων από κανόνες σχεδιασμού γεφυρών και δεν μπορούν να αποτυπώσουν πλήρως όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τον τελικό σχεδιασμό και τη δαπάνη κατασκευής των έργων. Δεν εξετάζουν τις απρόβλεπτες καταστάσεις και συνθήκες που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια κατασκευής και επιδρούν σημαντικά στην τελική δαπάνη και το σχεδιασμό.

Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνητικών μελετών της διεθνούς βιβλιογραφίας που αναφέρονται στην εκτίμηση της δαπάνης οδικών γεφυρών βασίζεται στους κανόνες σχεδιασμού γεφυρών των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής και του Καναδά και δεν καλύπτει όλα τα τμήματα του έργου από τη θεμελίωση έως την ανωδομή. Οι περισσότεροι μελετητές εστιάζουν σε εκτιμήσεις δαπάνης και ποσοτήτων εργασιών της ανωδομής, προκειμένου να εξαλειφθούν οι εξαρτώμενοι από τη θέση του έργου παράγοντες, όπως οι εδαφικές και υδρολογικές συνθήκες, τα απότομα πρανή, η εγγύτητα σε ενεργά ρήγματα, οι μετατοπίσεις του εδάφους και οι υδάτινες ροές.

Με βάση τα παραπάνω, είναι σαφές ότι έχουν δημοσιευθεί στη διεθνή βιβλιογραφία ελάχιστες εργασίες που αναφέρονται στην εκτίμηση της δαπάνης οδικών γεφυρών, βασίζονται σε πραγματικά στοιχεία από κατασκευασμένα έργα και καλύπτουν όλα τα τμήματα του έργου από τη θεμελίωση έως την ανωδομή. Επομένως, υφίσταται κενό στην επιστήμη και απαιτείται περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο τομέα.

Ως πρώτη προσέγγιση της προεκτίμησης της δαπάνης οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα, στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής εργασίας συλλέχθηκαν πραγματικά στοιχεία δαπάνης από οδικές γέφυρες της Εγνατίας Οδού. Η στατιστική επεξεργασία των οικονομικών στοιχείων οδήγησε σε εκτιμήσεις της μέσης δαπάνης κατασκευής ανά μονάδα επιφάνειας καταστρώματος

για τις κυριότερες κατασκευαστικές μεθόδους που εφαρμόζονται στην Ελλάδα (συμβατική κατασκευή, προβολοδόμηση και προκατασκευασμένες δοκούς) καθώς και για άνω διαβάσεις. Η ανάλυση κατέληξε, επίσης, στην ποσοστιαία κατανομή της συνολικής δαπάνης σε χωματουργικά, θεμελίωση, υποδομή, ανωδομή και εξοπλισμό. Τα χωματουργικά αναφέρονται στις απαιτούμενες εργασίες εκσκαφών και επιχώσεων για τη διαμόρφωση των προσβάσεων στο εργοτάξιο και την κατασκευή των θεμελίωσεων των βάθρων. Η θεμελίωση αναφέρεται στην κατασκευή φρεάτων, πασσάλων ή πεδύλων για τη μεταφορά των φορτίων από τα ακρόβαθρα και τα μεσόβαθρα στο έδαφος. Η υποδομή και η ανωδομή αναφέρεται στην κατασκευή των βάθρων και του καταστρώματος αντίστοιχα, ενώ ο εξοπλισμός περιλαμβάνει τα εφέδρανα, τους αρμούς διαστολής, το σύστημα αποχέτευσης, τα κιγκλιδώματα, το σύστημα προστασίας του καταστρώματος από το νερό και τα στηθαία ασφαλείας. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας προσφέρουν προκαταρκτικές εκτιμήσεις δαπάνης οδικών γεφυρών που βασίζονται στην κατασκευαστική εμπειρία και στο σύστημα κατασκευής έργων που εφαρμόζεται στην Ελλάδα.

Η κοινή πρακτική δημοπράτησης δημοσίων έργων υποδομής στην Ελλάδα περιλαμβάνει την ανάπτυξη προμετρήσεων ποσοτήτων εργασιών και την εξαγωγή του συμβατικού προϋπολογισμού του έργου χρησιμοποιώντας επίσημες τιμές μονάδας εργασιών από το Ενιαίο Τιμολόγιο Έργων Οδοποιίας Δημοσίων Έργων. Ως εκ τούτου, το προτεινόμενο σύστημα εκτίμησης δαπάνης οδικών γεφυρών βασίστηκε στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης ποσοτήτων εργασιών, από τα οποία ο χρήστης εξάγει εκτιμήσεις δαπάνης χρησιμοποιώντας κατάλληλες τιμές μονάδας εργασιών. Η ανάπτυξη των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με στατιστική επεξεργασία των πραγματικών κατασκευαστικών στοιχείων που συλλέχθηκαν από τις γέφυρες της Εγνατίας Οδού. Δεδομένου ότι η ανάλυση παλινδρόμησης είναι μια από τις πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες στατιστικές τεχνικές για την εξέταση της σχέσης μεταξύ μεταβλητών και ότι παραμετρικά μοντέλα εκτίμησης κόστους με παλινδρόμηση έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία από αρκετούς ερευνητές, αποφασίστηκε η χρησιμοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου για την ανάπτυξη των μοντέλων πρόβλεψης ποσοτήτων εργασιών. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία, όμως, περιλαμβάνει αρκετές προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για την ορθή εφαρμογή και την εγκυρότητά της. Ως εκ τούτου, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση κατά την εφαρμογή της μεθόδου στον έλεγχο των βασικών υποθέσεων ώστε να επιβεβαιώνεται η ισχύ των προτεινόμενων μοντέλων.

Το πρώτο στάδιο της ανάλυσης παλινδρόμησης είναι ο καθορισμός των ανεξάρτητων μεταβλητών. Όσον αφορά στην ανωδομή και τα μεσόβαθρα γεφυρών, οι γενικές παράμετροι που επηρεάζουν τον σχεδιασμό τους προσδιορίστηκαν κατόπιν έρευνας βιβλιογραφίας και συνεντεύξεων με εμπειρογνώμονες. Στη συνέχεια περιορίστηκαν στον αριθμό τους, ώστε να

περιλαμβάνουν μόνο εκείνες που είναι γνωστές κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών σταδίων του σχεδιασμού του έργου. Το μήκος κάθε ανοίγματος ή προβόλου της γέφυρας και το πλάτος του καταστρώματος αποτέλεσαν τις ανεξάρτητες μεταβλητές για την ανωδομή. Το μήκος και πλάτος του καταστρώματος που υποστηρίζεται από το μεσόβαθρο και το ύψος του μεσοβάθρου χρησιμοποιήθηκαν για τα μεσόβαθρα. Μοντέλα πρόβλεψης των ποσοτήτων εργασιών των μεσοβάθρων και της ανωδομής για τρεις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους κατασκευής γεφυρών αναπτύχθηκαν με χρήση απλής γραμμικής ανάλυσης παλινδρόμησης. Οι βασικές υποθέσεις της ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης εξετάστηκαν και επιβεβαιώθηκε η εγκυρότητα των προτεινόμενων μοντέλων. Τεχνική επικύρωσης με 10 μέρη εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση της απόδοσης πρόβλεψης των μοντέλων της ανωδομής. Η μεθοδολογία αυτή ανέδειξε ότι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν προσφέρουν εκτιμήσεις ποσοτήτων εργασιών ανωδομής και δαπάνης που αποκλίνουν λιγότερο από 20% από τα αντίστοιχα πραγματικά μεγέθη. Η μέθοδος αναδιάταξης δείγματος bootstrap χρησιμοποιήθηκε για να παραχθούν εύρη εκτιμήσεων των συντελεστών παλινδρόμησης και της δαπάνης ανωδομής.

Η δημιουργία του μοντέλου εκτίμησης δαπάνης θεμελιώσεων γεφυρών εμφάνιζε όμως πρόσθετες δυσκολίες καθώς:

- Χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον τρεις διαφορετικοί τύποι θεμελιώσεων (φρέατα, πάσσαλοι και επιφανειακή θεμελίωση).
- Η επιλογή του κατάλληλου τύπου θεμελίωσης δεν εξαρτάται μόνο από τις εδαφικές συνθήκες. Αποτελεί σύνθετη διαδικασία, στην οποία ο μελετητής λαμβάνει υπόψη αρκετές διαφορετικές παραμέτρους όπως τις συνθήκες στο εργοτάξιο, τη μορφολογία εδάφους και τα απαιτούμενα γεωτεχνικά έργα για τη σταθεροποίηση πρανών, τη διαθεσιμότητα εξοπλισμού και τις κατασκευαστικές δυσκολίες.
- Η μεγάλη ποικιλία γεωλογικών συνθηκών καθιστά αδύνατη την ακριβή πρόβλεψη των εδαφικών χαρακτηριστικών στις θέσεις θεμελίωσης πριν την εκτέλεση λεπτομερών γεωλογικών και γεωτεχνικών μελετών.
- Δεδομένου ότι το μοντέλο εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών και δαπάνης αναφέρεται στα προκαταρκτικά στάδια του έργου στα οποία τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περιορισμένα, κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη συστήματος ταξινόμησης εδαφών, το οποίο θα χρησιμοποιεί πληροφορίες γνωστές κατά τα αρχικά στάδια σχεδιασμού.

Σε πρώτη φάση προτάθηκε σύστημα ταξινόμησης εδαφών, το οποίο είναι εύκολο να εφαρμοστεί στις προκαταρκτικές φάσεις του έργου. Αναπτύχθηκε στη συνέχεια έμπειρο

σύστημα, το οποίο σε συνδυασμό με την ταξινόμηση εδαφών, επιτρέπει την επιλογή του κατάλληλου τύπου θεμελίωσης. Το έμπειρο σύστημα λαμβάνει υπόψη παράγοντες εξαρτώμενους από την τοποθεσία της γέφυρας. Βασίζεται στον τύπο εδάφους και σε κριτήρια επιλογής, τα οποία εμπεριέχουν την προηγούμενη κατασκευαστική εμπειρία και τη γνώση ειδικών γεωτεχνικών μηχανικών και μελετητών γεφυρών.

Συνεντεύξεις με ειδικούς και εμπειρογνώμονες μελέτης και κατασκευής γεφυρών οδήγησαν στον προσδιορισμό των σημαντικών μεταβλητών για κάθε τύπο θεμελίωσης. Αντί να εφαρμοστούν άμεσα συγκεκριμένα μοντέλα παλινδρόμησης βασισμένα στην άποψη των ειδικών και να εξαχθούν τα μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της σταδιακής παλινδρόμησης με προς τα πίσω απαλοιφή, ώστε να εξεταστεί η συμφωνία των αποτελεσμάτων με την άποψη των εμπειρογνομόνων. Η στατιστική ανάλυση οδήγησε σε μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού για τους κυριότερους τύπους θεμελίωσης. Η προσαρμογή των μοντέλων στα δεδομένα κρίθηκε ικανοποιητική. Εξετάστηκαν, τέλος, οι βασικές υποθέσεις της ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης και επιβεβαιώθηκε η ισχύ των προτεινόμενων μοντέλων.

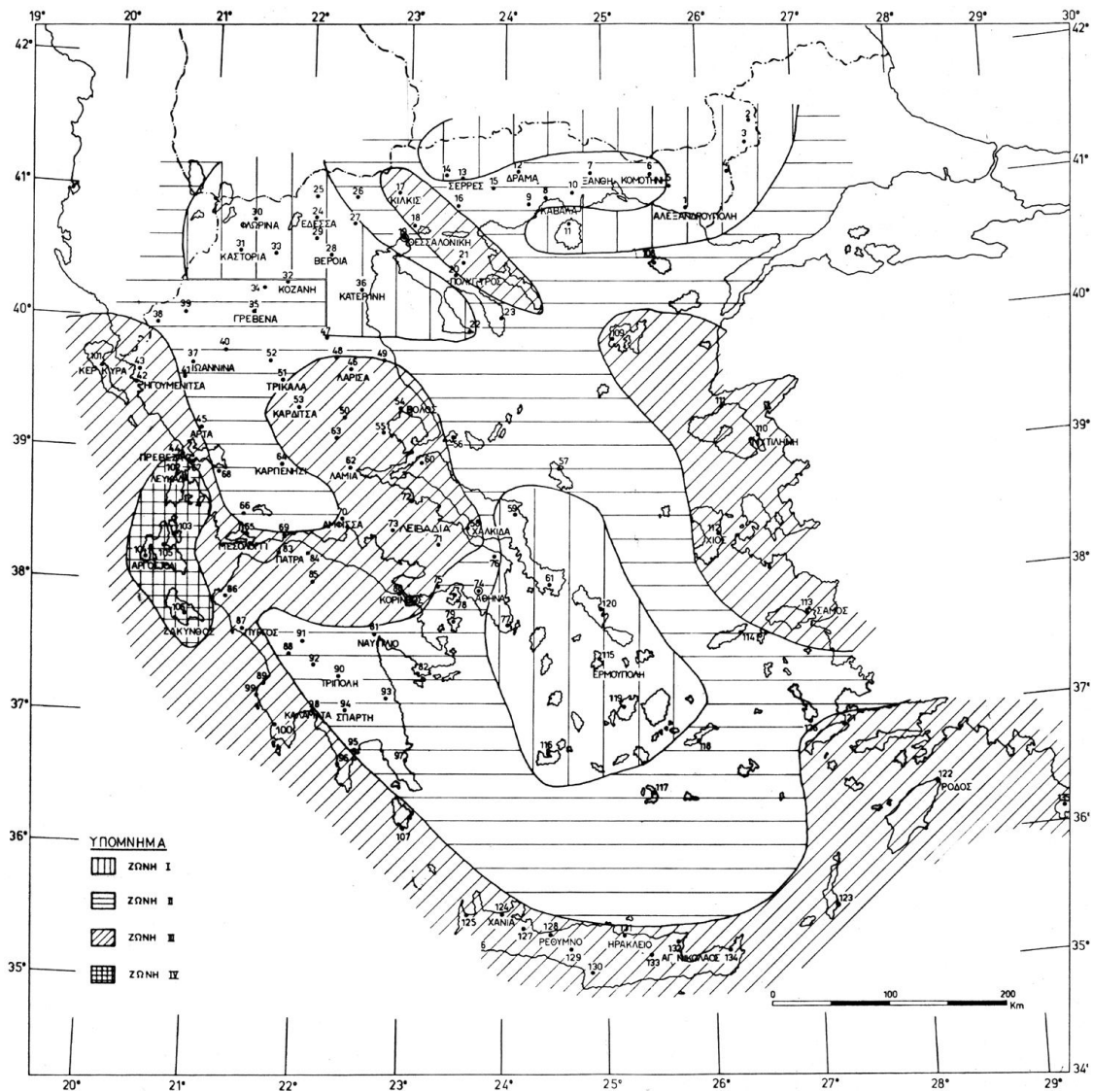
Στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής εργασίας δεν απατύχθηκαν μοντέλα εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών των ακροβάθρων. Επιπρόσθετα από τη μετάδοση των κάθετων και οριζόντιων δυνάμεων από το κατάστρωμα της γέφυρας στο έδαφος (Ryall et al. 2000), τα ακρόβαθρα αποτελούν το όριο μεταξύ της γέφυρας και του δρόμου πρόσβασης και λειτουργούν ως τοίχος αντιστήριξης (Chen and Duan 1999). Παράλληλα, οι πτερυγότοιχοι αποτρέπουν το υποστηριζόμενο έδαφος που βρίσκεται πίσω από το ακρόβαθρο να μετατοπιστεί εγκάρσια και αντιμετωπίζουν την ώθηση των γαιών. Η μελέτη της μορφής των ακροβάθρων εξαρτάται κυρίως από τις τοπικές συνθήκες του έργου. Για το λόγο αυτό παρατηρείται μεγάλη ποικιλία στο σχεδιασμό τους, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις οι μελετητές γεφυρών επιλέγουν την κατασκευή ενιαίου ακροβάθρου και για τους δυο ανεξάρτητους κλάδους της γέφυρας αντί για δυο ξεχωριστά ακρόβαθρα, όπως παρουσιάζεται στο σχέδιο 19 του παραρτήματος IV. Οι πτερυγότοιχοι παρουσιάζουν επίσης μεγάλη ποικιλία μορφών, καθώς η αντιμετώπιση της ώθησης των γαιών δύναται να πραγματοποιηθεί με διάφορους εναλλακτικούς τρόπους ανάλογα και με την αισθητική που επιθυμεί ο μελετητής να διαμορφώσει. Σε αρκετές περιπτώσεις κατασκευάζονται μεγάλοι τοίχοι αντιστήριξης για την υποστήριξη του εδάφους που αντικαθιστούν τον κοινό πτερυγότοιχο σε πρόβολο από το ακρόβαθρο. Τα σχέδια 13-19 του παραρτήματος IV παρουσιάζουν χαρακτηριστικές μορφές ακροβάθρων γεφυρών της Εγνατίας Οδού και αναδεικνύουν τη μεγάλη ποικιλία στο σχεδιασμό τους. Συνοψίζοντας, η τυποποίηση της

διαδικασίας μελέτης των ακροβάθρων και των παραγόντων που καθορίζουν το σχεδιασμό τους είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Δεδομένου ότι η παρούσα ερευνητική εργασία αναφέρεται σε εκτιμήσεις δαπάνης στα προκαταρκτικά στάδια μελέτης των έργων στα οποία τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περιορισμένα, κρίθηκε σκόπιμο να μην αναπτυχθούν μοντέλα πρόβλεψης των ποσοτήτων εργασιών των ακροβάθρων.

Τα μοντέλα πρόβλεψης των ποσοτήτων εργασιών που αναπτύχθηκαν δεν διαφοροποιήθηκαν με βάση τις σεισμικές παραμέτρους σχεδιασμού, καθώς οι γέφυρες της βάσης δεδομένων δεν επαρκούσαν για να αποτυπώσουν όλες τις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας που προβλέπει ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός. Μελετώντας το χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού 2000 του σχήματος 9-1 και λαμβάνοντας υπόψη τη χάραξη της Εγνατίας Οδού, διαπιστώνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος της Εγνατίας Οδού ανήκει στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού 2000. Δυο πολύ μικρά τμήματα του αυτοκινητοδρομού στην Ήπειρο και στην κεντρική Μακεδονία, στα οποία βρίσκονται κατ'εκτίμηση 16 γέφυρες διπλού κλάδου με μήκος μεγαλύτερο από 30 μέτρα, υπάγονται στη ζώνη III του αντισεισμικού κανονισμού. Ο αντίστοιχος αριθμός γεφυρών διπλού κλάδου της Εγνατίας Οδού της ζώνης I του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού 2000 εκτιμάται σε 8. Το μεγαλύτερο ποσοστό των γεφυρών της Εγνατίας Οδού μελετήθηκαν με βάση τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό 2000 και για το λόγο αυτό, παρουσιάζεται ο χάρτης του κανονισμού αυτού, μολονότι αναθεωρήθηκε το 2003. Ο Πίνακας 9-1 παρουσιάζει τον επιμερισμό των δειγμάτων δεδομένων της ανωδομής στις σεισμικές ζώνες του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού 2000. Συνοψίζοντας, είναι σαφές ότι τα διαθέσιμα δείγματα δεδομένων δεν ήταν επαρκή για να μελετηθεί σε βάθος η επίδραση της σεισμικότητας στα μοντέλα πρόβλεψης των ποσοτήτων εργασιών.

Πίνακας 9-1: Επιμερισμός δειγμάτων δεδομένων ανωδομής (ανοίγματα ή πρόβολοι) σε σεισμικές ζώνες

	Προκατ. Δοκοί	Επιτόπια σκυροδέτηση	Προβολοδόμηση
Ζώνη I	3	4	0
Ζώνη II	39	33	31
Ζώνη III	5	10	2
Ζώνη IV	0	0	0
Σύνολο	47	47	33



Σχήμα 9-1: Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό 2000

Τα μοντέλα εκτίμησης των ποσοτήτων εργασιών που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας χρησιμοποίησαν στοιχεία από όλες τις σεισμικές ζώνες, αλλά βασίστηκαν κατά μεγάλο ποσοστό σε δεδομένα από γέφυρες που ανήκουν στη ζώνη ΙΙ του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού 2000. Αναπτύχθηκαν και αντίστοιχα μοντέλα μόνο με τα δείγματα δεδομένων της ζώνης ΙΙ. Τα στατιστικά στοιχεία των μοντέλων αυτών συγκρίθηκαν με τα

αντίστοιχα των προτεινόμενων μοντέλων της παρούσας έρευνας και διαπιστώθηκαν πολύ μικρές αποκλίσεις.

Τα μοντέλα πρόβλεψης των ποσοτήτων εργασιών που αναπτύχθηκαν αποτέλεσαν τη βάση του ολοκληρωμένου συστήματος προκοστολόγησης οδικών γεφυρών. Ο προγραμματισμός του πραγματοποιήθηκε σε γλώσσα JAVA. Το προτεινόμενο σύστημα προσφέρει γρήγορες και αξιόπιστες εκτιμήσεις δαπάνης οδικών γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα και παρέχει εναλλακτικές επιλογές συστημάτων θεμελίωσης, τύπων καταστρώματος και μεθόδων κατασκευής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα για την παροχή διαφορετικών εκτιμήσεων στον Κύριο του Έργου, στο μελετητή της γέφυρας και στον ανάδοχο κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών σταδίων του έργου, στα οποία τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου του προγράμματος είναι γνωστά. Το σύστημα επιτρέπει συγκριτικές μελέτες, από τεχνική και οικονομική πλευρά, μεταξύ των διαφορετικών εναλλακτικών λύσεων στην αρχή του κύκλου ζωής του έργου, όταν περιορισμένες πληροφορίες είναι γνωστές.

9.2 Σπουδαιότητα και συμβολή της παρούσας έρευνας στην επιστήμη

Η εκτίμηση της δαπάνης ενός κατασκευαστικού έργου στα προκαταρκτικά στάδια σχεδιασμού πραγματοποιείται κυρίως με χρήση αξιόπιστων βάσεων δεδομένων με στοιχεία από αντίστοιχα προηγούμενα έργα. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να προσφέρουν άμεσα εκτιμήσεις δαπάνης με την κατάλληλη προσαρμογή τους ώστε να καταστούν συμβατά με τις συγκεκριμένες συνθήκες που εξετάζονται. Δύνανται, ακόμη, να αποτελέσουν αντικείμενο στατιστικής επεξεργασίας για την εξαγωγή μοντέλων πρόβλεψης ποσοτήτων εργασιών ή δαπάνης. Ωστόσο, εντοπίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία έλλειψη διαθέσιμων βάσεων δεδομένων οδικών γεφυρών με πραγματικά στοιχεία κατασκευής. Η δημιουργία βάσης δεδομένων γεφυρών με κατασκευαστικά στοιχεία είναι δύσκολο εγχείρημα που επιτείνεται από την απροθυμία των Κυρίων των Έργων και των δημόσιων οργανισμών να παρέχουν τις σχετικές πληροφορίες. Παράλληλα, η πρόοδος της τεχνολογίας κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πληθώρας σύγχρονων μηχανοποιημένων μεθόδων κατασκευής γεφυρών με διαφορετικές παραμέτρους κόστους και δαπάνης που εφαρμόζονται για παραπλήσια μήκη ανοιγμάτων και είναι ανταγωνιστικές μεταξύ τους. Ως εκ τούτου, έχει αυξηθεί σημαντικά η δυσκολία συλλογής στοιχείων από έργα που μελετώνται με παρόμοιες προδιαγραφές – κανονισμούς ώστε να δημιουργηθεί ομοιογενής βάση δεδομένων. Με βάση τα παραπάνω, εκτιμάται ότι υφίσταται σημαντική ανάγκη δημιουργίας βάσης δεδομένων οδικών γεφυρών με πραγματικά στοιχεία

κατασκευής. Η βάση δεδομένων πρέπει να καλύπτει τις κυριότερες σύγχρονες μεθόδους κατασκευής γεφυρών που εφαρμόζονται διεθνώς.

Είναι σημαντικό ότι στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας συγκεντρώθηκαν πραγματικά κατασκευαστικά στοιχεία από μεγάλο αριθμό οδικών γεφυρών. Τα στοιχεία αποθηκεύτηκαν σε ειδική βάση δεδομένων, ώστε να είναι δυνατή η αναζήτηση, η επεξεργασία και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αναφορές. Οι γέφυρες που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων κατασκευάστηκαν τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια με παρόμοιες προδιαγραφές και μελετήθηκαν με παρόμοιους κανονισμούς. Επομένως, η βάση δεδομένων είναι ομοιογενής και περιλαμβάνει αρκετές σύγχρονες κατασκευαστικές μεθόδους που εφαρμόζονται διεθνώς στη γεφυροποιία.

Η παρούσα έρευνα και η ανάπτυξη ολοκληρωμένου συστήματος προκοστολόγησης οδικών γεφυρών θεωρείται σημαντική λόγω της συνεχούς αύξησης της κατασκευής γεφυρών σε συνδυασμό με τις αξιόλογες υπερβάσεις του προϋπολογισμού δαπάνης που έχουν παρατηρηθεί. Κατά τον Flyvbjerg (2004;2007), η μέση υπέρβαση δαπάνης σε 33 έργα γεφυρών και σηράγγων ανήλθε σε 33.80%, ενώ πληθώρα εργασιών (Skamris και Flyvbjerg 1997; Azhar et al. 2008; Roxas και Chalermprong 2007) έχει αναδείξει ότι η υπέρβαση του αρχικού προϋπολογισμού δαπάνης κατασκευής ενός έργου υποδομής αποτελεί σύνηθες φαινόμενο παγκοσμίως. Η βελτίωση των οδικών υποδομών αποτελεί βασική πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης και αρκετών χωρών παγκοσμίως. Συνοδεύεται και από αυξημένες περιβαλλοντικές απαιτήσεις, με αποτέλεσμα την κατασκευή ολοένα και περισσότερων γεφυρών σε περιπτώσεις δύσκολου εδαφικού αναγλύφου. Δεδομένου ότι η κατασκευή γεφυρών έχει διαχρονικά παρουσιάσει σημαντικές υπερβάσεις του προϋπολογισμού δαπάνης, καθίσταται αναγκαία η αξιόπιστη εκτίμηση της δαπάνης κατασκευής στα άρχικα στάδια σχεδιασμού – σύλληψης του έργου.

Το αρνητικό οικονομικό περιβάλλον της εποχής μας δυσχεραίνει σημαντικά τη χρηματοδότηση έργων υποδομής από διεθνή χρηματοπιστωτικά ιδρύματα και οργανισμούς. Η κατασκευή γεφυρών εκτιμάται ότι απορροφά αξιόλογο ποσοστό των διαθέσιμων κρατικών κεφαλαίων των περισσότερων χωρών για προγράμματα υποδομών. Επομένως, καθίσταται περαιτέρω αναγκαία η εμπεριστατωμένη ανάλυση κόστους / ωφελειών και βιωσιμότητας των έργων και η σύγκριση εναλλακτικών μορφών σχεδιασμού στα προκαταρκτικά στάδια του έργου, ώστε να επιλέγεται η βέλτιστη λύση από τεχνικής και οικονομικής πλευράς. Η ανάπτυξη του ολοκληρωμένου συστήματος εκτίμησης δαπάνης οδικών γεφυρών είναι πολύτιμο εργαλείο για την επίτευξη του ανωτέρω στόχου.

Η συμβολή της παρούσας έρευνας στην επιστήμη πηγάζει και από τα αποτελέσματα της έρευνας βιβλιογραφίας. Η επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας αναδεικνύει τη δημοσίευση

ελάχιστων εργασιών που αναφέρονται στην εκτίμηση της δαπάνης οδικών γεφυρών και καλύπτουν όλα τα τμήματα του έργου από τη θεμελίωση έως την ανωδομή. Οι περισσότεροι ερευνητές θεωρούν ότι η υποδομή της γέφυρας εξαρτάται άμεσα από τις τοπικές συνθήκες, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η πρόβλεψη των κατασκευαστικών στοιχείων και της αντίστοιχης δαπάνης και να επικεντρώνονται μόνο στην ανωδομή. Οι δημοσιευμένες ερευνητικές μελέτες, εξάλλου, βασίζονται στις περισσότερες περιπτώσεις σε θεωρητικές επιλύσεις μαθηματικών αλγορίθμων από κανόνες σχεδιασμού γεφυρών, σε αντίθεση με την παρούσα έρευνα που χρησιμοποίησε πραγματικά στοιχεία από κατασκευασμένα έργα. Επομένως, είναι σαφές ότι παρατηρείται έλλειψη στη διεθνή βιβλιογραφία συστήματος εκτίμησης δαπάνης όλων των τμημάτων οδικών γεφυρών, το οποίο θα βασίζεται σε πραγματικά κατασκευαστικά στοιχεία και όχι σε θεωρητικούς κανόνες.

Συνοψίζοντας, το προτεινόμενο σύστημα προσφέρει γρήγορες και αξιόπιστες εκτιμήσεις δαπάνης οδικών γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα. Αποτελεί χρήσιμο εργαλείο λήψης αποφάσεων για τον μελετητή, τον Κύριο του Έργου και τον ανάδοχο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών σταδίων μελέτης του έργου.

9.3 Προτάσεις περαιτέρω έρευνας

Τα παρακάτω θέματα χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης ώστε να εμπλουτιστούν η βάση δεδομένων και το σύστημα προκοστολόγησης οδικών γεφυρών που αναπτύχθηκαν:

- Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης ποσοτήτων εργασιών με χρήση νευρωνικών δικτύων και σύγκριση των εξαγόμενων μοντέλων με τα αντίστοιχα που αναπτύχθηκαν με την ανάλυση παλινδρόμησης.
- Ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης ποσοτήτων εργασιών και δαπάνης ακροβάθρων και ενσωμάτωσή του στο σύστημα εκτίμησης δαπάνης.
- Επέκταση του δείγματος δεδομένων με γέφυρες που ανήκουν στις σεισμικές ζώνες I και III του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού 2000 και διερεύνηση της επίδρασης της σεισμικότητας της περιοχής του έργου στις ποσότητες εργασιών και στη δαπάνη οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα.
- Εμπλουτισμός της Βάσης Δεδομένων Οδικών Γεφυρών με μεταλλικές γέφυρες, καθώς και με γέφυρες από σκυρόδεμα που κατασκευάστηκαν με τις μεθόδους της σταδιακής προώθησης και του προωθούμενου μεταλλότυπου και ανάπτυξη μοντέλων εκτίμησης ποσοτήτων εργασιών ανωδομής και δαπάνης.

Παράρτημα Ι: Απόσπασμα βάσης δεδομένων θεμελιώσεων γεφυρών

#	Όνομα Γέφυρας	Τύπος Εδάφους	Ζώνη Σεισμ.	#	Τύπος θεμελίωσης	b (μ)	l (μ)	h (μ)	b _e	V _c (μ ³)	B _s (Kg)	
1	Βοτονόσσι - Α	ID1	II	1	Φρέαρ	13.00	220.40	45.00	0	2173.91	143772.8	
				2		13.00	220.40	46.19	0	1735.73	109142.8	
2	Μεσοβούνι -Α	ID1	III	3	Επιφαν.	12.95	49.87	8.58	1	151.69	14391.2	
				4		12.95	80.80	26.00	0	408.32	68505.2	
				5		12.95	80.14	29.64	0	408.32	69519.5	
3	T5 Καλογήρου -Δ	IE3	II	6	Επιφαν.	12.10	40.00	20.80	1	253.50	18884.6	
				7		12.10	40.00	28.30	1	253.50	19413.5	
				8		12.10	40.00	29.80	1	253.50	19159.0	
				9		Πάσσαλοι	12.10	40.00	44.80	1	125.60	10625.0
				10			12.10	40.00	50.40	1	125.60	10625.0
				11			12.10	40.00	27.30	1	157.00	17115.0
...		
77	T1 - Α	IB2	II	152	Επιφαν.	12.10	40.00	43.11	1	281.35	30037.2	
				153		12.10	40.00	23.89	1	281.35	20871.1	
				154		Φρέαρ	12.10	40.00	30.59	1	817.88	22257.6
				155		Πάσσαλοι	12.10	40.00	48.42	1	87.92	8231.2
78	Γ3-Α	IE3	I*	156	Πάσσαλοι	14.20	117.50	38.36	0	849.60	100446.0	
				157	Επιφαν.	14.20	117.50	44.45	0	940.80	242357.0	

*δείχνει ζώνη με βάση την αναθεώρηση ΕΑΚ του 2003

Παράρτημα ΙΙ: Δείγμα βάσης δεδομένων γεφυρών

Όνομα	Τμήμα	Σεισμική ζώνη	Πλάτος (μ)	Μήκος (μ)	Τύπος καταστρώματος	Μέθοδος κατασκευής
T6	11.3	II	12.70	210.00	Προκατ. δοκοί	Προκατ. δοκοί
Κομψάτου	14.3.2	II	15.07	416.00	Προκατ. δοκοί	Προκατ. δοκοί
Ερυθροπόταμου	80.4	I	13.00	356.00	Προκατ. δοκοί	Προκατ. δοκοί
Καλογήρου	4.2.2	II	12.10	280.00	Προκατ. δοκοί	Προκατ. δοκοί
Γέφυρα 5 - Α	13.5	II	13.10	270.00	Προκατ. δοκοί	Προκατ. δοκοί
Γέφυρα 5 - Δ	13.5	II	13.10	345.00	Προκατ. δοκοί	Προκατ. δοκοί
Γέφυρα 6	13.5	II	13.10	165.00	Προκατ. δοκοί	Προκατ. δοκοί
Βοτονόσι – Α	3.2	II	13.00	547.00	Μονοκύπελο κιβώτιο	Συμ. προβολοδόμηση
Βοτονόσι - Δ	3.2	II	13.00	536.50	Μονοκύπελο κιβώτιο	Συμ. προβολοδόμηση
Γέφυρα 2 - Α	4.1.1	I	14.20	345.00	Μονοκύπελο κιβώτιο	Συμ. προβολοδόμηση
Γέφυρα 2 - Δ	4.1.1	I	14.20	349.00	Μονοκύπελο κιβώτιο	Συμ. προβολοδόμηση
Γέφυρα 12 – Α	5.1	II	14.00	457.00	Μονοκύπελο κιβώτιο	Συμ. προβολοδόμηση
Γρεβενιώτικου	4.1.5	II	12.78	920.00	Μονοκύπελο κιβώτιο	Συμ. προβολοδόμηση
Μεσοβουνίου	1.1.3	III	12.95	259.00	Μονοκύπελο κιβώτιο	Συμ. προβολοδόμηση
Γέφυρα 5 – Α	2.4	II	13.50	240.00	Μονοκύπελο κιβώτιο	Επιτόπ. σκυροδέτηση
Ειρήνης	15.6	I	13.90	180.00	Μονοκύπελο κιβώτιο	Επιτόπ. σκυροδέτηση
Γέφυρα 12	14.3.1	II	13.95	145.00	Μονοκύπελο κιβώτιο	Επιτόπ. σκυροδέτηση
Γέφυρα 3	15.1.1	II	13.95	113.00	Μονοκύπελο κιβώτιο	Επιτόπ. σκυροδέτηση
Γέφυρα 4	6.0	II	13.50	135.80	Μονοκύπελο κιβώτιο	Επιτόπ. σκυροδέτηση

Παράρτημα III: Αρχείο αποτελεσμάτων ποσοτήτων εργασιών πρώτου παραδείγματος έργου

SUPERSTRUCTURE MATERIAL QUANTITIES

Span 0

Point Superstructure Quantities for Span 0:
Volume Of Concrete = 373.31067
Weight of Reinforcing Steel: 46731.96
Weight of Prestressing Steel: 12140.605
5% Superstructure Quantities for Span 0:
Volume Of Concrete = 291.33093
Weight of Reinforcing Steel: 34097.156
Weight of Prestressing Steel: 9295.642
95% Superstructure Quantities for Span 0:
Volume Of Concrete = 452.7243
Weight of Reinforcing Steel: 59101.89
Weight of Prestressing Steel: 15107.787
50% Superstructure Quantities for Span 0:
Volume Of Concrete = 373.4769
Weight of Reinforcing Steel: 46579.86
Weight of Prestressing Steel: 12124.502

Span 1

Point Superstructure Quantities for Span 1:
Volume Of Concrete = 373.31067
Weight of Reinforcing Steel: 46731.96
Weight of Prestressing Steel: 12140.605
5% Superstructure Quantities for Span 1:
Volume Of Concrete = 291.33093
Weight of Reinforcing Steel: 34097.156
Weight of Prestressing Steel: 9295.642
95% Superstructure Quantities for Span 1:
Volume Of Concrete = 452.7243
Weight of Reinforcing Steel: 59101.89
Weight of Prestressing Steel: 15107.787
50% Superstructure Quantities for Span 1:
Volume Of Concrete = 373.4769
Weight of Reinforcing Steel: 46579.86
Weight of Prestressing Steel: 12124.502

Span 2

Point Superstructure Quantities for Span 2:
Volume Of Concrete = 373.31067
Weight of Reinforcing Steel: 46731.96
Weight of Prestressing Steel: 12140.605
5% Superstructure Quantities for Span 2:
Volume Of Concrete = 291.33093
Weight of Reinforcing Steel: 34097.156

Weight of Prestressing Steel: 9295.642
95% Superstructure Quantities for Span 2:
Volume Of Concrete = 452.7243
Weight of Reinforcing Steel: 59101.89
Weight of Prestressing Steel: 15107.787
50% Superstructure Quantities for Span 2:
Volume Of Concrete = 373.4769
Weight of Reinforcing Steel: 46579.86
Weight of Prestressing Steel: 12124.502

Span 3

Point Superstructure Quantities for Span 3:
Volume Of Concrete = 373.31067
Weight of Reinforcing Steel: 46731.96
Weight of Prestressing Steel: 12140.605
5% Superstructure Quantities for Span 3:
Volume Of Concrete = 291.33093
Weight of Reinforcing Steel: 34097.156
Weight of Prestressing Steel: 9295.642
95% Superstructure Quantities for Span 3:
Volume Of Concrete = 452.7243
Weight of Reinforcing Steel: 59101.89
Weight of Prestressing Steel: 15107.787
50% Superstructure Quantities for Span 3:
Volume Of Concrete = 373.4769
Weight of Reinforcing Steel: 46579.86
Weight of Prestressing Steel: 12124.502

Span 4

Point Superstructure Quantities for Span 4:
Volume Of Concrete = 373.31067
Weight of Reinforcing Steel: 46731.96
Weight of Prestressing Steel: 12140.605
5% Superstructure Quantities for Span 4:
Volume Of Concrete = 291.33093
Weight of Reinforcing Steel: 34097.156
Weight of Prestressing Steel: 9295.642
95% Superstructure Quantities for Span 4:
Volume Of Concrete = 452.7243
Weight of Reinforcing Steel: 59101.89
Weight of Prestressing Steel: 15107.787
50% Superstructure Quantities for Span 4:
Volume Of Concrete = 373.4769
Weight of Reinforcing Steel: 46579.86
Weight of Prestressing Steel: 12124.502

SUBSTRUCTURE MATERIAL QUANTITIES

Pier 0

Point Substructure Quantities for Pier 0:
Volume Of Concrete = 139.1279
Weight of Reinforcing Steel: 24803.588
5% Substructure Quantities for Pier 0:

Volume Of Concrete = 63.026245
Weight of Reinforcing Steel: 14161.811
95% Substructure Quantities for Pier 0:
Volume Of Concrete = 223.55363
Weight of Reinforcing Steel: 35881.117
50% Substructure Quantities for Pier 0:
Volume Of Concrete = 137.64441
Weight of Reinforcing Steel: 24713.021

Pier 1

Point Substructure Quantities for Pier 1:
Volume Of Concrete = 300.09024
Weight of Reinforcing Steel: 55483.547
5% Substructure Quantities for Pier 1:
Volume Of Concrete = 198.27806
Weight of Reinforcing Steel: 40995.1
95% Substructure Quantities for Pier 1:
Volume Of Concrete = 407.28015
Weight of Reinforcing Steel: 70111.766
50% Substructure Quantities for Pier 1:
Volume Of Concrete = 296.8126
Weight of Reinforcing Steel: 55238.78

Pier 2

Point Substructure Quantities for Pier 2:
Volume Of Concrete = 281.60794
Weight of Reinforcing Steel: 51960.758
5% Substructure Quantities for Pier 2:
Volume Of Concrete = 182.74794
Weight of Reinforcing Steel: 37914.0
95% Substructure Quantities for Pier 2:
Volume Of Concrete = 386.18396
Weight of Reinforcing Steel: 66181.266
50% Substructure Quantities for Pier 2:
Volume Of Concrete = 278.5363
Weight of Reinforcing Steel: 51733.7

Pier 3

Point Substructure Quantities for Pier 3:
Volume Of Concrete = 155.94778
Weight of Reinforcing Steel: 28009.514
5% Substructure Quantities for Pier 3:
Volume Of Concrete = 77.159485
Weight of Reinforcing Steel: 16965.775
95% Substructure Quantities for Pier 3:
Volume Of Concrete = 242.75227
Weight of Reinforcing Steel: 39458.08
50% Substructure Quantities for Pier 3:
Volume Of Concrete = 154.2768
Weight of Reinforcing Steel: 27902.834

FOUNDATION MATERIAL QUANTITIES

Pier 0

Point Foundation Quantities for Socket 0:
Volume Of Concrete = 485.453
Weight of Reinforcing Steel: 26051.045
5% Foundation Quantities for Socket 0:
Volume Of Concrete = 272.09732
Weight of Reinforcing Steel: 15527.701
95% Foundation Quantities for Socket 0:
Volume Of Concrete = 704.6952
Weight of Reinforcing Steel: 36241.625
50% Foundation Quantities for Socket 0:
Volume Of Concrete = 480.4566
Weight of Reinforcing Steel: 26228.738

Pier 1

Point Foundation Quantities for Spread 1:
Volume Of Concrete = 303.56433
Weight of Reinforcing Steel: 78207.33
5% Foundation Quantities for Spread 1:
Volume Of Concrete = 80.10451
Weight of Reinforcing Steel: -7705.1797
95% Foundation Quantities for Spread 1:
Volume Of Concrete = 540.5681
Weight of Reinforcing Steel: 168480.12
50% Foundation Quantities for Spread 1:
Volume Of Concrete = 294.79373
Weight of Reinforcing Steel: 75872.22

Pier 2

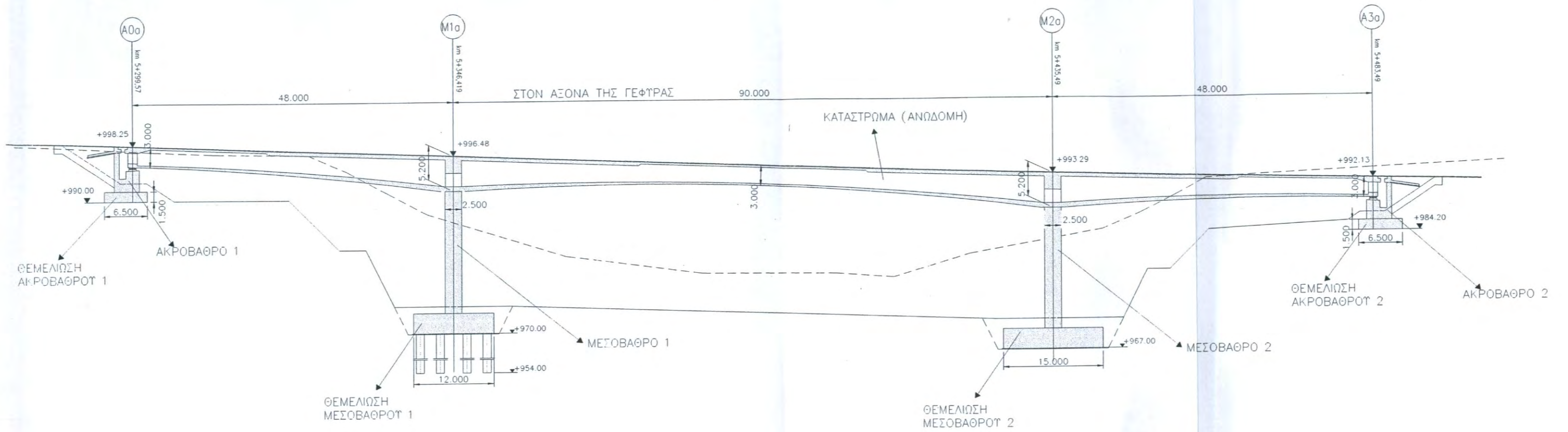
Point Foundation Quantities for Pile 2:
Volume Of Concrete = 167.32901
Weight of Reinforcing Steel: 23510.674
Point Foundation Quantities for Pile Cap 2:
Volume Of Concrete = 211.76529
Weight of Reinforcing Steel: 29119.832
5% Foundation Quantities for Pile 2:
Volume Of Concrete = -14.789616
Weight of Reinforcing Steel: -9423.104
5% Foundation Quantities for Pile Cap 2:
Volume Of Concrete = 136.84106
Weight of Reinforcing Steel: 3053.7432
95% Foundation Quantities for Pile 2:
Volume Of Concrete = 348.22742
Weight of Reinforcing Steel: 55892.027
95% Foundation Quantities for Pile Cap 2:
Volume Of Concrete = 303.1228
Weight of Reinforcing Steel: 60577.5
50% Foundation Quantities for Pile 2:
Volume Of Concrete = 165.65659
Weight of Reinforcing Steel: 23755.287
50% Foundation Quantities for Pile Cap 2:
Volume Of Concrete = 210.35358
Weight of Reinforcing Steel: 28464.242

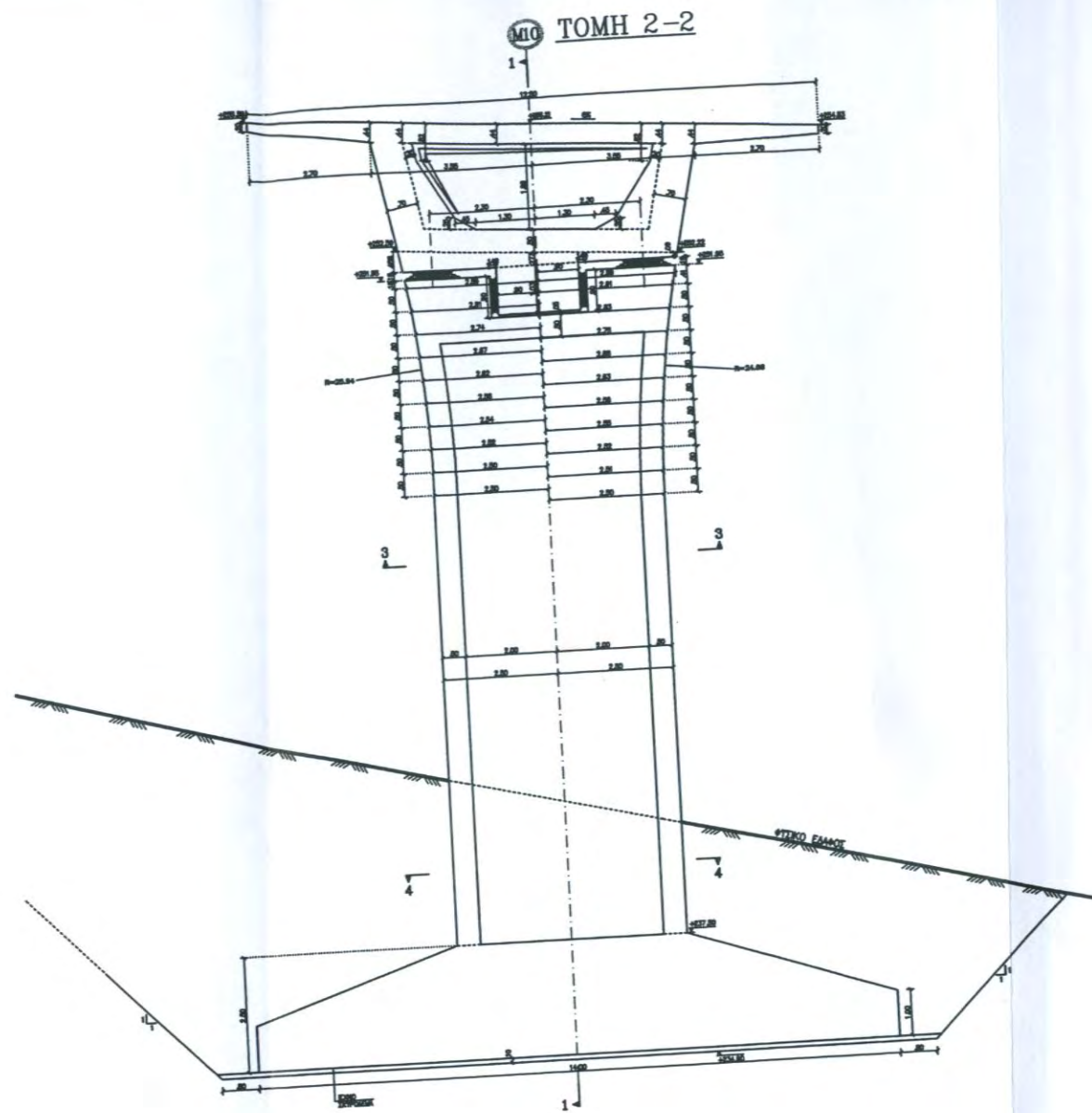
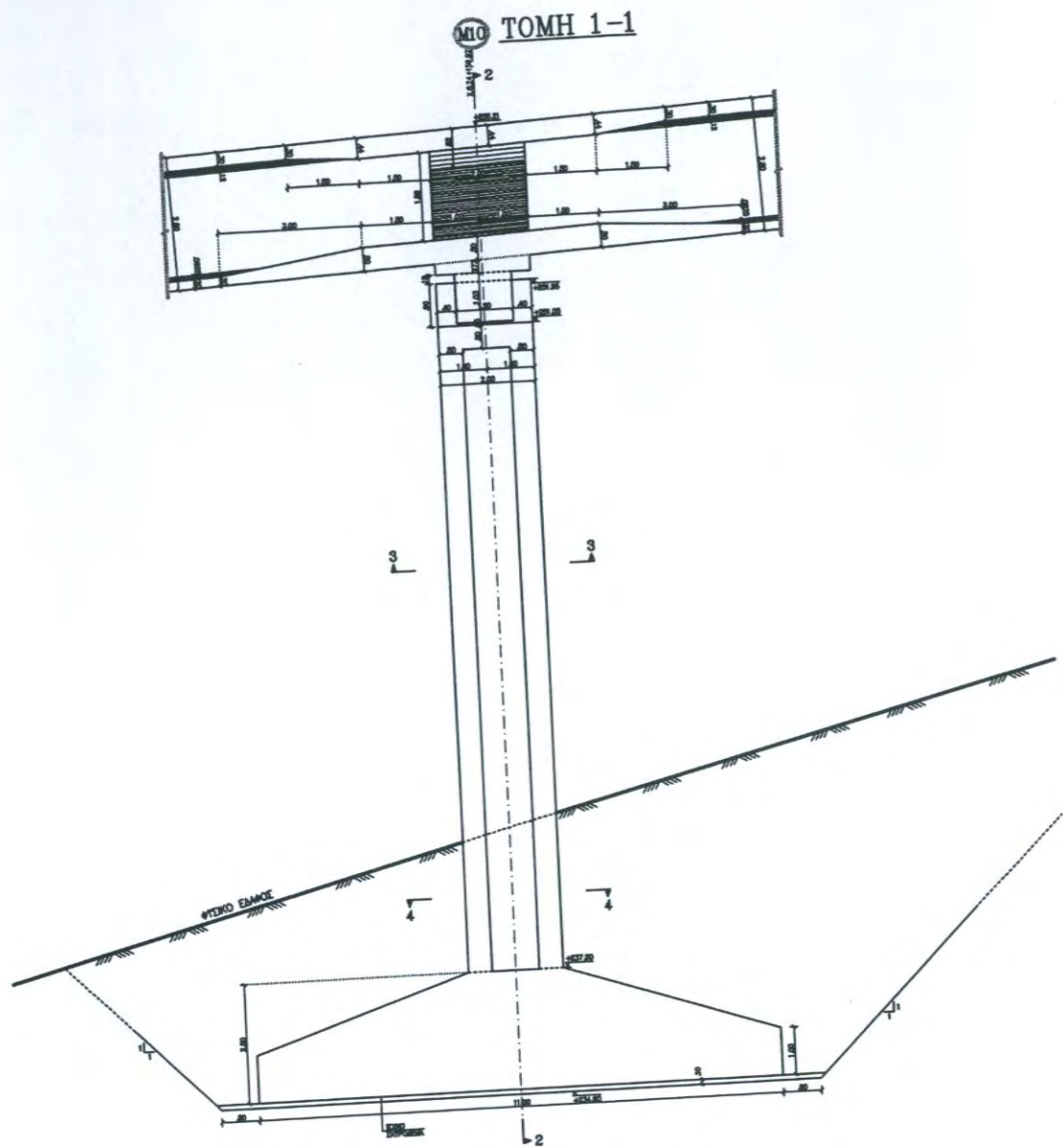
Pier 3

Point Foundation Quantities for Socket 3:
Volume Of Concrete = 485.453
Weight of Reinforcing Steel: 26051.045
5% Foundation Quantities for Socket 3:
Volume Of Concrete = 272.09732
Weight of Reinforcing Steel: 15527.701
95% Foundation Quantities for Socket 3:
Volume Of Concrete = 704.6952
Weight of Reinforcing Steel: 36241.625
50% Foundation Quantities for Socket 3:
Volume Of Concrete = 480.4566
Weight of Reinforcing Steel: 26228.738

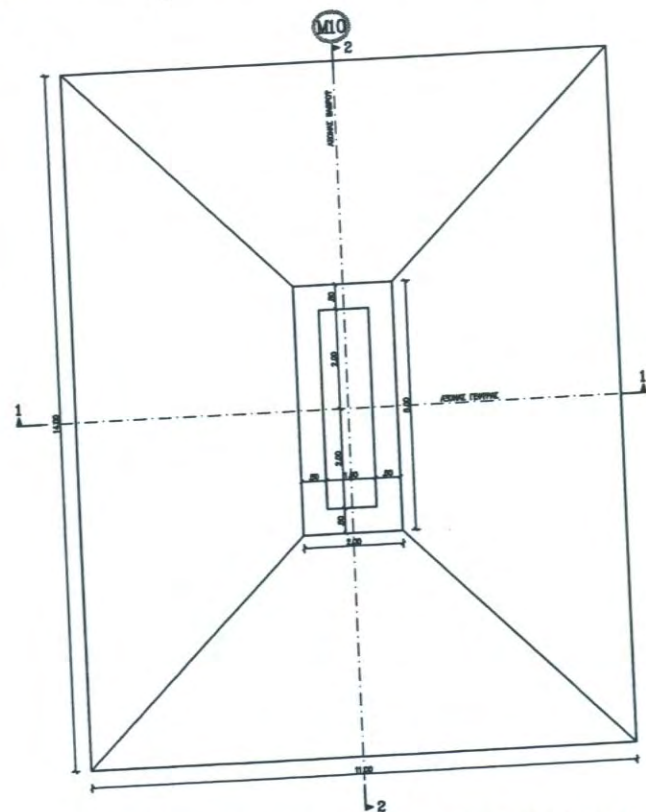
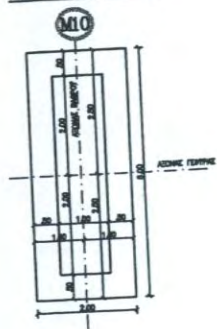
Παράρτημα IV: Σχέδια

ΣΧΕΔΙΟ 1





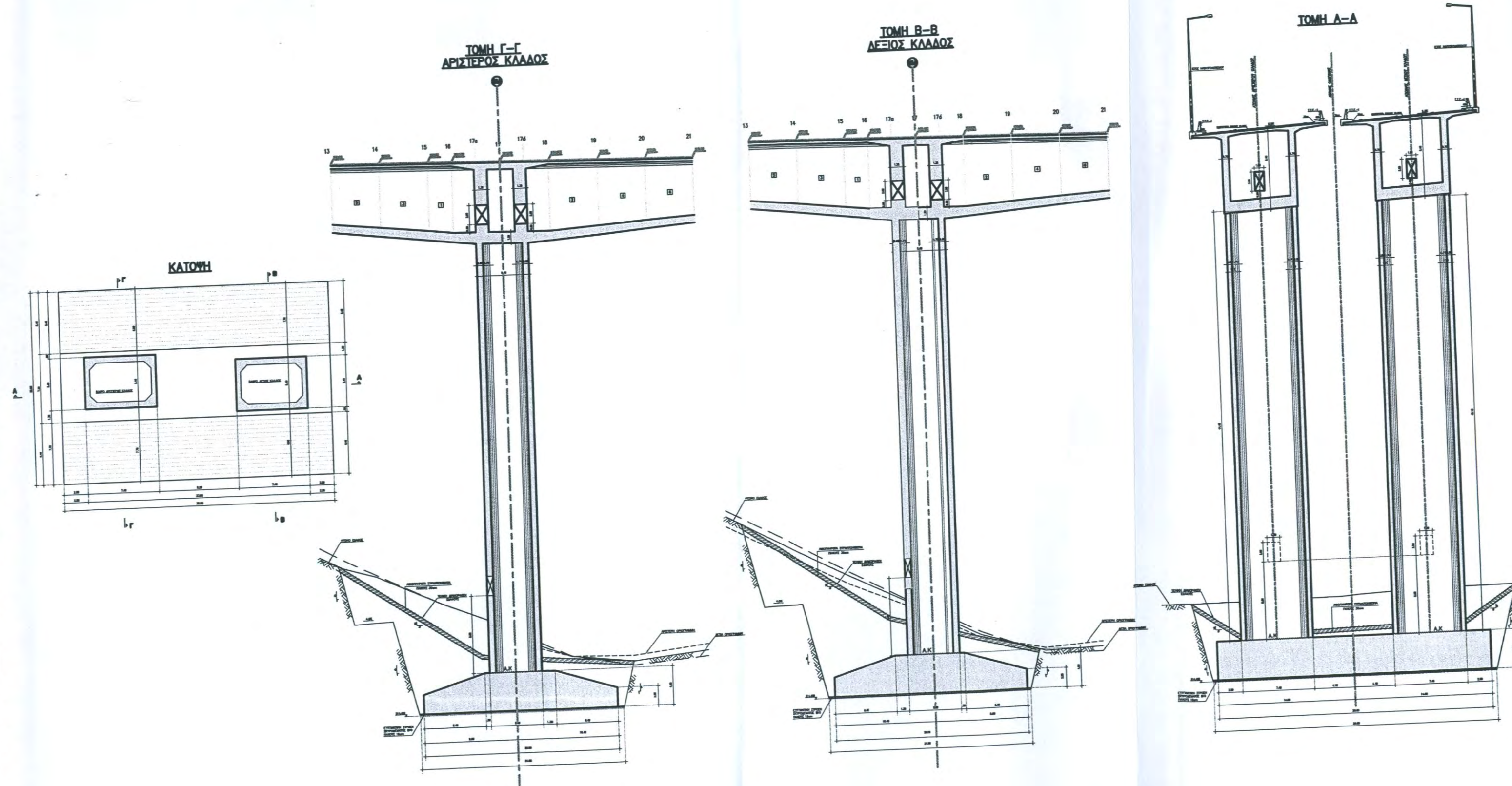
ΤΟΜΗ 3-3



ΚΑΤΩΦΗ ΠΕΔΙΛΟΤ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ (ΤΟΜΗ 4-4)

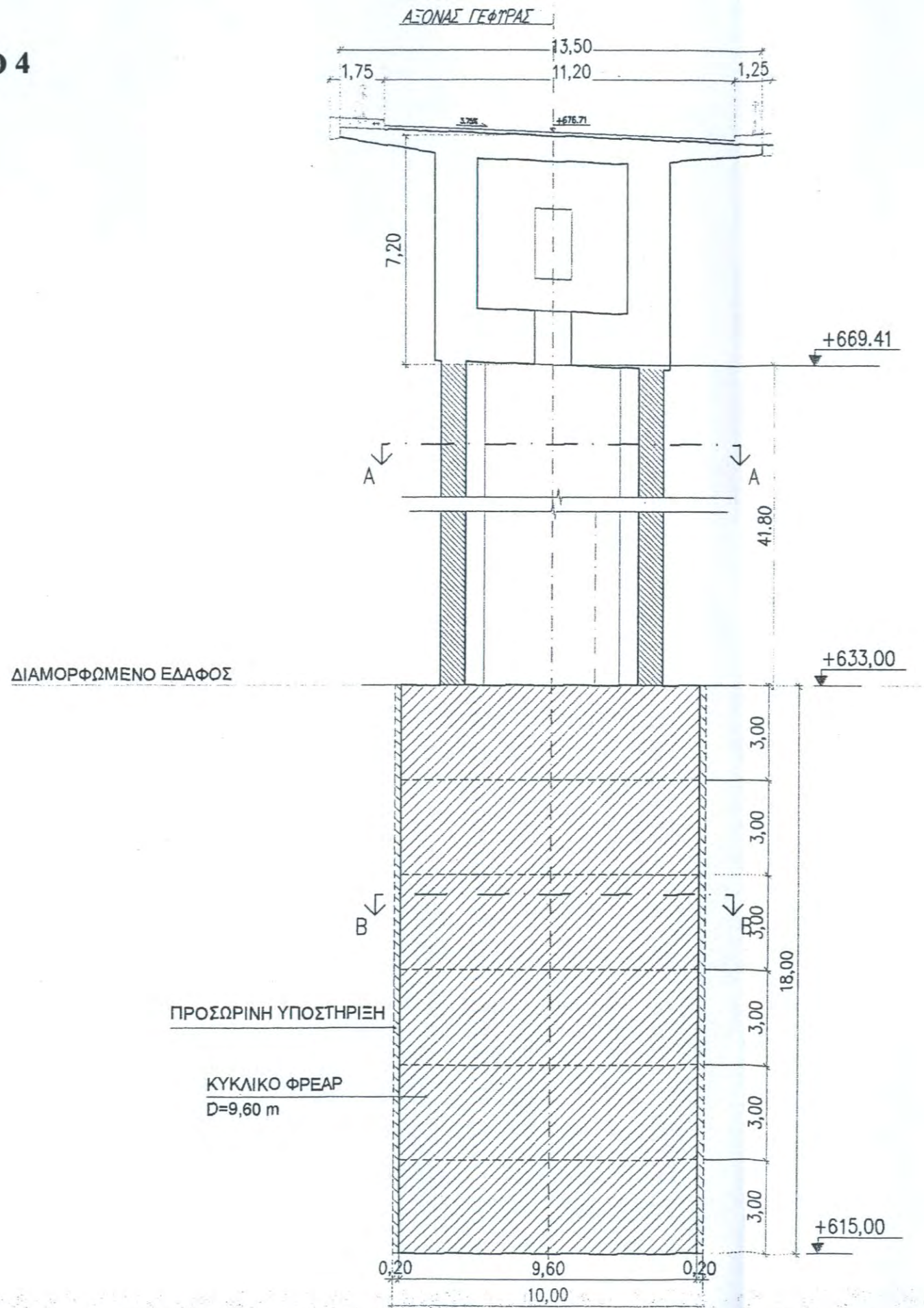
ΣΧΕΔΙΟ 2

ΣΧΕΔΙΟ 3

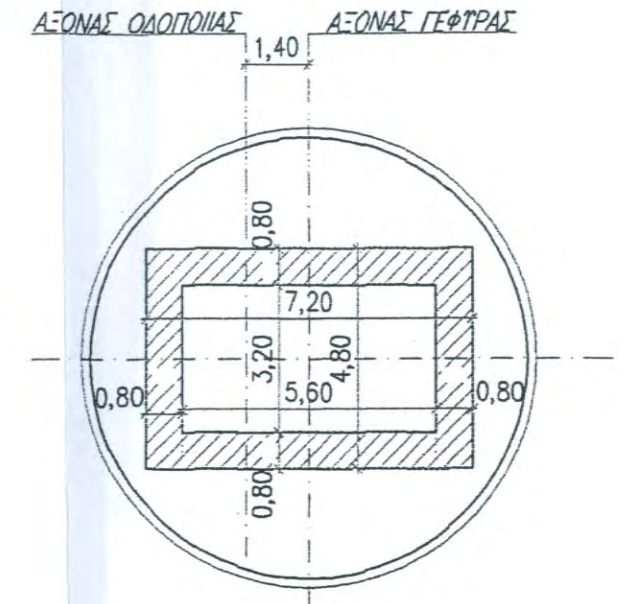


ΣΧΕΔΙΟ 4

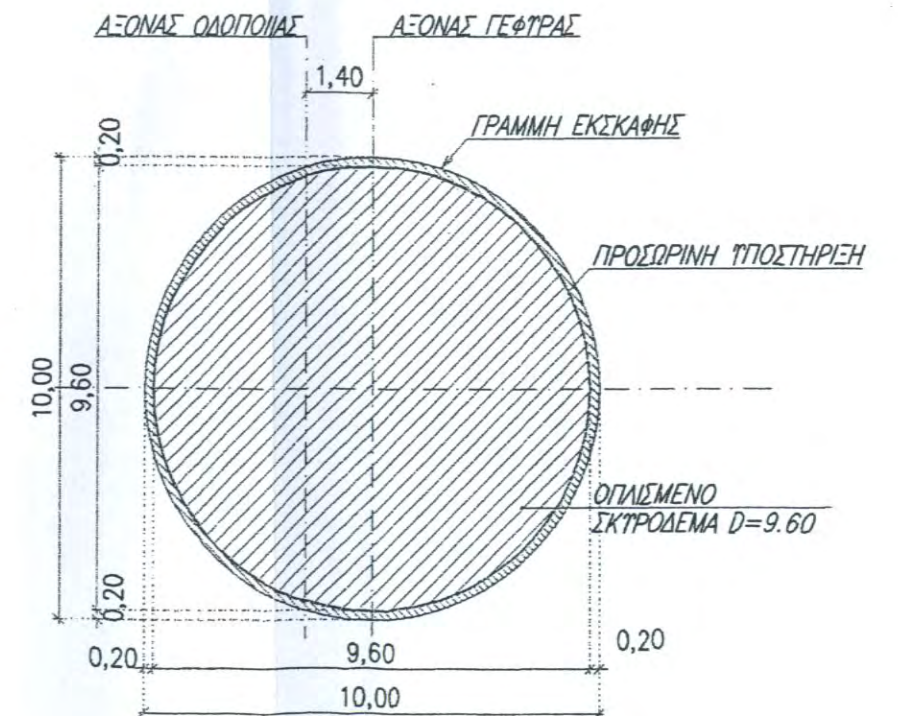
ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ ΒΑΘΡΟΥ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Μ11



ΤΟΜΗ Α

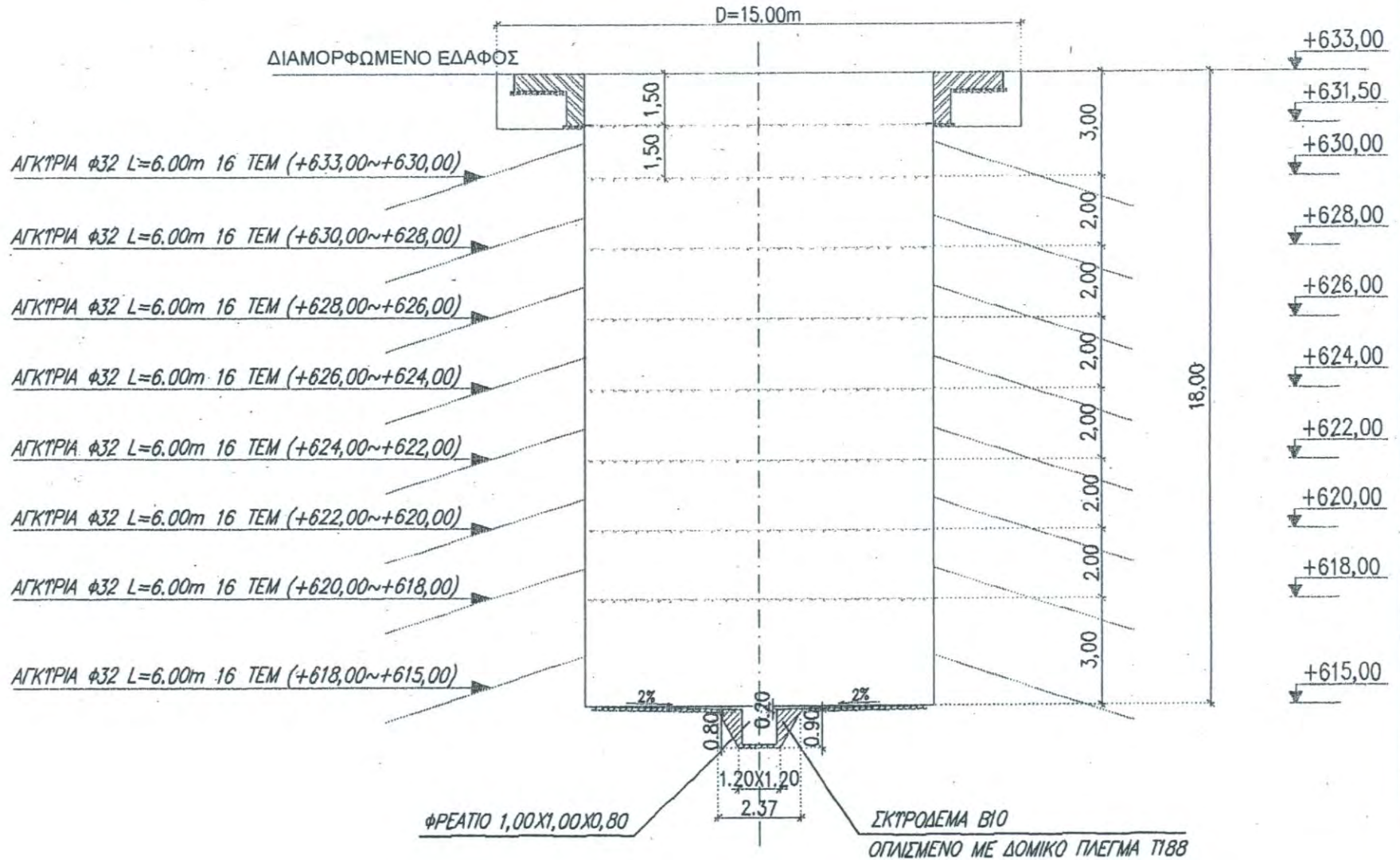


ΤΟΜΗ Β



ΣΧΕΔΙΟ 4α

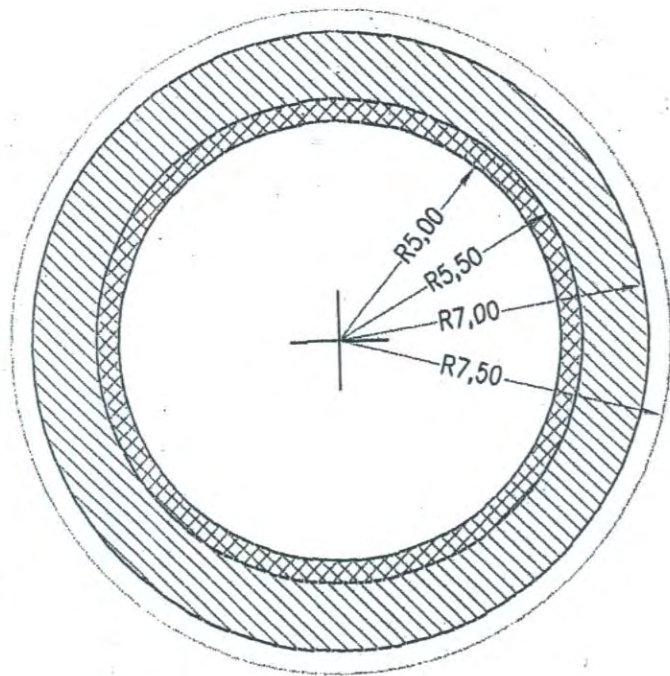
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΓΚΥΡΙΩΝ
ΚΑΤΑΚΟΡΤΦΗ ΤΟΜΗ



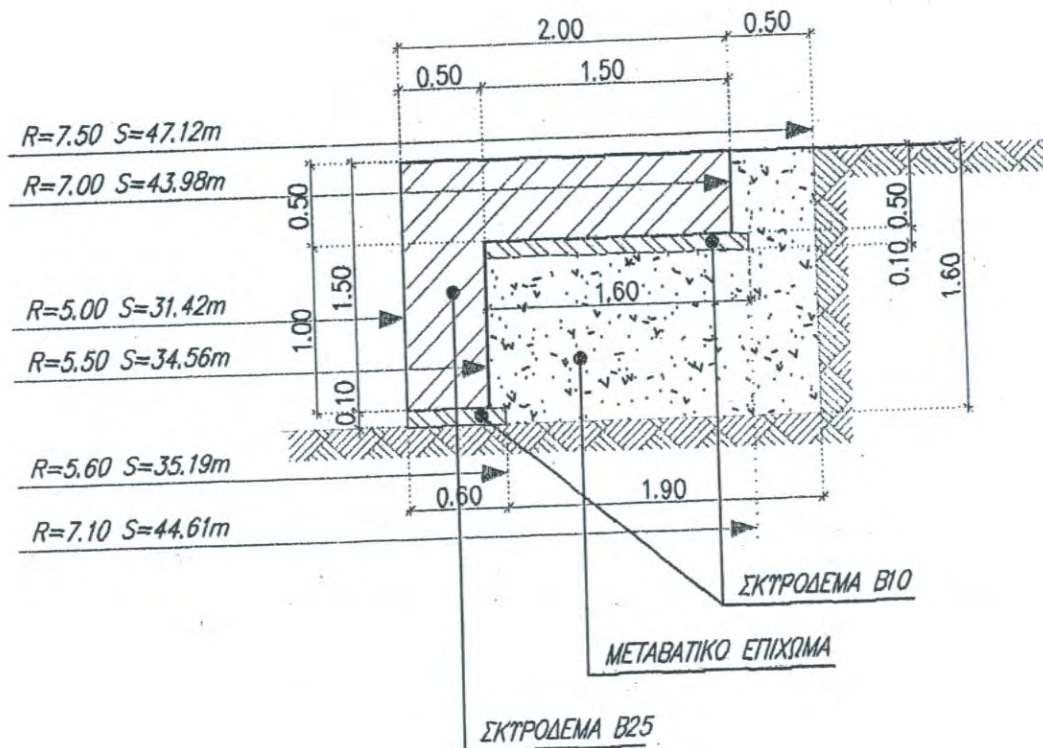
ΣΧΕΔΙΟ 4β

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΣΤΕΦΗΣ ΦΡΕΑΤΟΣ

ΚΑΤΟΨΗ

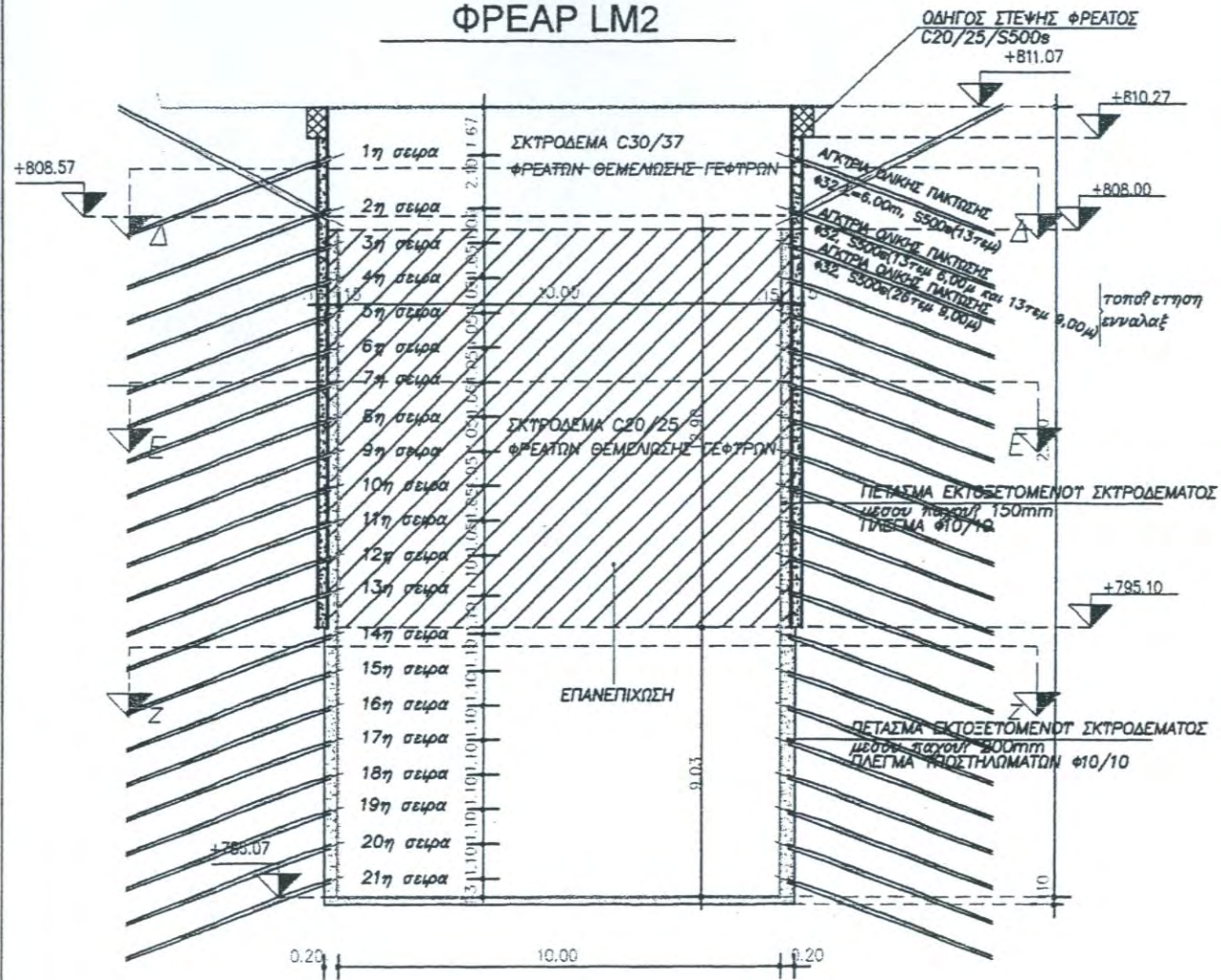


ΤΟΜΗ

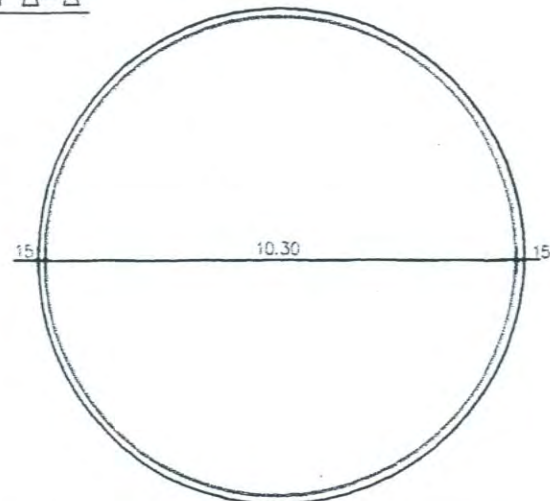


ΣΧΕΔΙΟ 5

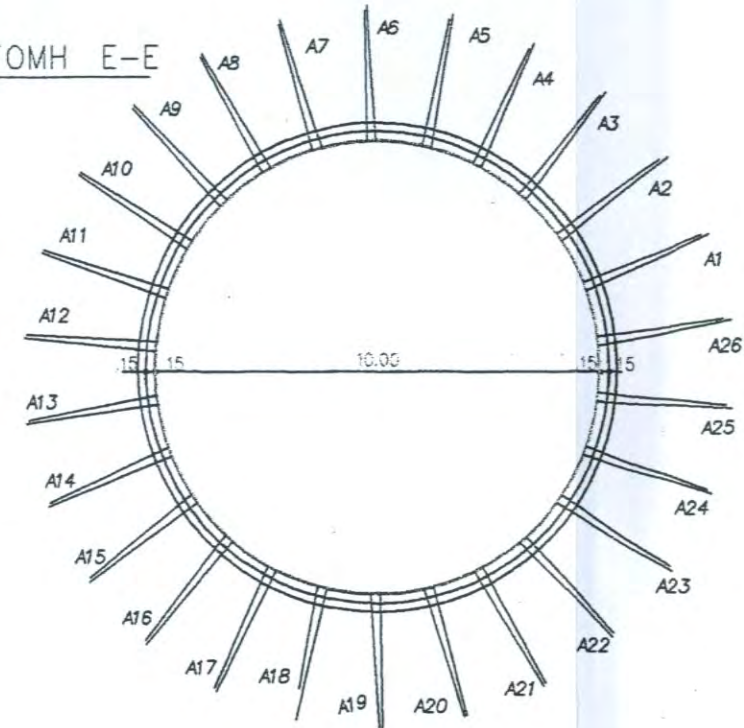
ΦΡΕΑΡ LM2



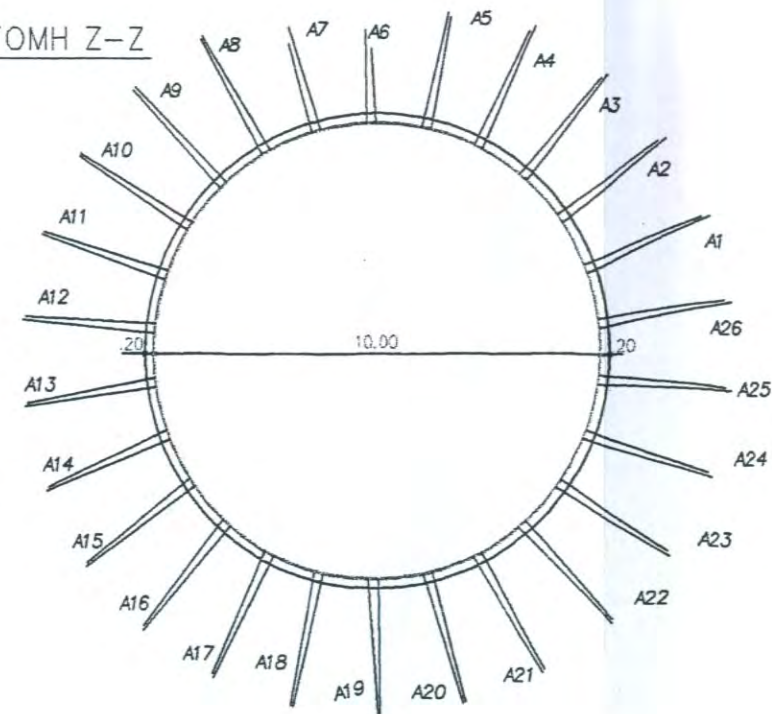
ΤΟΜΗ Δ-Δ



ΤΟΜΗ Ε-Ε

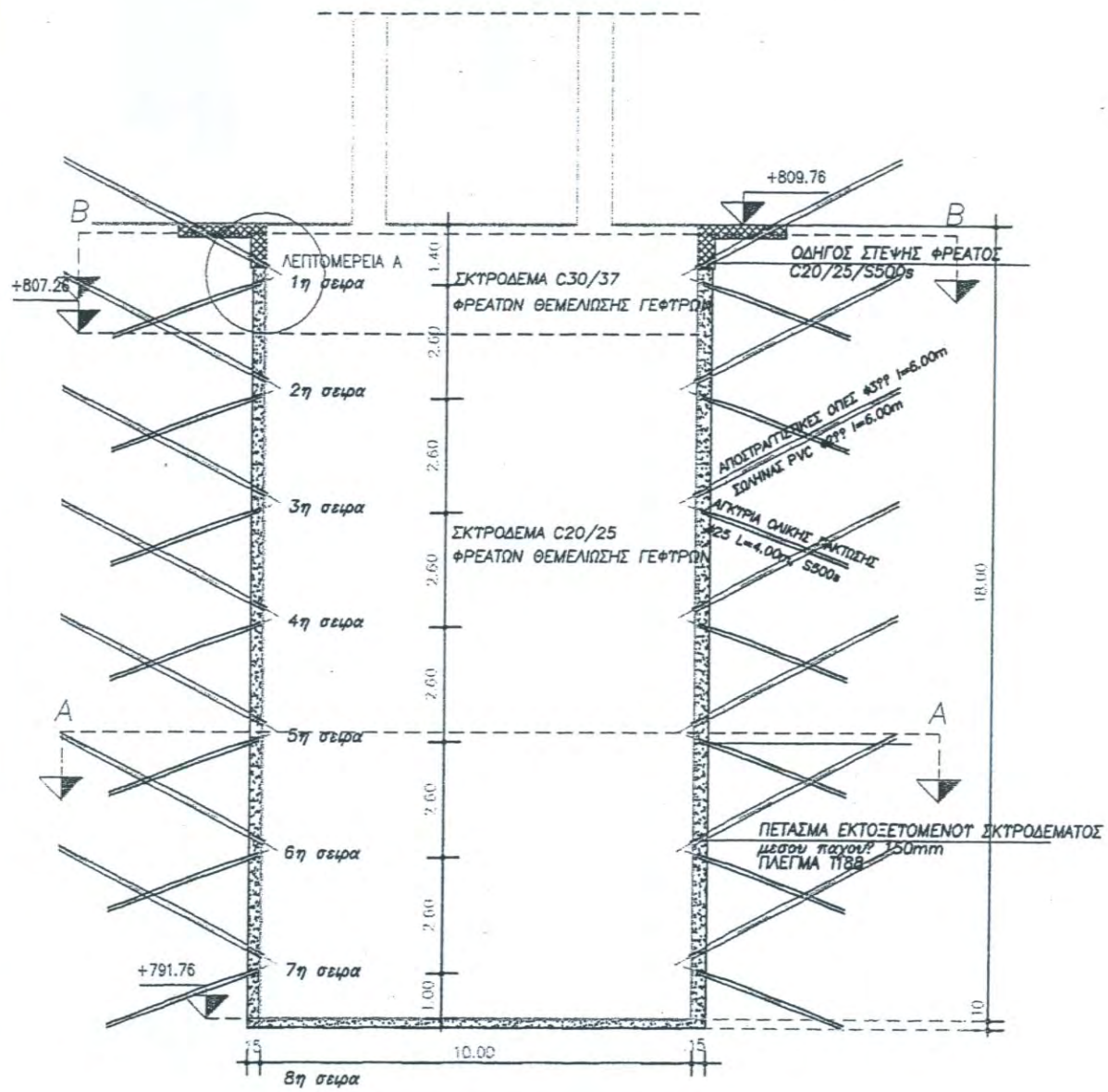


ΤΟΜΗ Ζ-Ζ

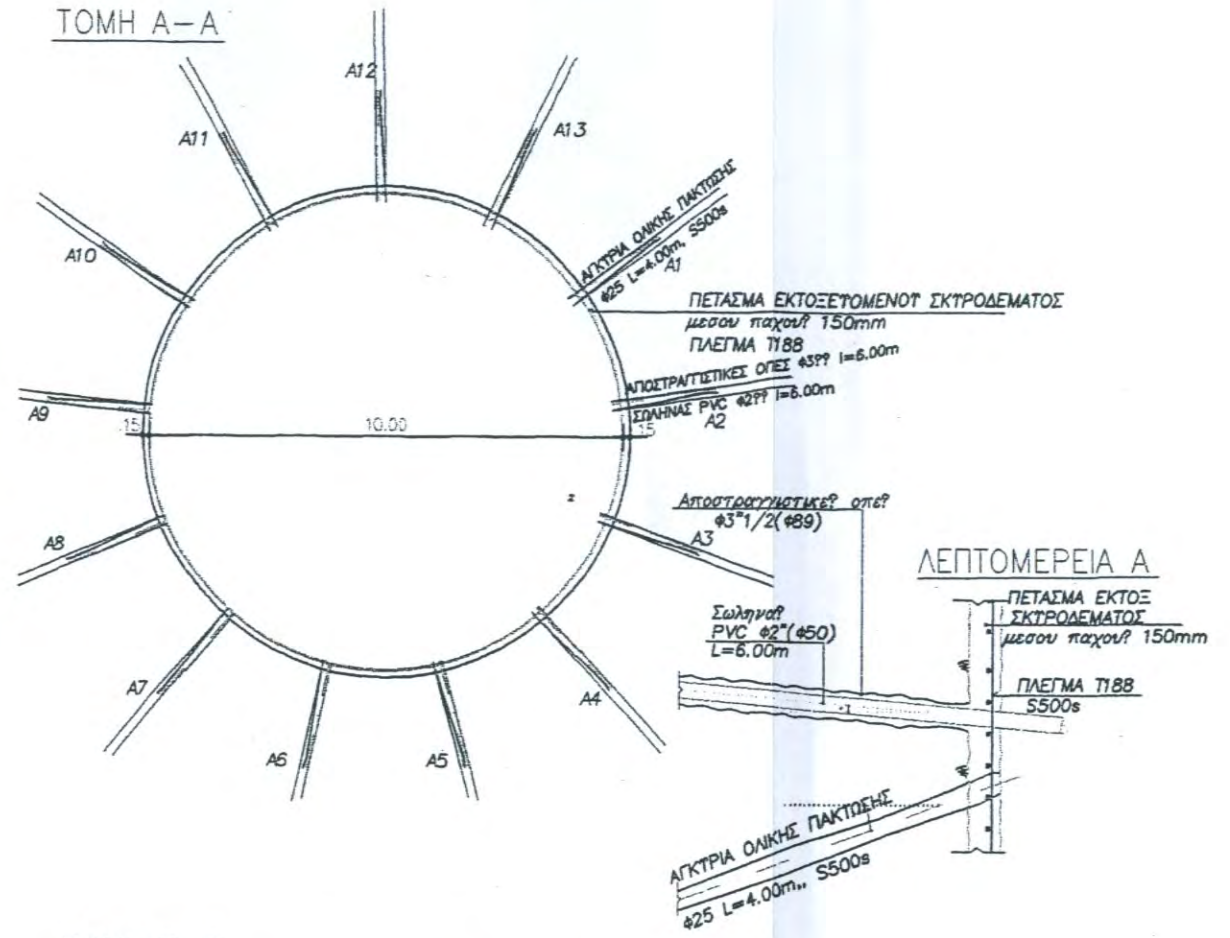


ΣΧΕΔΙΟ 6

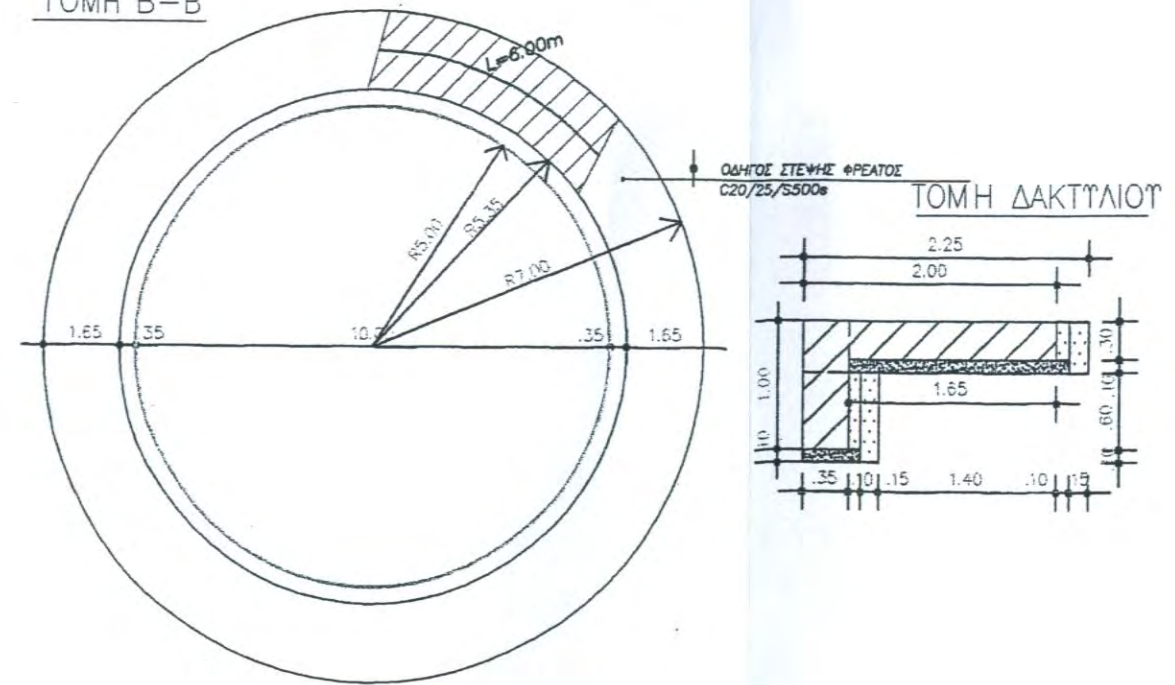
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΤΟΜΗ



ΤΟΜΗ Α-Α



ΤΟΜΗ Β-Β

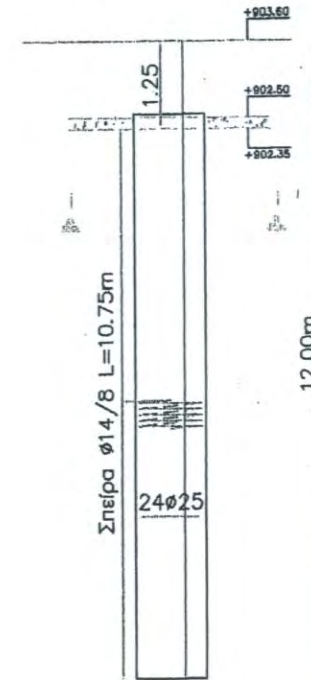
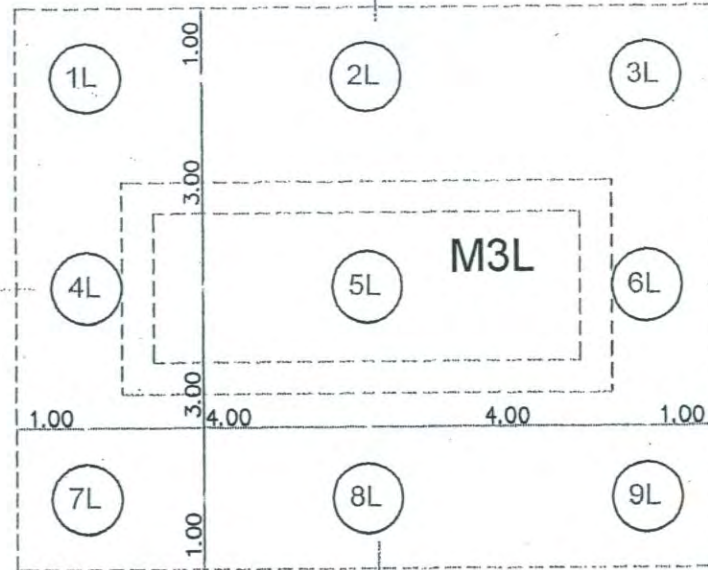


ΣΧΕΔΙΟ 8

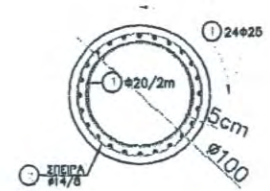
ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΜΕ ΠΑΣΣΑΛΟΥΣ

ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥ

ΚΑΤΟΨΗ

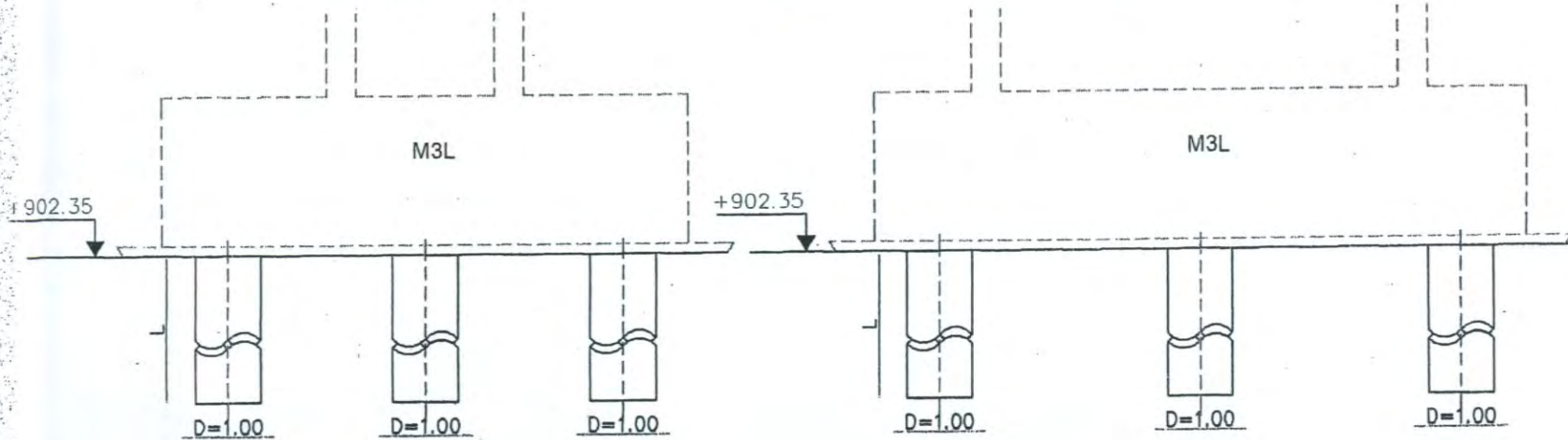


ΤΟΜΗ 1-1



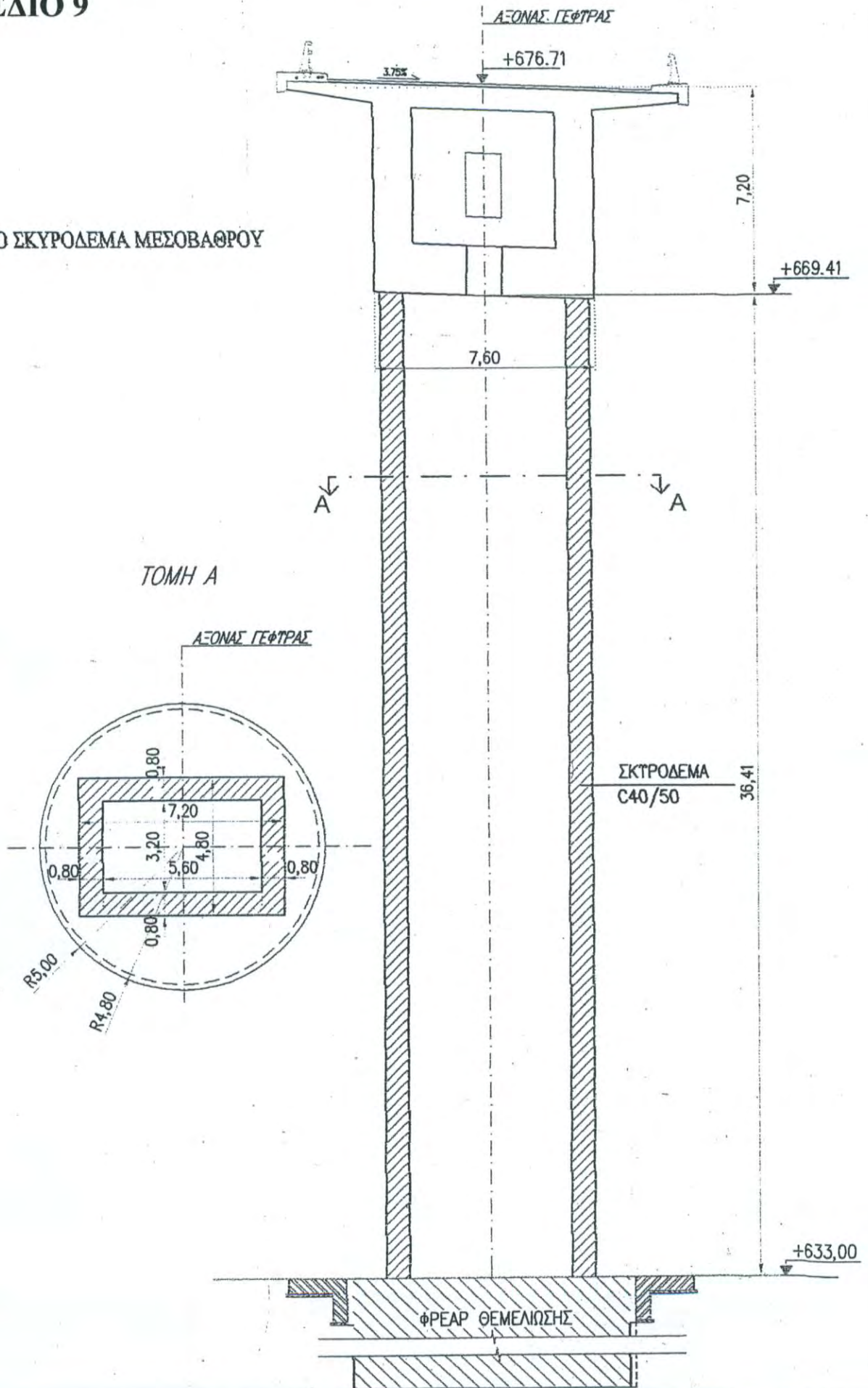
ΤΟΜΗ 1-1

ΤΟΜΗ 2-2



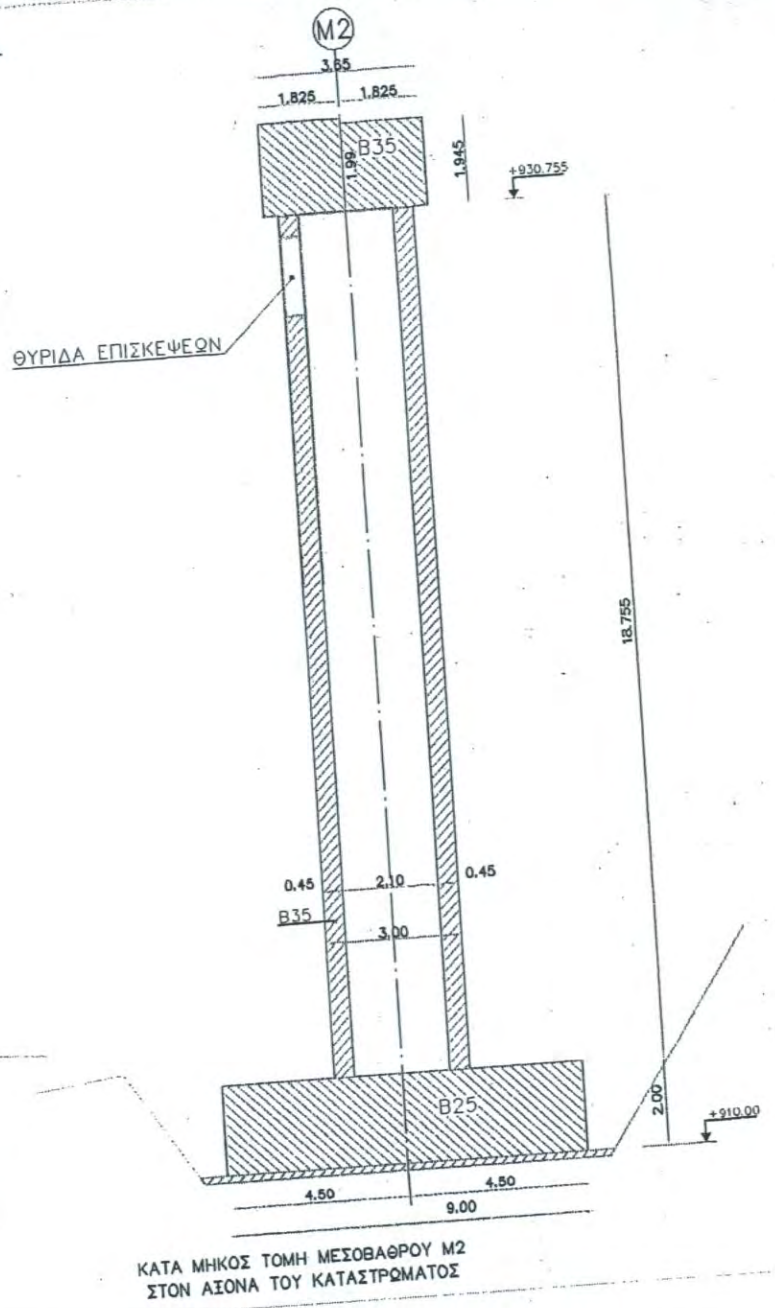
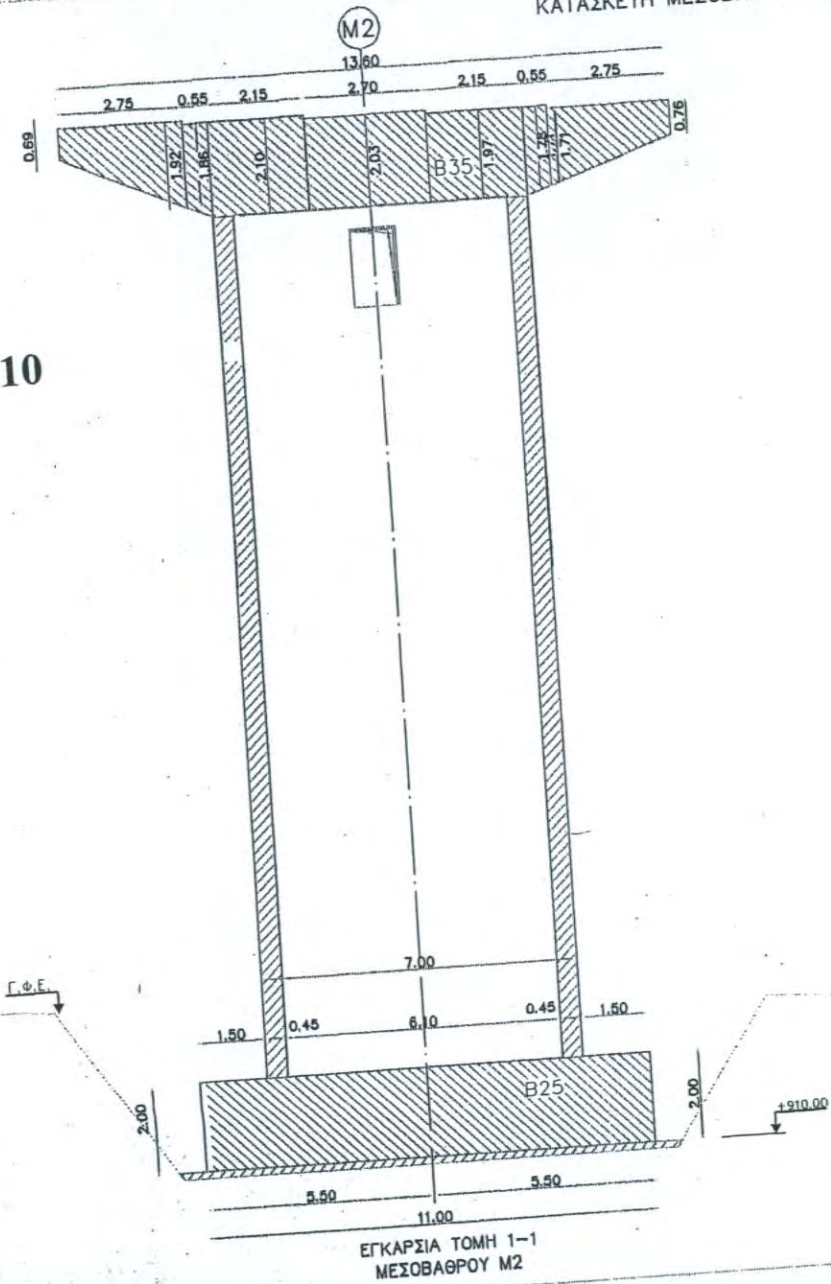
ΣΧΕΔΙΟ 9

ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ



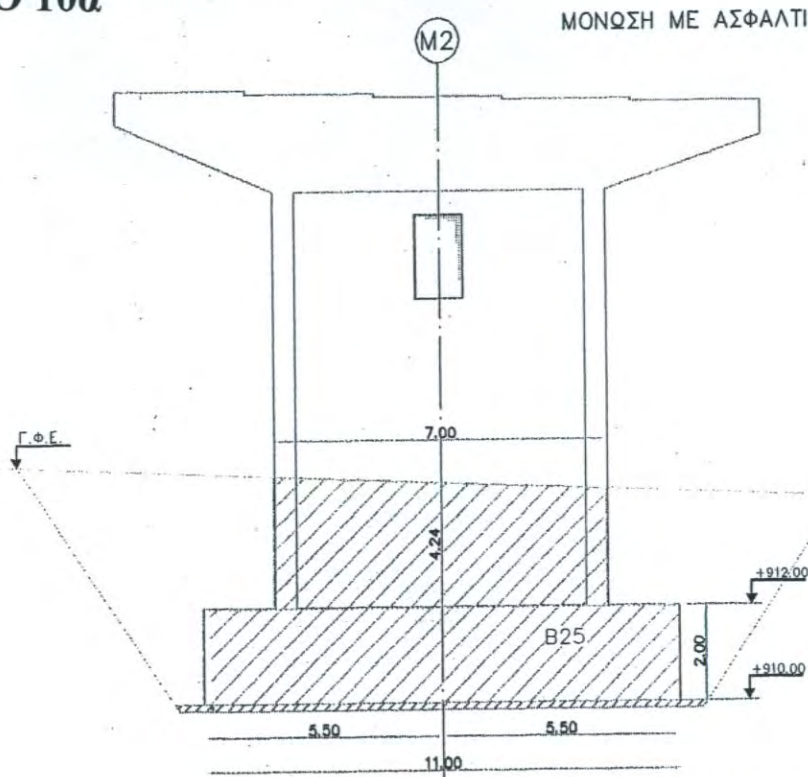
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ M2L

ΣΧΕΔΙΟ 10

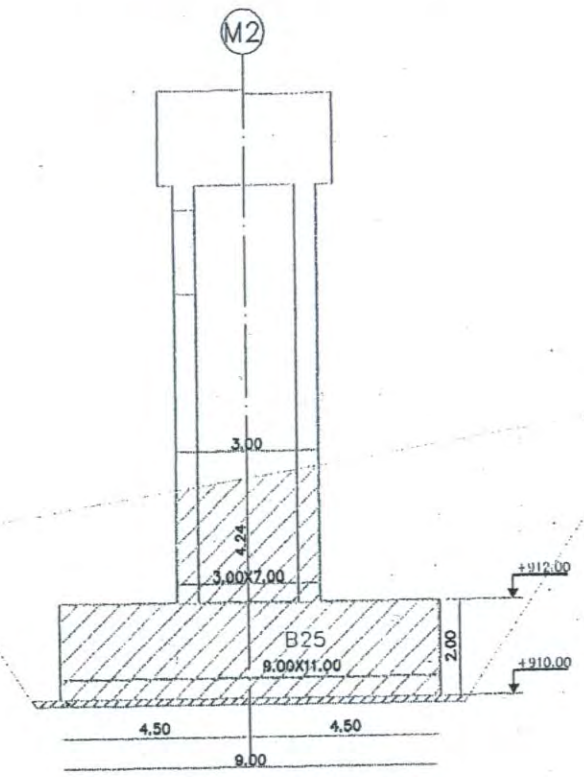


ΣΧΕΔΙΟ 10α

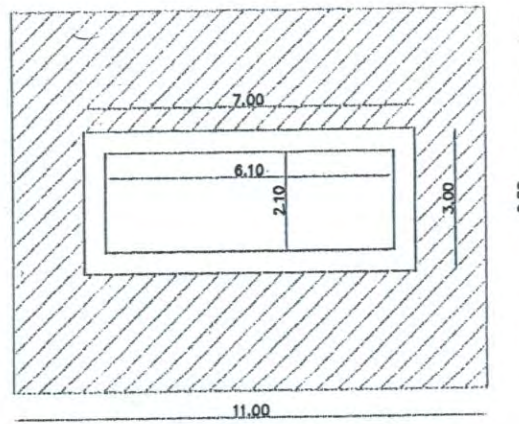
ΜΟΝΩΣΗ ΜΕ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ ΕΠΑΛΕΙΨΗ



ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ 1-1
ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ Μ2



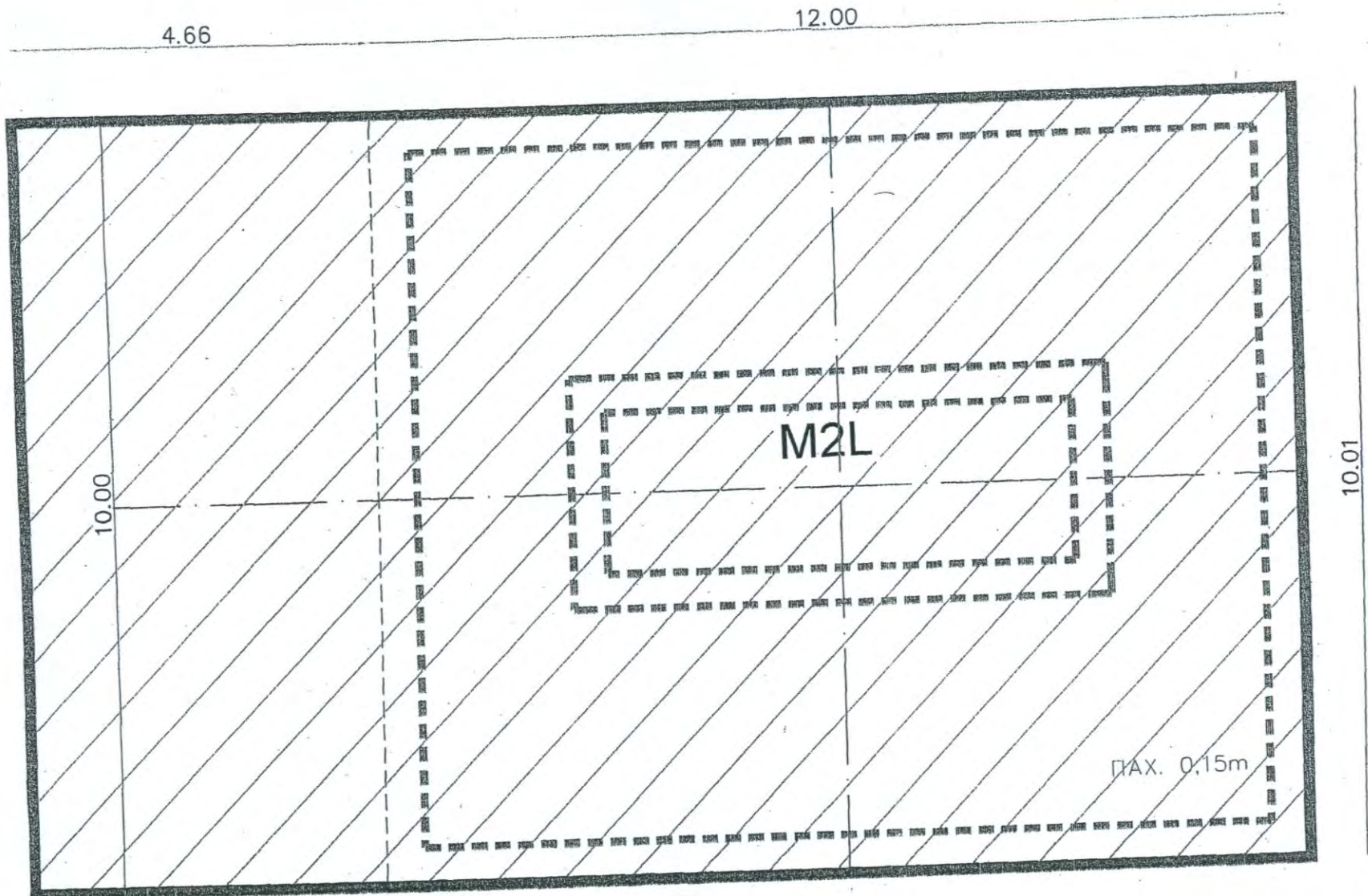
ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ Μ2
ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ



ΚΑΤΟΨΗ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ Μ2L

ΣΧΕΔΙΟ 10β

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ Μ2L
(ΕΙΣΟΜΑΛΥΝΤΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ)



4.66

12.00

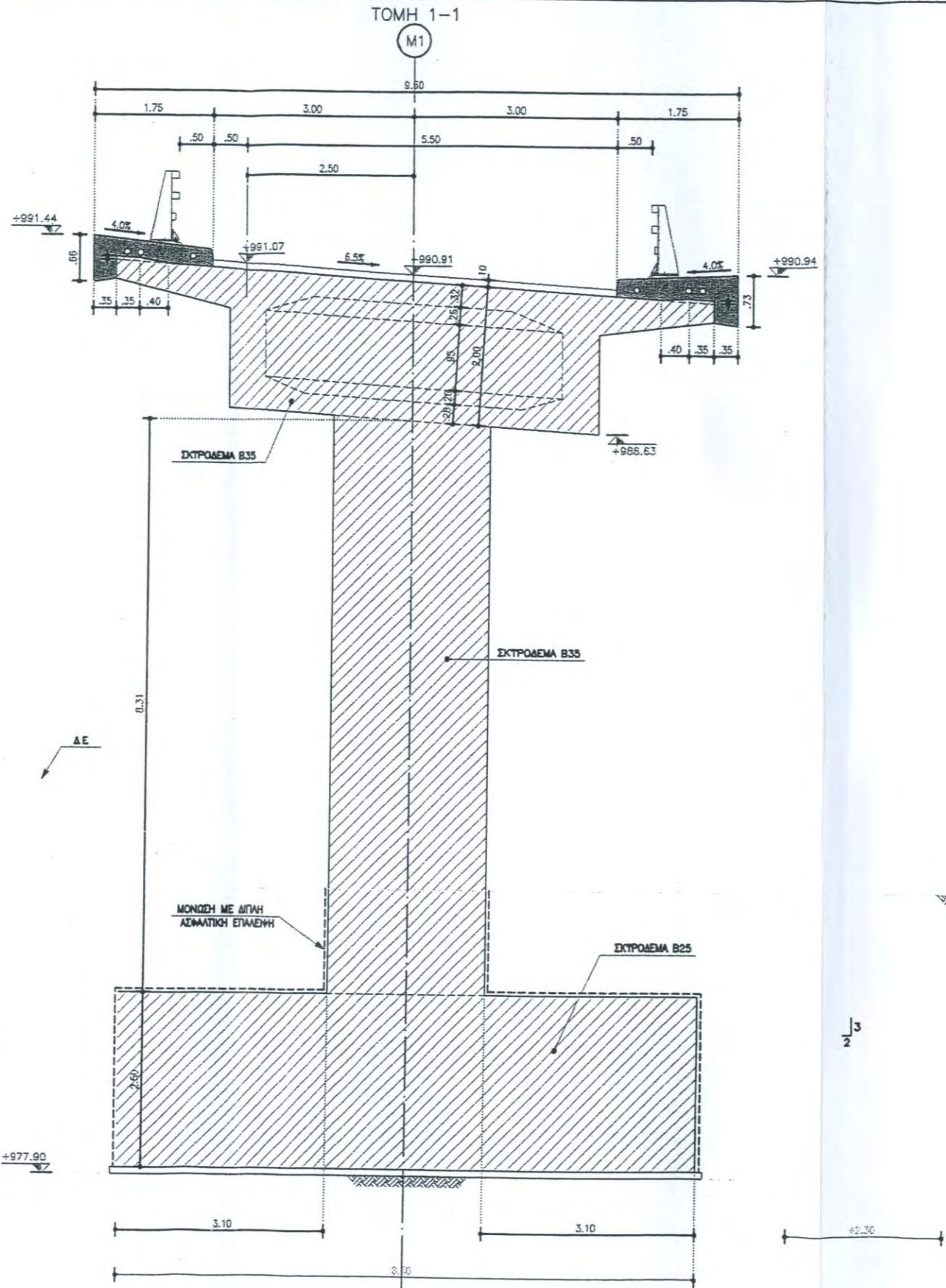
10.00

M2L

ΠΑΧ. 0,15m

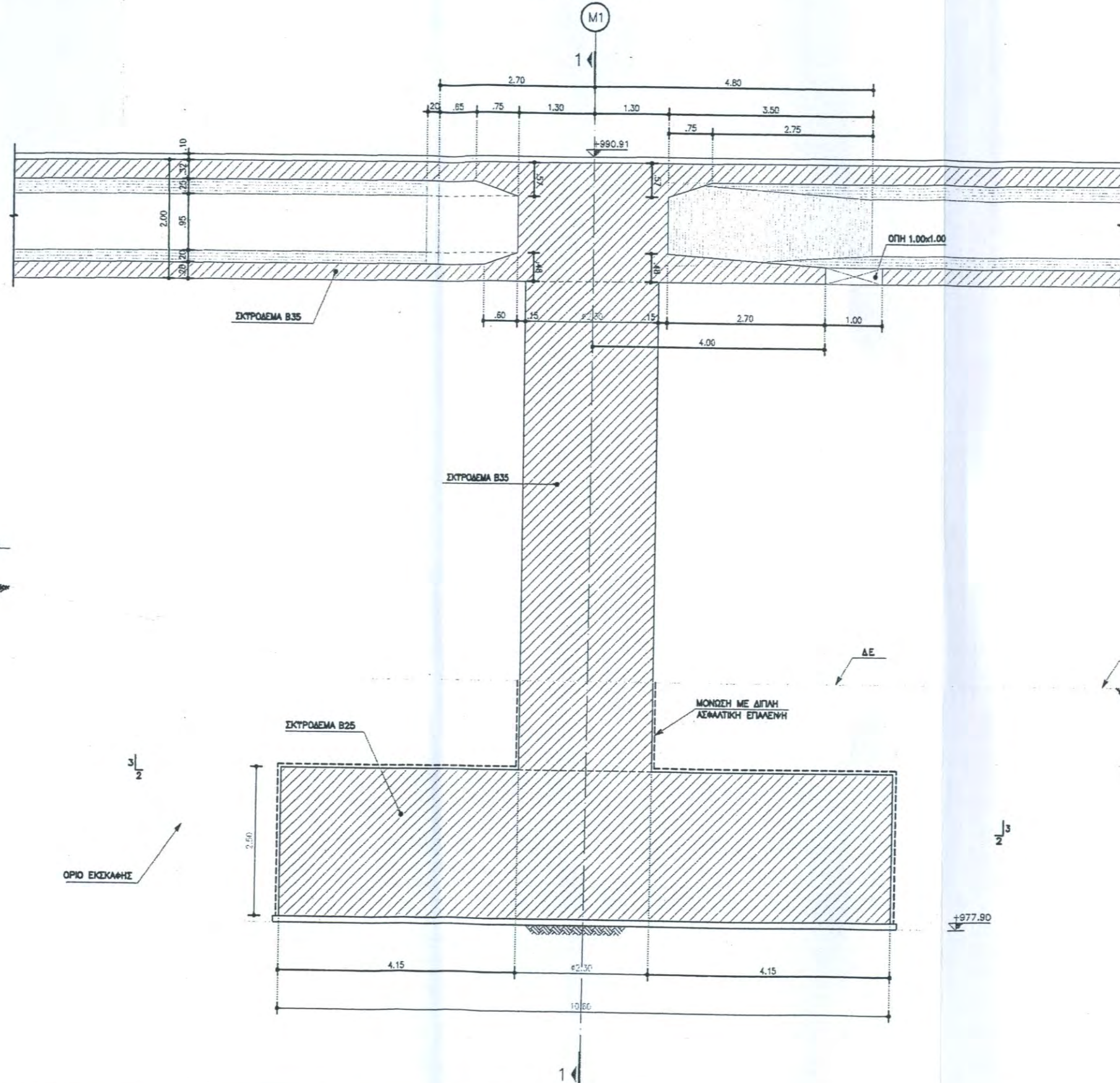
10.01

ΣΧΕΔΙΟ 11

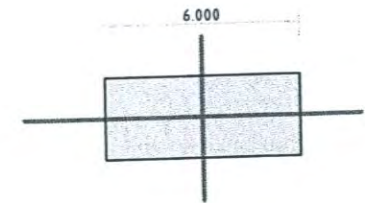
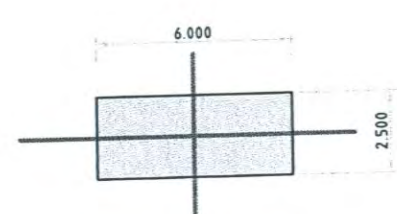
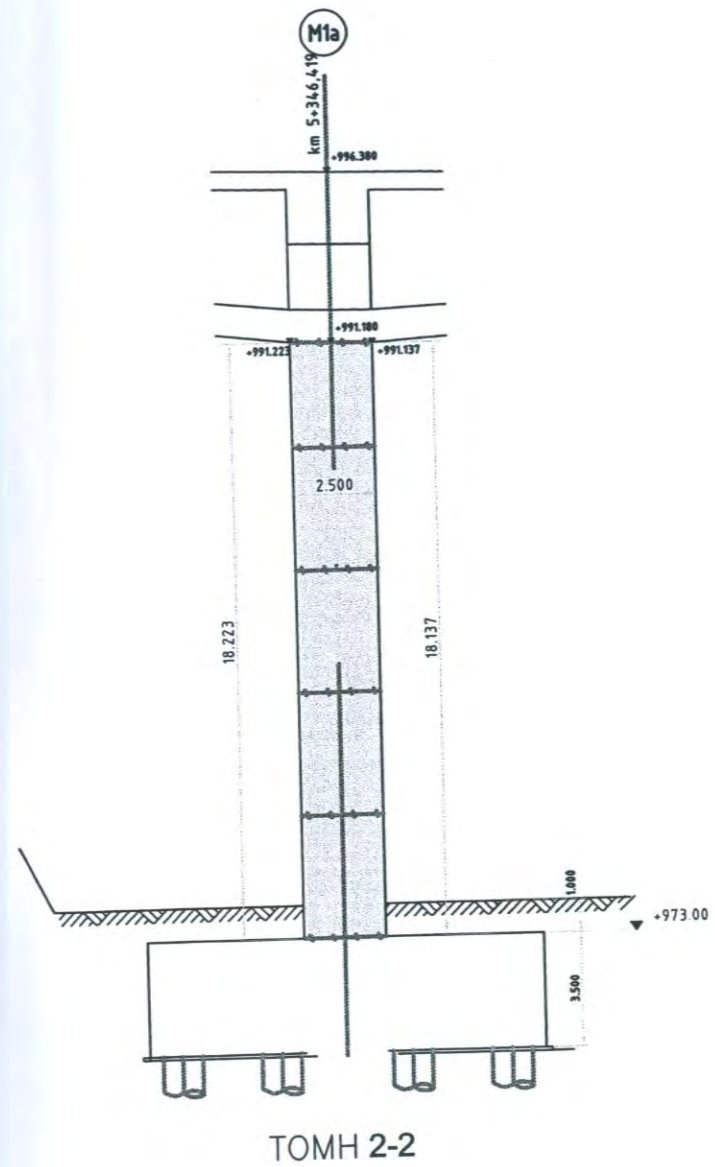
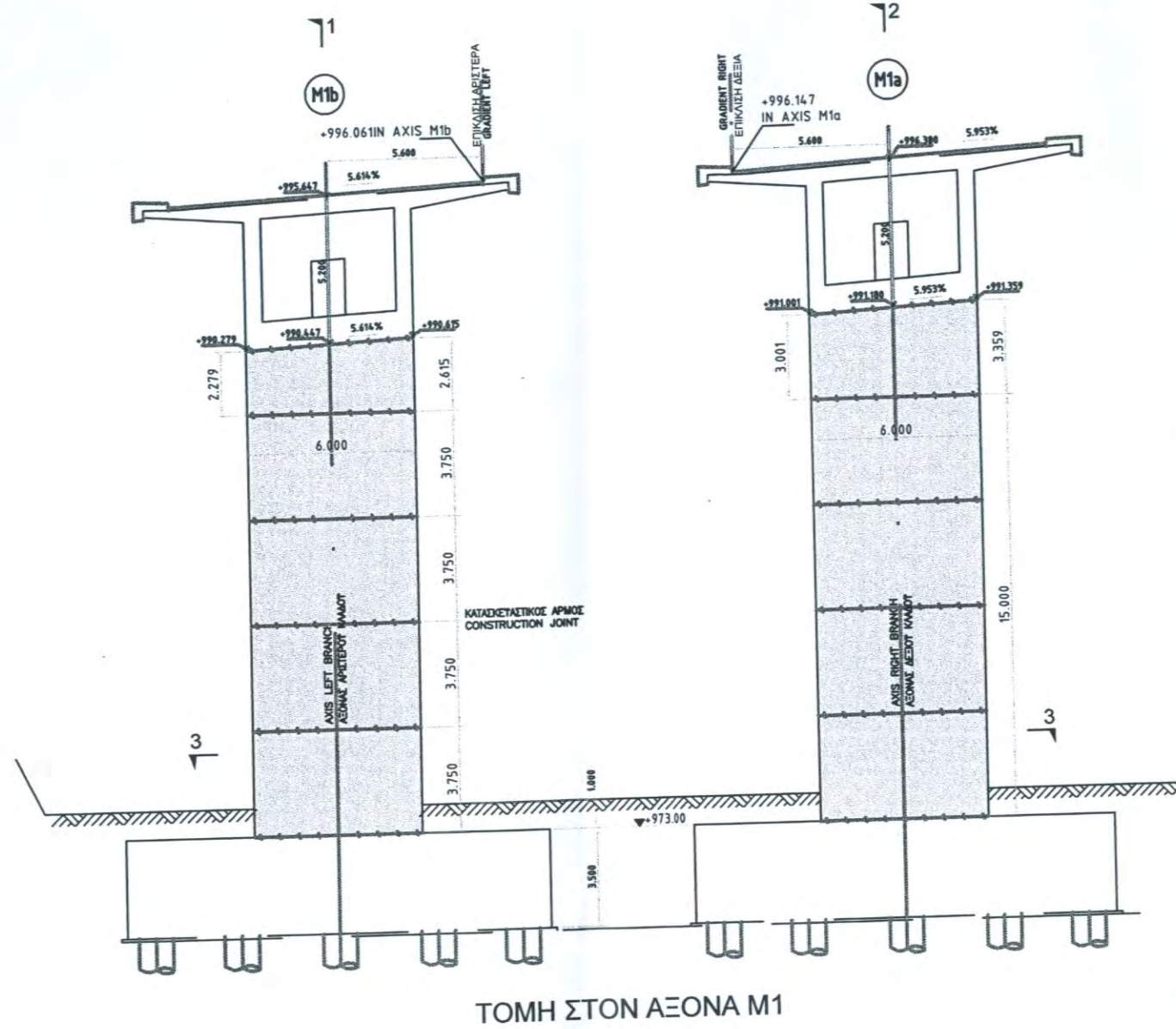
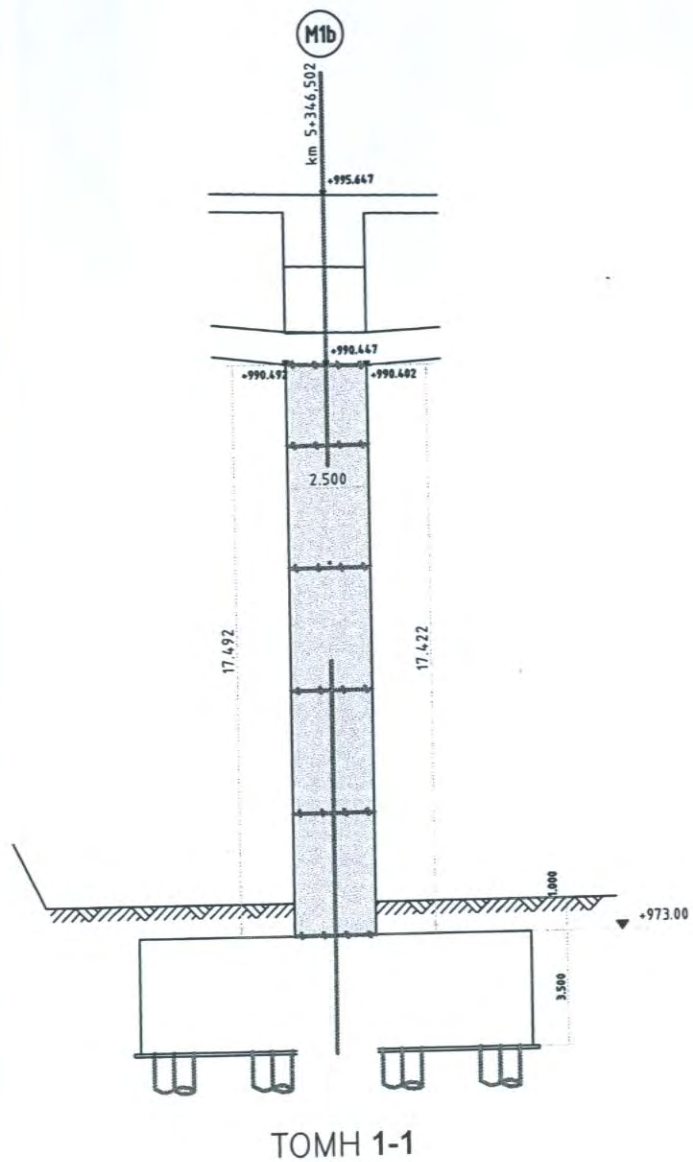


ΣΧΕΔΙΟ 11α

ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗ



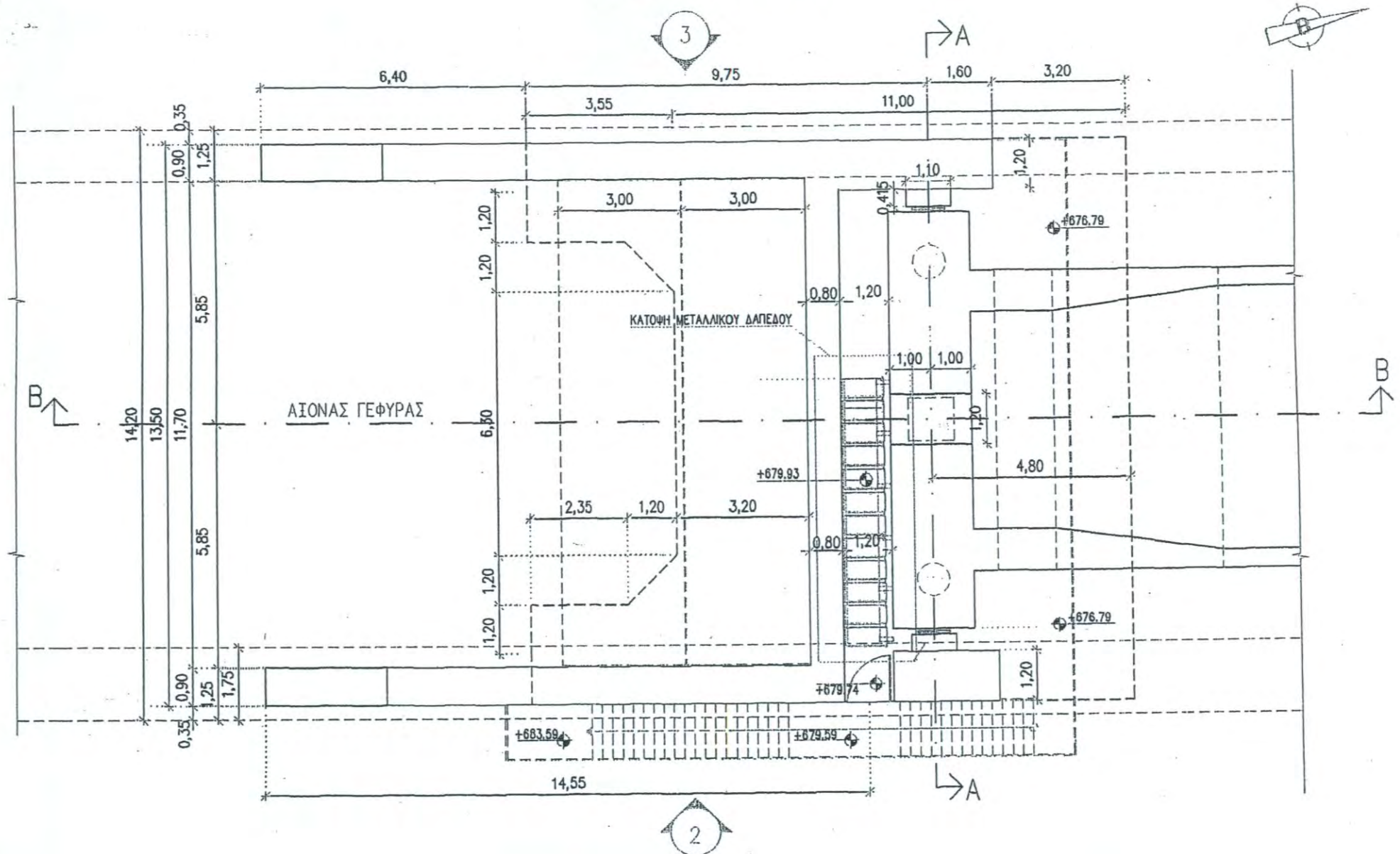
ΣΧΕΔΙΟ 12



TOMH 3-3

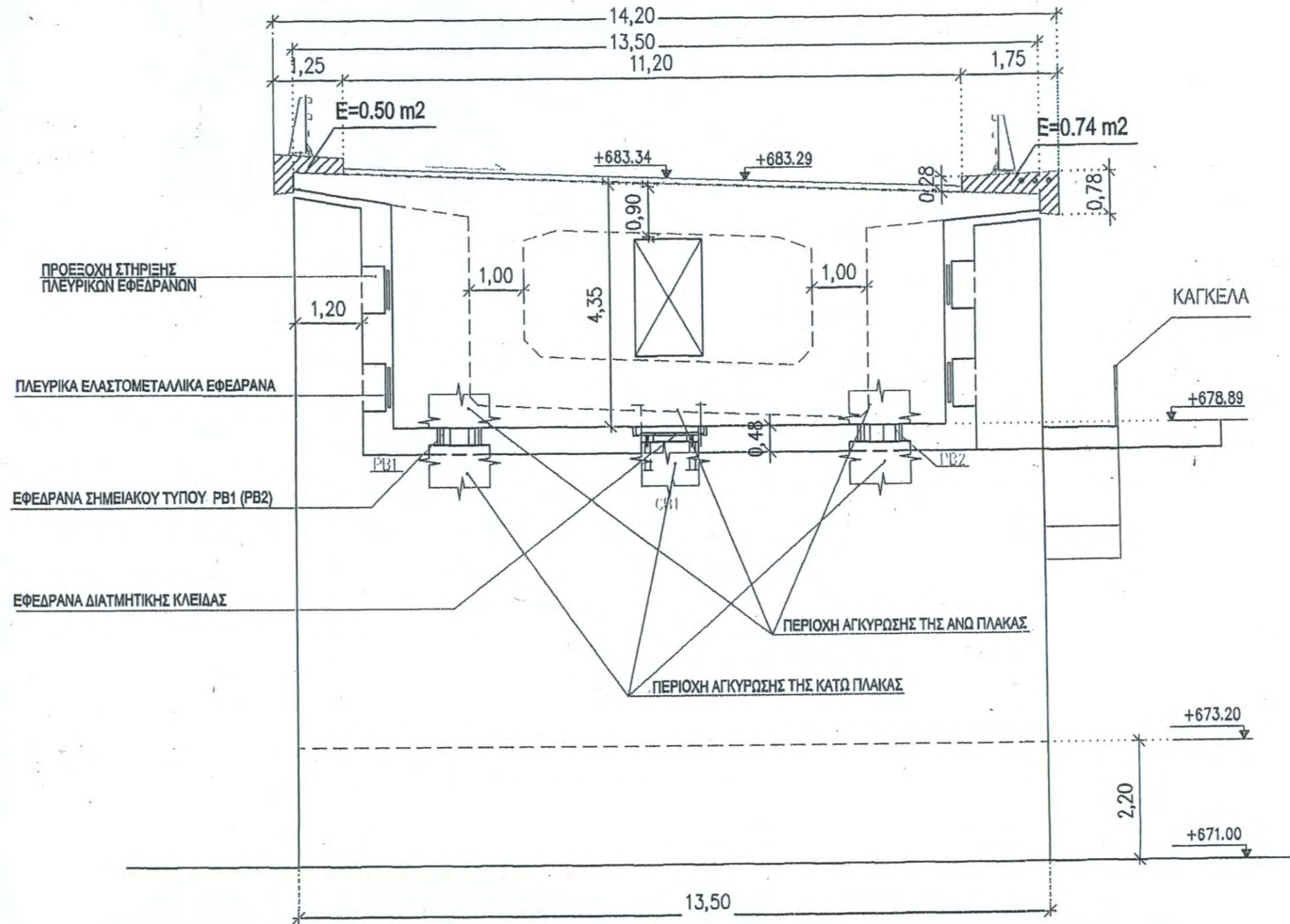
ΣΧΕΔΙΟ 13

ΓΕΝΙΚΗ ΚΑΤΟΨΗ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΥ



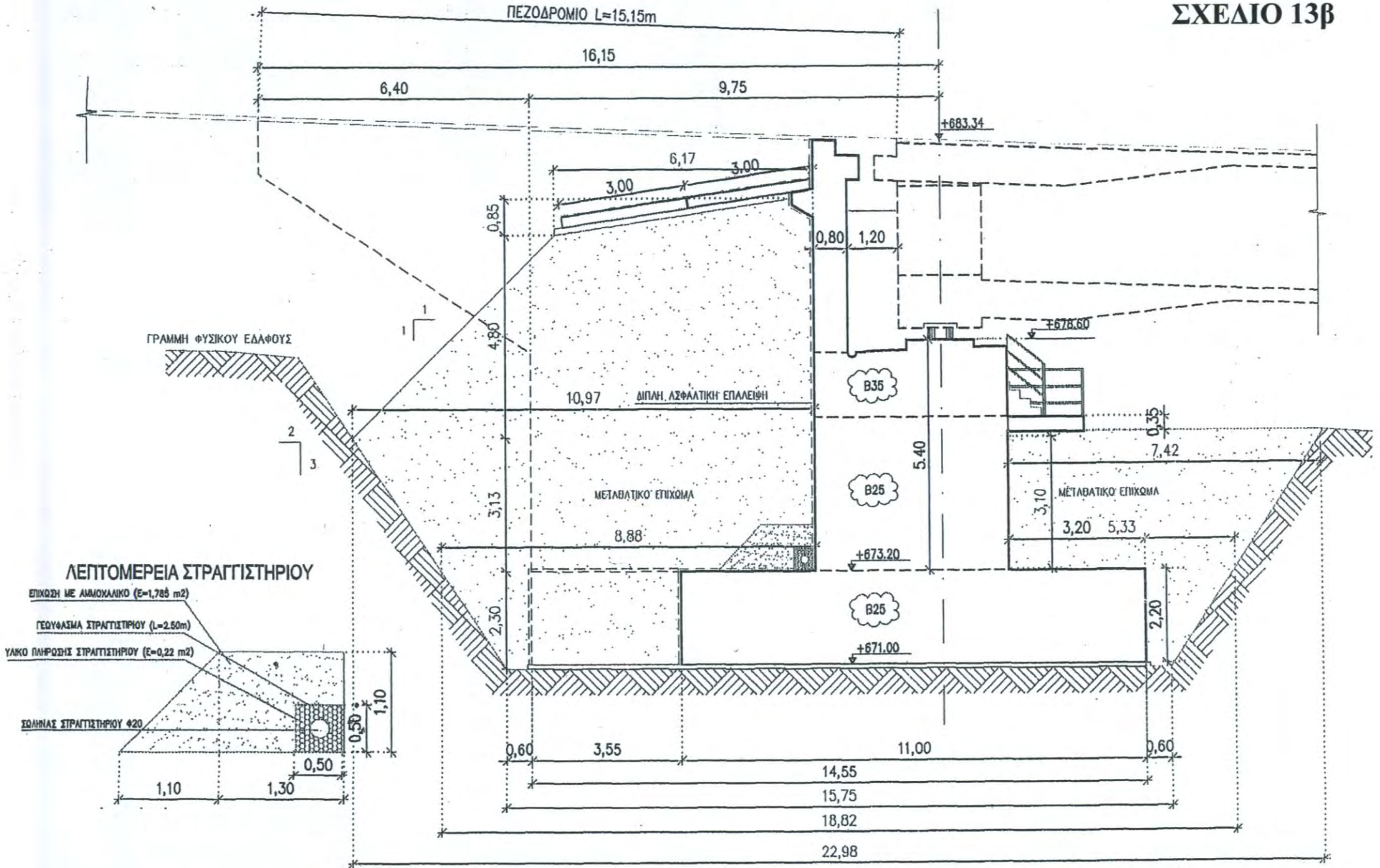
ΣΧΕΔΙΟ 13α

ΤΟΜΗ Α-Α



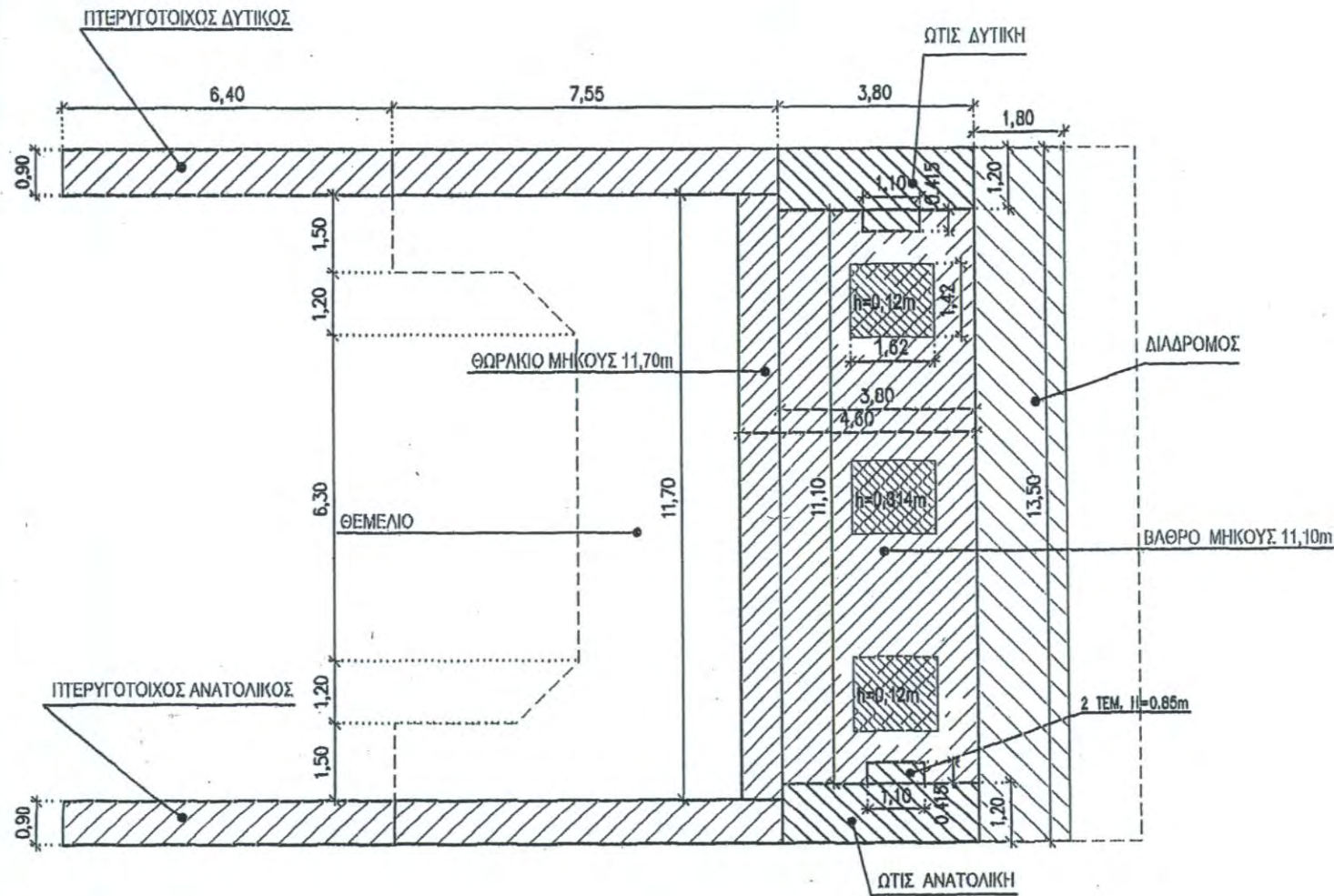
ΤΟΜΗ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΥ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ (ΤΟΜΗ Β-Β)

ΣΧΕΔΙΟ 13β

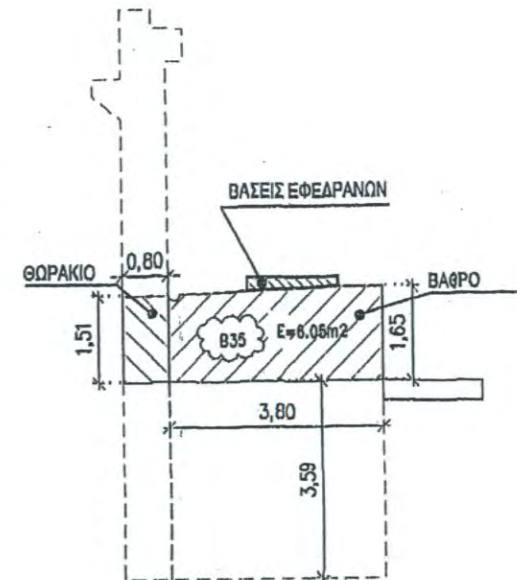


ΣΧΕΔΙΟ 13γ

ΓΕΝΙΚΗ ΚΑΤΟΨΗ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ



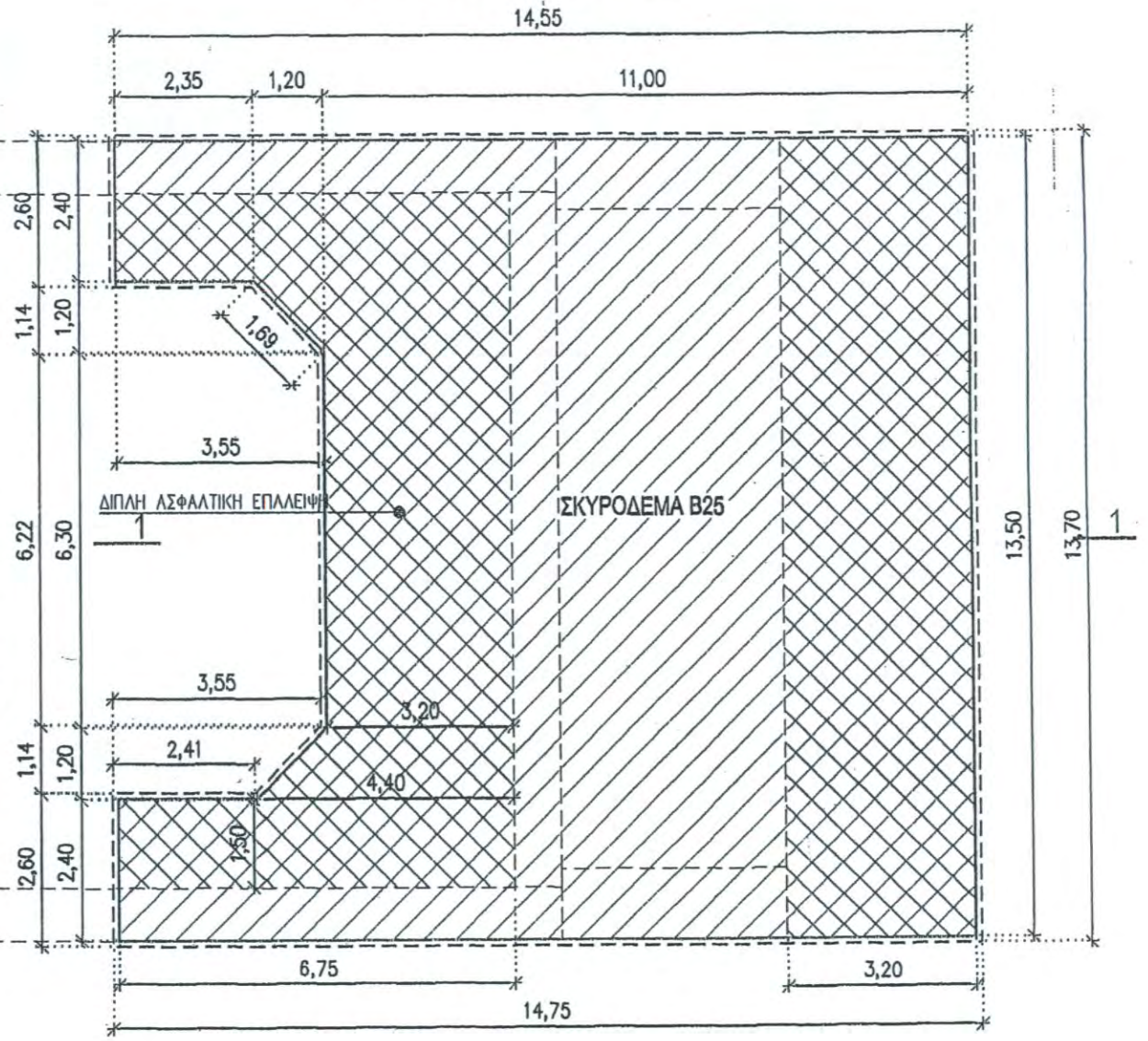
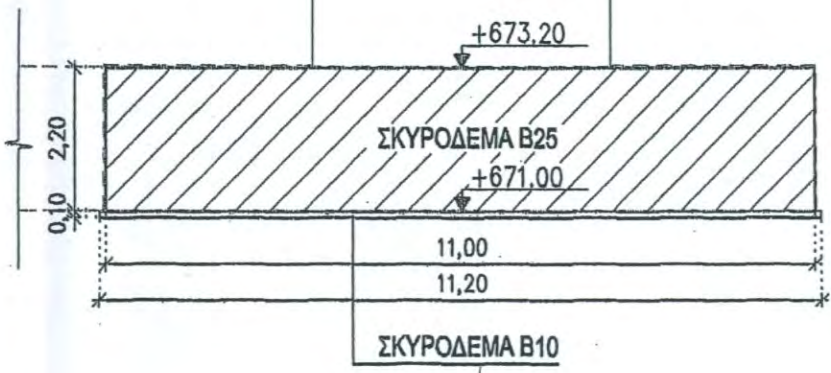
ΤΟΜΗ ΘΩΡΑΚΙΟΥ & ΒΑΘΡΟΥ



ΣΧΕΔΙΟ 138

ΚΑΤΟΨΗ ΠΛΑΚΑΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

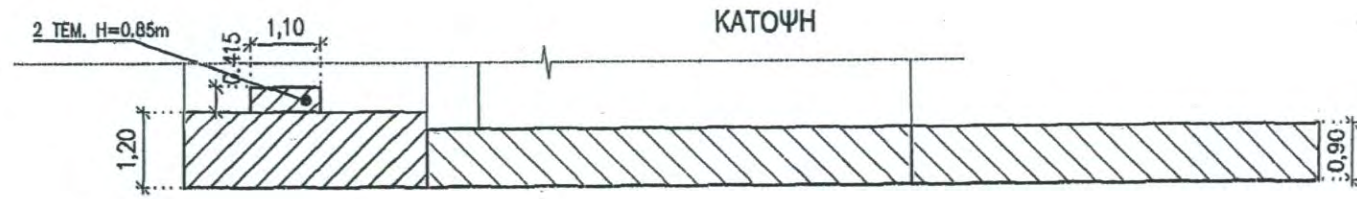
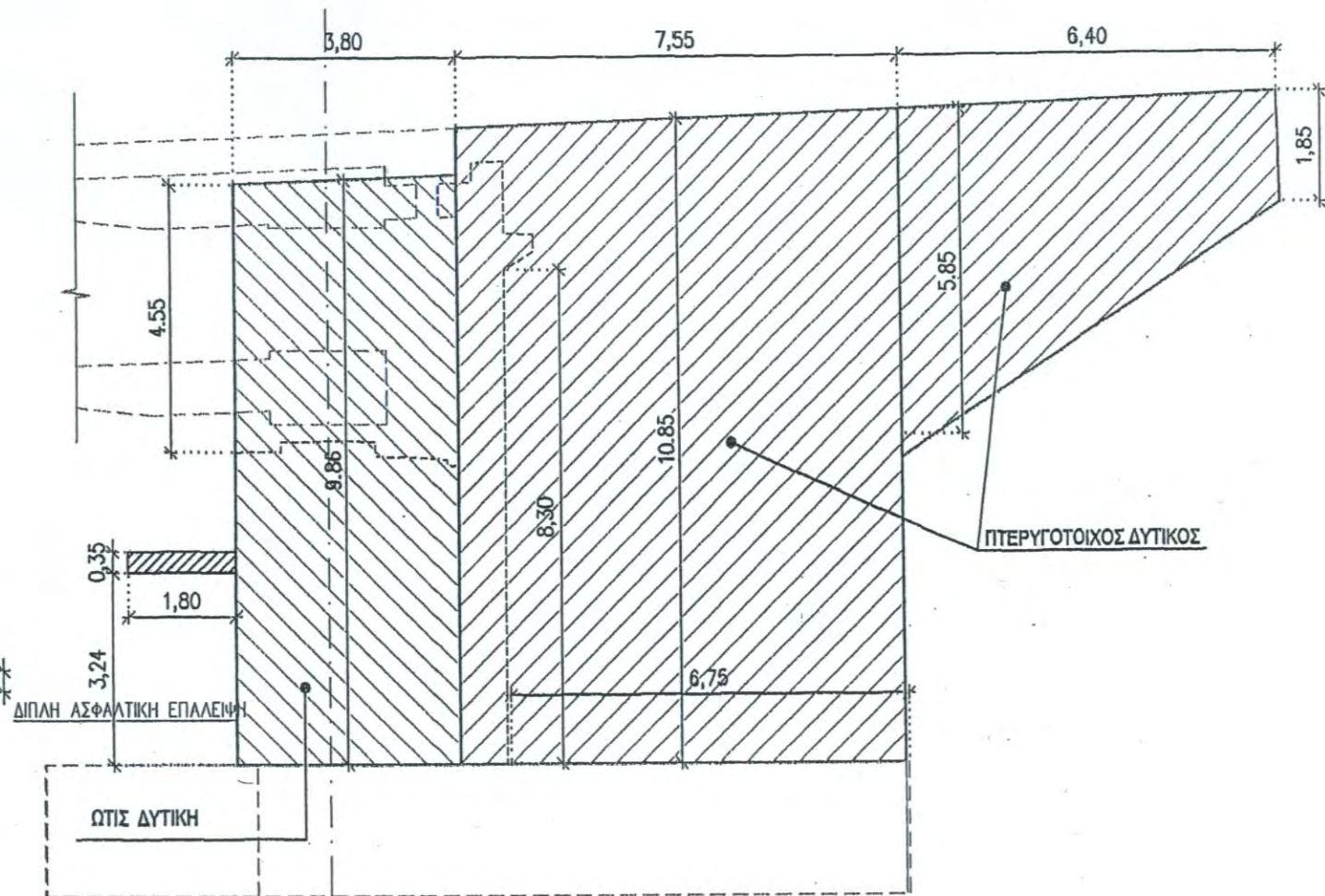
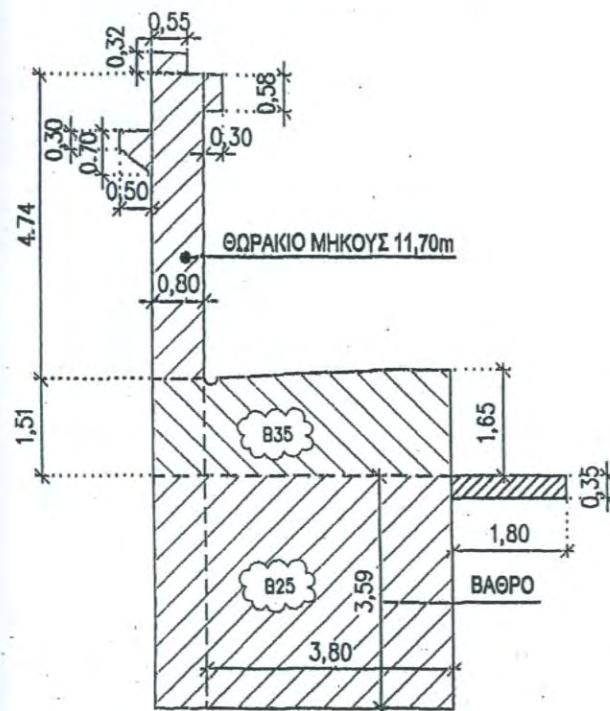
ΤΟΜΗ (1 - 1) ΠΛΑΚΑΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ



ΣΧΕΔΙΟ 13ε

ΔΥΤΙΚΗ ΟΨΗ (3)

ΤΟΜΗ ΘΩΡΑΚΙΟΥ & ΒΑΘΡΟΥ



ΠΤΕΡΥΓΟΤΟΙΧΟΣ ΔΥΤΙΚΟΣ

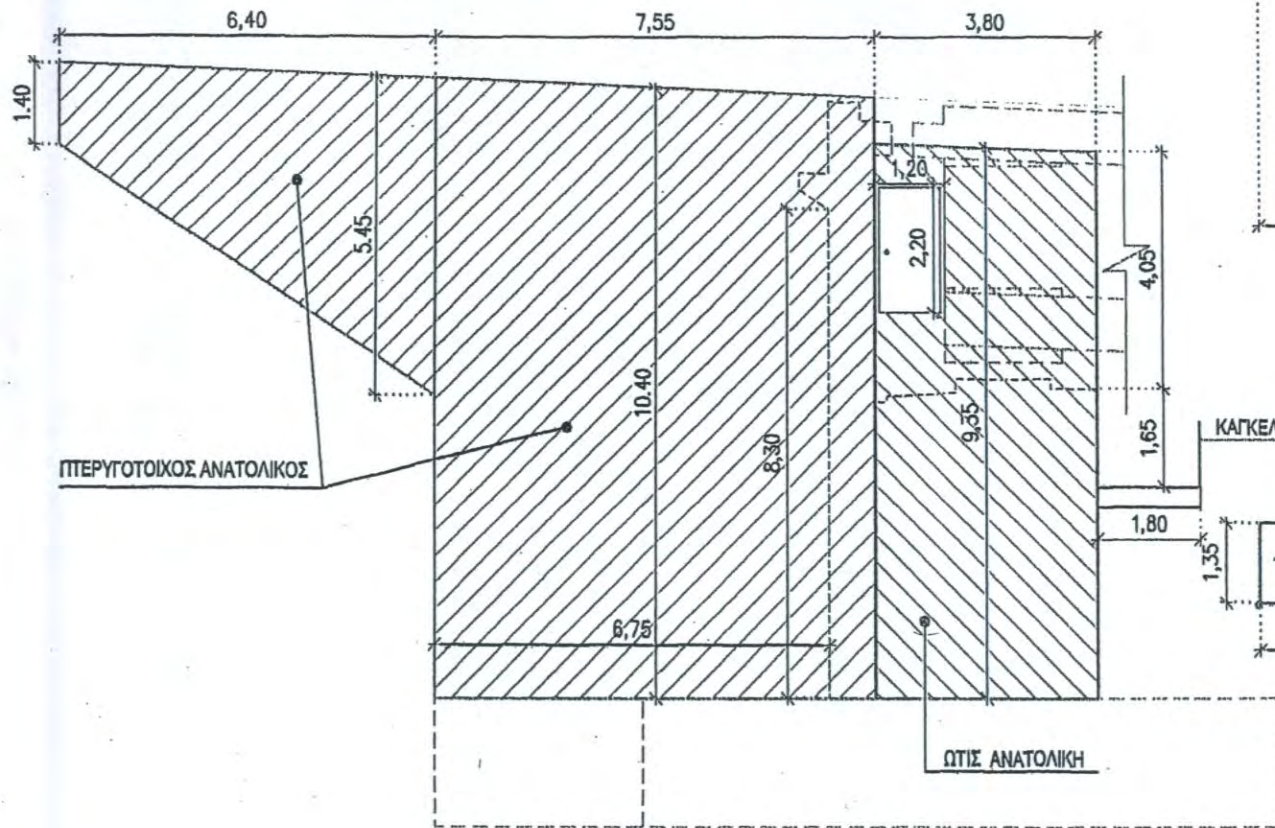
ΔΙΠΛΗ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ ΕΠΑΛΕΣΗ

ΩΤΙΣ ΔΥΤΙΚΗ

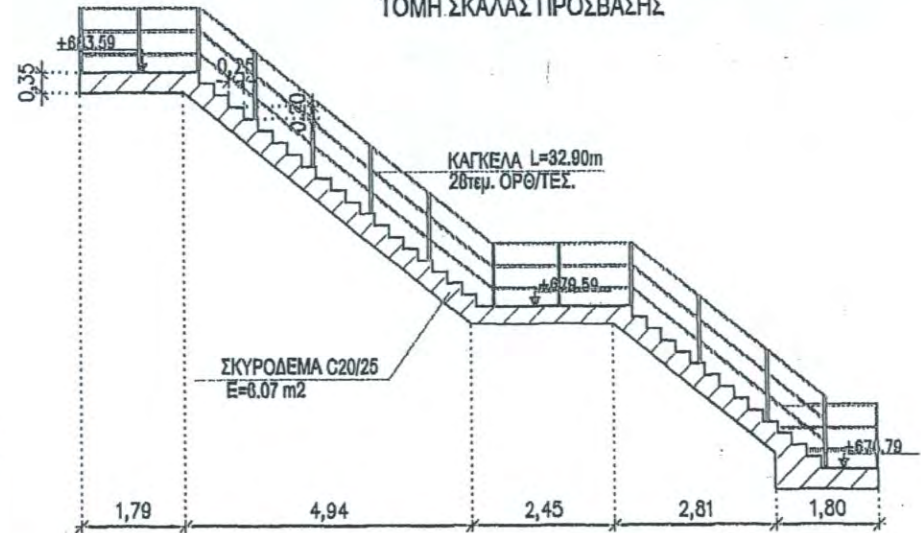
ΚΑΤΟΨΗ

ΣΧΕΔΙΟ 13στ

ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΟΨΗ (2)



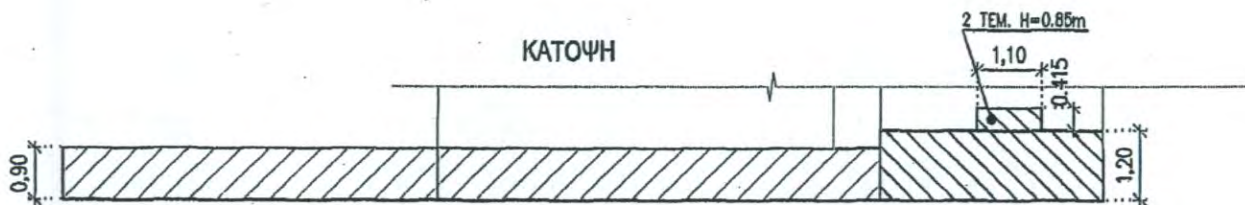
ΤΟΜΗ ΣΚΑΛΑΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ



ΚΑΤΟΨΗ ΣΚΑΛΑΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ



ΚΑΤΟΨΗ

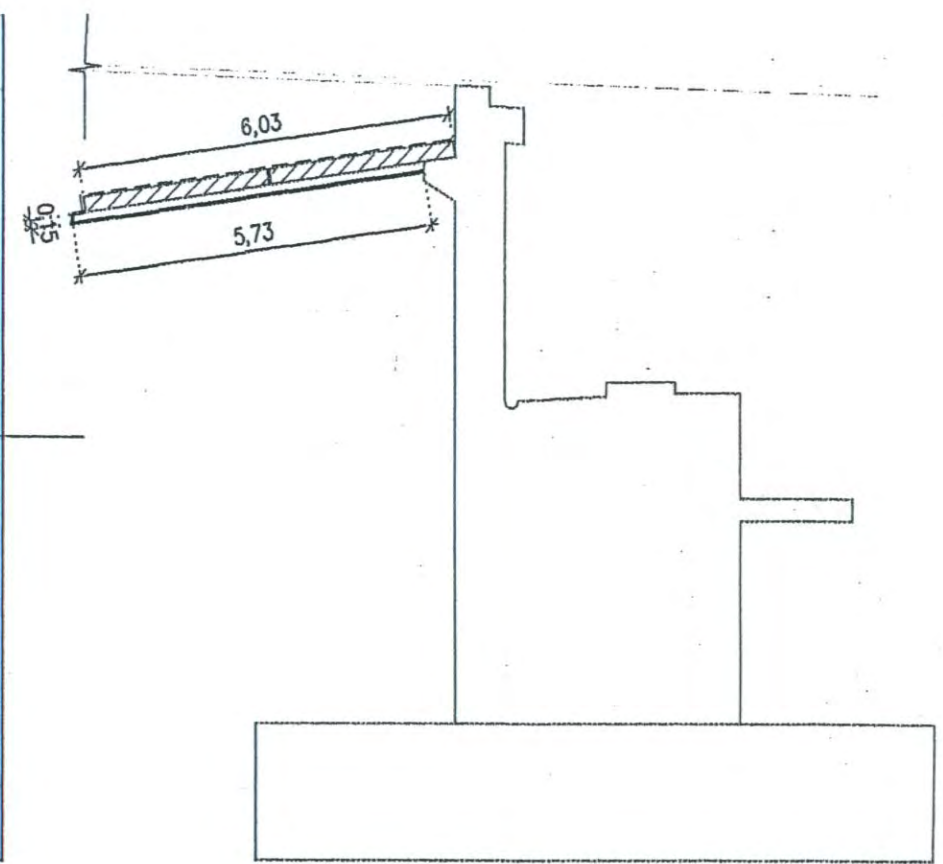
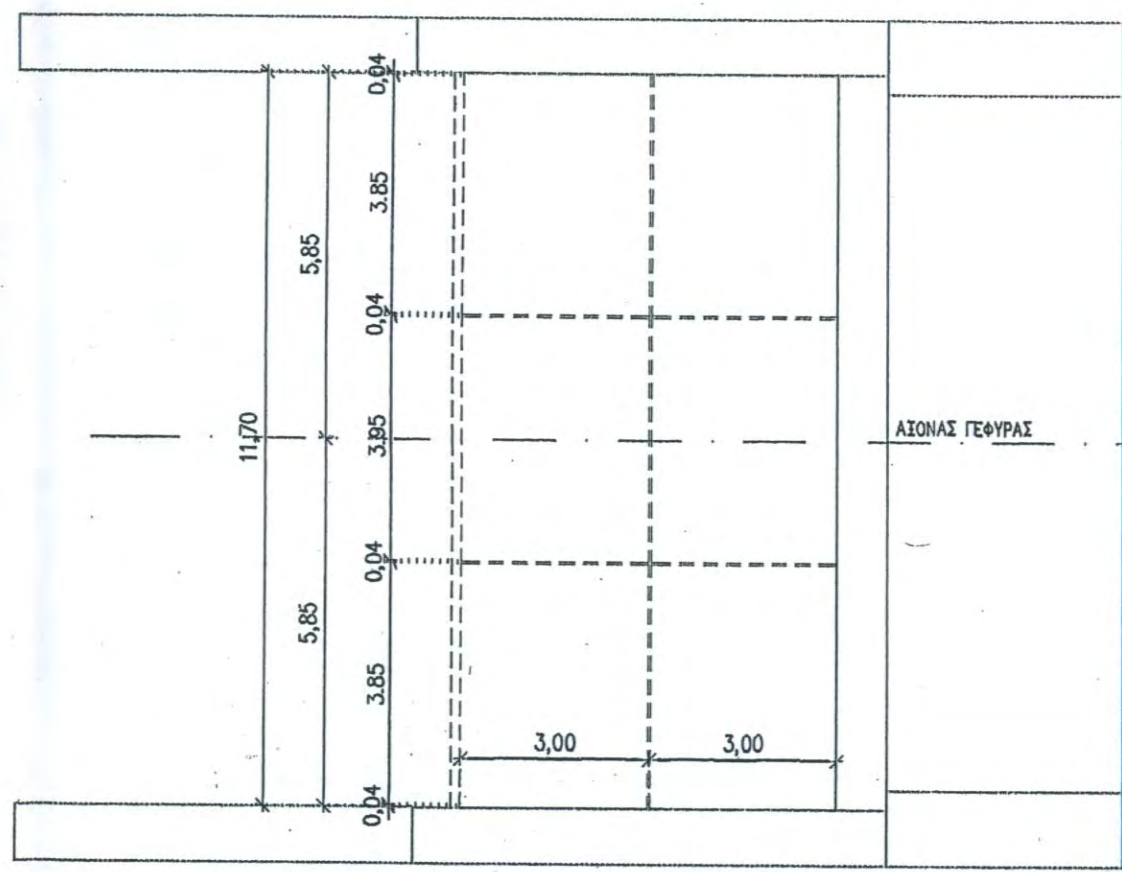


ΣΧΕΔΙΟ 13ζ

ΠΛΑΚΕΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

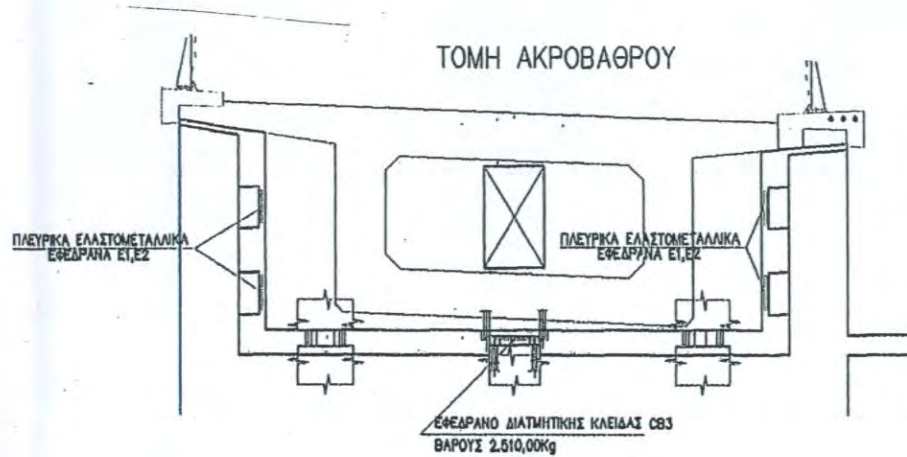
ΚΑΤΩΨΗ

ΤΟΜΗ



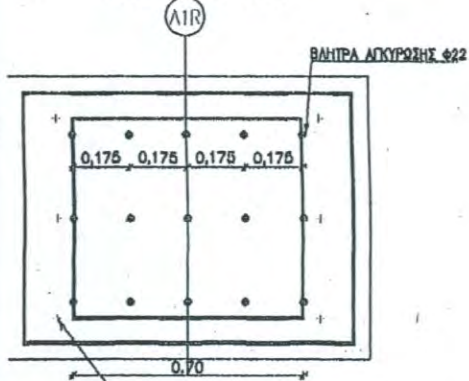
ΕΓΚΑΡΣΙΟΙ ΣΕΙΣΜΙΚΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

ΣΧΕΔΙΟ 13η



ΠΛΕΥΡΙΚΑ ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ

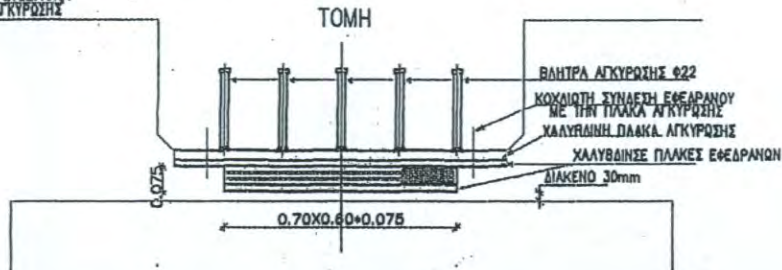
ΟΨΗ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ



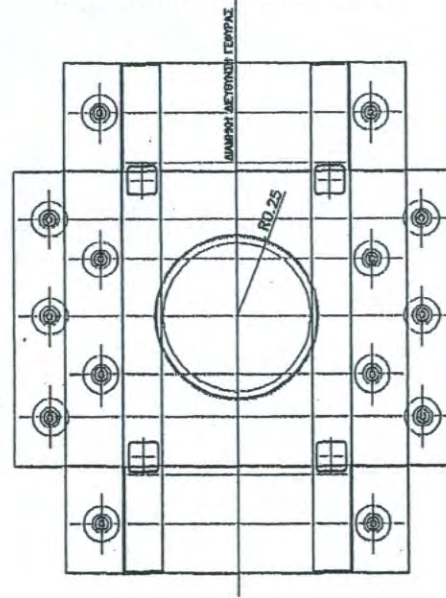
ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ



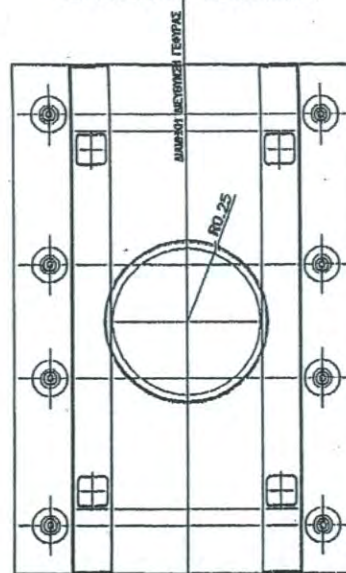
ΚΟΧΛΙΩΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΠΛΑΚΑ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ



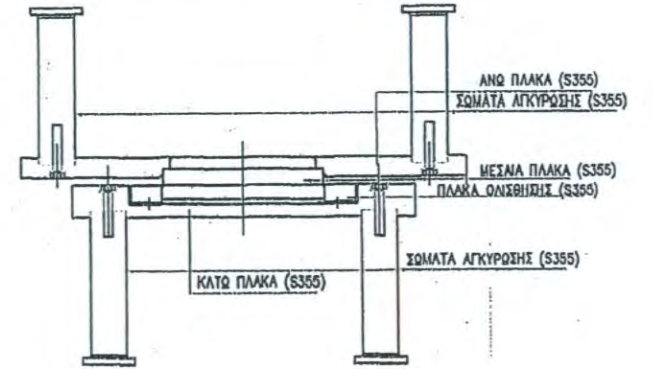
ΚΑΤΟΨΗ ΑΝΩ ΠΛΑΚΑΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΤΥΠΟΥ



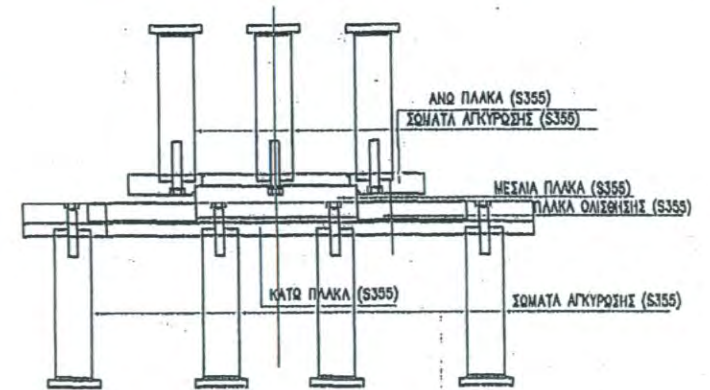
ΚΑΤΟΨΗ ΚΑΤΩ ΠΛΑΚΑΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ



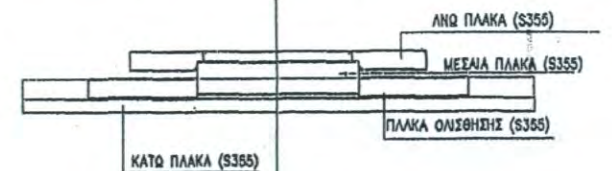
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΤΟΜΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΥ



ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΤΟΜΗ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΤΟΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ



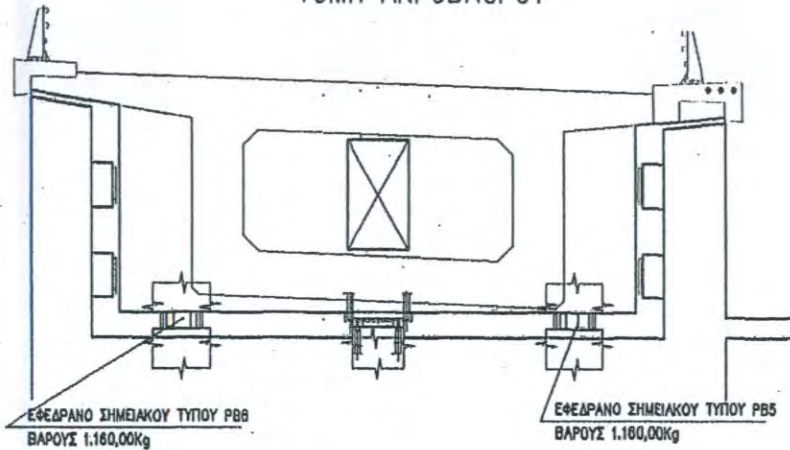
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΤΟΜΗ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΤΟΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ



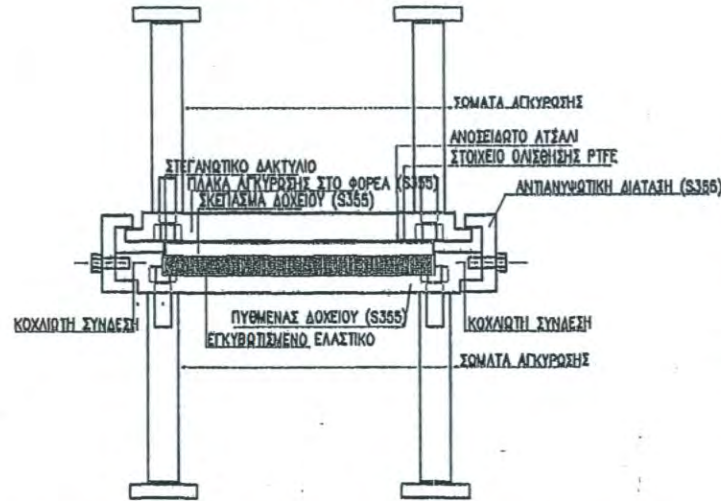
ΣΧΕΔΙΟ 130

ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΣΗΜΕΙΑΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

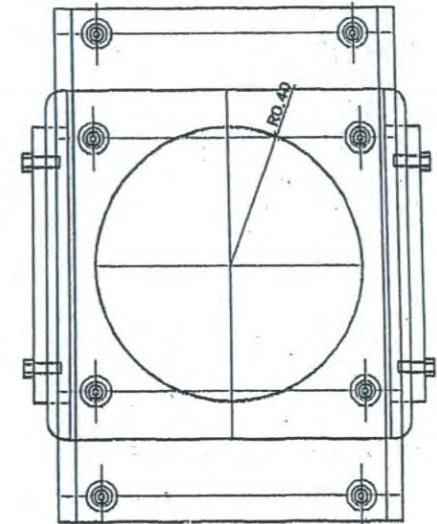
ΤΟΜΗ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΥ



ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΤΟΜΗ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ PB5,PB6 ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΥ



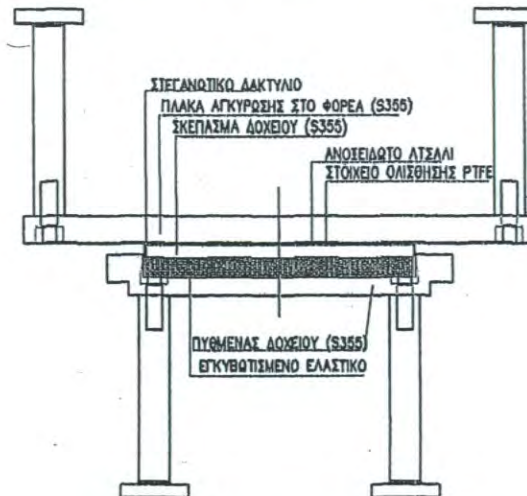
ΚΑΤΟΨΗ ΑΝΩ ΠΛΑΚΑΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ PB5,PB6



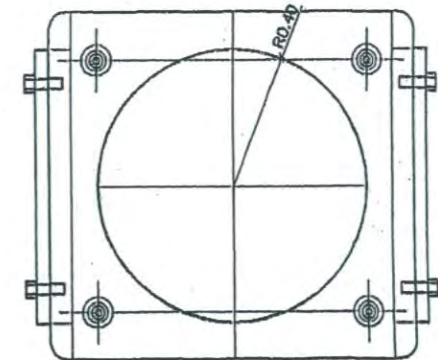
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΤΟΜΗ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ PB5,PB6 ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΥ



ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΤΟΜΗ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ PB5,PB6 ΣΤΟΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ



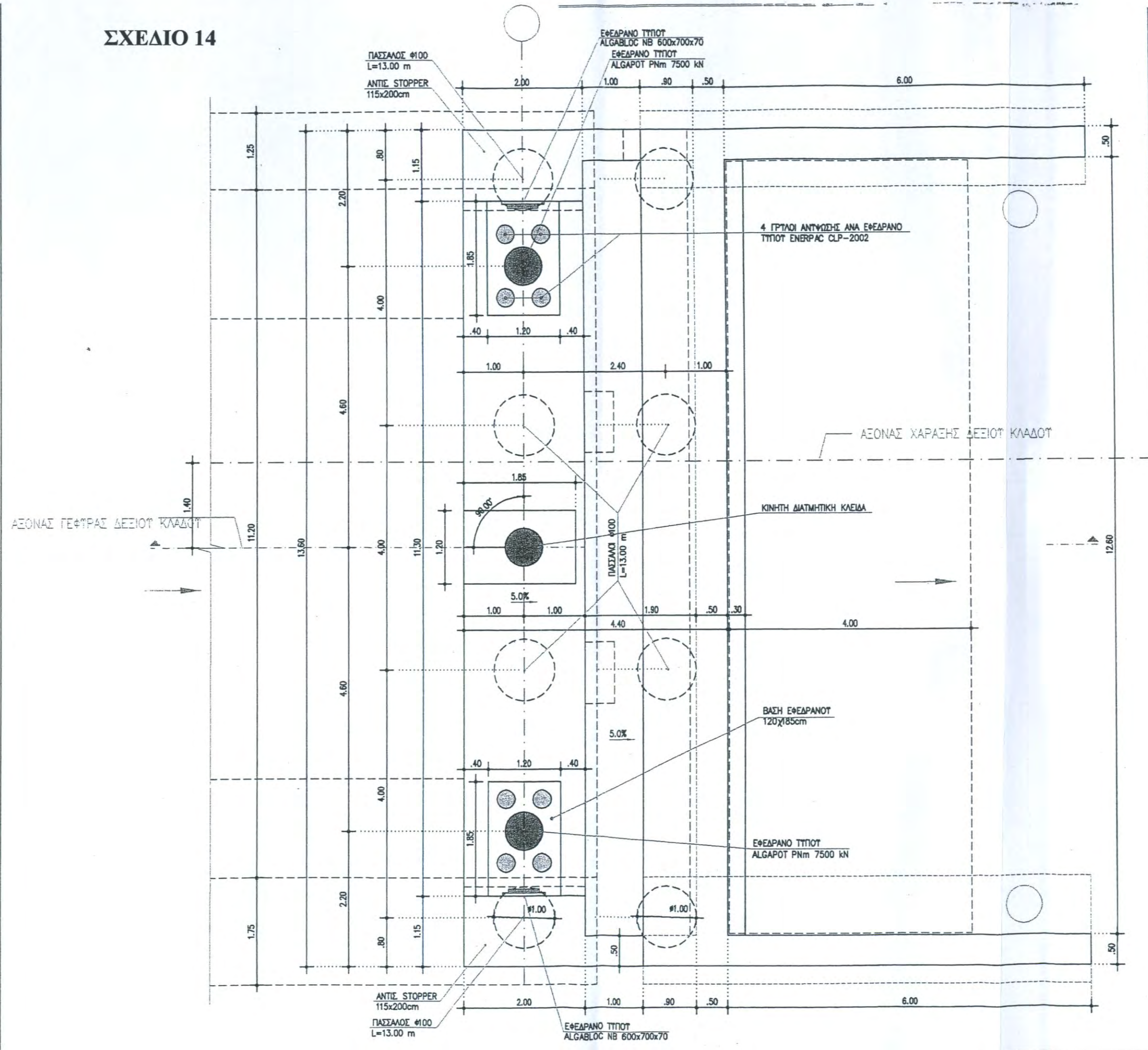
ΚΑΤΟΨΗ ΚΑΤΩ ΠΛΑΚΑΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ PB5,PB6



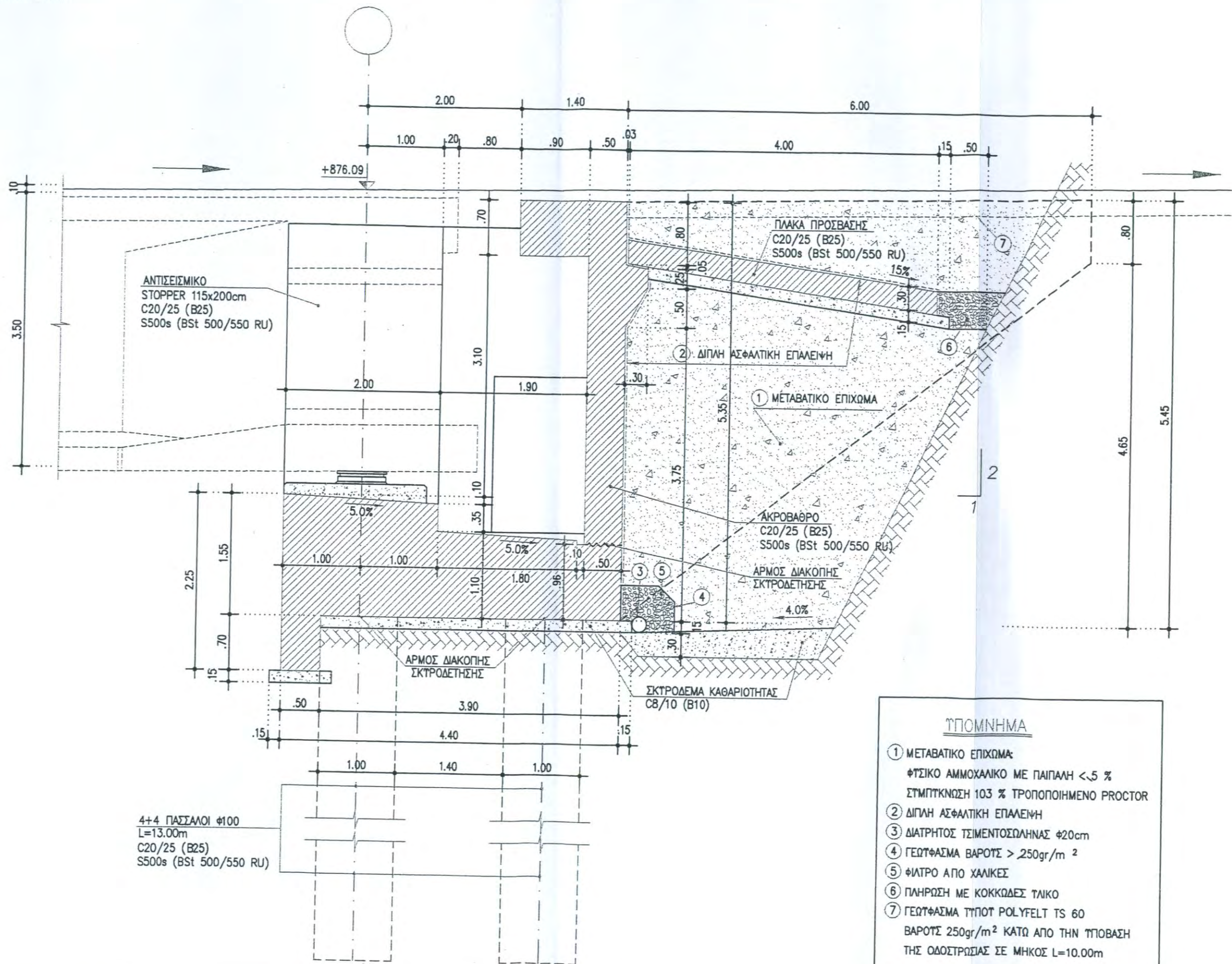
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΤΟΜΗ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ PB5,PB6 ΤΟΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ



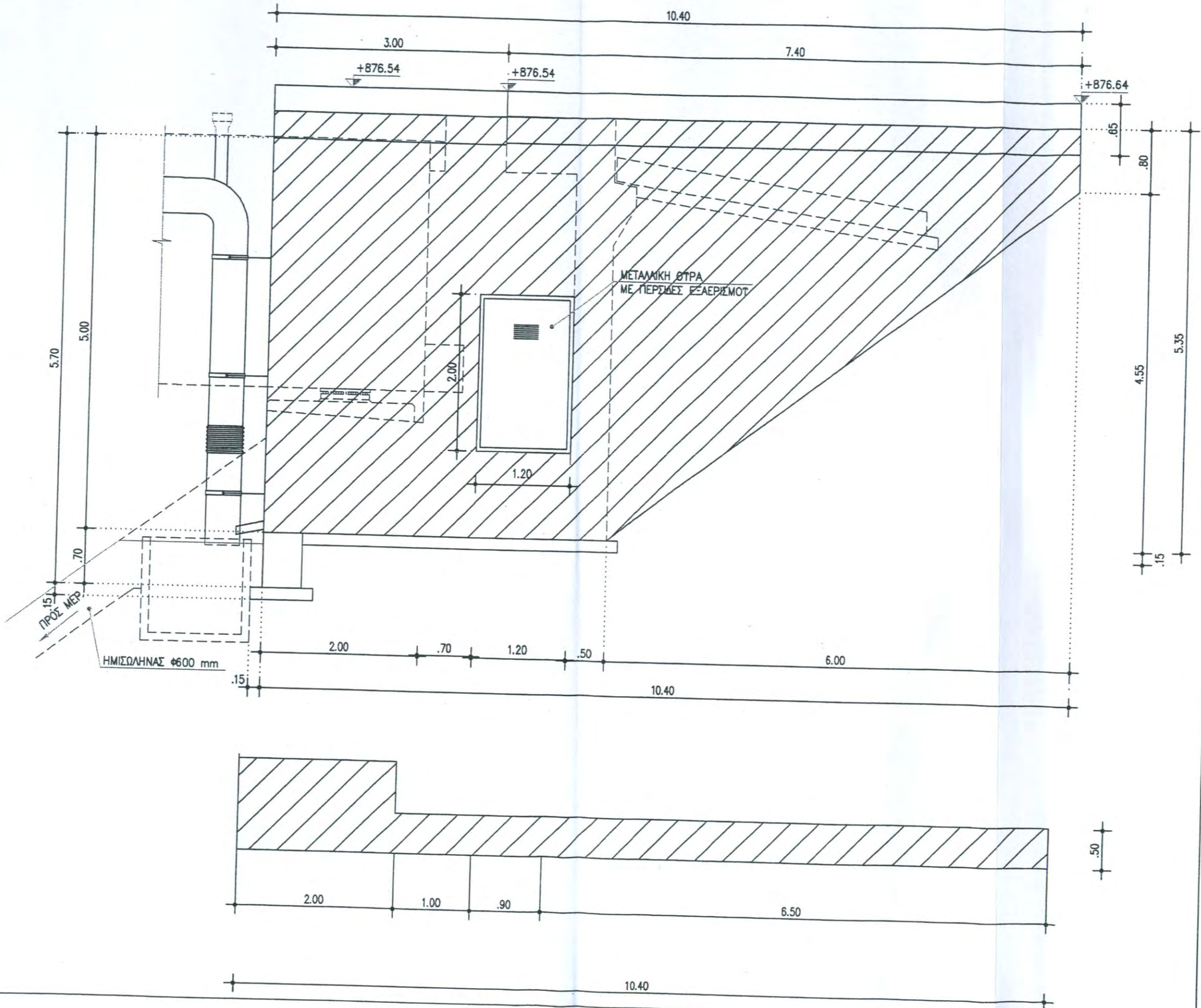
ΣΧΕΔΙΟ 14



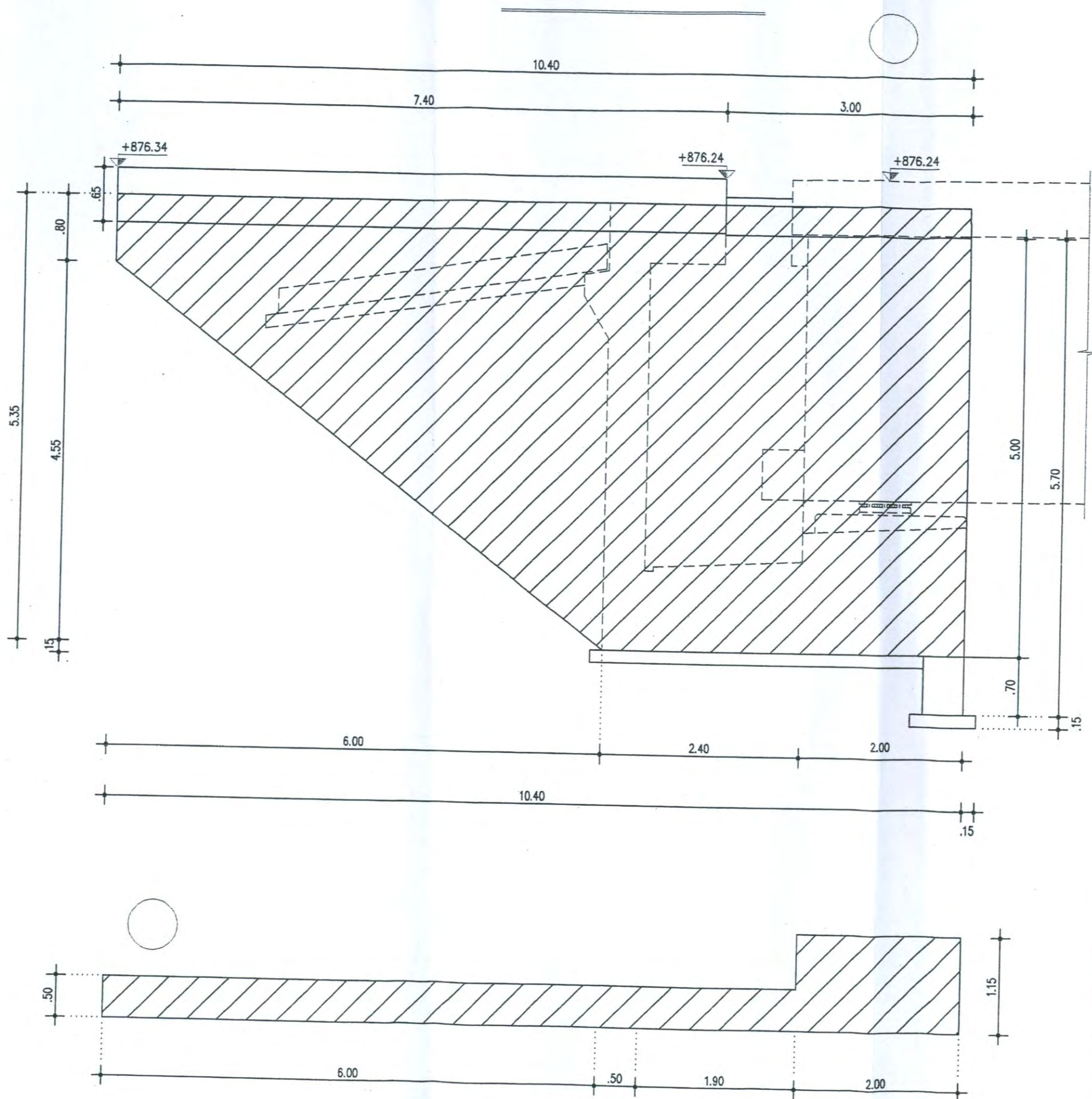
ΣΧΕΔΙΟ 14α



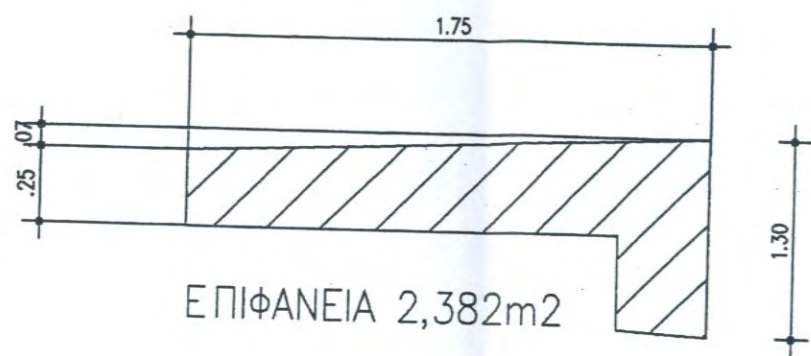
ΣΧΕΔΙΟ 14β



ΣΧΕΔΙΟ 14γ



ΤΟΜΗ ΔΕΞΙΟΥ ΠΕΖΟΔΡΟΜΙΟΥ



ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ 2,382m²

ΜΗΚΟΣ ΠΕΖΟΔΡΟΜΙΟΥ 7,40m

ΤΟΜΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟΥ ΠΕΖΟΔΡΟΜΙΟΥ

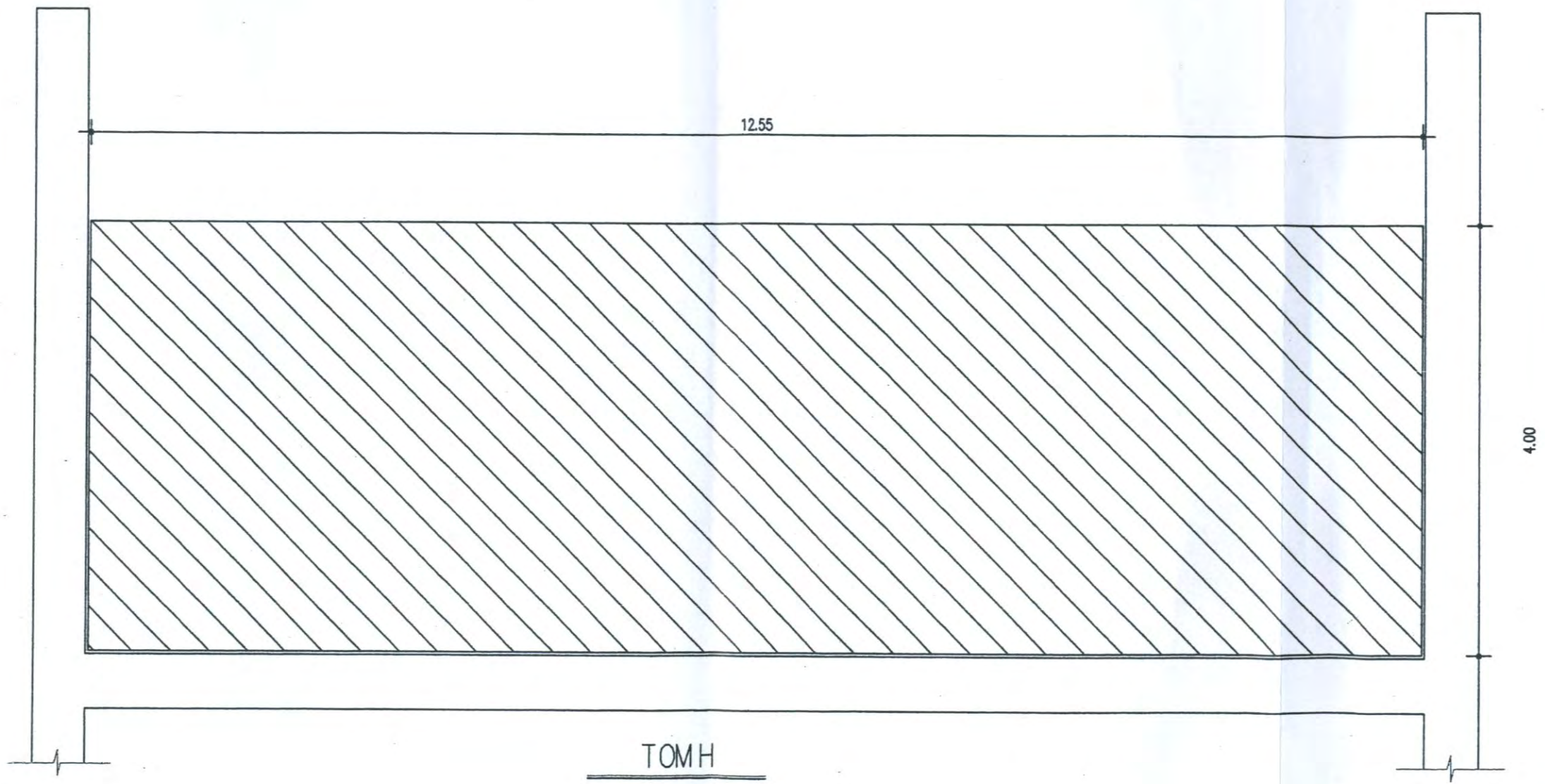


1.25 ΜΗΚΟΣ ΠΕΖΟΔΡΟΜΙΟΥ 7,40m

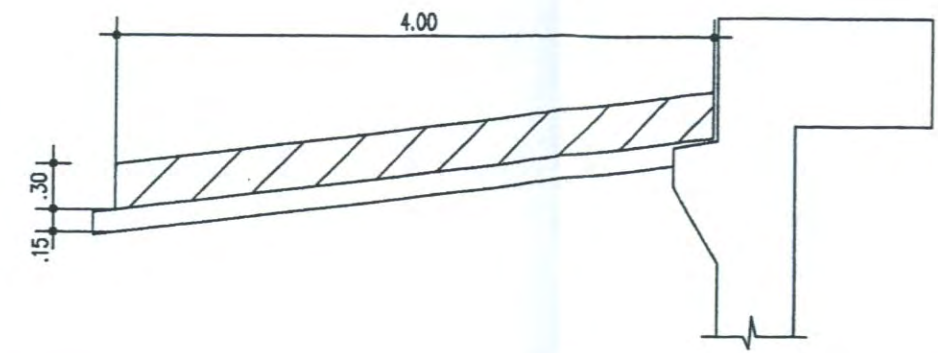
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ 1,785m²

ΣΧΕΔΙΟ 14ε

ΠΛΑΚΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ RA2



ΤΟΜΗ

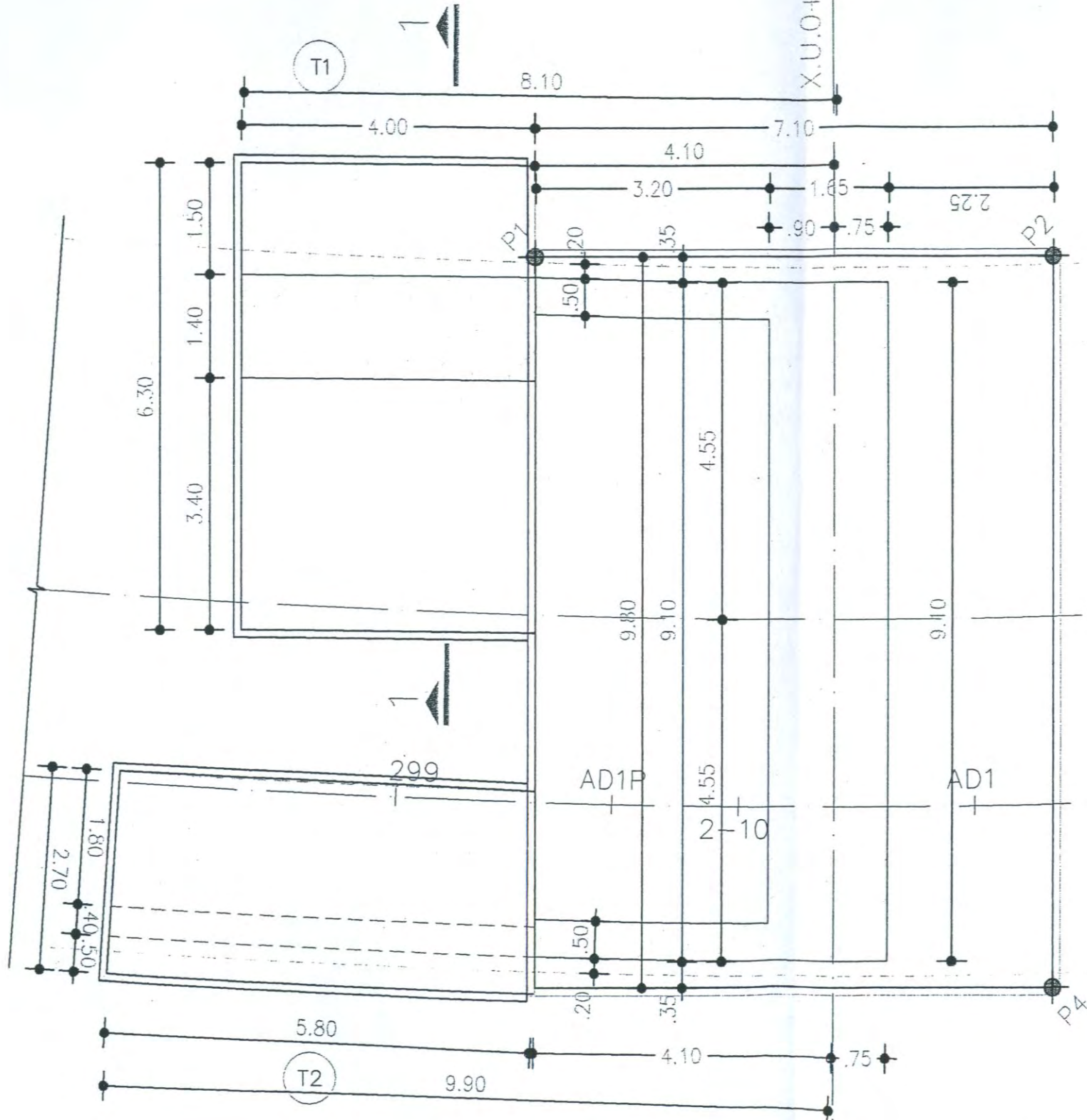


ΣΧΕΔΙΟ 15

ΚΑΙΟΥΠ

A1

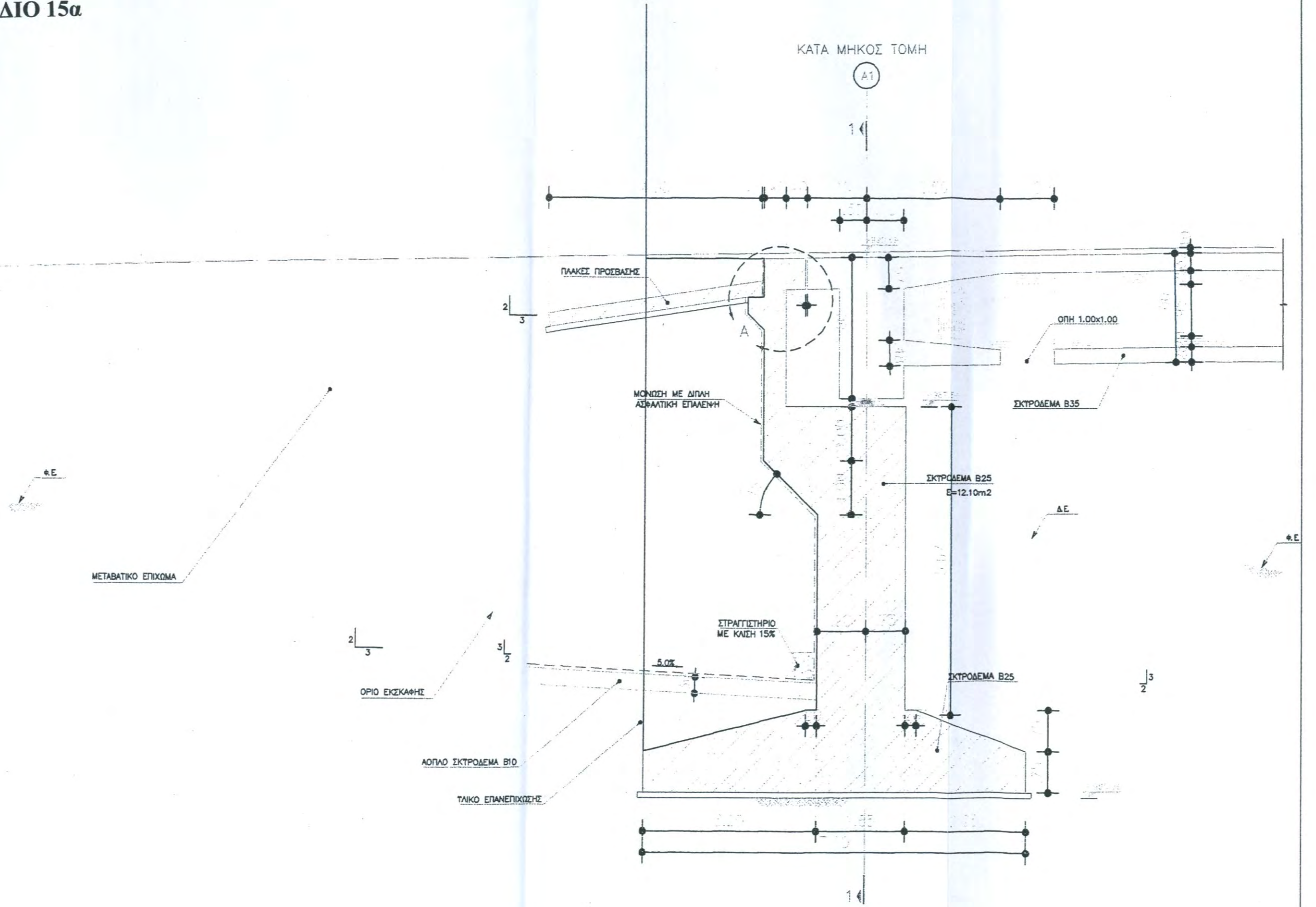
X.U.0+381.04



ΤΟΜΗ ΤΟΙΧΟΥ
ΚΛ 1:100

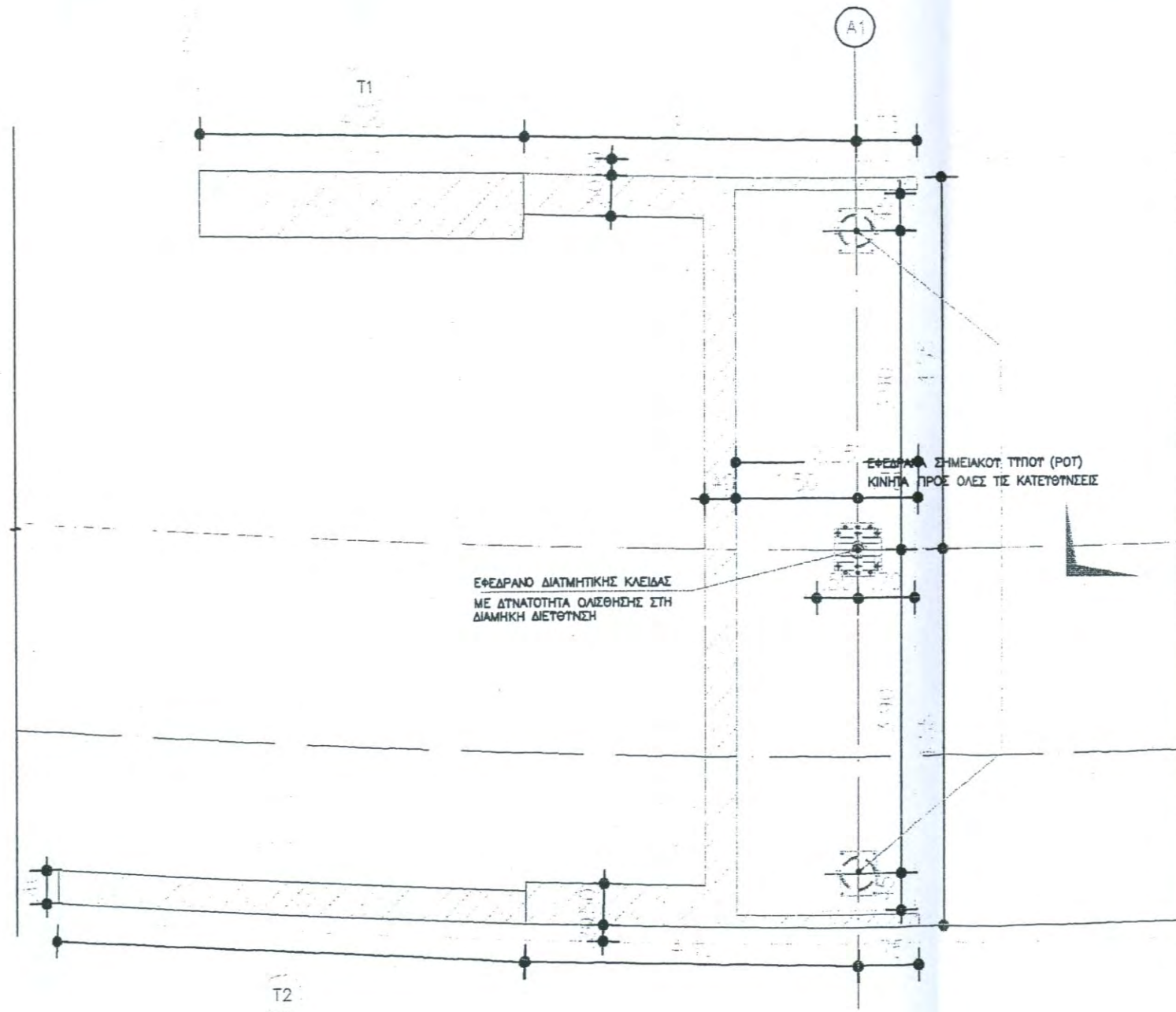


ΣΧΕΔΙΟ 15α

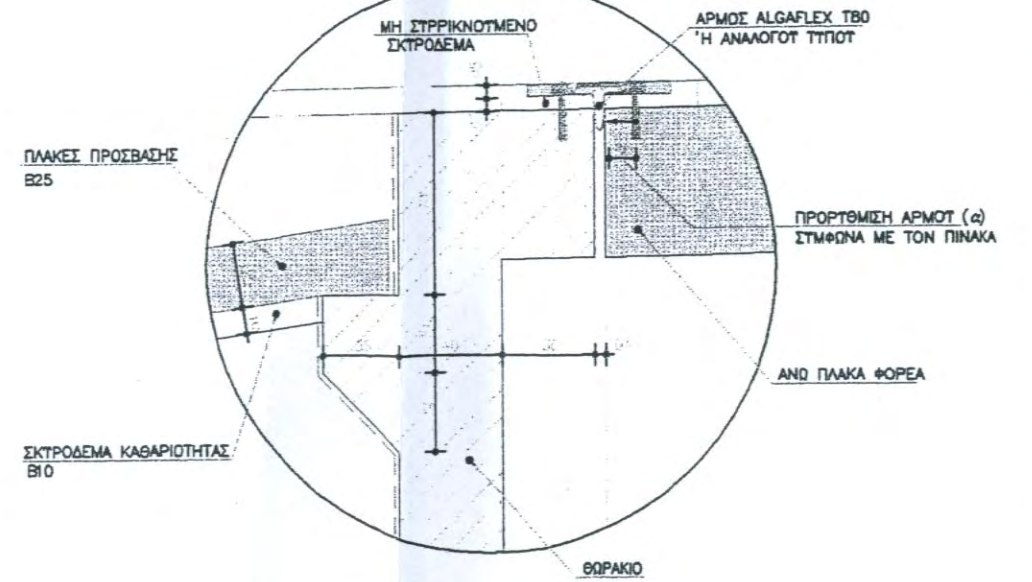


ΣΧΕΔΙΟ 15β

ΤΟΜΗ 2-2

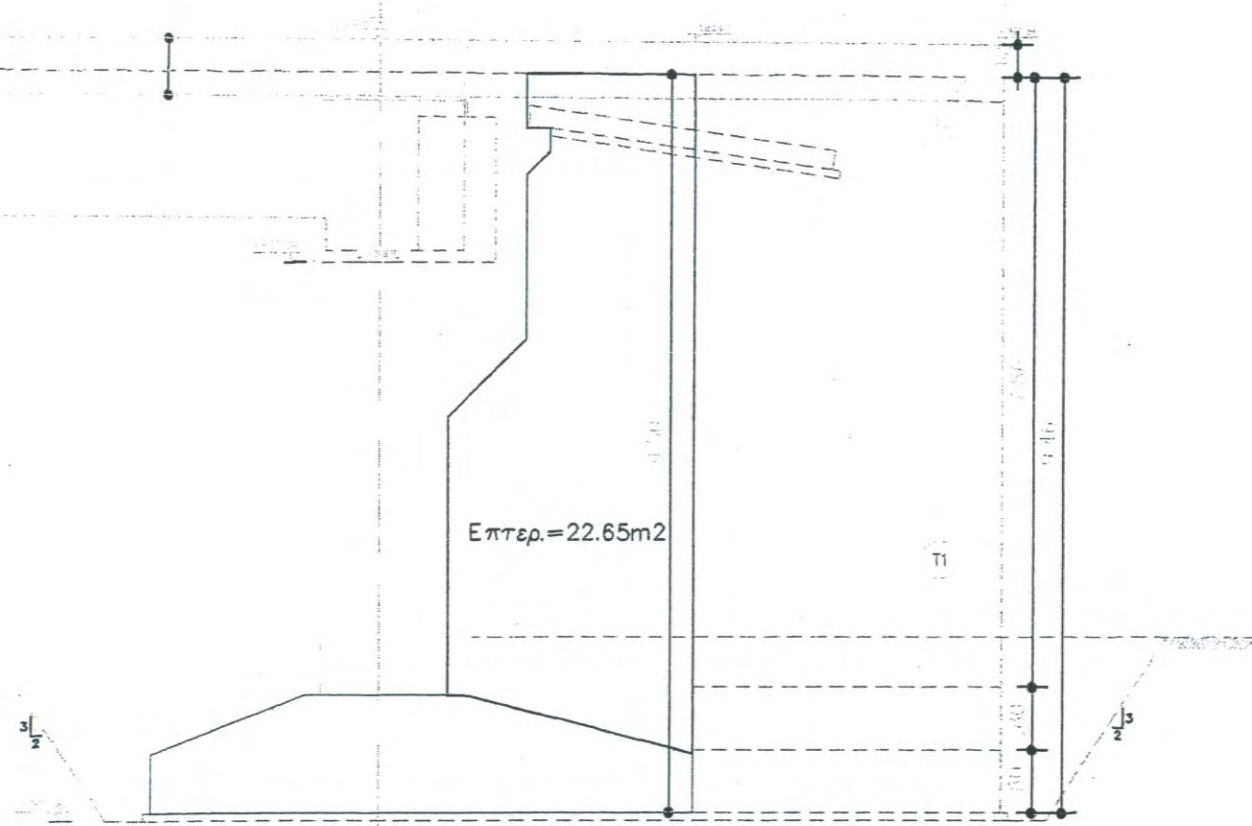


ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ "Α"



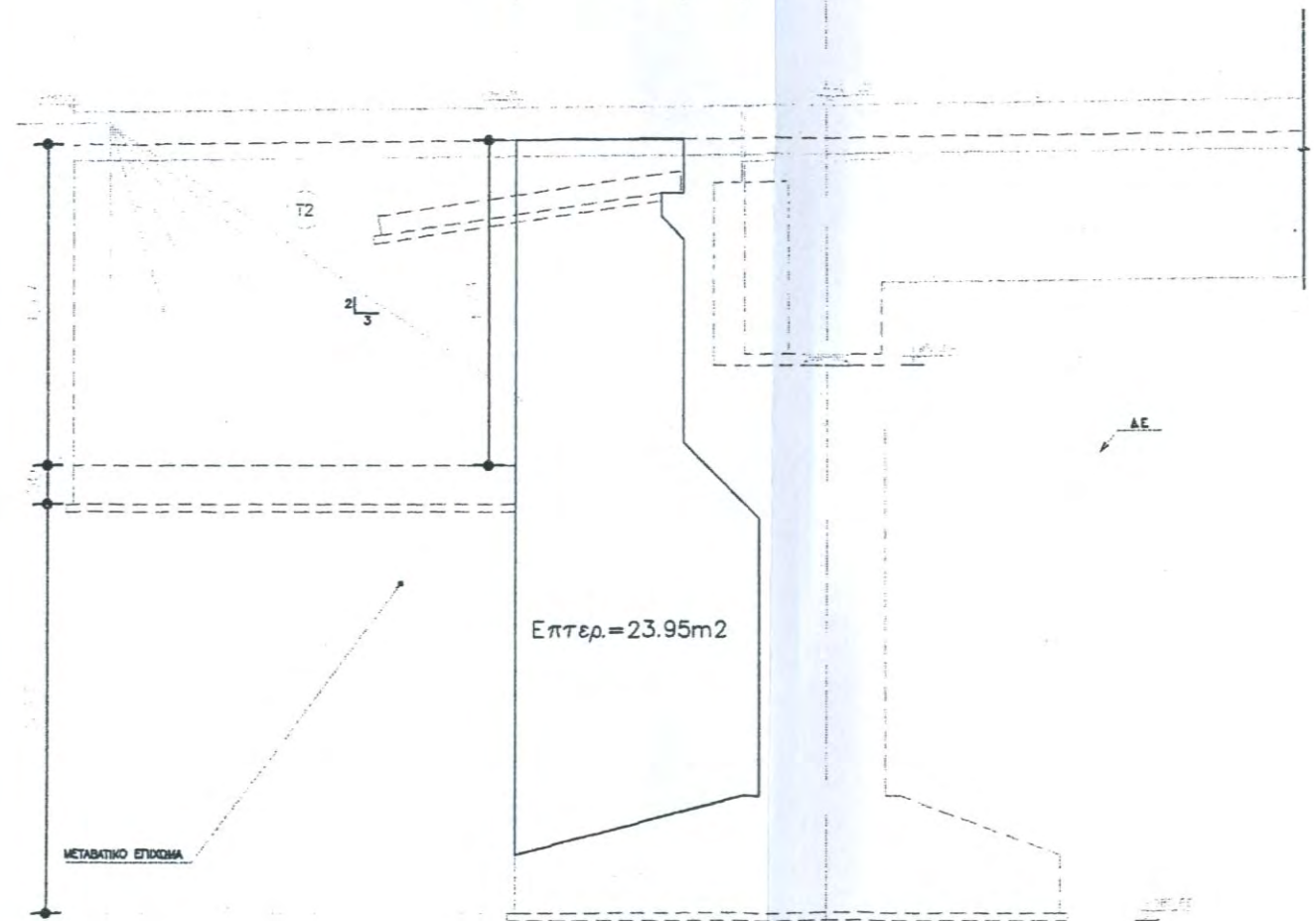
ΣΧΕΔΙΟ 15γ

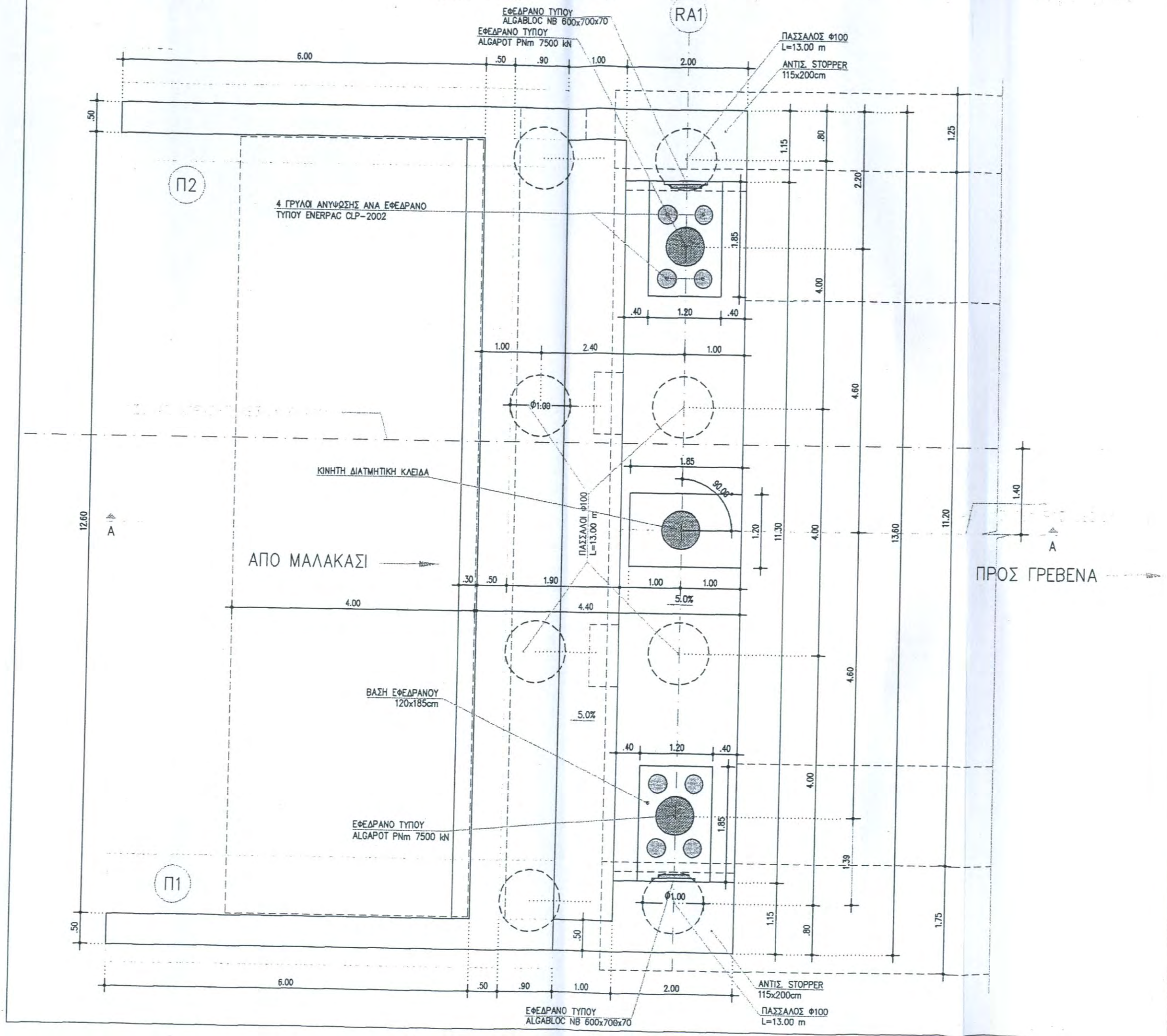
Οψη Α-Α

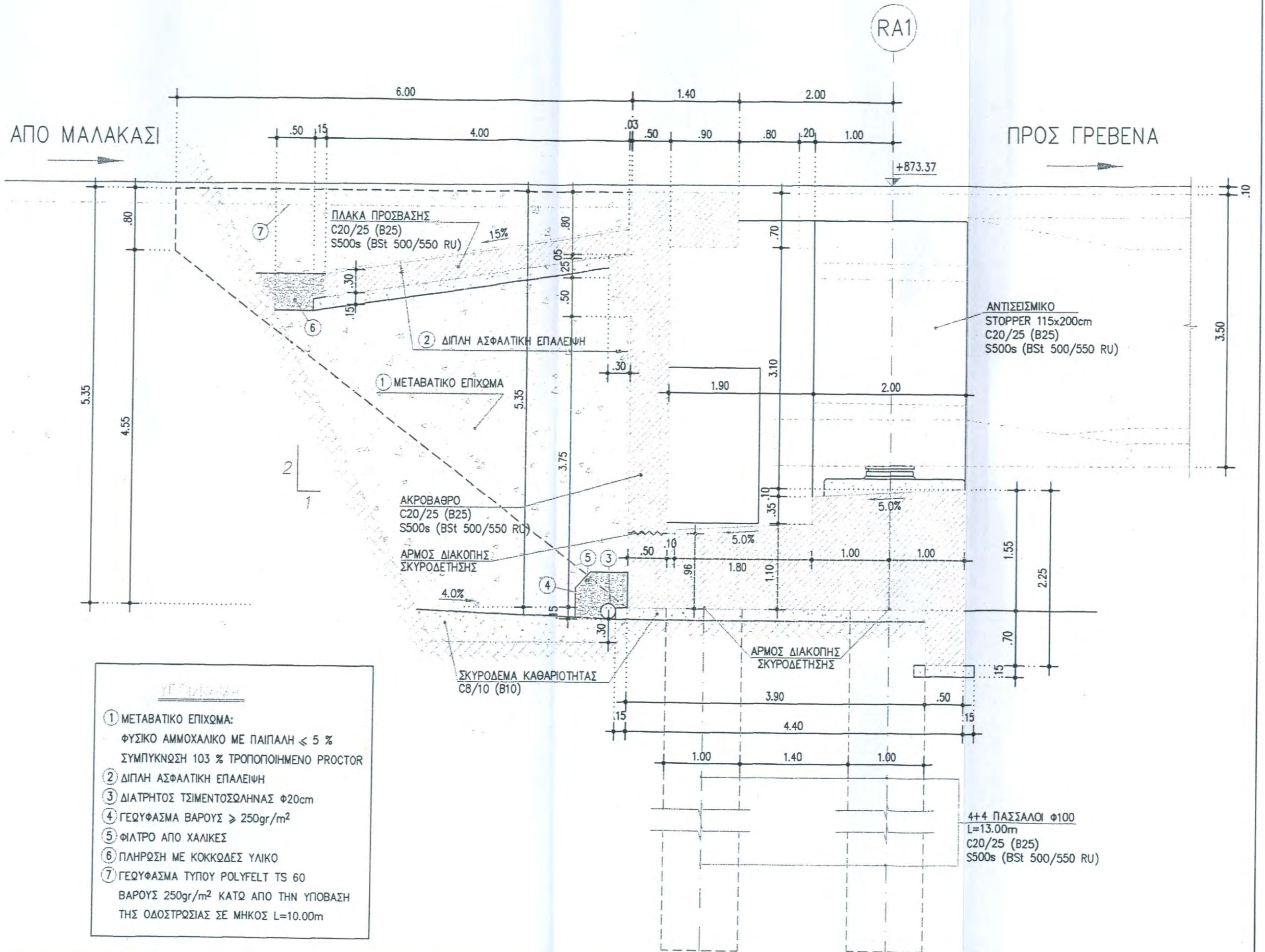


Οψη Β-Β

A1

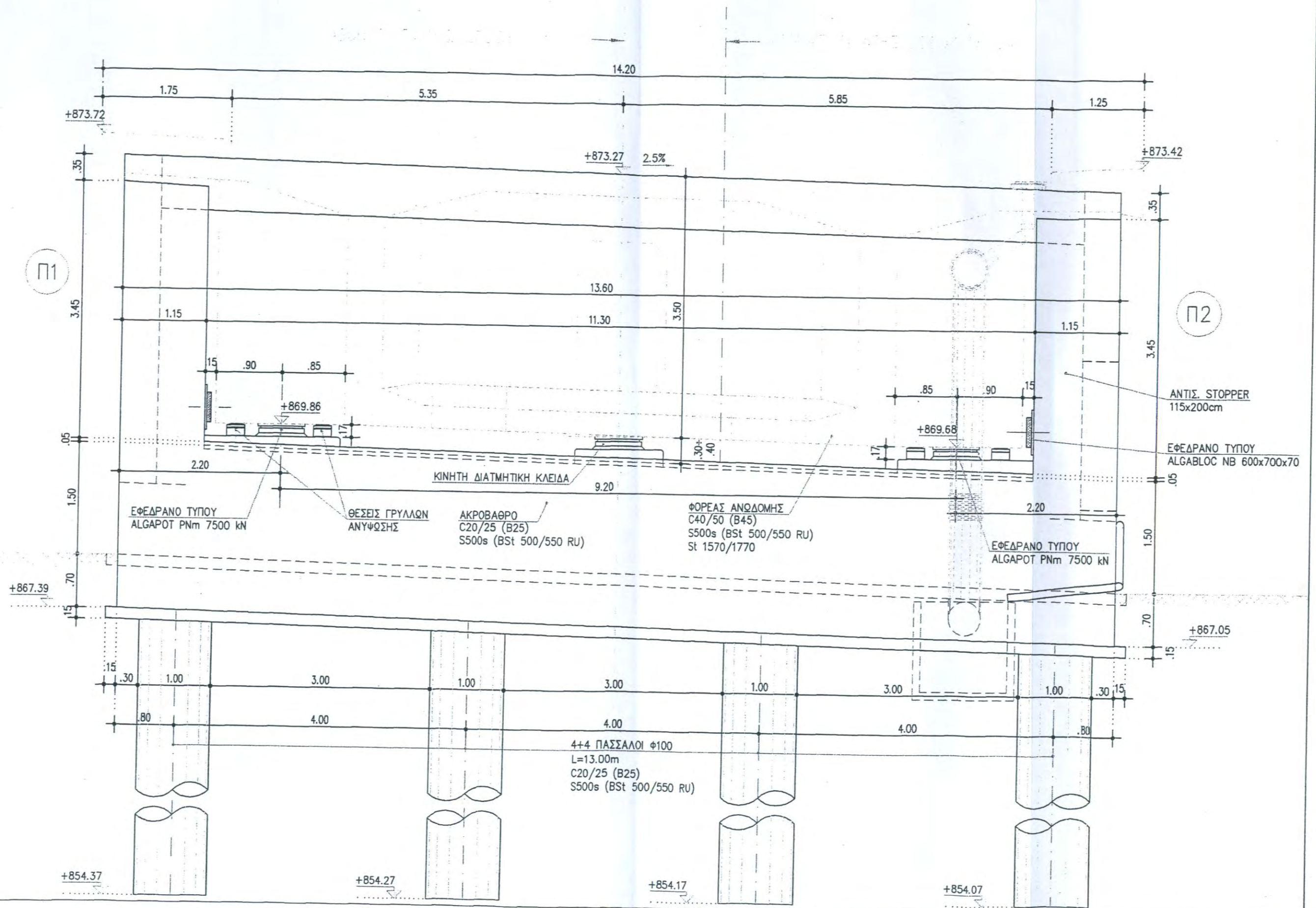






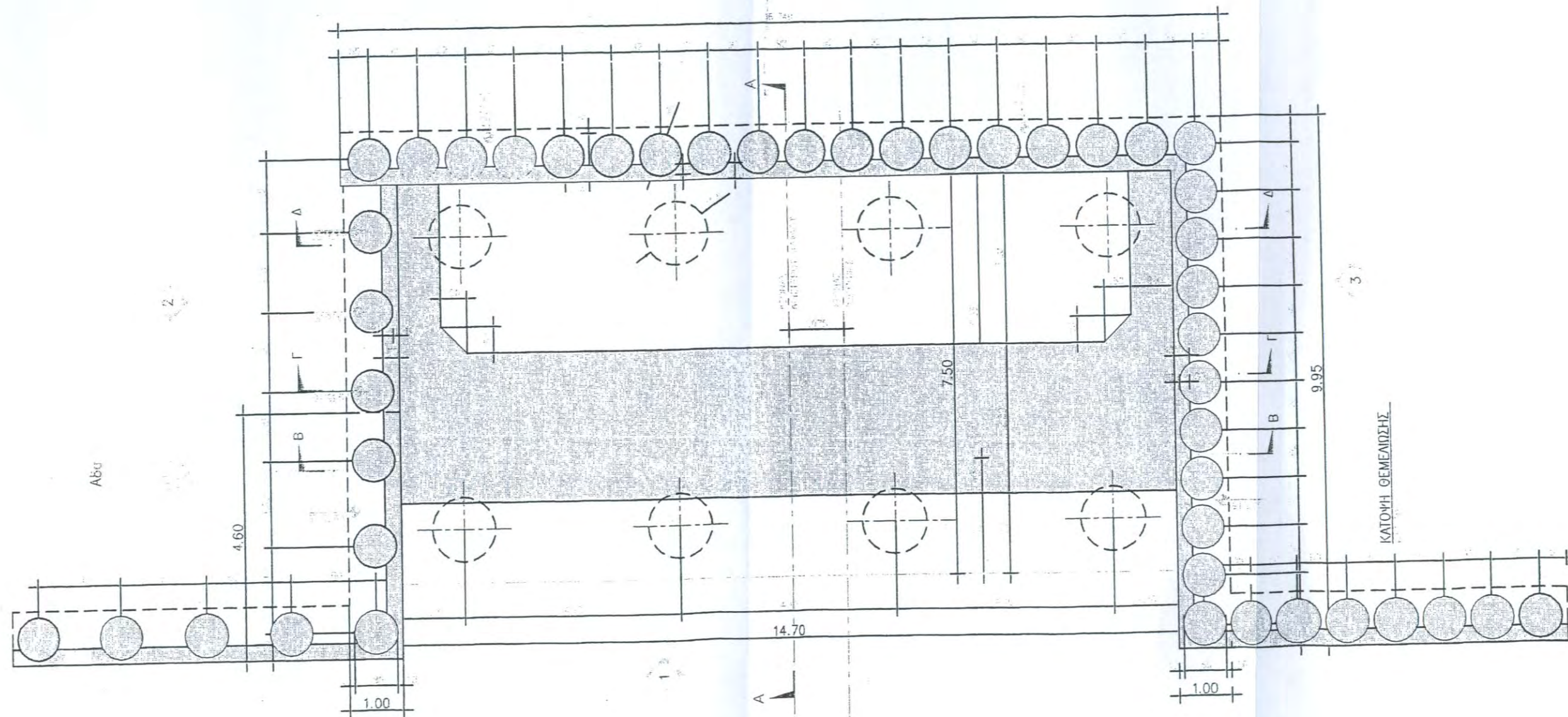
- ΠΡΟΜΕΤΡΙΑ**
- ① ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟ ΕΠΙΧΩΜΑ:
ΦΥΣΙΚΟ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ ΜΕ ΠΑΙΠΑΛΗ $\leq 5\%$
ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ 103% ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ PROCTOR
 - ② ΔΙΠΛΗ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ ΕΠΑΛΕΙΨΗ
 - ③ ΔΙΑΤΡΗΤΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΣΩΛΗΝΑΣ $\Phi 20\text{cm}$
 - ④ ΓΕΩΥΦΑΣΜΑ ΒΑΡΟΥΣ $\geq 250\text{gr/m}^2$
 - ⑤ ΦΙΛΤΡΟ ΑΠΟ ΧΑΛΙΚΕΣ
 - ⑥ ΠΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΚΟΚΚΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ
 - ⑦ ΓΕΩΥΦΑΣΜΑ ΤΥΠΟΥ POLYFELT TS 60
ΒΑΡΟΥΣ 250gr/m^2 ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΠΟΒΑΣΗ
ΤΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΣΙΑΣ ΣΕ ΜΗΚΟΣ $L=10.00\text{m}$

4+4 ΠΑΣΣΑΛΟΙ $\Phi 100$
 $L=13.00\text{m}$
C20/25 (B25)
S500s (BSt 500/550 RU)



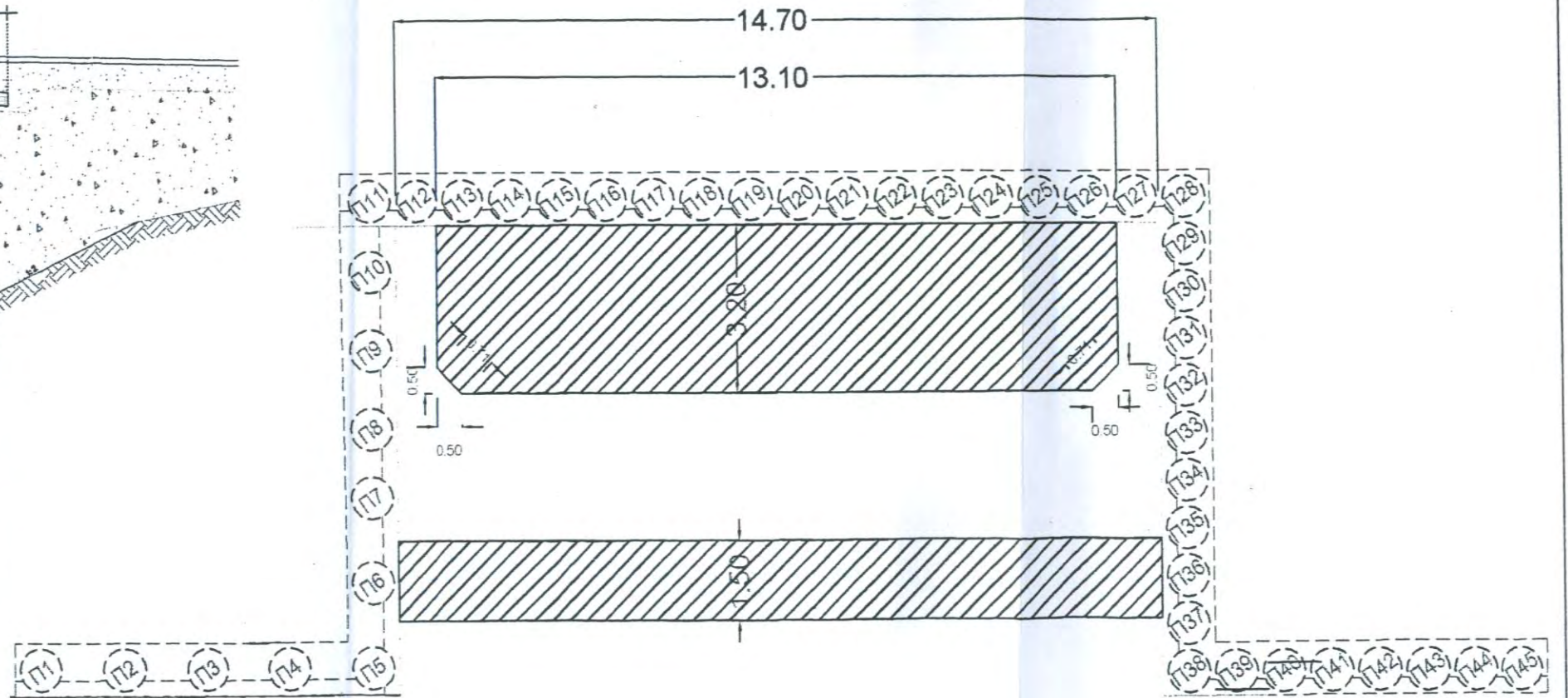
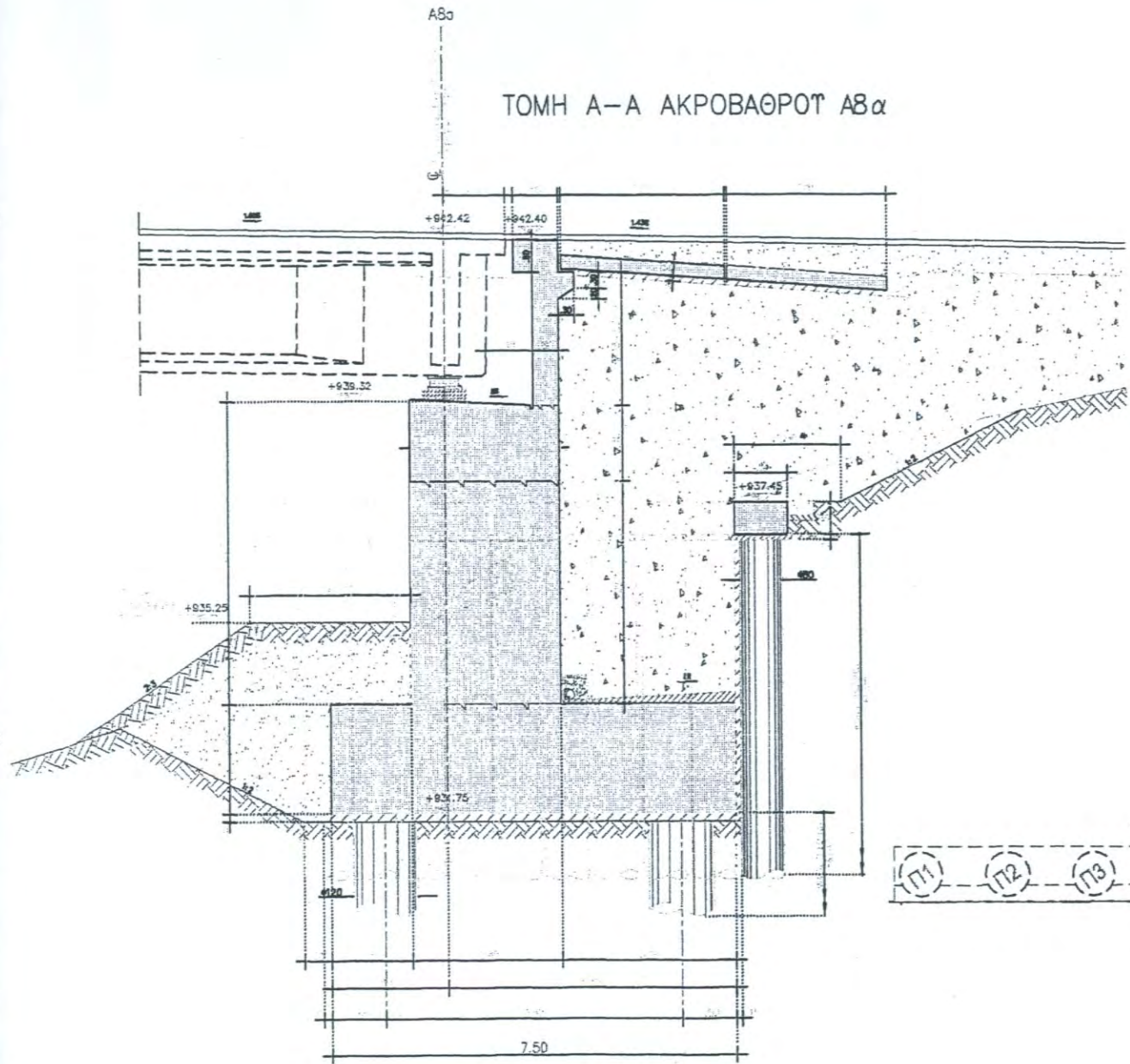
ΣΧΕΔΙΟ 17

ΚΑΤΟΨΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΥ Α8α



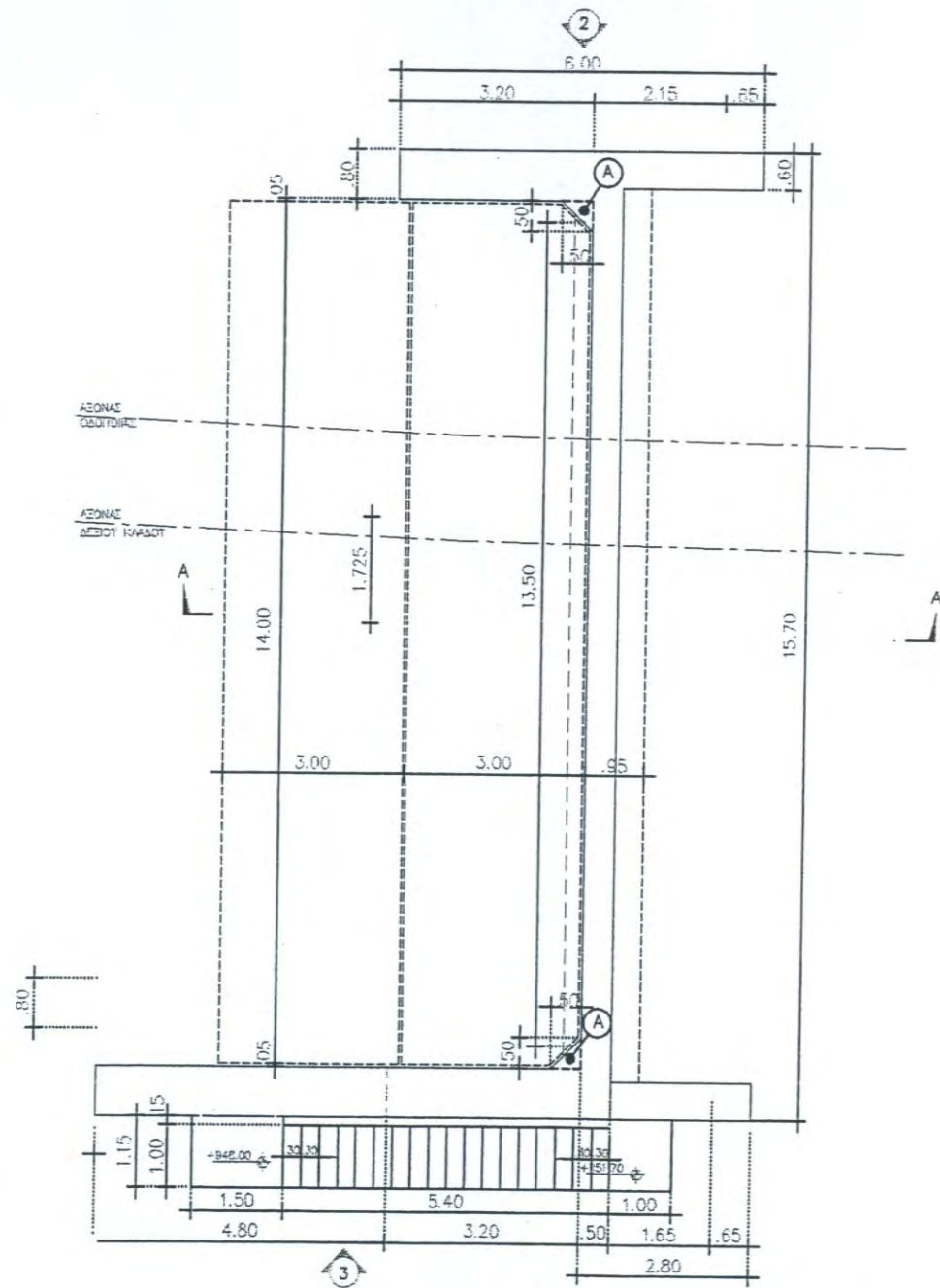
ΣΧΕΔΙΟ 17α

ΤΟΜΗ Α-Α ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΣ Α8α

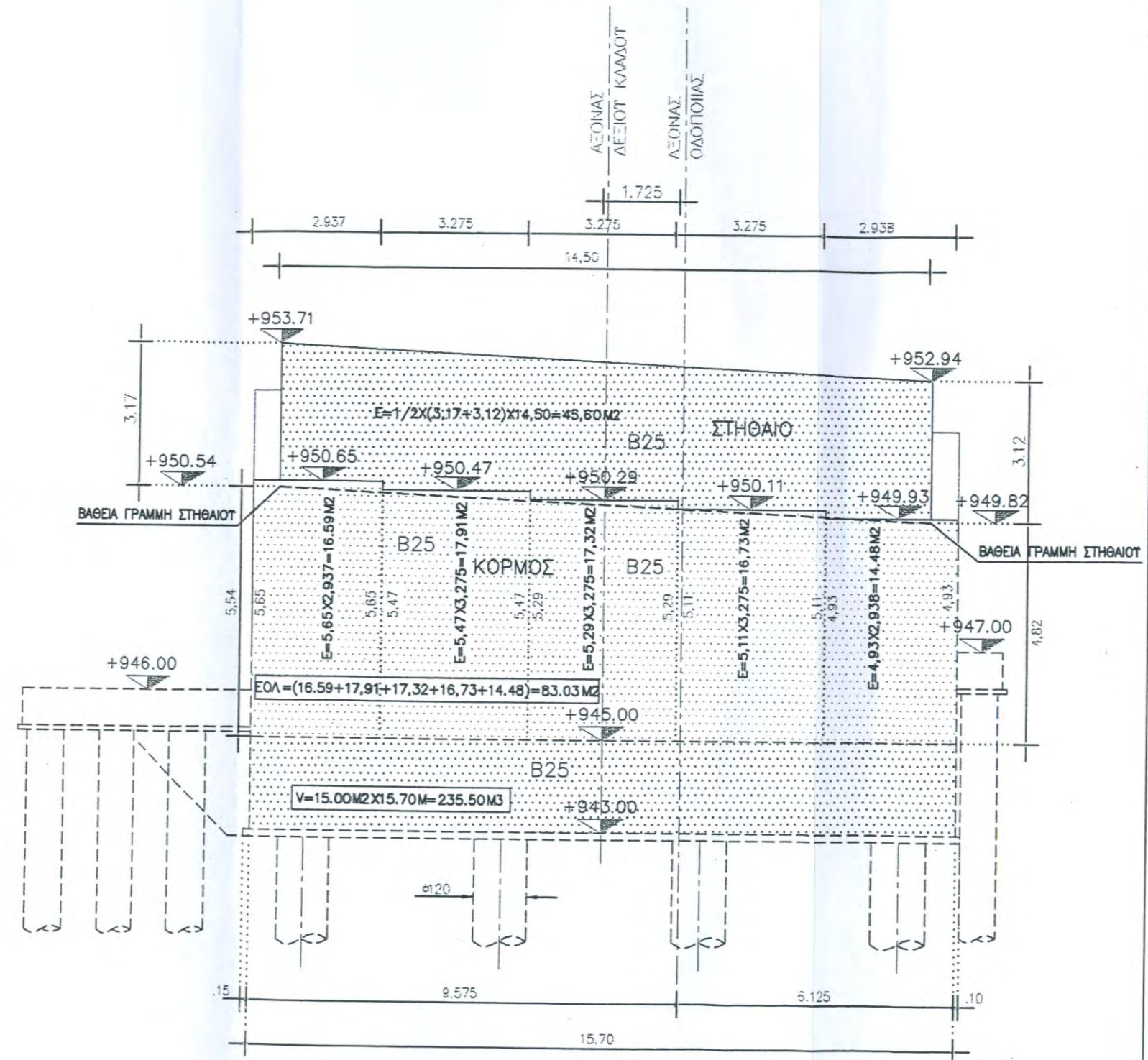


ΣΧΕΔΙΟ 18

ΚΑΤΩΦΗ ΑΝΩΔΟΜΗΣ
ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΤ Αοδ

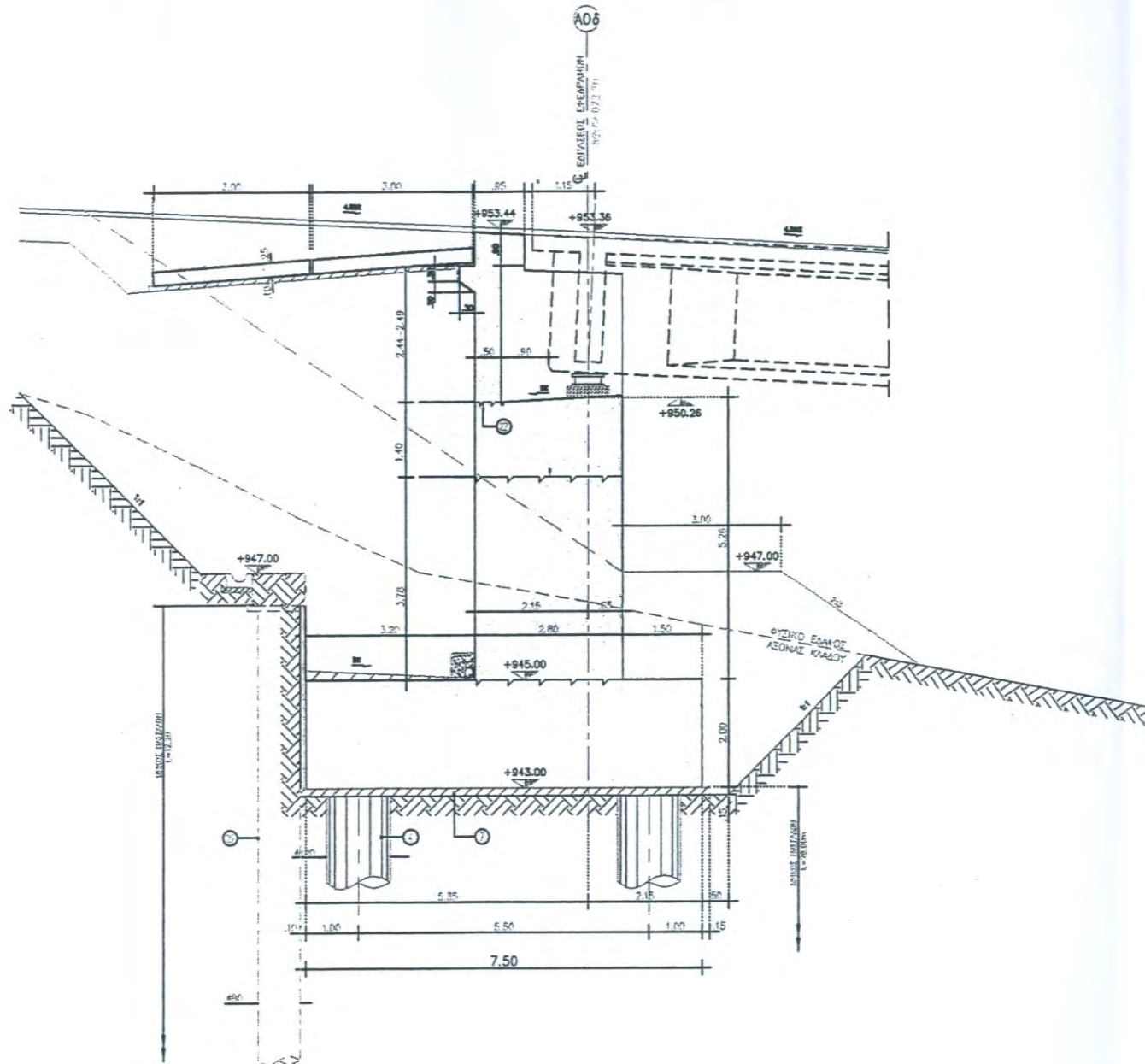


ΟΥΗ 1 ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΤ Αοδ

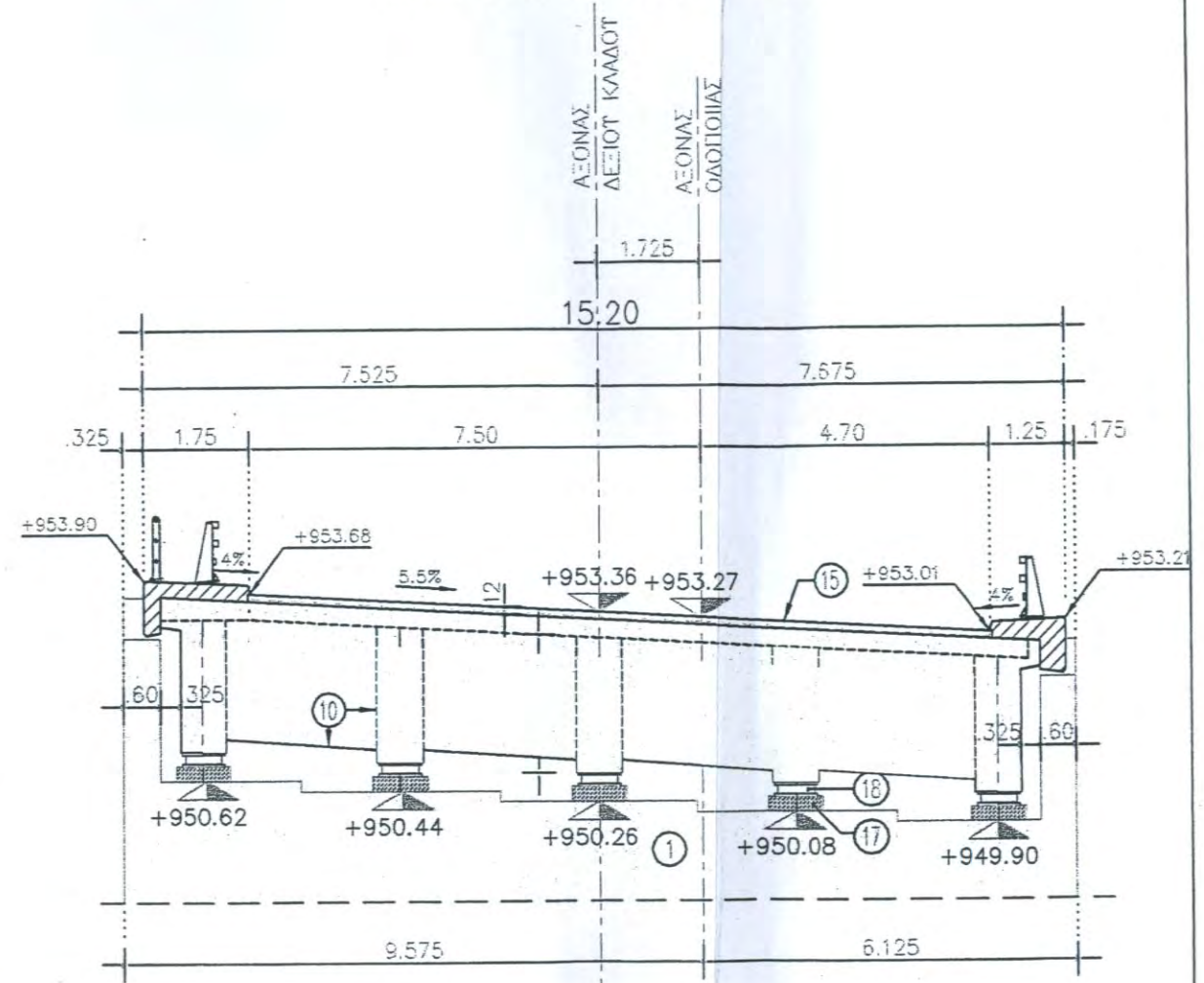


ΣΧΕΔΙΟ 18α

ΤΟΜΗ Α-Α ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΤ Αοδ



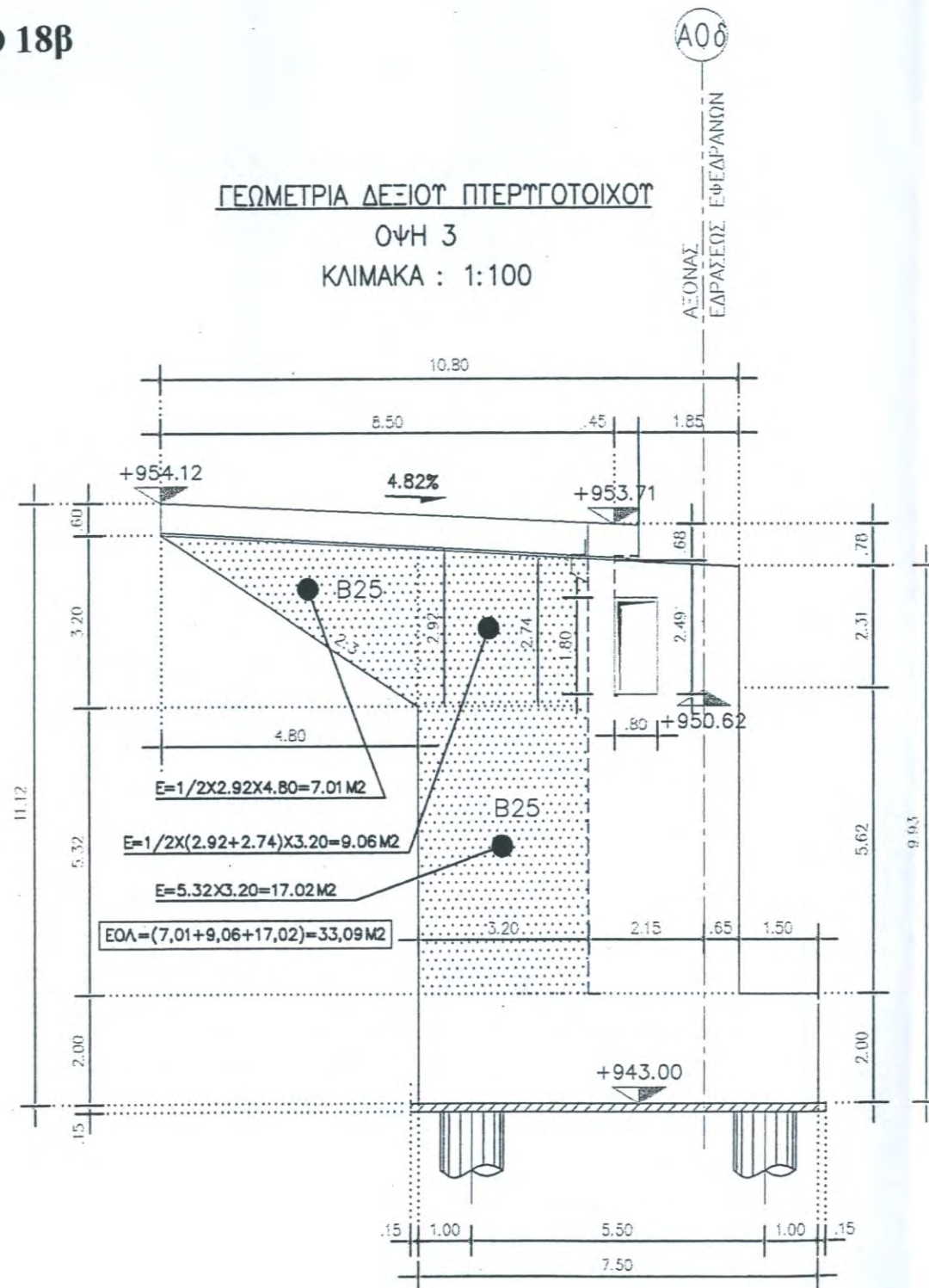
ΤΟΜΗ Β-Β ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΤ Αοδ



ΣΧΕΔΙΟ 18β

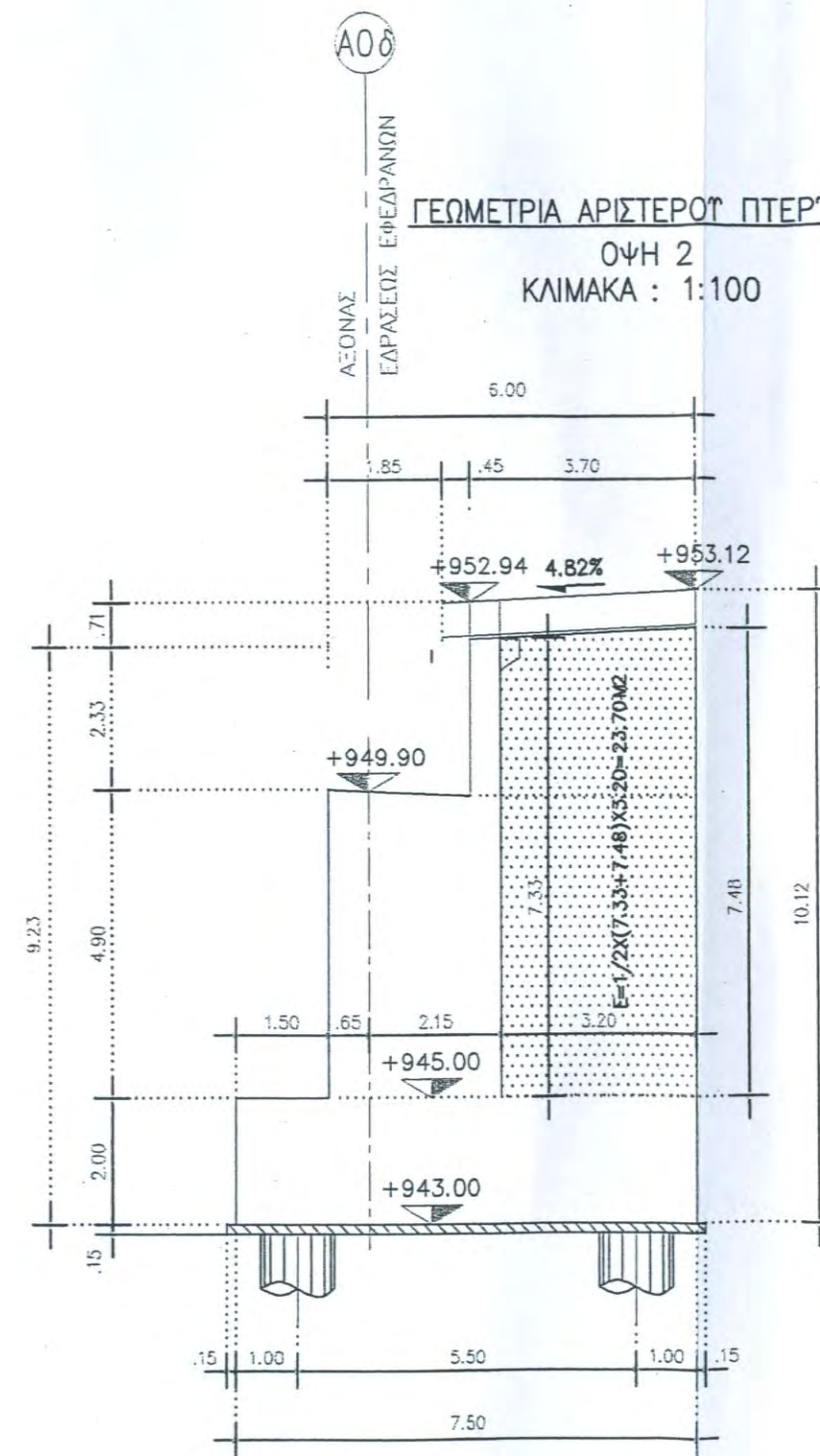
ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΕΞΙΟΥ ΠΤΕΡΥΓΟΤΟΙΧΟΥ

ΟΨΗ 3
ΚΛΙΜΑΚΑ : 1:100

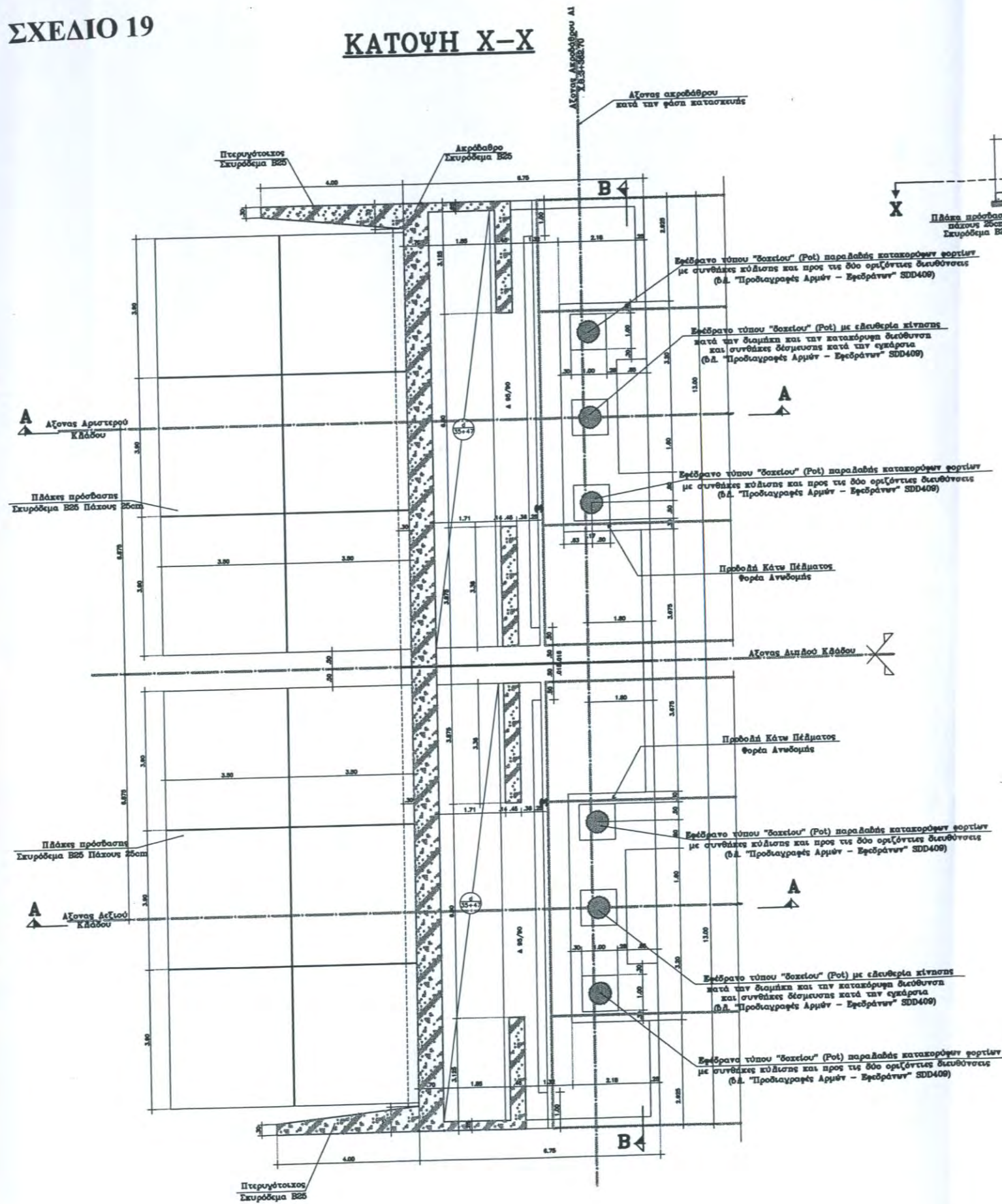


ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΑΡΙΣΤΕΡΟΥ ΠΤΕΡΥΓΟΤΟΙΧΟΥ

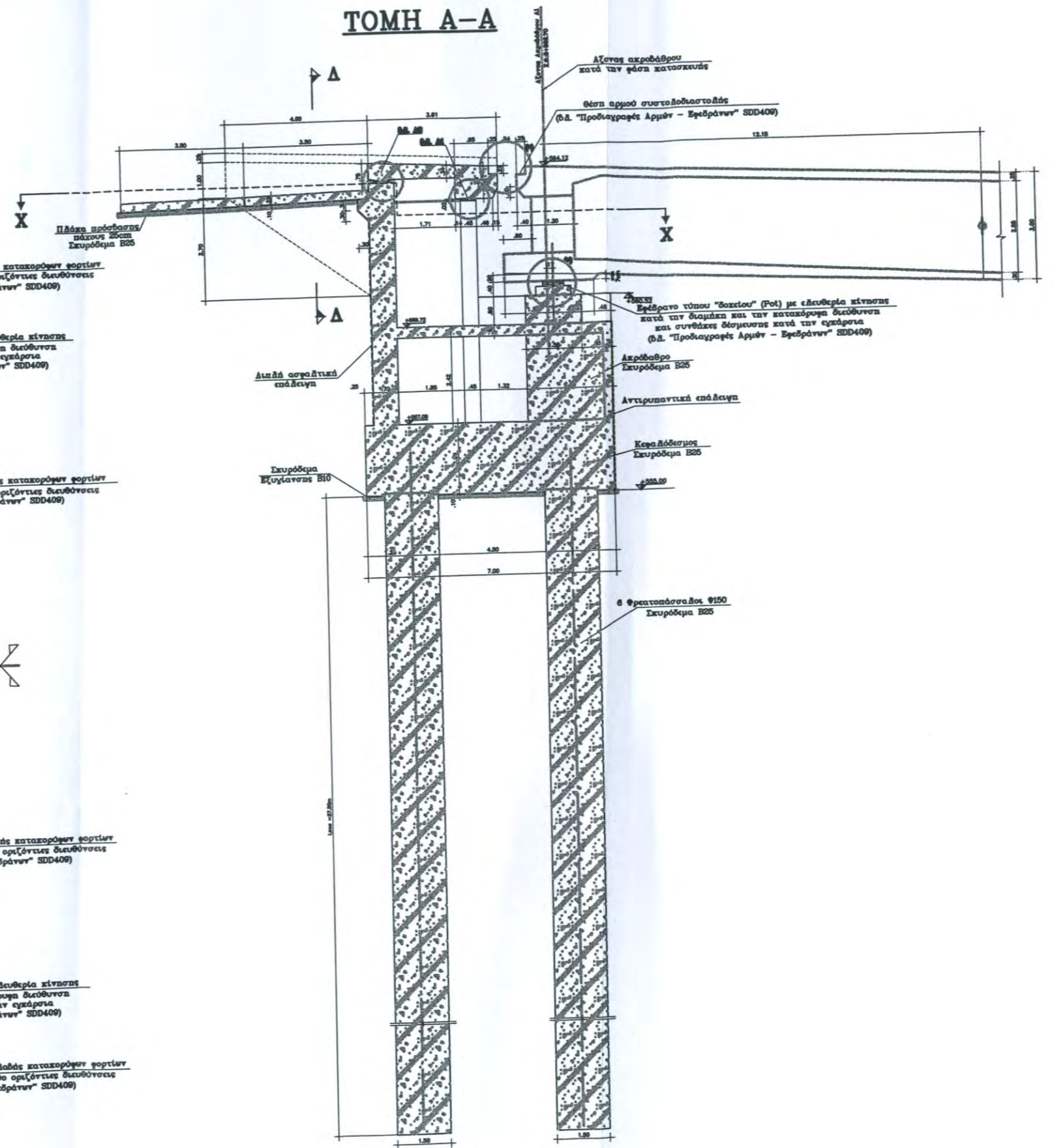
ΟΨΗ 2
ΚΛΙΜΑΚΑ : 1:100

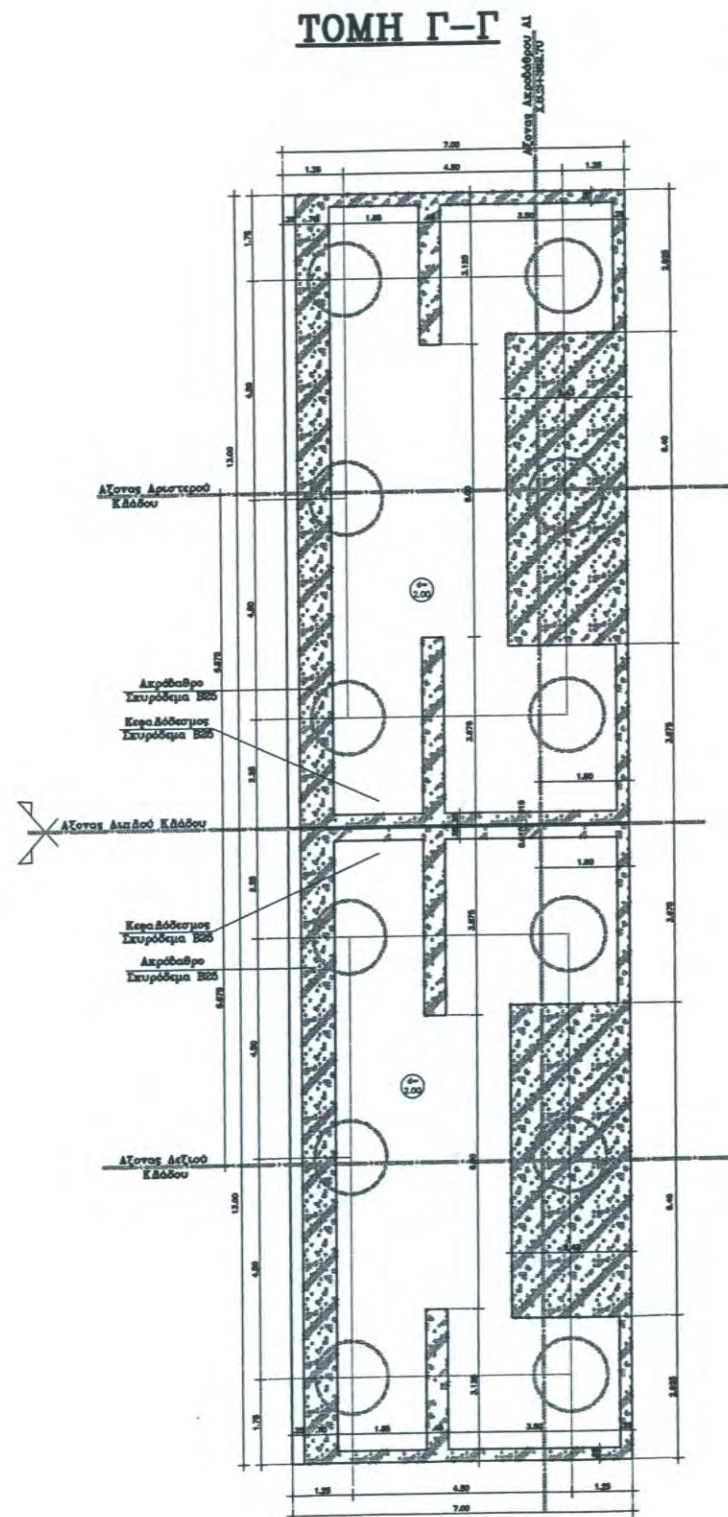


ΚΑΤΟΨΗ X-X



ΤΟΜΗ Α-Α



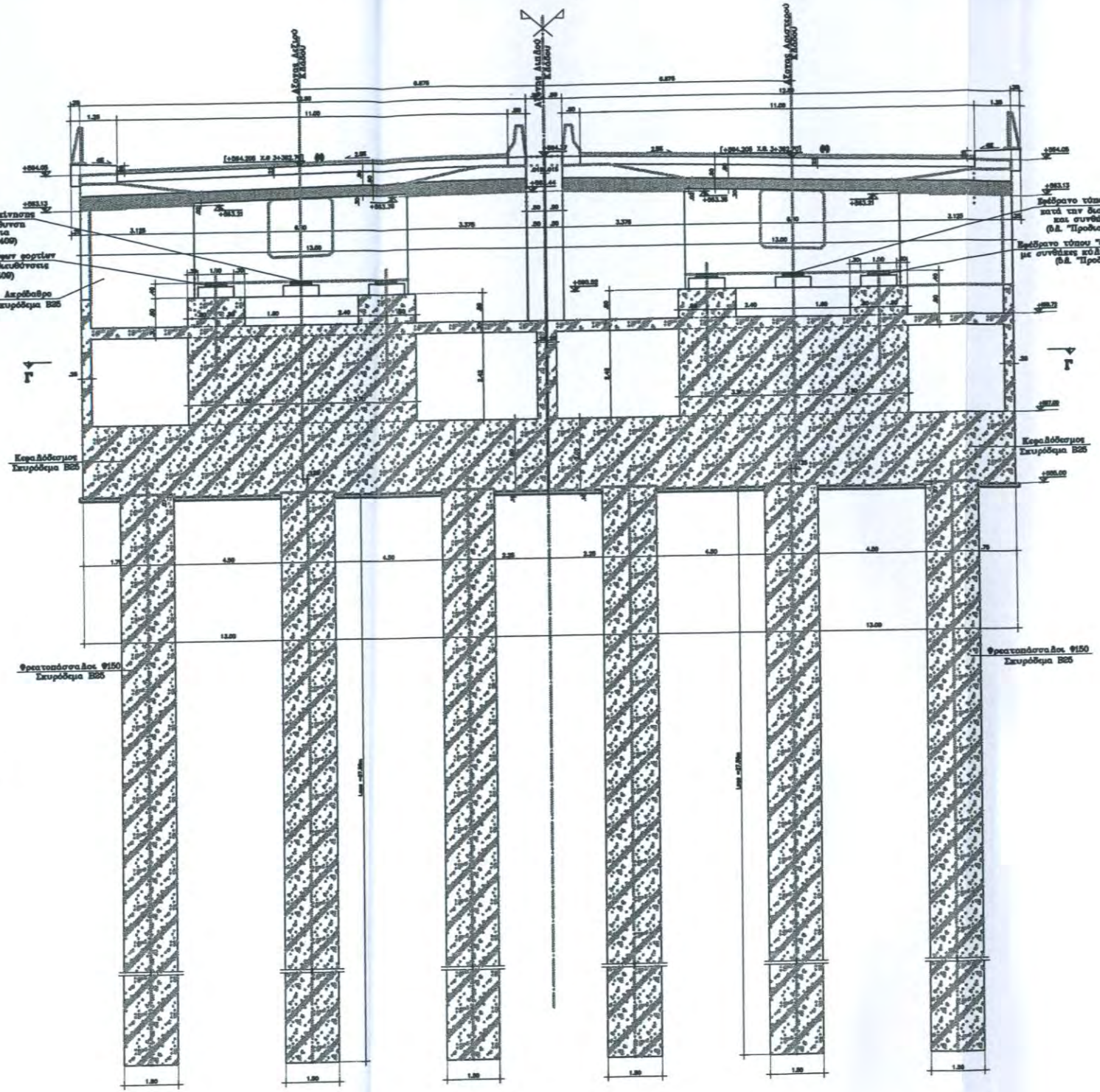


Επέχονο τύπου "Βασίλει" (Ρολ) με ελεύθερη κίνηση κατά την διεύθυνση και των κατακόρυφων διευθύνσεων και συνθήκες διαμετακίνησης κατά την εγκάρσια (βλ. "Προδιαγραφή Αρμών - Επεχόνων" ΣΠΔ400)

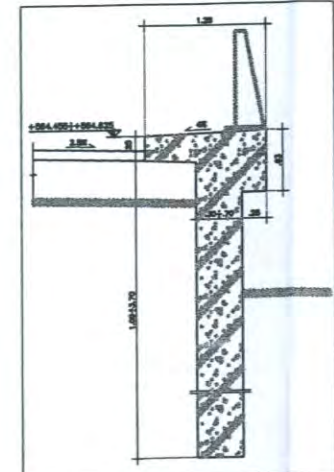
Επέχονο τύπου "Βασίλει" (Ρολ) παραλλήλα κατακόρυφον φορτίων με συνθήκες κλίσης και προς τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις (βλ. "Προδιαγραφή Αρμών - Επεχόνων" ΣΠΔ400)

Επέχονο τύπου "Βασίλει" (Ρολ) με ελεύθερη κίνηση κατά την διεύθυνση και των κατακόρυφων διευθύνσεων και συνθήκες διαμετακίνησης κατά την εγκάρσια (βλ. "Προδιαγραφή Αρμών - Επεχόνων" ΣΠΔ400)

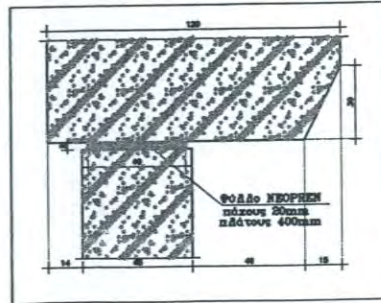
Επέχονο τύπου "Βασίλει" (Ρολ) παραλλήλα κατακόρυφον φορτίων με συνθήκες κλίσης και προς τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις (βλ. "Προδιαγραφή Αρμών - Επεχόνων" ΣΠΔ400)



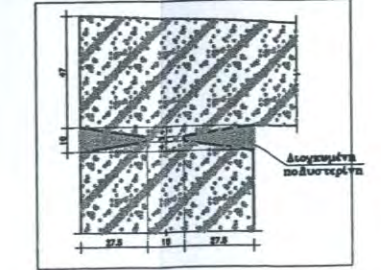
ΤΟΜΗ Δ-Δ



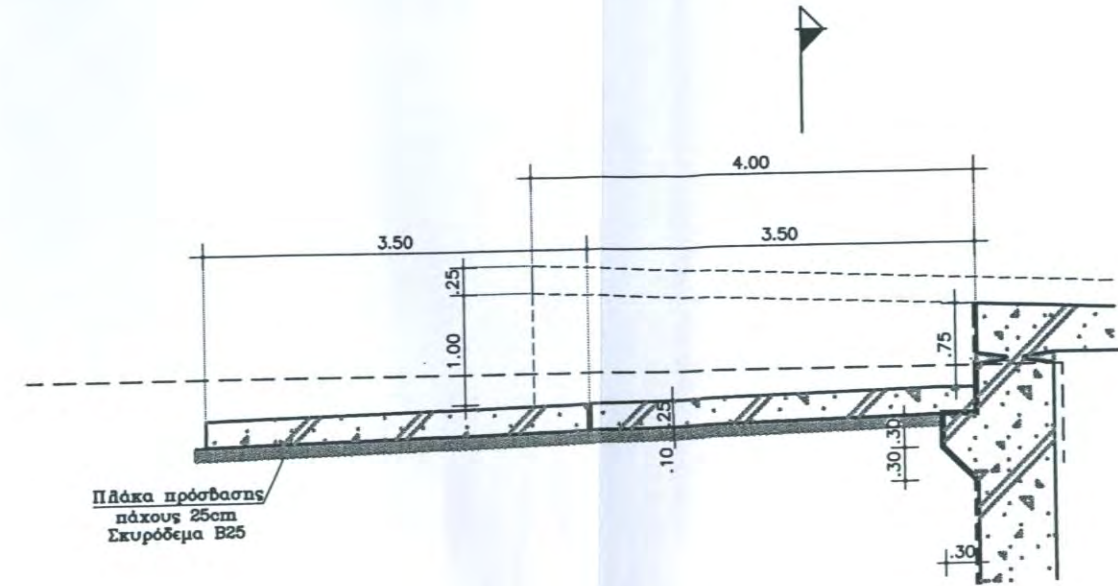
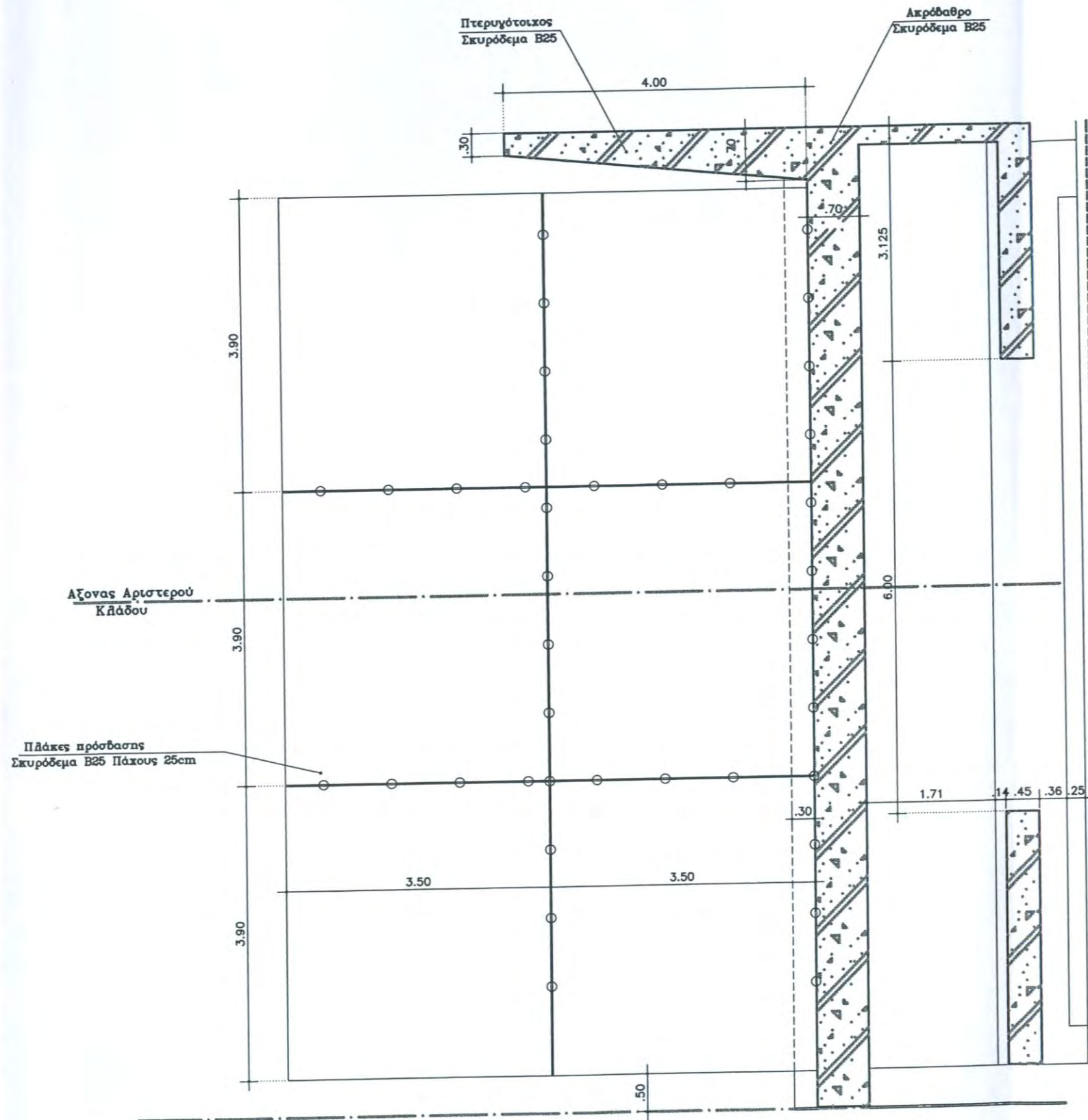
ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ Λ1



ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ Λ2



Α.Τ. Β-4.1.1 Β10 Πλακών πρόσβασης & Α.Τ. Β-4.3.6 Β25 Πλακών πρόσβασης



Α.Τ. Β-4.1.1 Σκυρόδεμα Β10 (C8/10) κοιτοστρώσεων, εξομαλυντικών στρώσεων κλπ)

$$V = 12.20 \times 7.15 \times 0.10 = 8.72 \text{ m}^3$$

Α.Τ. Β-4.3.6 Σκυρόδεμα Β25 (C20/25) πεζοδρομίων, πλακών πρόσβασης

$$V = (3.90 \times 3.50 \times 2) \times 0.25 = 20.48 \text{ m}^3$$

Α.Τ. Β-13.2 Σφράγιση κατακόρυφων - κεκλιμένων αρμών με PLASTIJOINT ή αναλόγου

$$S = 3.90 \times 3 \times 2 + 3.50 \times 2 \times 2 + 6 \times 0.25 = 38.90 \text{ m}$$

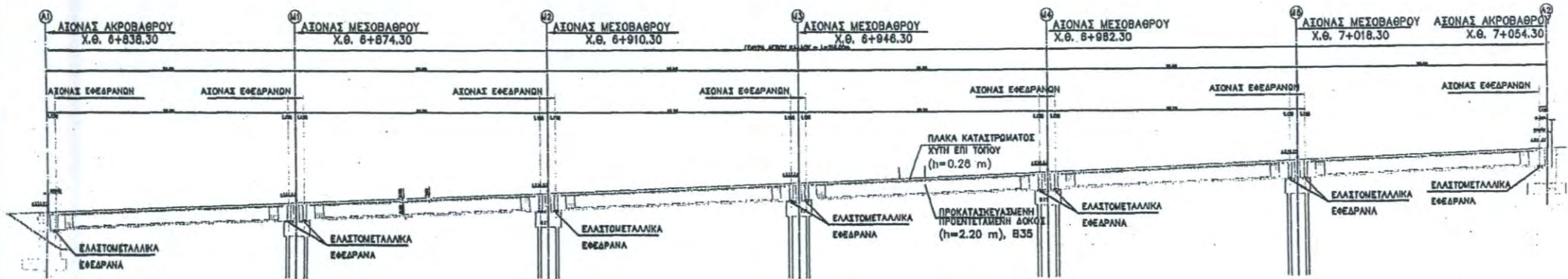
Α.Τ. Β-13.3 Μόρφωση αρμών αρμών με προκατασκευασμένες πλάκες τύπου FLEXCELL ή αναλόγου

$$S = (3.90 \times 3 \times 2 + 3.50 \times 2 \times 2) \times 0.25 = 37.40 \times 0.25 = 9.35 \text{ m}^3$$

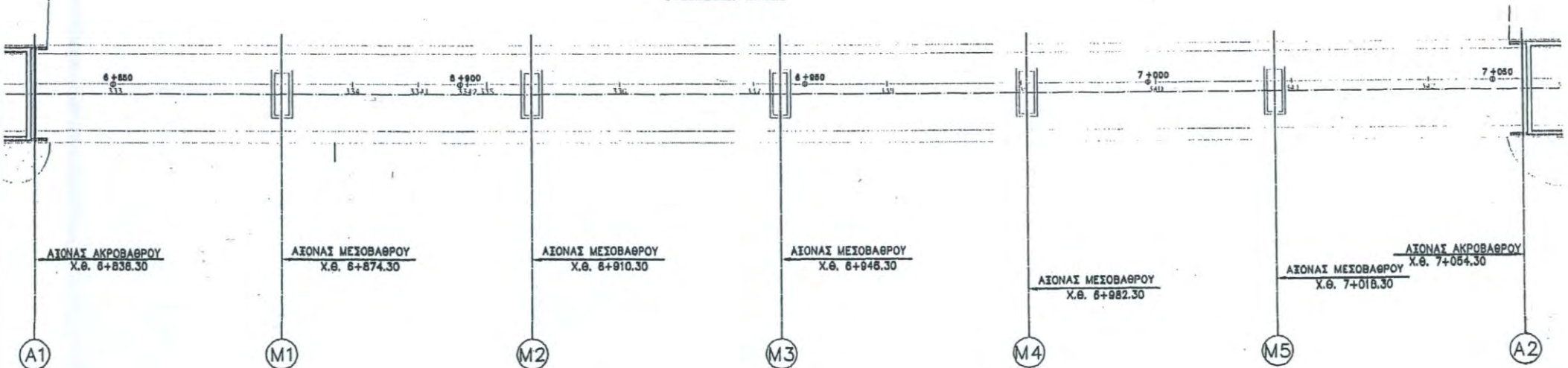
ΣΧΕΔΙΟ 20

ΦΟΡΕΑΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗ

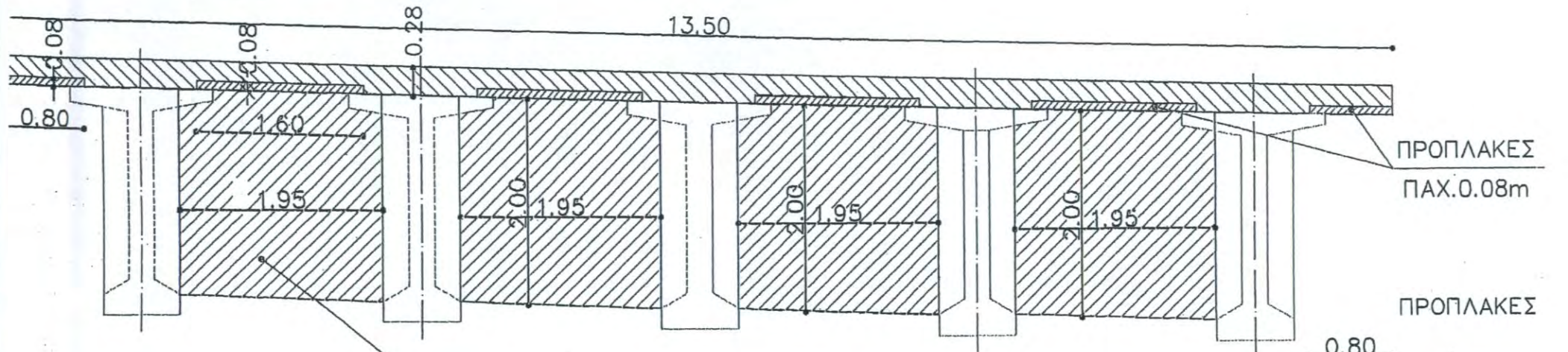


ΚΑΤΩΨΗ ΦΟΡΕΑ



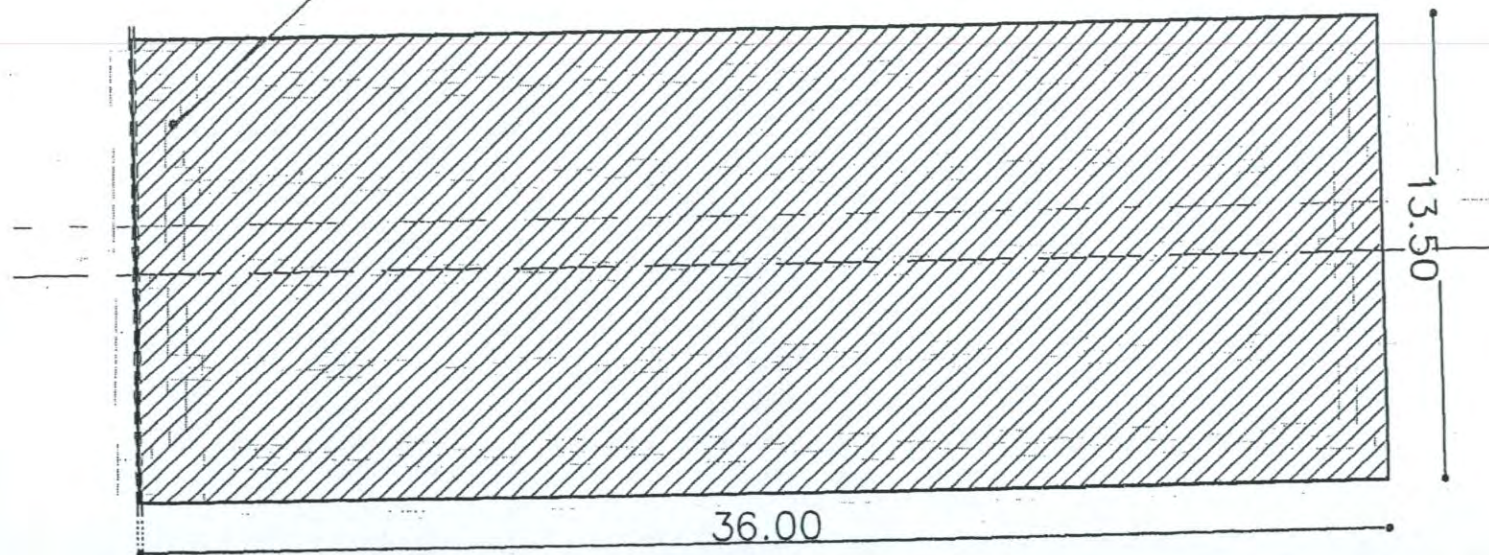
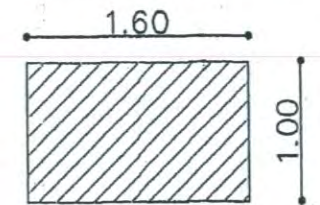
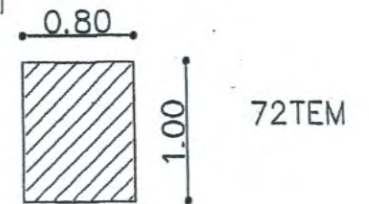
ΣΧΕΔΙΟ 20α

ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ



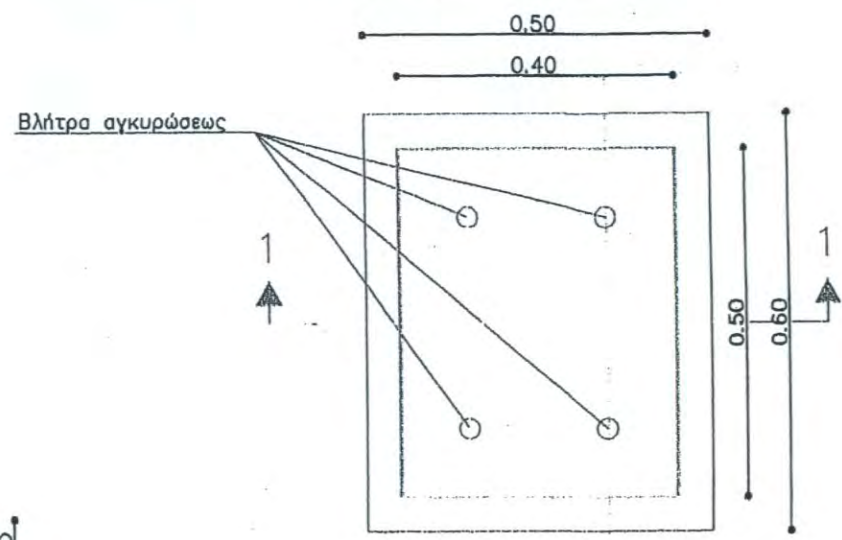
ΔΙΑΔΟΚΙΔΕΣ (ΑΡΧΗ & ΤΕΛΟΣ)

ΚΑΤΟΨΗ ΠΛΑΚΑΣ ΕΝΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ



ΣΧΕΔΙΟ 20β

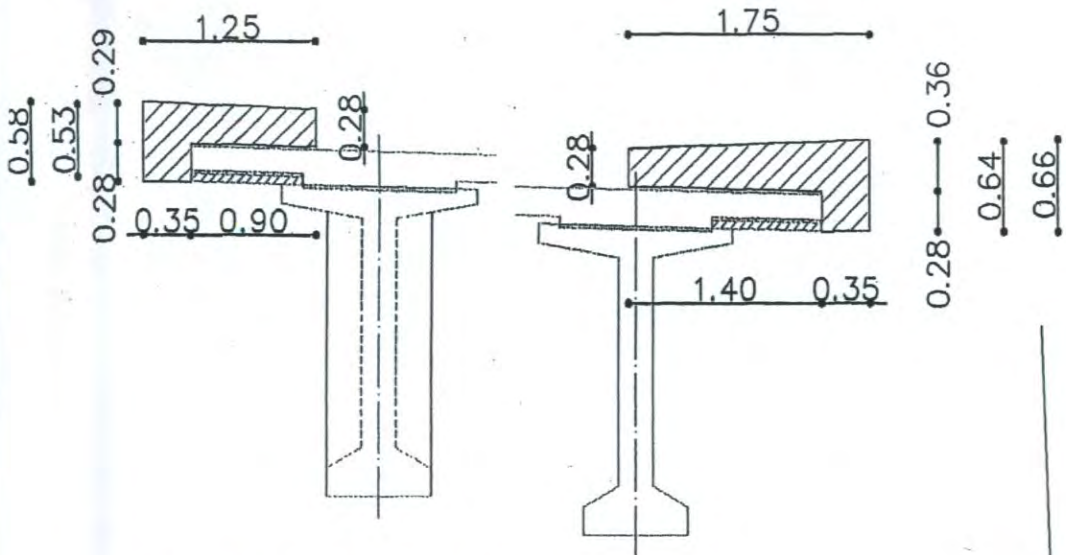
ΚΑΤΟΨΗ ΕΦΕΔΑΝΩΝ



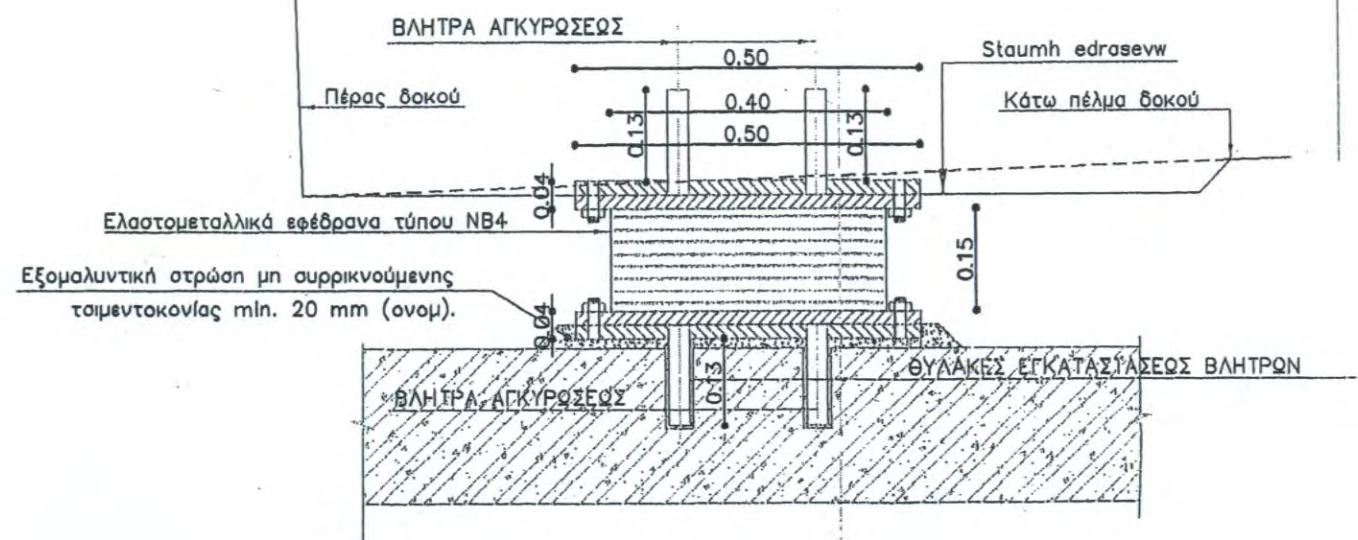
ΤΟΜΗ ΠΕΖΟΔΡΟΜΙΩΝ

ΑΡΙΣΤΕΡΑ

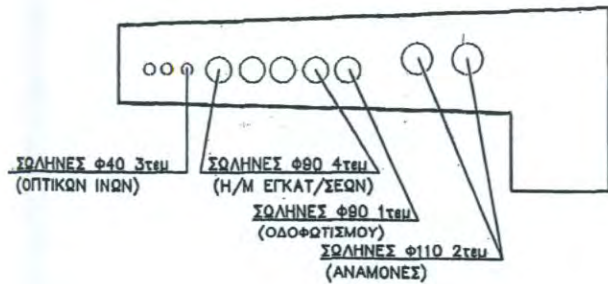
ΔΕΞΙΑ



ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ 1-1

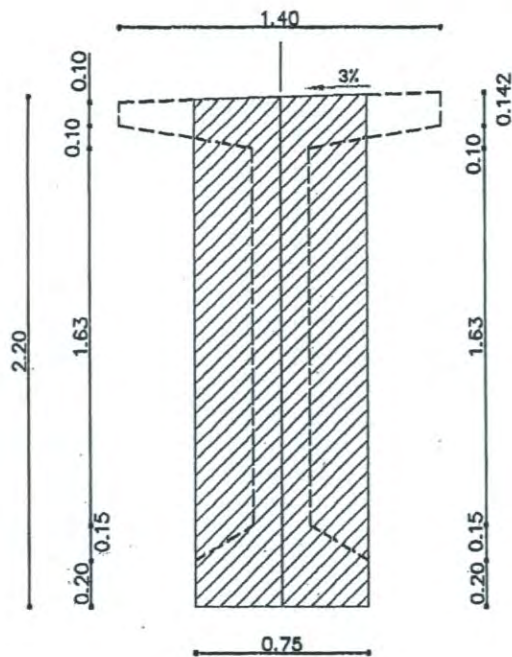
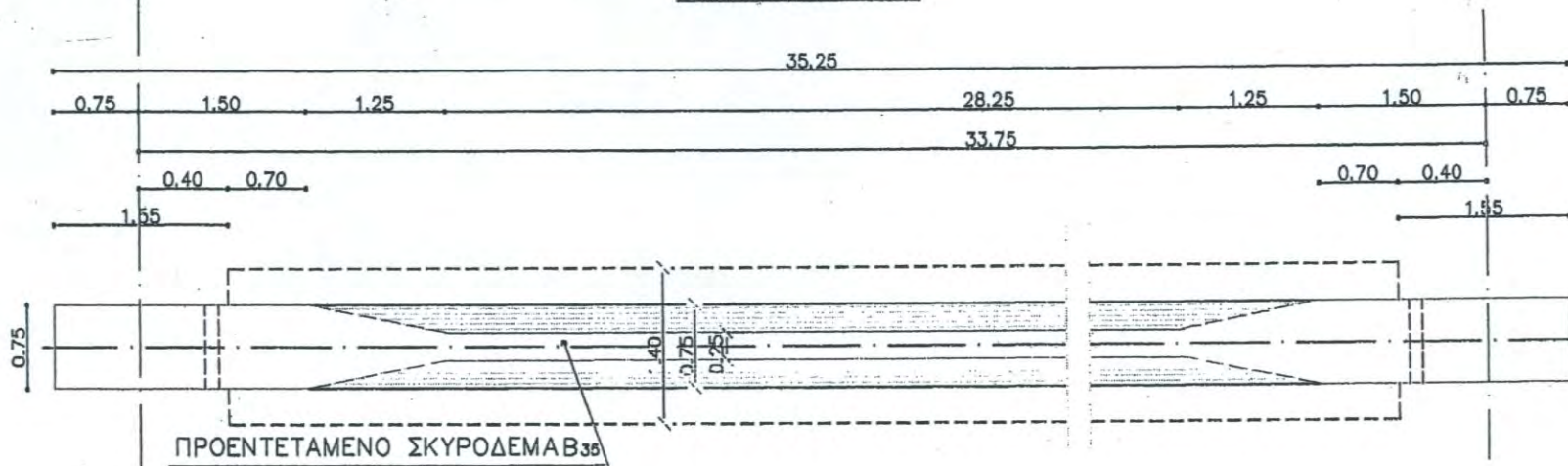


ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ ΔΕΞΙΟΥ ΠΕΖΟΔΡΟΜΙΟΥ

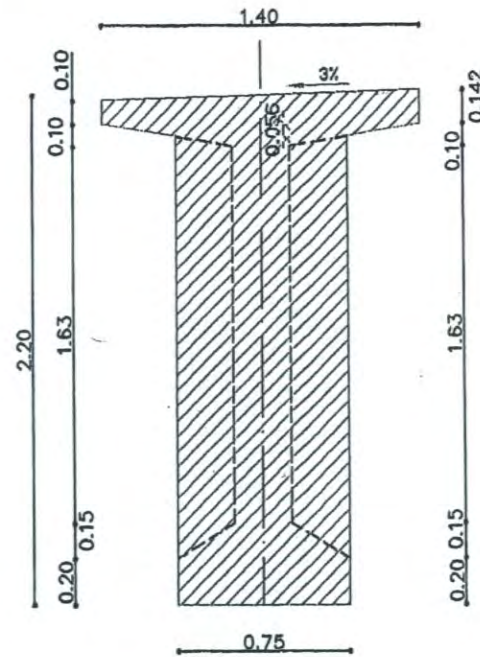


ΣΧΕΔΙΟ 20γ

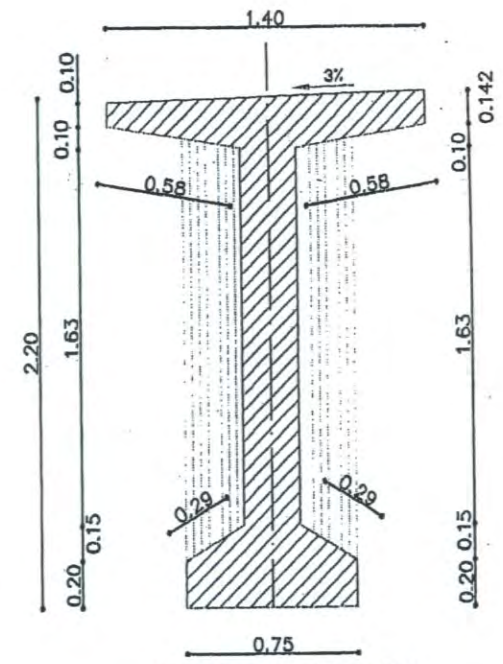
ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗ ΔΟΚΟΣ
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΤΟΜΗ



ΤΟΜΗ 1-1
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ 1,65m²
 $L=2.20+0.75+2.20=5.15m$

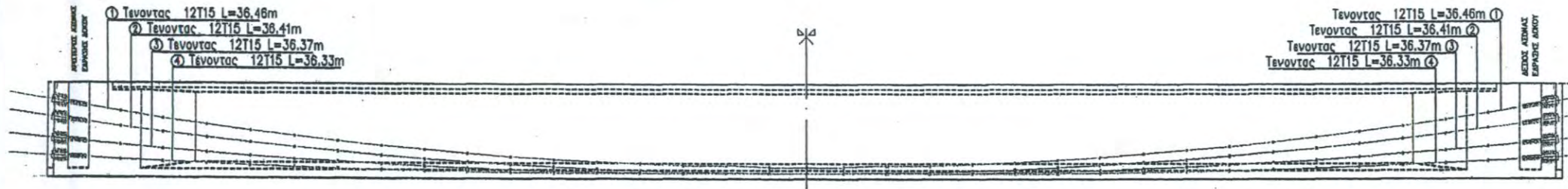


ΤΟΜΗ 2-2
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ 1,75m²
 $L=0.10+0.33*2+2.02*2+0.75+0.14=5.69m$

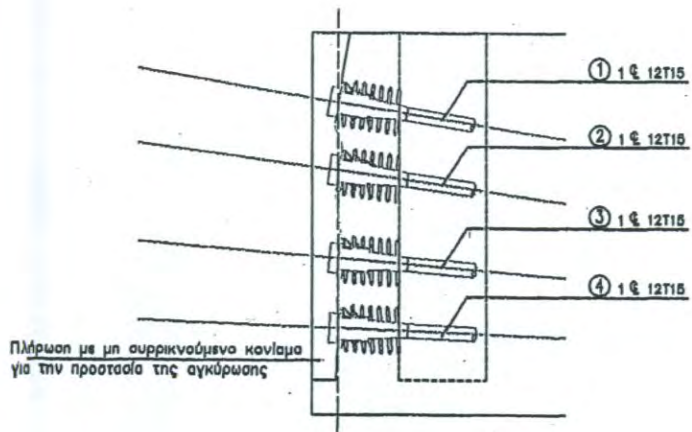


ΤΟΜΗ ΣΤΟ ΑΝΟΙΓΜΑ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ 0,883m²
 $L=0.10+(0.20+0.29+1.83+0.58)*2+0.75+0.14=6.39m$

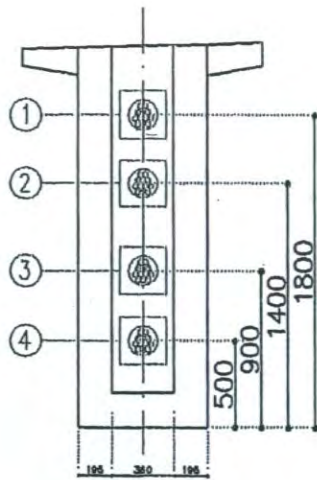
ΣΧΕΔΙΟ 208



ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗ ΤΕΝΟΝΤΩΝ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ

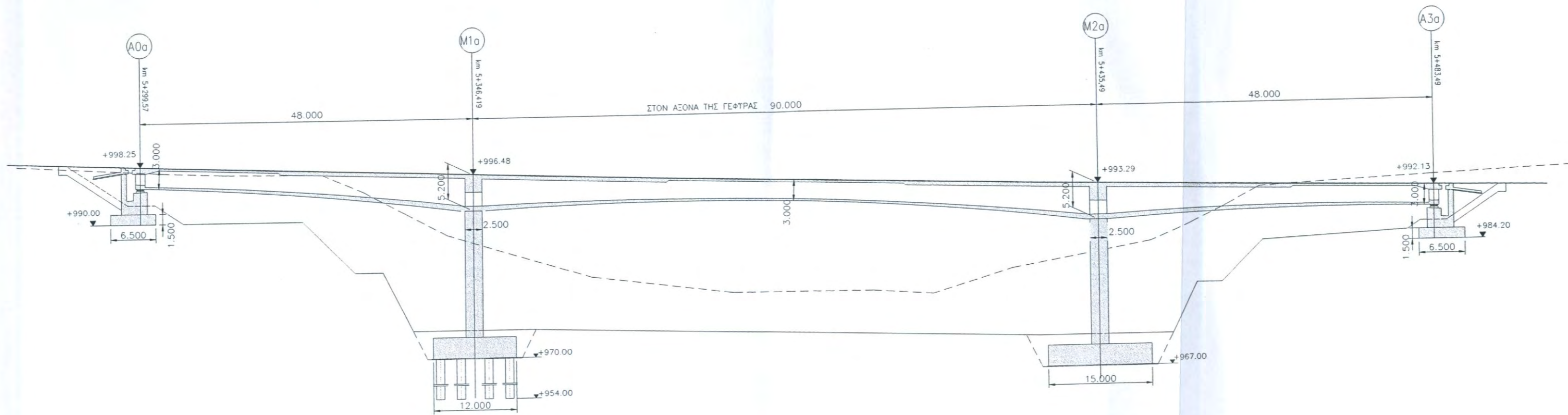


ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ

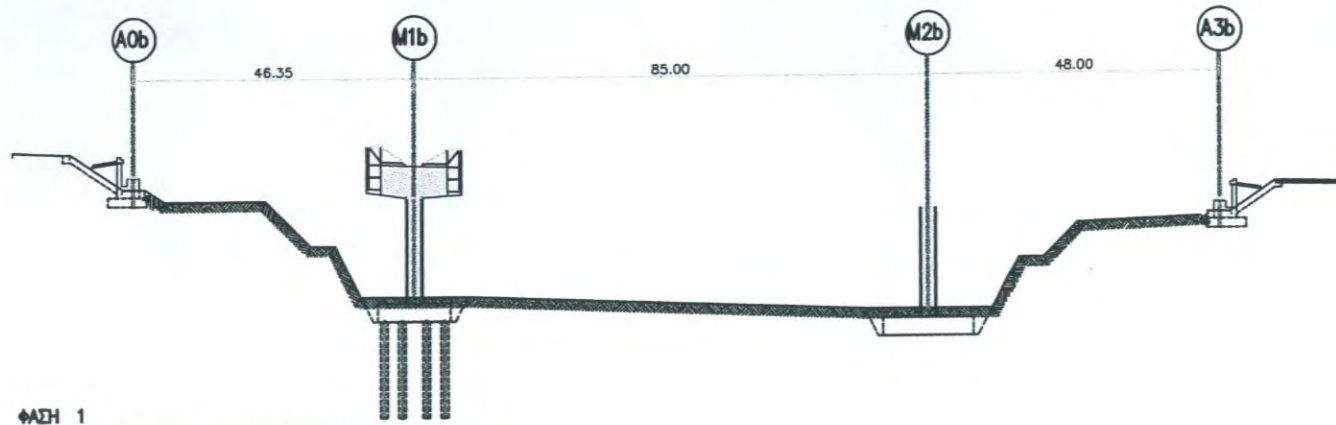


ΟΨΗ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ

ΣΧΕΔΙΟ 21

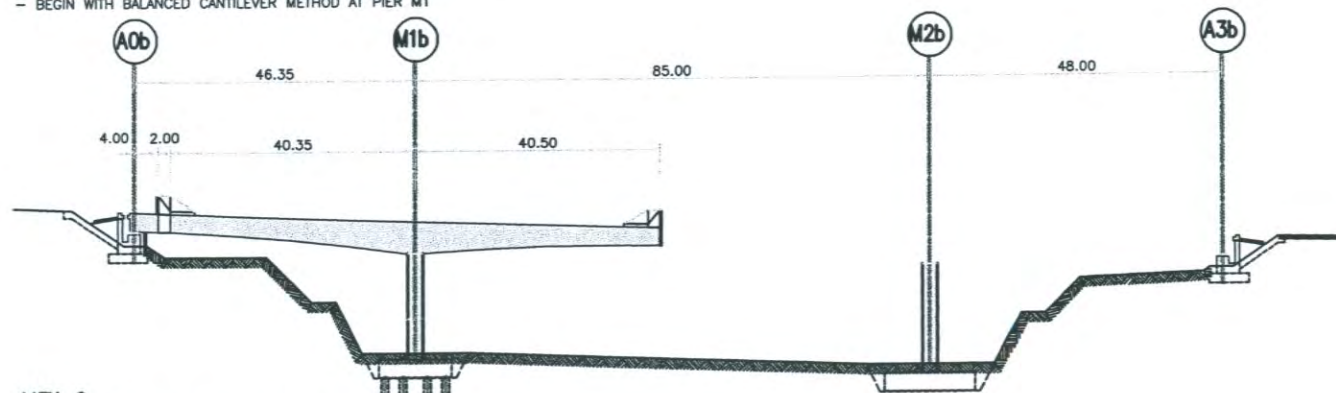


ΣΧΕΔΙΟ 21α



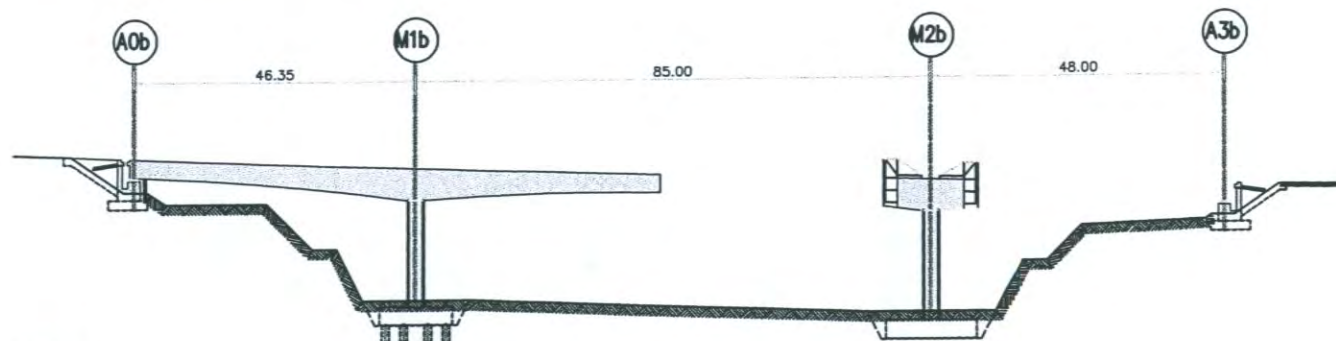
ΦΑΣΗ 1

- ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗΣ ΠΡΟΒΟΛΟΔΟΜΗΣΗΣ ΣΤΟ ΒΑΘΡΟ Μ1
- BEGIN WITH BALANCED CANTILEVER METHOD AT PIER M1



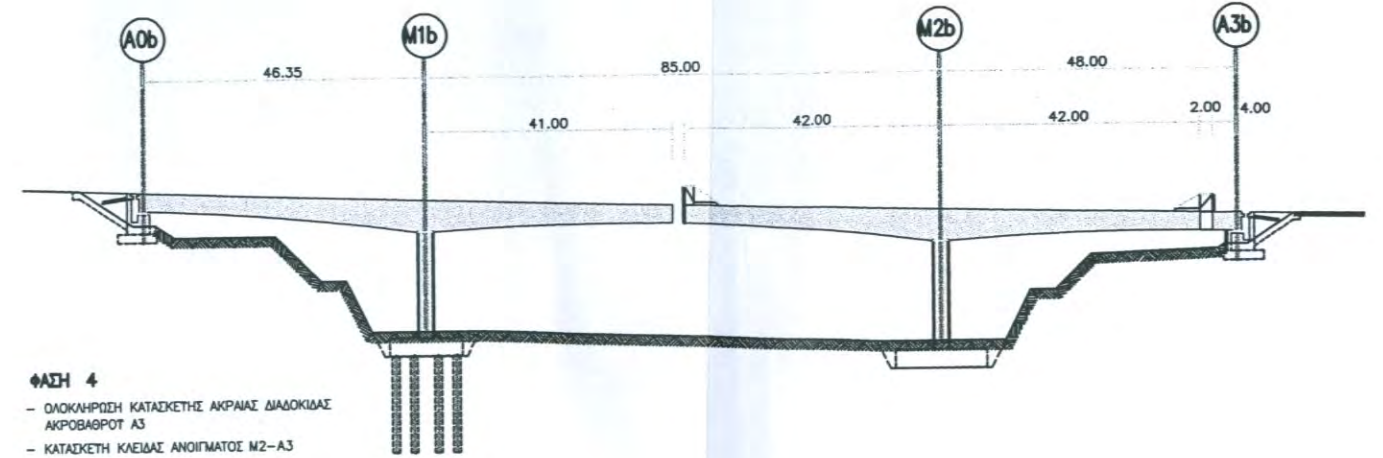
ΦΑΣΗ 2

- ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΤΗΣ ΑΚΡΑΙΑΣ ΔΙΑΔΟΚΙΑΣ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΥ Α0
- ΚΑΤΑΣΚΕΤΗ ΚΛΕΙΔΑΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ Α0-Μ1
- ENDDIAPHRAGM A0 CONSTRUCTED
- CLOSE KEY ELEMENT AT SIDE SPAN A0-M1



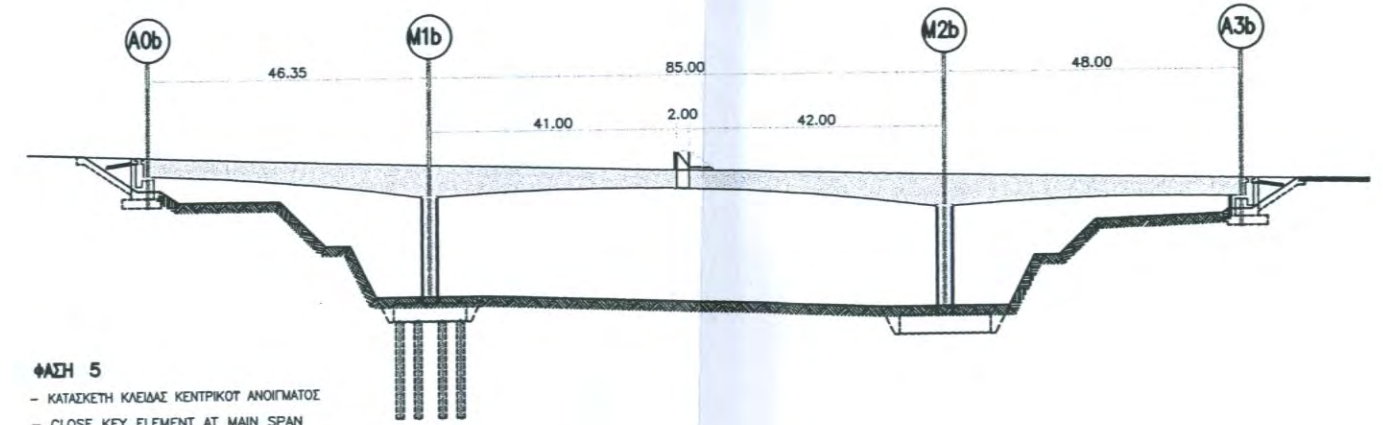
ΦΑΣΗ 3

- ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗΣ ΠΡΟΒΟΛΟΔΟΜΗΣΗΣ ΣΤΟ ΒΑΘΡΟ Μ2
- ΑΠΟΜΑΚΡΤΝΣΗ ΕΣΤΕΡΙΚΩΝ ΠΡΟΣΤΗΡΗΓΜΑΤΩΝ ΜΠΡΟΣΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟ Α0b
- BEGIN WITH BALANCED CANTILEVER AT PIER M2
- REMOVE AUXILIARY SUPPORT IN FRONT OF A0b



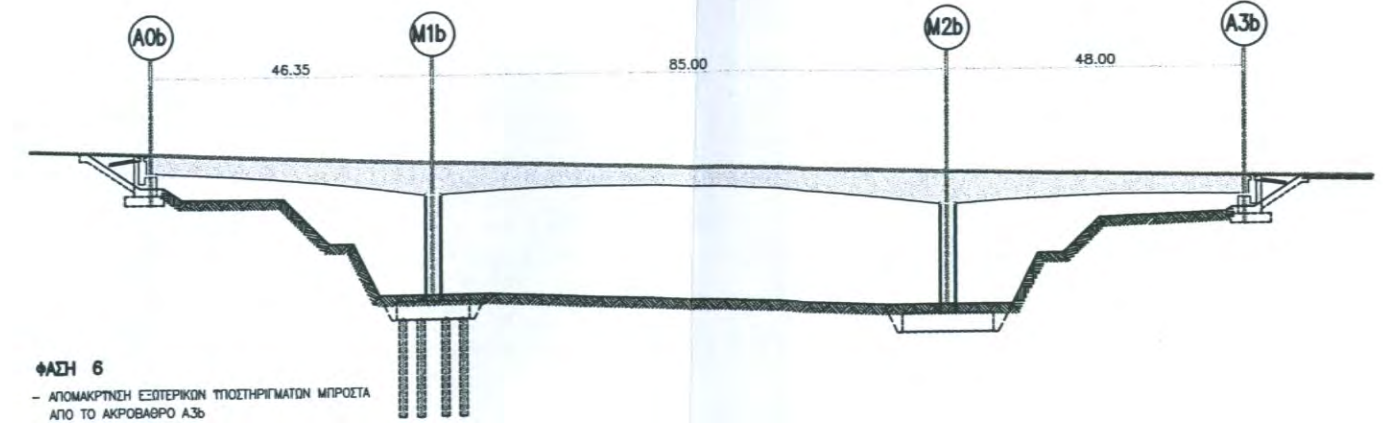
ΦΑΣΗ 4

- ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΤΗΣ ΑΚΡΑΙΑΣ ΔΙΑΔΟΚΙΑΣ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟΥ Α3
- ΚΑΤΑΣΚΕΤΗ ΚΛΕΙΔΑΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ Μ2-Α3
- ENDDIAPHRAGM A3 CONSTRUCTED
- CLOSE KEY ELEMENT AT SIDE SPAN Μ2-Α3



ΦΑΣΗ 5

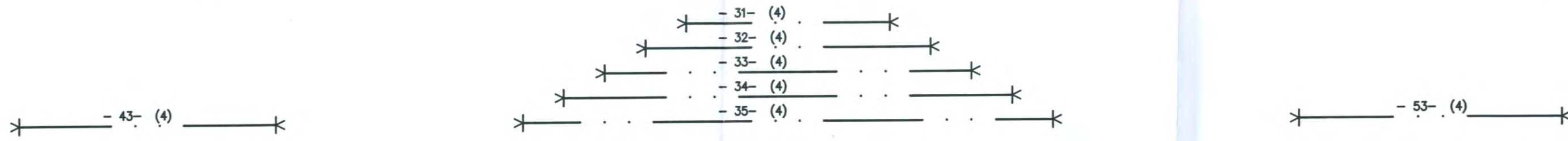
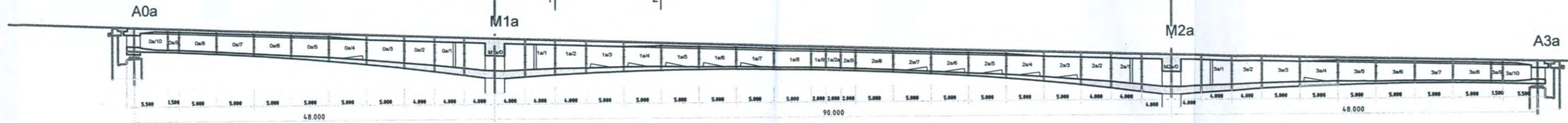
- ΚΑΤΑΣΚΕΤΗ ΚΛΕΙΔΑΣ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ
- CLOSE KEY ELEMENT AT MAIN SPAN



ΦΑΣΗ 6

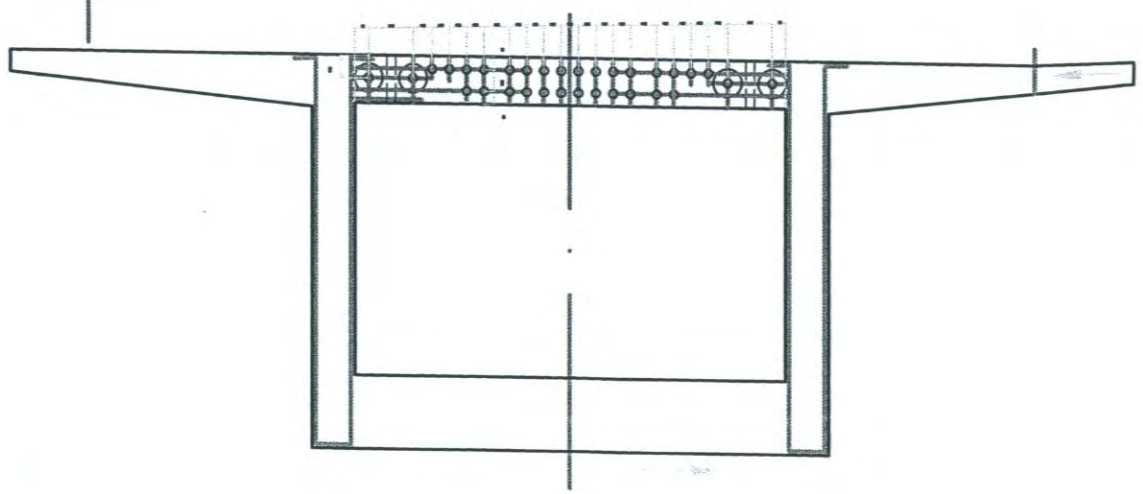
- ΑΠΟΜΑΚΡΤΝΣΗ ΕΣΤΕΡΙΚΩΝ ΠΡΟΣΤΗΡΗΓΜΑΤΩΝ ΜΠΡΟΣΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΑΚΡΟΒΑΘΡΟ Α3b
- ΕΞΟΛΙΣΜΟΣ ΓΕΦΥΡΑΣ
- REMOVE AUXILIARY SUPPORT IN FRONT OF A3b
- BRIDGE EQUIPMENT

ΣΧΕΔΙΟ 21β



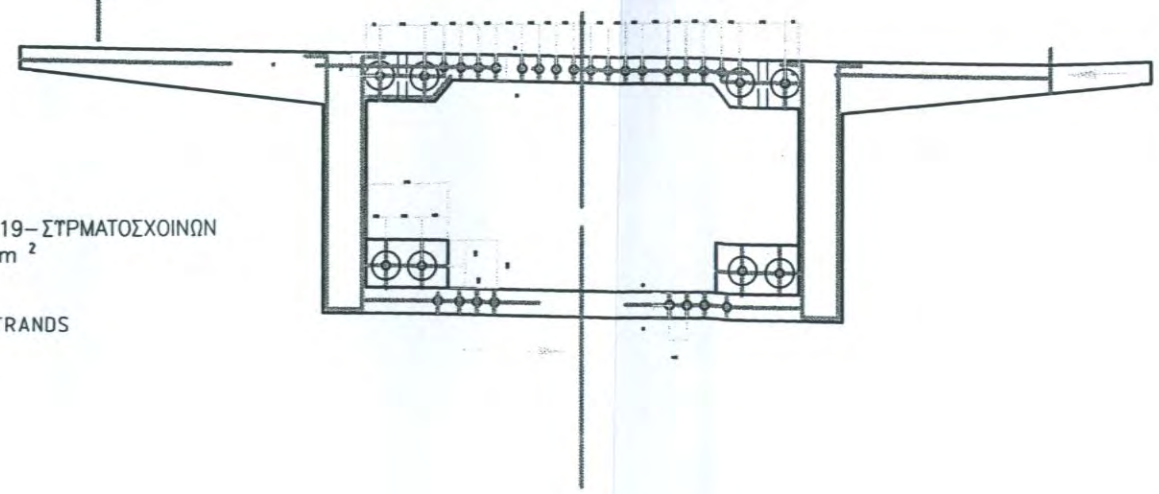
ΕΠΙΚΛΙΣΗ ΔΕΞΙΑ

ΔΕΞΙΟΣ ΚΛΑΔΟΣ
ΤΟΜΗ 1
RIGHT BRANCH
SECTION 1



ΕΠΙΚΛΙΣΗ ΔΕΞΙΑ

ΔΕΞΙΟΣ ΚΛΑΔΟΣ
ΤΟΜΗ 2
RIGHT BRANCH
SECTION 2



ΟΛΟΙ ΟΙ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΕΙΝΑΙ ΤΥΠΟΥ 19-ΣΤΡΜΑΤΟΣΧΟΙΝΩΝ
ΣΤΡΜΑΤΟΣΧΟΙΝΑ ΜΕ $A = 150\text{mm}^2$
ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΧΑΛΥΒΑ: 1570/1770
ALL TENDONS ARE OF TYPE 19-STRANDS
STRANDS WITH $A = 150\text{mm}^2$
STEEL-QUALITY: 1570/1770

ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αναγνωστόπουλος, Α.Γ. (1990). “Θεμελιώσεις με πασσάλους”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- Αναγνωστόπουλος, Α.Γ., και Παπαδόπουλος, Β.Π. (1989). “Επιφανειακές θεμελιώσεις”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- Γκαζέτας, Γ. (1998). “Θεμελιώσεις με φρέατα.” *Πρακτικά επιστημονικής διημερίδας Προβλήματα Σχεδιασμού Οδογεφυρών*, Θεσσαλονίκη.
- Εγνατία Οδός Α.Ε. (2010). “*The project identity*”. Αναζητήθηκε 6 Δεκεμβρίου 2010 από <http://www.egnatia.eu/page/default.asp?la=2&id=24>
- Καρμίρης, Γ. (1999). “Χρονικός και οικονομικός προγραμματισμός γεφυρών με ανωδομή από προκατασκευασμένα στοιχεία.” Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κόλιας Β. (1998). “Προβολοδόμηση.” *Πρακτικά επιστημονικής διημερίδας Προβλήματα Σχεδιασμού Οδογεφυρών*, Θεσσαλονίκη.
- Λαμπρόπουλος, Σ. (2008). “Δομικές μηχανές και κατασκευαστικές μέθοδοι - Σημειώσεις μαθήματος”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μαρίνος, Β. (2007). “Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων”. Διδακτορική διατριβή, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- ΟΑΣΠ (2001). “Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000 – ΕΑΚ 2000”, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, Αθήνα.
- Πελεγκάρης Α. (2003). “Κατασκευή γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα με προβολοδόμηση και προώθηση στην Ελλάδα σήμερα.” Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Σιγάλας Ι. (1998). “Υψηλά βάθρα.” *Πρακτικά επιστημονικής διημερίδας Προβλήματα Σχεδιασμού Οδογεφυρών*, Θεσσαλονίκη.
- Τσουκαντάς, Σ. (1998). “Προκατασκευή (κλασική / σπόνδυλοι).” *Πρακτικά επιστημονικής διημερίδας Προβλήματα Σχεδιασμού Οδογεφυρών*, Θεσσαλονίκη.

Φραγκάκης, Ν.Π. (2000). “Γέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα στην Ελλάδα: Ανάπτυξη βάσης δεδομένων και μεθόδου προσεγγιστικής προκοστολόγησης.” Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Διεθνής Βιβλιογραφία

Abeyasinghe, R., Konstantinidis, D., and Lambropoulos, S. (1999). “Managing the design of structures in a mega project”. *Computer Techniques for Civil and Structural Engineering*, 255-263.

Ahsan, R., Rana, S., and Ghani, S.N. (2010). “Design of prestressed concrete I-girder bridge superstructure using optimization algorithm.” *Proceedings. IABSE-JSCE Joint Conference on advances in bridge engineering-II*, Dhaka, Bangladesh, August 2010, 211-223.

Ahsan, R., Rana, S., and Ghani, S.N. (2011). “Cost optimum design of post-tensioned I-girder bridge using global optimization approach.” *Journal of Structural Engineering*, doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000458 (accepted manuscript posted ahead of print).

Aparicio, A.C., Casas, J.R., and Ramos, G. (1996). “Computer aided design of prestressed concrete highway bridges.” *Computers & Structures*, 60 (6), 957-969.

Association for the Advancement of Cost Engineering AACE (2005). “*AACE International Recommended Practice No. 18R-97 – Cost Estimate Classification System – as applied in engineering, procurement, and construction for the process industries*”, AACE, Inc.

Association for the Advancement of Cost Engineering AACE (2010). “*AACE International Recommended Practice No. 10S-90 – Cost Engineering Terminology*”, AACE, Inc.

Ayed, A.S. (1997). “*Parametric cost estimating of highway projects using neural networks.*” M.Sc. Thesis, School of Graduate Studies, Faculty of Engineering & Applied Sciences, Memorial University, Newfoundland, Canada.

Ayvaz, Y., and Aydin, Z. (2009): “Optimum topology and shape design of prestressed concrete bridge girders using a genetic algorithm.” *Struct Multidisc Optim*, industrial application, DOI10.1007/s00158-009-0404-2.

Azhar, N., Farooqui, R.U., and Ahmed, S.M. (2008). “Cost overrun in construction industry of Pakistan.” *Proceedings. 1st International Conference on Construction In Developing Countries*

(ICCIDC-I) *Advancing and Integrating Construction Education, Research & Practice*, Karachi, Pakistan, August 2008, 499-508..

Belshey, D.A., Kuh, E., and Welsch, R. (1980). “*Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity*”, Wiley, New York, USA.

Bowles, J.E. (1996). “*Foundation analysis and design*”, McGraw-Hill, USA.

Brubaker, K.L. and McCuen, R.H. (1990), “Level of significance selection in engineering analysis.” *Journal of Professional Issues in Engineering ASCE*, 116(4), 375-387.

Burgoyne, C.J., and Sham, S.H.R. (1987). “Application of expert systems to prestressed concrete bridge design.” *Civil Engineering Systems*, 4, 14-19.

Burke, R. (1999). “*Project Management, Planning & Control Systems*”, John Wiley & Sons Ltd., UK.

California Department of Transportation, Division of Engineering Services (2011). “*Construction Statistics 2010*”, California Department of Transportation, USA διαθέσιμο στη διεύθυνση www.dot.ca.gov/hq/esc/estimates/Construction_Stats_2010.pdf (πρόσβαση 3 Μαρτίου 2012).

Chatterjee, S, and Price, B. (1991). “*Regression diagnostics*”, Wiley, New York, USA.

Chen, W., and Duan, L. (1999). “*Bridge engineering handbook*”, CRC Press LLC, USA.

Chernick, M.R. (1999). “*Bootstrap methods. A practitioner’s guide*”, John Wiley & Sons Inc., USA.

Cohn, M.Z., and Lounis, Z. (1994). “Optimal design of structural concrete bridge systems.” *Journal of Structural Engineering*, 120(9), 2653-2674.

Creese, R, and Li, L. (1995). “Cost estimation of timber bridges using neural networks.” *Cost Engineering*, 37(5), 17-22.

Davison, A.C., and Hinkley, D.V. (1997). “*Bootstrap methods and their application*”, Cambridge University Press, USA.

Draper, N.R., and Smith, H. (1981). “*Applied Regression Analysis*.” 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., USA. (Μετάφραση στα Ελληνικά από τους Χατζηκωνσταντινίδη Ευστάθιο και Καλαματιανού Αγλαΐα για τις Εκδόσεις Παπαζήση).

Efron, B. (1979). “Bootstrap methods: another look at the jackknife.” *The Annals of Statistics*. 7, 1-26.

Efron, B. (1982). *“The Jackknife, the bootstrap and other resampling plans,”* Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, USA.

Efron, B. (1987). “Better bootstrap confidence intervals (with discussion).” *Journal of the American Statistical Association.* 82, 172-200.

Efron, B, and Tibshirani, R. (1986). “Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals and other measures of statistical accuracy.” *Statistical Science.*1, 54-77.

Efron, B, and Tibshirani, R. (1993). *“An introduction to the bootstrap,”* Chapman & Hall, London

Elmasri, R., and Navathe, S.B. (2000). *“Fundamentals of Database Systems”*, 3rd edition revised, Addison-Wesley Publishing Company (Μετάφραση στα Ελληνικά από τον Μιχάλη Χατζόπουλο για τις Εκδόσεις Διάυλος).

Fereig, S.M. (1996). “Economic preliminary design of bridges with prestressed I girders.” *Journal of Bridge Engineering,* 1(1), 18-25.

Flyvbjerg, B. (2007). “Cost overruns and demand shortfalls in urban rail and other infrastructure.” *Transportation Planning and Technology,* 30(1), 9-30.

Flyvbjerg, B., Skamris, M.K., and Buhl, S.L. (2004). “What causes cost overrun in transport infrastructure projects?” *Transport Reviews,* 24(1), 3-18.

Fragkakis, N.P., and Lambropoulos, S. (2004). “A quantity and cost estimate model for concrete road bridges.” *Tech. Chron. Sci. J. TCG,* 124 (2-3), 65-78.

Fragkakis, N.P., Lambropoulos, S., and Tsiambaos, G. (2011). “A parametric model for conceptual cost estimation of concrete bridge foundations.” *Journal of Infrastructure Systems,* 17(2), 66-74.

Gujarati, D. (1999). *“Essentials of Econometrics”*, Irwin Mc Graw Hill, New York, USA.

Hassanain, M.A., and Loov, R.E. (2003). “Cost Optimization of Concrete Bridge Infrastructure.” *Canadian Journal of Civil Engineering,* 30(5), 841-849.

Hegazy, T (2002). *“Computer-Based Construction Project Management”*, Prentice-Hall International.

Hegazy, T., and Ayed, A. (1998). “Neural network model for parametric cost estimation of highway projects.” *Journal of construction engineering and Management.* 124 (3), 210-218.

- Hendrickson, C. (2008). “*Project Management for Construction, Fundamental Concepts for Owners, Engineers, Architects and Builders, version 2.2*”, διαθέσιμο στη διεύθυνση http://pmbook.ce.cmu.edu/05_Cost_Estimation.html (πρόσβαση 20 Μαρτίου 2008).
- Hoek, E. (1994). “Strength of rock and rock masses.” *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16.
- Hoek, E., Kaiser, P.K., and Bawden, W.F. (1995). “*Support of underground excavations in hard rock*”, Balkema, Rotterdam.
- Hoek, E., Marinos, P., and Benissi, M. (1998). “Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation.” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57(2), 151-160.
- Hoek, E., Marinos, P., Kazilis, N., Angistalis, G., Rahaniotis, N., and Marinos, V. (2006) “Greece’s Egnatia Highway Tunnels.” *Tunnels & Tunnelling International*, September issue, 32-35.
- Hoek, E., Marinos, P., and Marinos, V. (2004) “Characterisation and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses.” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(2), 277-285.
- Hoffman, G.J., Thal, A.E., Webb, T.S., and Weir, J.D. (2007). “Estimating performance time for construction projects.” *Journal of Management in Engineering*, 23(4), 193-199.
- Hughes, W.O., and Paez, T.L. (2006). “Application of the bootstrap statistical method in deriving vibroacoustic specifications”. *Proceedings, 9th Ninth international conference on recent advances on structural dynamics*, Southampton, United Kingdom, July 2006.
- Iowa Department of Transportation, Office of Bridges and Structures (2011). “*LRFD Bridge Design Manual*”, IOWA Department of Transportation, USA διαθέσιμο στη διεύθυνση <http://www.iowadot.gov/bridge/policy/0328PrelimJu11.pdf> (πρόσβαση 3 Μαρτίου 2012).
- Johnson, R.W. (2001). “An introduction to bootstrap.” *Teaching Statistics*, 23(2), 49-54.
- Kaiser, M.J. (2006). “Offshore decommissioning cost estimation in the Gulf of Mexico.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(3), 249-258.
- Karshenas, S. (1984). “Predesign cost estimating method for multistory buildings.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 110(1), 79-86.
- Khosrowshahi, F., and Kaka, A.P. (1996). “Estimation of project total cost and duration for housing projects in the U.K.” *Building and Environment*, 31(4), 373-383.

- Kim, G.H., An, S.H., and Kang, K.I. (2004). "Comparison of construction cost estimating models based on regression analysis, neural networks and case-based reasoning." *Building and Environment*, 39, 1235-1242.
- Konstantinidis, D. and Maravas, A. (2003). "Egnatia Motorway concrete bridges statistics". *Proceedings, 31st ASECAP Study and Information Days international conference*, Portoroz, Slovenia, 2003, (pp. 92-109).
- Koyskoulas, V., and Koehn, E. (1974). "Predesign cost-estimation function for buildings." *Journal of the Construction Division, ASCE*, 100 (CO4), 589-604.
- Long, J. S., and Ervin, L H.(2000). "Using Heteroscedasticity Consistent Standard Errors in the Linear Regression Model." *The American Statistician*, 54, 217-224.
- Lounis, Z., and Cohn, M.Z. (1993). "Optimization of precast prestressed concrete bridge girder systems." *PCI Journal*, 38(4), 60-78.
- Lounis, Z., and Cohn, M.Z. (1995). "Computer-aided design of prestressed concrete cellular bridge decks." *Microcomputers in Civil engineering*, 10 (1), 1-11.
- Lounis, Z., and Cohn, M.Z. (1996). "An approach to preliminary design of precast pretensioned concrete girders." *Microcomputers in Civil engineering*, 11 (6), 381-393.
- Love, P.E.D., Tse, R.Y.C., and Edwards, D.J. (2005). "Time-cost relationships in Australian building construction projects." *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(2), 187-194.
- Lowe, D.J., Emsley, M.W., and Harding, A. (2006). "Predicting construction cost using multiple regression techniques." *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(7), 750-758.
- MacKinnon, J.G., and White, H. (1985). "Some heteroskedasticity consistent covariance matrix estimators with improved finite sample properties." *Journal of Econometrics*, 29, 53-57.
- Maddala, G.S. (1992). "*Introduction to Econometrics*", 2nd edition, Macmillan Publishing Company, New York, USA.
- Marinos, P., and Hoek, E. (2000). "GSI: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation." *Proceedings of the International Conference on Geotechnical & Geological Engineering (GeoEng 2000)*, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster., 1422-1446.
- Marinos, P., and Hoek, E. (2001). "Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60, 82-92.

Marinos, P., Hoek, E., and Marinos, V. (2005). "Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunneling." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 129-142.

Mathivat, J. (1983). "*The cantilever construction of prestressed concrete bridges*", John Wiley & Sons Ltd., UK.

McCaffer, R. (1975). "Some examples of the use of regression analysis as an estimating tool." *Quantity Surveyor*, December, 81-86.

Menn, C. (1990). "*Prestressed concrete bridges*", Birkhauser, Germany.

Montgomery, D.C., Peck, E.A., and Vining, G.G. (2006). "*Introduction to linear regression analysis*", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA.

Moore, C.J. (1991). "*An expert system for the conceptual design of bridges*." Ph.D. thesis, School of Engineering, University of Cardiff, Cardiff.

Moore, C.J., Miles, J.C., and Rees, D.W.G. (1997). "Decision support for conceptual bridge design." *Artificial Intelligence in Engineering*, 11, 259-272.

New York Department of Transportation, Engineering Division, Office of Structures (2012). "*Preliminary cost estimate worksheet for new and replacement bridges*", New York Department of Transportation, USA διαθέσιμο στη διεύθυνση <https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/structures/manuals/preliminary-cost> (πρόσβαση 3 Μαρτίου 2012).

Oberlender, G.D., and Trost, S.M. (2001). "Predicting accuracy of early cost estimates based on estimate quality". *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(3), 173-182.

Office of Program Policy Analysis and Government Accountability, The Florida Legislature (1996). "*Review of the Florida Department of Transportation's performance in controlling construction cost overruns and establishing accountability for these problems. – Report No. 96-21*", Office of Program Policy Analysis and Government Accountability, The Florida Legislature, USA

Office of Program Policy Analysis and Government Accountability, The Florida Legislature (1997). "*Follow-up report on the Florida Department of Transportation's performance in controlling cost overruns when building roads and bridges. – Report No. 97-22*", Office of Program Policy Analysis and Government Accountability, The Florida Legislature, USA

- Pickrell, D.H. (1990). "Urban rail transit projects: forecast versus actual ridership and cost", US Department of Transportation, Washington, USA.
- Poulos, H.G., and Davis, E.H. (1980). "*Pile foundation analysis and design*", John Wiley & Sons, USA.
- Rawlings, J.O., Pantula, S.G., and Dickey, D.A. (1998). "*Applied regression analysis: a research tool*", 2nd edition, Springer Verlag, New York, USA.
- Ritz, G.J. (1994). "*Total Construction Project Management*", Irwin Mc Graw Hill, New York, USA
- Ryall, M.J., Parke, G.A.R., and Harding, J.E. (2000). "*Manual of bridge engineering*", Thomas Telford Publishing, UK.
- Sarma, K.C., and Adeli, H. (1998). "Cost optimization of concrete structures." *Journal of Structural Engineering*, 124(5), 570-579.
- Seber, G.A.F., and Lee, A.J. (2003). "Linear regression analysis", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA.
- Shapiro, S. S. and Wilk, M. B. (1965). "An analysis of variance test for normality (complete samples)." *Biometrika*, 52(3-4), 591-611.
- Sirca, G.F., and Adeli, H. (2005). "Cost optimization of prestressed concrete bridges." *Journal of Structural Engineering*, 131(3), 380-388.
- Skamris, M.K., and Flyvbjerg, B. (1997). "Inaccuracy of traffic forecasts and cost estimates on large transport projects." *Transport Policy*, 4(3), 141-146.
- Smith, S.D. (1999). "Earthmoving productivity estimation using linear regression techniques." *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(3), 133-141.
- Sonmez, R. (2004). "Conceptual cost estimation of building projects with regression analysis and neural networks." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31, 677-683.
- Sonmez, R. (2008). "Parametric Range Estimating of Building Costs Using Regression Models and Bootstrap." *Journal of Construction Engineering and Management*, 134 (12), 1011-1016.
- Swiss Seismological Service (2004). "*Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2004*", Swiss Seismological Service, Switzerland.
- Taly, N. (1998). "*Design of modern highway bridges*", McGraw-Hill, USA

Tomlinson, M.J. (1995). “*Foundation design and construction*”, Addison Wesley Longman Limited, UK.

Tsiambaos, G., and Saroglou, H. (2009). “Excavatability assessment of rock masses using the Geological strength Index (GSI).” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(1), 13-27.

United States Department of Energy (1997). “*Types of cost estimates - guide DOE G 430.1-1*”, United States Department of Energy.

Welch, J.G., and Biswas, M. (1986). “*Application of expert systems in the design of bridges.*” *Transport Res. Record* 1072, USA, 65-70.

White, H. (1980). “A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix and a Direct Test for Heteroskedasticity.” *Econometrica*, 48, 817-838.

Wideman, R.M. (1995). “*Cost control of capital projects*”, BiTech Publishers Ltd., Richmond, Canada.

Wu, C.F.J. (1986). “Jackknife, bootstrap and other resampling methods in regression analysis (with discussion).” *The Annals of Statistics*. 14(4), 1261-1295.

Wyllie, D.C. (1999). “*Foundations on rock*”, E&FN Spon, UK.

Συνοπτικό βιογραφικό σημείωμα

Ο Νικόλαος Π. Φραγκάκης είναι υποψήφιος διδάκτορας στον Τομέα Προγραμματισμού και Διαχείρισης Τεχνικών Έργων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κατέχει πτυχίο Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π. και μεταπτυχιακό τίτλο Διοίκησης Επιχειρήσεων (Μ.Β.Α.) γενικής κατεύθυνσης. Έχει λάβει αρκετές διακρίσεις και υποτροφίες (Ι.Κ.Υ., Τ.Ε.Ε., Ίδρυμα Fulbright) κατά τη διάρκεια των σπουδών του. Εργάζεται στον τομέα ακίνητης περιουσίας παρέχοντας τεχνικές και οικονομικές συμβουλευτικές υπηρεσίες. Είναι εξειδικευμένος πιστοποιημένος εκτιμητής ακινήτων και συνεργάτης χρηματοπιστωτικών ιδρυμάτων και έχει επανειλημμένως παράσχει συμβουλευτικές υπηρεσίες σε μεγάλης κλίμακας αναπτυξιακά έργα.