ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΛΑΚΟΣΤΡΩΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΠΟ ΚΥΒΟΛΙΘΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΠΙΣΤΕΥΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΑ

Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια

Ιούλιος 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως την κα. Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ανάθεση, την επίβλεψη, την καθοδήγηση και την εξαιρετική μας συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Ακόμα, ευχαριστώ ιδιαίτερα την υποψήφια διδάκτορα του τομέα, Μαρία Τσακουμάκη, για τη βοήθειά της στην καταγραφή της βιβλιογραφίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και δικούς μου ανθρώπους. Ειδικά όσους γνώρισα εντός πολυτεχνείου, που αυτά τα πέντε χρόνια φοίτησής μου στην Αθήνα με αγκάλιασαν σαν μια δεύτερη οικογένεια. Νικολέττα, Ανδριάννα, Αργυρώ, Μαριάννα, Γιάννο, σας ευχαριστώ που κάνατε αυτό το ταξίδι τόσο όμορφο.

Τέλος, ευχαριστώ την αδερφή μου, Φαίη και τους γονείς μου, Χαρούλα και Δημήτρη, για την στήριξή και την αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια και κυρίως που δεν έπαψαν ποτέ να πιστεύουν σε εμένα και να αγκαλιάζουν τα όνειρα και τις φιλοδοξίες μου.

Τη διπλωματική μου την αφιερώνω στους γονείς μου, στους οποίους οφείλω τις μεγαλύτερες επιτυχίες της ζωής μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της μελέτης διαφόρων τύπων οδοστρωμάτων και των επιμέρους χαρακτηριστικών τους, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα πλακόστρωτα οδοστρώματα με κυβόλιθους σκυροδέματος. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση του σχεδιασμού και των σταδίων κατασκευής των υπόψη οδοστρωμάτων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου πραγματοποιείται αφενός μια ενδελεχής αναζήτηση στη διεθνή βιβλιογραφία των χαρακτηριστικών και των παραμέτρων σχεδιασμού των οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος και αφετέρου, μία προκαταρκτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους, για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητάς τους. Η συγκεκριμένη διερεύνηση περιλαμβάνει τη μελέτη κατασκευασμένης διατομής πλακόστρωτου οδοστρώματος και με βάση τα χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων της πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας με κριτήριο τις επιτρεπόμενες διελεύσεις τυπικού αξονικού φορτίου. Τα αποτελέσματα ανάλυσης αποδεικνύουν κάποιες οδηγίες όσον αφορά στα απαιτούμενα χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος με κυβόλιθους σκυροδέματος.

ABSTRACT

As part of the study on various types of pavements and their specific characteristics, particular interest is given to concrete block pavements (CBP). The aim of this thesis is to present their design and construction stages. To achieve this goal, a thorough search is conducted in the international literature regarding the characteristics and design parameters of concrete block pavements. Additionally, a preliminary investigation of their mechanical behavior is carried out to calculate their load-bearing capacity. This specific investigation includes the study of the cross-section of a constructed concrete block pavement, and based on the characteristics of its individual layers, a sensitivity analysis is performed using the criterion of permissible passages of a typical axial load. The analysis results provide some guidelines regarding the required characteristics of the individual layers of the concrete block pavement.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
   1.1 Αντικείμενο 1
   1.2 Στόχος διπλωματικής 1
   1.3 Δομή εργασίας 2
2. Ιστορική εξέλιξη οδοστρωμάτων 4
   2.1 Πλακόστρωτα οδοστρώματα στην Αρχαία Ρώμη 4
   2.2 Οδοστρώματα Telford 5
   2.3 Οδοστρώματα Macadam 6
   2.4 Ασφαλτικά οδοστρώματα 7
   2.5 Οδοστρώματα από σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland 9
   2.6 Οδοστρώματα με κυβόλιθους σκυροδέματος 9
      2.6.1 Η εξέλιξη των οδοστρωμάτων με μπλοκ σκυροδέματος 9
      2.6.2 Κατασκευαστική διατομή 10
      2.6.3 Τομείς εφαρμογής 14
3. Παραγωγή κυβόλιθων σκυροδέματος 15
   3.1 Εξοπλισμός 15
   3.2 Αναλογία μίγματος σκυροδέματος 17
   3.3 Επιλογή χρώματος κυβόλιθων 18
      3.3.1 Βασικά είδη 18
      3.3.2 Διαδικασία χρωματισμού και χαρακτηριστικά χρωστικών 19
   3.4 Επιλογή σχήματος κυβόλιθων σκυροδέματος 21
   3.5 Απαιτήσεις και μέθοδοι δοκιμής/ Πρότυπο EN 1338 23
      3.5.1 Γενικά 23
      3.5.2 Έλεγχοι αποδοχής 23
      3.5.3 Περαιτέρω πληροφορίες 26
4. Στάδια κατασκευής οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος 28
   4.1 Σχεδιασμός 28
   4.2 Επιλογή και παραγγελία κυβόλιθων 29
   4.3 Εκσκαφή 29
   4.4 Εγκατάσταση υπόγειων αποστραγγιστικών έργων 30
   4.5 Εγκατάσταση συστημάτων συγκράτησης άκρων 32

4.5.1 Γενικά 32
4.5.2 Τυπικές διατομές κρασπέδων 33
4.5.3 Είδος σκυροδέματος 35
4.5.4 Διαδικασία εγκατάστασης 36
4.6 Κατασκευή στρώσεων βάσης/υπόβασης 37
4.7 Διάστρωση και συμπίεση άμμου κλινοστρωμνής 41
4.8 Τοποθέτηση κυβόλιθων 43
4.9 Ευθυγράμμιση και κοπή κυβόλιθων 45
4.10 Συμπίεση στρώματος κυβόλιθων 46
4.11 Πλήρωση αρμών με άμμο 47
5. Μηχανική συμπεριφορά οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος 48
5.1 Μελέτη ευαισθησίας 48
5.2 Ανάλυση τάσης – καταπόνησης 53
5.3 Πρόβλεψη παραμόρφωσης οδοστρωμάτων 58
6. Μελέτη εφαρμογής 66
6.1 Περιγραφή έργου 66
6.2 Στάδια κατασκευής οδοστρώματος έργου 68
6.3 Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας 72
6.4 Ανάλυση ευαισθησίας 73
7. Συμπεράσματα 78
8. Βιβλιογραφία 83
9. Παράρτημα: Πίνακες Jones A. 87

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Η Αππία Οδός στη Ρώμη (Via Appia Antica & Catacombs of Rome) 4
Εικόνα 2.2: Δομή ρωμαϊκού οδοστρώματος 5
Εικόνα 2.3: Τυπικό οδόστρωμα Telford (Pavement History) 6
Εικόνα 2.4: Τυπικό οδόστρωμα Macadam (Pavement History) 7
Εικόνα 2.5: Βασικοί τύποι κυβόλιθων (Paver Blocks - Types, Shapes, Uses, and Benefits, 2020) 11
Εικόνα 2.6: Τυπικό μπλοκ σκυροδέματος (Block Paving - An Introduction to Block and Brick Paving) 12
Εικόνα 2.7: Διατομή οδοστρώματος με κυβόλιθους σκυροδέματος (CBP) 13
Εικόνα 3.1: Brickwell BW 8004 BLOCK MACHINE (Types of Concrete Block Making Machine Models) 16
Εικόνα 3.2: ELKOBLOCK-36M multilayer block making machine (Elkoblock-36M Multilayer Block Making Machine) 17
Εικόνα 3.3: Συστατικά κυβόλιθων σκυροδέματος 17
Εικόνα 3.4: Πλακόστρωση με μονόχρωμους κυβόλιθους (Block Paving - Choosing a Block or Brick Paver) 19
Εικόνα 3.5: Πλακόστρωση με πολύχρωμους κυβόλιθους (Block Paving - Choosing a Block or Brick Paver) 19
Εικόνα 3.6: Επίδραση ποσότητας χρωστικής στην ένταση του χρώματος 21
Εικόνα 3.7: Συμπίεση διεπαφής ορθογώνιων κυβόλιθων από επιβαλλόμενο φορτίο . 22
Εικόνα 3.8: Καταστροφή κυβόλιθου σκυροδέματος λόγω εφελκυστικής δύναμης (Block Paving - Choosing a Block or Brick Paver) 22
Εικόνα 3.9: Παράδειγμα σήμανσης CE κυβόλιθων (EN 1338) 27
Εικόνα 4.1: Σχέδιο κατασκευής προετοιμασμένο εκ των προτέρων (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction) 28
Εικόνα 4.2: Κάδος εναπόθεσης χωματουργικών 29
Εικόνα 4.3: Μηχάνημα Grab Wagon (What Is A Grab Wagon?) 30
Εικόνα 4.4: Μέγεθος τάφρου υπόγειου αγωγού αποστράγγισης (Drainage - Land Drainage for Fields and Gardens) 31
Εικόνα 4.5: Τομή διάτρητου σωλήνα (Drainage - Land Drainage for Fields and Gardens) 31
Εικόνα 4.6: Πλαστικός σωλήνας αποστράγγισης (Drainage - Land Drainage for Fields and Gardens) 32
Εικόνα 4.7: Τσιμεντοσωλήνες αποστράγγισης (από προσωπικό αρχείο) 32
Εικόνα 4.8: Κράσπεδο οδοποιίας 100 x 15 x 28, βάρους 85 kg (EN 1340:2003, 2003) 33
Εικόνα 4.9: Κράσπεδο οδοποιίας 100 x 10 x 28, βάρους 61 kg (EN 1340:2003, 2003) 33
Εικόνα 4.10: Κράσπεδο – Διαχωριστικό κήπου 100 x 6 x 23, βάρους 1.35 kg (EN 1340:2003, 2003) 34
Εικόνα 4.11: Κράσπεδο νησίδα 200 x 40 x 50, βάρους 770 kg (EN 1340:2003, 2003) 34

Εικόνα 4.12: Κράσπεδο νησίδα 200 x 40 x 35, βάρους 557 kg (EN 1340:2003, 2003) 34
Εικόνα 4.13: Διάστρωση σκυροδέματος κλινοστρωμνής (Concrete Bedded Edgings & Kerbs)....36
Εικόνα 4.14: Τοποθέτηση κρασπέδου (Concrete Bedded Edgings & Kerbs)....37
Εικόνα 4.15: Διασπορά φορτίου στη στρώση υπόβασης (Sub-bases)....38
Εικόνα 4.16: Επιμέρους στρώσεις υπόβασης πάχους 425 mm (Sub-bases)....38
Εικόνα 4.17: Διάστρωση υλικού υπόβασης (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)....39
Εικόνα 4.18: Δονητικός συμπιεστής υλικού υπόβασης (Sub-bases)....39
Εικόνα 4.19: Μέτρηση επιπέδου υπόβασης (Sub-bases)....40
Εικόνα 4.20: Εναπόθεση υλικού κλινοστρωμνής (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)....41
Εικόνα 4.21: Διάστρωση υλικού κλινοστρωμνής (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)....42
Εικόνα 4.22: Συμπύκνωση άμμου με συμπιεστή δονούμενης πλάκας (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)....42
Εικόνα 4.23: Τελική συμπύκνωση με χρήση ξύλινου πήχη (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)....43
Εικόνα 4.24: Τοποθέτηση κυβόλιθων με χειρωνακτική εργασία (από προσωπικό αρχείο)....43
Εικόνα 4.25: Σωστός τρόπος τοποθέτησης κυβόλιθων....44
Εικόνα 4.26: Λανθασμένος τρόπος τοποθέτησης κυβόλιθων....44
Εικόνα 4.27: Διαδικασία ευθυγράμμισης κυβόλιθων (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)....45
Εικόνα 4.28: Block splitter (από προσωπικό αρχείο)....46
Εικόνα 5.1: Διατομή πειραματικού οδοστρώματος....48
Εικόνα 5.2: Προοδευτική παραμόρφωση πειραματικού οδοστρώματος: (a) υπόβαση 150mm, (b) υπόβαση 200mm, (c) υπόβαση 250mm, (d) υπόβαση 300mm, (e) υπόβαση 350mm, (d) υπόβαση 400mm (Knapton J. ,Barber S.D., 1979)....49
Εικόνα 5.3: Γραφική παράσταση της μέγιστης παραμόρφωσης σε σχέση με τον αριθμό εφαρμογών φορτίου....50
Εικόνα 5.4: Δομική ανάλυση οδοστρώματος....51
Εικόνα 5.5: Σύγκριση εκτιμώμενης και πραγματικής διάρκειας ζωής οδοστρώματος52
Εικόνα 5.6: Πλακόστρωτο οδόστρωμα ανάλυσης....54
Εικόνα 5.7: Εξεταζόμενα μοτίβα (τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της κίνησης) (Paola Di Mascio, 2019)....55
Εικόνα 5.8: Οριζόντιες μετατοπίσεις (Paola Di Mascio, 2019)....57
Εικόνα 5.9: Δοκιμή δυναμικής εργαστηριακής φόρτισης....58
Εικόνα 5.10: 3D μοντέλο δομικής ανάλυσης....60
Εικόνα 5.11: Σύγκριση παραμόρφωσης από ανάλυση και εργαστηριακή δοκιμή (μοτίβο 1)....61
Εικόνα 5.12: Σύγκριση παραμόρφωσης από ανάλυση και εργαστηριακή δοκιμή (μοτίβο 2)....61

Εικόνα 5.13: Σύγκριση παραμόρφωσης από ανάλυση και εργαστηριακή δοκιμή (μοτίβο 3) 62
Εικόνα 5.14: Διαφορά στο βάθος αυλάκωσης ανάλογα με το πάχος του κυβόλιθου.. 63
Εικόνα 5.15: Διαφορά στο βάθος αυλάκωσης ανάλογα με το πάχος της στρώσης βάσης 64
Εικόνα 5.16: Διαφορά στο βάθος αυλάκωσης ανάλογα με το σχήμα των κυβόλιθων 64
Εικόνα 6.1: (a) Τμήμα τομής πλατείας, (b) Τμήμα τομής χώρου στάθμευσης 66
Εικόνα 6.2: Κάτοψη έργου 67
Εικόνα 6.3: Διατομή πλακόστρωτου οδοστρώματος 68
Εικόνα 6.4: Διαδικασία εκσκαφής (από προσωπικό αρχείο) 69
Εικόνα 6.5: Επίστρωση υλικών στρώσης εξυγίανσης (από προσωπικό αρχείο) 70
Εικόνα 6.6: Τελική μορφή οδοστρώματος έργου (από προσωπικό αρχείο) 71
Εικόνα 6.7: Τελική μορφή οδοστρώματος έργου (από προσωπικό αρχείο) 72
Εικόνα 6.8: Σταθερά χαρακτηριστικά διατομής για μεταβαλλόμενο h_2 73
Εικόνα 6.9: Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής αυξανόμενου του βάθους υπόβασης 74
Εικόνα 6.10: Σταθερά χαρακτηριστικά διατομής για μεταβαλλόμενο CBR 75
Εικόνα 6.11: Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής αυξανόμενου του CBR (%) 76

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Έλεγχοι αποδοχής κυβόλιθων 24
Πίνακας 3.2: Απαιτούμενοι έλεγχοι με βάση το Σύστημα Συμμόρφωσης (λαμβανόμενος από τη Οδηγία 89/106 της ΕΕ για δομικά υλικά) 26
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά συμπιεστή δονητικής πλάκας βάσει κατηγορίας οδοστρώματος 47
Πίνακας 5.1: Σύγκριση φορτίου δοκιμής με τυπικό άξονα 50
Πίνακας 5.2: Δεδομένα φορτίων κυκλοφορίας 53
Πίνακας 5.3: Μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών 54
Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά κυβόλιθων σκυροδέματος 54
Πίνακας 5.5: Τιμές του Δz για διαφορετικά μοτίβα και θέσεις φορτίου 55
Πίνακας 5.6: Δεδομένα εισόδου και αποτελέσματα για ανάλυση κόπωσης και αυλάκωσης 56
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα διαφορετικών διαμορφώσεων 57
Πίνακας 5.8: Δεδομένα παραμόρφωσης τριών διαφορετικών μοτίβων 59
Πίνακας 6.1: Ελάχιστες επιδόσεις λευκών και έγχρωμων κυβόλιθων με ψυχρά υλικά 71
Πίνακας 6.2: Βήματα εκτίμησης διάρκειας ζωής για μεταβαλλόμενο h_2 74
Πίνακας 6.3: Βήματα εκτίμησης διάρκειας ζωής για μεταβαλλόμενο CBR 76

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Οδόστρωμα ονομάζεται ένα σύνολο επάλληλων στρώσεων που είναι τοποθετημένες πάνω από το φυσικό έδαφος ή από κάποιο επίχωμα, με σκοπό τη δημιουργία μιας οδού. Αποτελεί μία σύνθετη κατασκευή που επιτελεί διάφορες λειτουργίες ανόμοιες μεταξύ τους, διανέμοντας τις πιέσεις από τα φορτία επιβολής ή κυκλοφορίας, έτσι ώστε η καταπόνηση του εδάφους θεμελίωσης να μην υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι οδοστρώματος, ένας από αυτούς είναι τα πλακόστρωτα οδοστρώματα. Η αρχική τους εμφάνιση έγινε κατά τη διάρκεια της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας και η ανάπτυξή τους οδήγησε στον σχεδιασμό και την κατασκευή πλακόστρωτων οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος. Η ευρεία χρήση κυβόλιθων σκυροδέματος ξεκίνησε τη δεκαετία του ’80, λόγω της βιομηχανικής παραγωγής τσιμέντου υψηλής αντοχής και του γεγονότος ότι οι υπόψη κυβόλιθοι υπό ακραίες καιρικές συνθήκες είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί. Επιπλέον, το ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο τύπο πλακοστρώσεων αυξήθηκε, λόγω της παρουσίας πολλαπλών αρχιτεκτονικών δυνατοτήτων αλλά και της εύκολης συντήρησής τους. Γενικά, χρησιμοποιούνται συχνά για την κατασκευή πεζοδρομίων, ποδηλατοδρόμων, αστικών δρόμων, χώρων στάθμευσης, αλλά και για ειδικές εφαρμογές όπως σε λιμάνια.

Ωστόσο, ο σχεδιασμός τους είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος σε σχέση με τα παραδοσιακά οδοστρώματα, εξαιτίας των δομικών ασυνεχειών, δηλαδή των αρμών μεταξύ των κυβόλιθων. Για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους απαιτούνται αριθμητικές προσομοιώσεις με σημαντική υπολογιστική πολυπλοκότητα. Τα επιτρεπόμενα φορτία κυκλοφορίας και η αστοχία των οδοστρωμάτων με μπλοκ σκυροδέματος εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους, όπως το πάχος της υπόβασης, τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης, αλλά και το μοτίβο κατασκευής. Όλα τα παραπάνω πρέπει να εξετάζονται και να λαμβάνονται υπόψη πριν την έναρξη της κατασκευής του έργου. Εφόσον, λοιπόν, η εκτέλεση των εργασιών είναι σύμφωνη με τον σχεδιασμό και τις αντίστοιχες προδιαγραφές, το οδόστρωμα είναι ικανό να διατηρήσει την αποδοτικότητά του ακόμα και για μια εικοσαετία.

1.2 Στόχος διπλωματικής

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η παρουσίαση του σχεδιασμού και της κατασκευής των οδοστρωμάτων με κυβόλιθους

σκυροδέματος. Για την επίτευξη του στόχου πραγματοποιείται αφενός μια ενδελεχής αναζήτηση στη διεθνή βιβλιογραφία των χαρακτηριστικών και των παραμέτρων σχεδιασμού τους και αφετέρου μία προκαταρκτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητάς τους. Η υπόψη διερεύνηση περιλαμβάνει τη μελέτη κατασκευασμένης διατομής πλακόστρωτου οδοστρώματος που με βάση τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού της πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας με κριτήριο τις επιτρεπόμενες διελεύσεις τυπικού αξονικού φορτίου.

1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 9 κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου.

Στο **κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η εξέλιξη των οδοστρωμάτων και δίνεται περισσότερη έμφαση στην περιγραφή των οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος, κάνοντας αναφορά στην κατασκευαστική διατομή και στους τομείς εφαρμογής τους.

Στο **κεφάλαιο 3** αναφέρεται η παραγωγική διαδικασία των κυβόλιθων σκυροδέματος και συγκεκριμένα ο εξοπλισμός και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τα σχήματα και τα χρώματα που διατίθενται, αλλά και οι απαιτήσεις στις οποίες πρέπει να συμμορφώνονται.

Στο **κεφάλαιο 4** περιγράφονται τα στάδια κατασκευής των οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος, από το αρχικό, δηλαδή τον σχεδιασμό τους, μέχρι το τελικό, δηλαδή την πλήρωση των αρμών με άμμο, με την ολοκλήρωση του οποίου το έργο τίθενται σε λειτουργία.

Στο **κεφάλαιο 5** περιγράφεται η μηχανική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος, μέσω της παρουσίασης τριών ερευνών, μιας μελέτης ευαισθησίας, μιας ανάλυσης τάσης – παραμόρφωσης και μιας πρόβλεψης παραμόρφωσης.

Στο **κεφάλαιο 6** γίνεται μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής υπάρχοντος οδοστρώματος με κυβόλιθους σκυροδέματος και σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της διατομής του, υπολογίζεται η φέρουσα ικανότητά του αλλά και η επίδραση που θα έχει σε αυτήν η μεταβολή του πάχους της υπόβασης και της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης.

Στο **κεφάλαιο 7** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και γίνεται πρόταση περαιτέρω έρευνας.

Στο **κεφάλαιο 8** παρατίθενται το σύνολο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, στο **κεφάλαιο 9** δίνεται Παράρτημα με πίνακες τιμών από τη διεθνή βιβλιοραφία.

2. Ιστορική εξέλιξη οδοστρωμάτων

2.1 Πλακόστρωτα οδοστρώματα στην Αρχαία Ρώμη

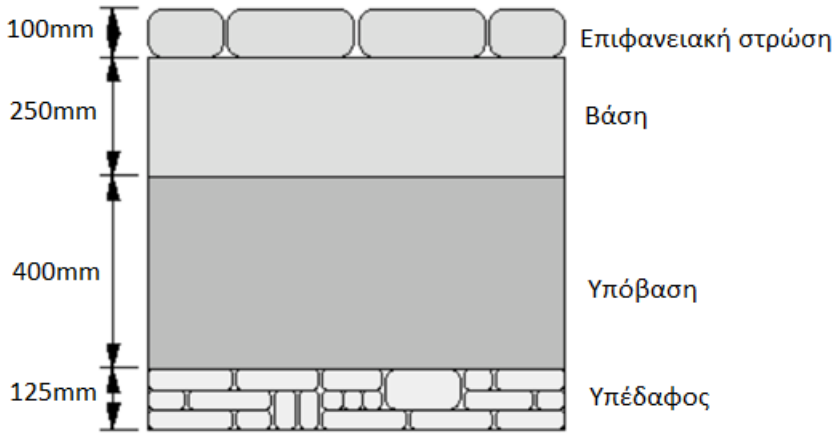
Η έννοια των οδοστρωμάτων χρονολογείται από την περίοδο της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι πέτρινοι όγκοι που αλληλοσυνδέονταν σφιχτά μεταξύ τους σχημάτιζαν το ανώτερο στρώμα των δρόμων, των οποίων τα κάτω στρώματα είχαν μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά που έχουμε σήμερα. Ειδικότερα, η πλειονότητα των Ρωμαϊκών δρόμων κατασκευάστηκε κατά τη διάρκεια της Ρεπουμπλικανικής περιόδου (509-31 π.Χ.), με τον παλαιότερο δρόμο, την Αππία Οδό (βλ. Εικόνα 2.1) να χρονολογείται το 312 π.Χ. Το ρωμαϊκό δίκτυο αποτελούνταν από περισσότερα από 87.000 km οδικού δικτύου, το οποίο είναι περίπου ίσο με το μήκος του διαπολιτειακού δικτύου των ΗΠΑ. Η υψηλή ποιότητα και η δομή των συγκεκριμένων οδοστρωμάτων έχουν επιτρέψει σε πολλούς ρωμαϊκούς δρόμους να επιβιώσουν μέχρι σήμερα.

Εικόνα 2.1: Η Αππία Οδός στη Ρώμη (Via Appia Antica & Catacombs of Rome)

Η δομή ενός τυπικού ρωμαϊκού δρόμου αποτελούνταν από τέσσερα στρώματα (από πάνω προς τα κάτω) (βλ. Εικόνα 2.2):

- Επιφανειακή στρώση (Summa Crusta). Λεία, πολυγωνικά μπλοκ τοποθετημένα στο υποκείμενο στρώμα.
- Βάση (Nucleus). Ένα είδος στρώσης βάσης που αποτελούνταν από χαλίκια και άμμο με ασβέστη και τσιμέντο.

- Υπόβαση (Rutus). Το τρίτο στρώμα αποτελούνταν από λιθοδομή και μικρότερες πέτρες, επίσης τοποθετημένες σε ασβεστοκονίαμα.
- Υπέδαφος (Statumen). Δύο ή τρεις στρώσεις επίπεδων λίθων τοποθετημένες σε ασβεστοκονίαμα.

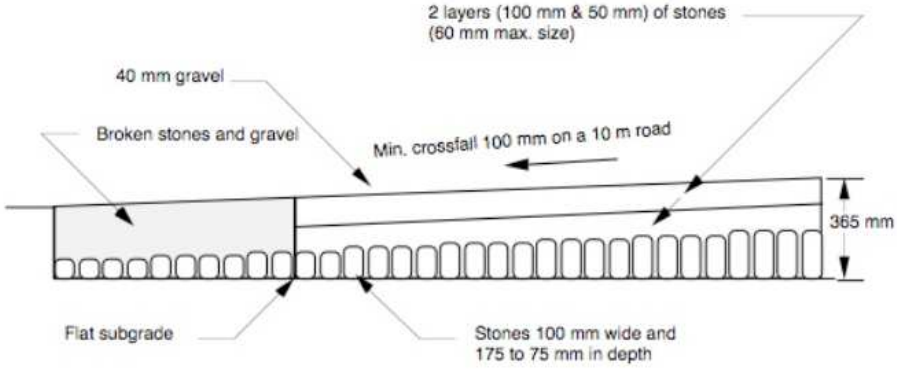


Εικόνα 2.2: Δομή ρωμαϊκού οδοστρώματος

Όπως φαίνεται, τα ρωμαϊκά οδοστρώματα ήταν σχετικά παχιά, της τάξεως των 0.9 m και η κατασκευή τους δεν ήταν οικονομική. Κατ' αντιστοιχία εκτιμήσεις κόστους της Αππίας Οδού στην Ιταλία είναι περίπου ίσες με 2.000.000 δολάρια ανά χιλιόμετρο δρόμου (Pavement History).

2.2 Οδοστρώματα Telford

Ο Thomas Telford (γεννημένος το 1757) συντελώντας στην εξέλιξη των οδοστρωμάτων, προσπάθησε, όπου ήταν δυνατόν, να κατασκευάσει δρόμους σε σχετικά επίπεδες επιφάνειες (με κλίση όχι περισσότερο από 1:30) προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των αλόγων που απαιτούνταν για τη μεταφορά του φορτίου. Το οδόστρωμα είχε πάχος περίπου 350 mm έως 450 mm και χωριζόταν σε 3 στρώσεις. Το κάτω στρώμα αποτελούνταν από μεγάλες πέτρες πλάτους 100 mm και ύψους από 75 mm έως 180 mm. Αυτή η στρώση είναι που ξεχώριζε τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων Telford. Το από πάνω στρώμα αποτελούνταν από δύο στρώσεις λίθων μέγιστου μεγέθους 65 mm (συνολικού πάχους περίπου 150 έως 250 mm), ακολουθούμενες από μια επιφανειακή (φθαρμένη) στρώση χαλικιού πάχους περίπου 40 mm (βλ. Εικόνα 2.3).

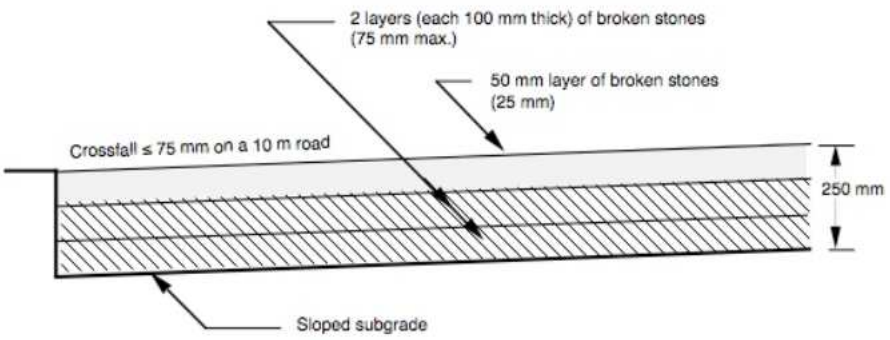


Εικόνα 2.3: Τυπικό οδόστρωμα Telford (Pavement History)

Αξίζει να σημειωθεί ότι μία τυπική διατομή οδοστρώματος Telford ήταν ικανή να αντέξει φορτίο της τάξεως των 88 N/mm.

2.3 Οδοστρώματα Macadam

Τα οδοστρώματα Macadam εισήγαγαν τη χρήση των γωνιακών αδρανών. Στις αρχές του 1800, ο John Macadam (γεννημένος το 1756) παρατήρησε ότι οι περισσότεροι από τους πλακόστρωτους δρόμους στο Ηνωμένο Βασίλειο αποτελούνταν από στρογγυλεμένα χαλίκια. Επίσης, γνώριζε ότι τα γωνιακά αδρανή πάνω από ένα καλά συμπαγές υπέδαφος θα έχουν σημαντικά υψηλότερες επιδόσεις. Χρησιμοποίησε μια επικλινή επιφάνεια υπεδάφους ώστε να βελτιώσει την αποστράγγιση (σε αντίθεση με τον Telford που χρησιμοποίησε μια επίπεδη επιφάνεια υπεδάφους), στην οποία τοποθέτησε γωνιακά αδρανή (σπασμένα στο χέρι, με μέγιστο μέγεθος 75 mm) σε δύο στρώσεις με συνολικό πάχος περίπου 200 mm. Πάνω από αυτή τη στρώση, τοποθετήθηκε η επιφανειακή στρώση, πάχους περίπου 50 mm (με μέγιστο μέγεθος αδρανών περίπου 25 mm). Ο λόγος που ο Macadam χρησιμοποίησε αδρανή μέγιστου μεγέθους 25 mm, ήταν γιατί ήθελε να παρέχει μια "ομαλή" πορεία στους τροχούς των βαγονιών. Έτσι, το συνολικό βάθος του οδοστρώματος Macadam ήταν περίπου 250 mm (βλ. Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: Τυπικό οδόστρωμα Macadam (Pavement History)

Τέλος, το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο για αυτό το είδος σχεδιασμού εκτιμήθηκε ότι ήταν 158 N/mm.

2.4 Ασφαλτικά οδοστρώματα

Έως τα τέλη του 1700, για την κατασκευή των οδοστρωμάτων δεν χρησιμοποιούνταν κάποιο συνδετικό υλικό, αλλά συνήθως στηρίζονταν σε αδρανή για την παροχή συνοχής. Εξαίρεση αποτελούν οι Ρωμαϊκοί δρόμοι, στους οποίους χρησιμοποιούνταν ασβεστοκονιάματα. Ασφαλτικά συνδετικά υλικά και επιφανειακά στρώματα άρχισαν να εμφανίζονται στις αρχές του 1800.

<u>Οδοστρώματα Macadam με άσφαλτο</u>

Το πρώτο οδόστρωμα Macadam με άσφαλτο (πίσσα) τοποθετήθηκε έξω από το Nottingham (Lincoln Road) το 1848. Εκείνη την εποχή, τα οδοστρώματα του συγκεκριμένου τύπου θεωρούνταν κατάλληλα μόνο για δρόμους με χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο. Η λιθανθρακοπίσσα, ως συνδετικό υλικό, ήταν διαθέσιμη στο Ηνωμένο Βασίλειο, περίπου από το 1800, ως υπόλειμμα από την καύση άνθρακα και φυσικού αερίου. Ενδεχομένως, αυτή να ήταν μία από τις πρώτες προσπάθειες για ανακύκλωση υλικών αποβλήτων σε ένα οδόστρωμα.

Λίγο μετά το έργο στο Nottingham, κατασκευάστηκαν οδοστρώματα Macadam με άσφαλτο στο Παρίσι (1854) και το Knoxville του Tennessee (1866). Το 1871 στην Ουάσιγκτον, χρησιμοποιήθηκε εκτενώς ένα "σκυρόδεμα πίσσας". Το θειικό οξύ χρησιμοποιήθηκε ως μέσο σκλήρυνσης και άλλα υλικά όπως το πριονίδι, η τέφρα, κλπ. συμπεριλήφθηκαν μέσα στο μείγμα. Εντός μιας επταετίας, κατασκευάστηκαν 630.000 m^2, ωστόσο λόγω της έλλειψης προσοχής κατά τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε πίσσα, οι περισσότεροι από αυτούς απέτυχαν μέσα σε λίγα χρόνια. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να απαξιωθεί η πίσσα, ενισχύοντας έτσι τη

βιομηχανία της ασφάλτου. Ωστόσο, ορισμένα από αυτά τα οδοστρώματα, στην Ουάσιγκτον, επέζησαν πολύ περισσότερο, σχεδόν 30 χρόνια. Σε αυτά τα μείγματα, η πίσσα αποτελούσε το 6% του συνολικού βάρους (κενά αέρος της τάξης του 17%). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν αδρανή, με το 20% να διέρχεται από το κόσκινο No.10 και τέλος η επιφανειακή στρώση είχε πάχος 50 mm.

Οδοστρώματα "φύλλου" ασφάλτου

Τα οδοστρώματα "φύλλου" ασφάλτου έγιναν γνωστά στα μέσα του 1800 μ.Χ., με το πρώτο να κατασκευάζεται στο Παρίσι το 1858. Στις ΗΠΑ εμφανίστηκε, αρχικά, στο Newark του New Jersey το 1870. Το σύστημα αυτού του οδοστρώματος αποτελούνταν από (Baker, 1903):

- Μια επιφανειακή στρώση πάχους 40 με 50 mm, που αποτελούνταν από ασφαλτικό τσιμέντο και άμμο.
- Μια συνδετική στρώση πάχους 40 mm, που αποτελούνταν από σπασμένη πέτρα και ασφαλτικό σκυρόδεμα.
- Μια στρώση βάσης υδραυλικού σκυροδέματος ή μπάζα οδοστρωμάτων (παλιά μπλοκ γρανίτη, τούβλα, κλπ.). Γενικά, το στρώμα σκυροδέματος είχε πάχος 100 mm για "ελαφριά" κυκλοφορία και 150 mm για "βαριά" κυκλοφορία.

Ασφαλτικά οδοστρώματα

Το 1901 και 1903, ο Frederick J. Warren έκδωσε διπλώματα ευρεσιτεχνίας για τα πρώτα υλικά οδοστρωσίας θερμών ασφαλτομιγμάτων. Ένα τυπικό μίγμα περιείχε 6% ασφαλτικό τσιμέντο και διαβαθμισμένα αδρανή σε αναλογία για χαμηλά κενά αέρος. Το μέγιστο μέγεθος των αδρανών ήταν 75 mm. Η ιδέα ήταν να παραχθεί ένα μίγμα που θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει ένα πιο ρευστό συνδετικό υλικό από αυτό που είχε χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή "φύλλου" ασφάλτου. Αυτό το υλικό έγινε γνωστό ως "Bitulithic".

Το 1910 στο Topeka του Kansas, μια δικαστική απόφαση δήλωσε ότι τα μίγματα ασφαλτικού σκυροδέματος που περιέχουν αδρανή μέγιστου μεγέθους 12,5 mm δεν παραβιάζουν το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του Warren (Steele, 1986). Έτσι, στη συνέχεια τα ασφαλτομίγματα προσανατολίστηκαν προς τα αδρανή με μικρότερη μέγιστη διάσταση.

Το 1910, ένας συνταξιούχος υπάλληλος της εταιρείας Warren Brothers, ο Edwin C. Wallace, εφηύρε το Warrenite–Bitulithic. Αυτό αποτελούνταν από ένα στρώμα

πάχους 25 mm “ λεπτόκοκκου ορυκτού με επικάλυψη ασφάλτου κυλινδρωμένο σε ένα χαμηλότερο στρώμα μεγάλων και μικρών λίθων, σκόνης από πέτρα και άσφαλτο”. Ουσιαστικά ήταν μία επιφανειακή στρώση “φύλλου” ασφάλτου πάνω σε ζεστά, μη συμπυκνωμένα ασφαλτικά. Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος ήταν ότι τα μεγάλα αδρανή δεν είχαν εκτεθεί άμεσα σε βαρέα οχήματα, γεγονός που θα μπορούσε να δημιουργήσει ρωγμές με την προσθήκη της λεπτής επιφανειακής στρώσης και να οδηγήσει σε υποβάθμιση του μίγματος. Μέχρι το 1920, τα πρωτότυπα διπλώματα ευρεσιτεχνίας του Warren είχαν λήξει στις ΗΠΑ.

2.5 Οδοστρώματα από σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland

Στις αρχές του 1900 μ.Χ., το τσιμέντο κατηγοριοποιήθηκε σε “φυσικό” και “τεχνητό”. Το φυσικό τσιμέντο κατασκευαζόταν απευθείας από συγκεκριμένο πέτρωμα. Το τεχνητό τσιμέντο κατασκευάστηκε από αναλογικά συστατικά και έγινε γνωστό ως “Portland”. Το πρώτο τσιμέντο Portland παρήχθη στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1824 και στις ΗΠΑ το 1865.

Αρχικά, το τσιμέντο Portland χρησιμοποιήθηκε όχι ως επιφανειακή στρώση, αλλά ως άκαμπτη βάση για την στήριξη ξύλινων και πέτρινων μπλοκ, τούβλων, κλπ. Το πρώτο οδόστρωμα από τσιμέντο Portland (Portland Cement Concrete – PCC) κατασκευάστηκε το 1891 στο Bellefontaine του Οχάιο και είχε πλάτος 3 m και μήκος 67.1 m.

Μέχρι τη δεκαετία του 1930, πολλά χαρακτηριστικά σχεδιασμού των οδοστρωμάτων PCC άρχισαν να εξελίσσονται. Για παράδειγμα, προσδιορίστηκε το τυπικό πάχος πλάκας στα 200 mm και έγινε σαφές ότι οι διαμήκεις και εγκάρσιοι αρμοί πρέπει να χρησιμοποιούνται ανά 3 έως 3.7 m (Pavement History).

2.6 Οδοστρώματα με κυβόλιθους σκυροδέματος

2.6.1 Η εξέλιξη των οδοστρωμάτων με μπλοκ σκυροδέματος

Μέχρι τον Α’ Παγκόσμιο Πόλεμο (1914 – 1918) για την επίστρωση των δρόμων χρησιμοποιούνταν πέτρινα μπλοκ, τούβλα, κροκάλες και σύνθετες μονάδες ξύλου και πίσσας. Έπειτα, αυτές οι πλακοστρώσεις εξαφανίστηκαν σε μεγάλο βαθμό, λόγω του αυξημένου κατασκευαστικού κόστους, των απαιτήσεων ομαλότητας των επιφανειών και της διαθεσιμότητας πιο οικολογικών, εύκολων στην κατασκευή, εναλλακτικών λύσεων. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950, στη μεταπολεμική Ολλανδία υπήρξε σημαντική αύξηση του πληθυσμού. Αυτό σε συνδυασμό με τις

ανάγκες ανοικοδόμησης των καταστροφών του πολέμου, οδήγησε στην κατασκευή νέων κατοικιών. Επακόλουθο ήταν να υπάρξει έλλειψη σε οπτόπλινθους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μπλοκ σκυροδέματος, για την αντικατάστασή τους.

Τα μπλοκ κατασκευάστηκαν, αρχικά, έχοντας τις ίδιες ορθογωνικές διαστάσεις με τους οπτόπλινθους και σχεδόν το ίδιο κόστος με αυτούς. Αργότερα, λόγω της αυξανόμενης μηχανοποίησης και της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας στη βιομηχανία κατασκευής τους, το κόστος παραγωγής μειώθηκε στο 40% του κόστους παραγωγής οπτόπλινθων.

Από τη δεκαετία του 1950 και έπειτα, υπήρξε μια σταθερή εξέλιξη του σχήματος των μπλοκ. Συγκεκριμένα, το σχήμα τους άρχισε να βελτιώνεται, έτσι ώστε κάθε μονάδα να μπορεί να "κλειδώνει" στις γειτονικές της, κάνοντας πιο πρακτική την τοποθέτησή και βελτιώνοντας την απόδοσή τους.

Η εμφάνιση πολλών μορφών μπλοκ σκυροδέματος και η μείωση του κόστους παραγωγής τους οδήγησε στην ανάπτυξη της αγοράς πλακόστρωσης και στη Γερμανία. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980, είχε επιτευχθεί ετήσια παραγωγή άνω των 45 εκατομμυρίων τετραγωνικών μέτρων. Παρόμοιες αυξήσεις στη χρήση κυβόλιθων σημειώθηκαν σε πολλές άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Το 1984, η κατά κεφαλήν χρήση μπλοκ σκυροδέματος στην Ευρώπη, κυμαινόταν μεταξύ 0.5 και 1.4 τετραγωνικών μέτρων ετησίως. Τέλος, γρήγορα επήλθε η ανάπτυξη του συγκεκριμένου τύπου πλακόστρωσης και στον υπόλοιπο κόσμο (History Of Paving, 2021).

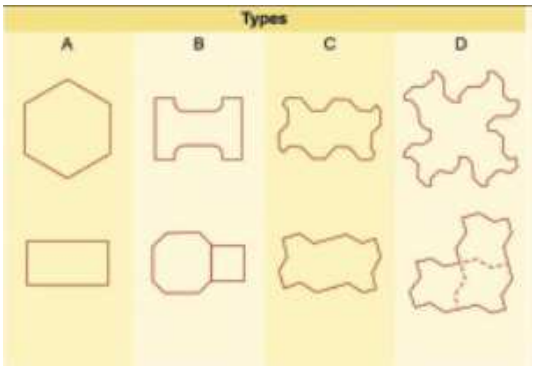
2.6.2 Κατασκευαστική διατομή

Κυβόλιθοι σκυροδέματος

Το πλακόστρωτο οδόστρωμα αποτελείται από μπλοκ σκυροδέματος (κυβόλιθοι σκυροδέματος), τεμαχισμένα με ακρίβεια, τα οποία συνδέονται στενά μεταξύ τους, δημιουργώντας μια επιφάνεια οδοστρώματος, γνωστή ως «concrete block pavement» (CBP). Τα μπλοκ κατασκευάζονται σε διάφορα σχήματα. Υπάρχουν 4 βασικά σχήματα κυβόλιθων (βλ. Εικόνα 2.5) , που αντιστοιχούν στους 4 τύπους μπλοκ:

- Τύπος Α: Κυβόλιθοι με επίπεδες κάθετες επιφάνειες, οι οποίοι δεν αλληλοσυνδέονται στην επίστρωσή τους, σε οποιοδήποτε μοτίβο.
- Τύπος Β: Κυβόλιθοι με εναλλασσόμενες επίπεδες και καμπύλες ή κυματοειδείς κάθετες επιφάνειες, οι οποίοι αλληλοσυνδέονται κατά μήκος της καμπύλης/κυματοειδούς όψης στην επίστρωσή τους σε οποιοδήποτε μοτίβο.

- Τύπος C: Κυβόλιθοι με όλες τις επιφάνειες καμπύλες ή κυματοειδείς, οι οποίοι κλειδώνουν μεταξύ τους κατά μήκος όλων των όψεων στην επίστρωσή τους σε οποιοδήποτε μοτίβο.
- Τύπος D: Κυβόλιθοι σε σχήμα «L» και «X», που έχουν όλες τις επιφάνειες καμπύλες ή κυματοειδείς, οι οποίοι κλειδώνουν μεταξύ τους κατά μήκος όλων των όψεων στην επίστρωσή τους σε οποιοδήποτε μοτίβο.

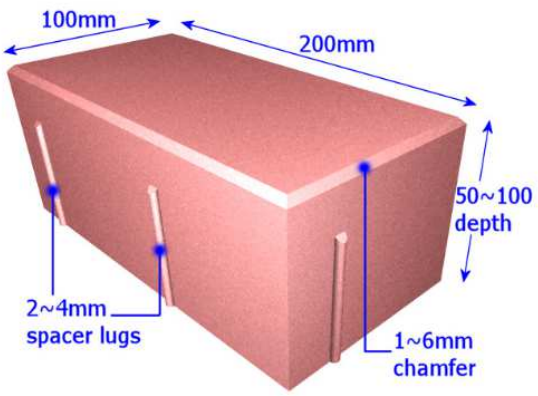


Εικόνα 2.5: Βασικοί τύποι κυβόλιθων (Paver Blocks - Types, Shapes, Uses, and Benefits, 2020)

Τα οδοστρώματα στα οποία χρησιμοποιούνται μη αλληλοσυνδεόμενα τεμάχια ("non–interlocking blocks") χαρακτηρίζονται ως "Concrete Block Pavements" (CBP) ή ως "Non – interlocking CBP", ενώ σε εκείνα που χρησιμοποιούνται μερικώς, πλήρως ή πολλαπλώς αλληλοσυνδεόμενα μπλοκ χαρακτηρίζονται ως "Interlocking Concrete Block Pavements" (ICBP).

Οι κυβόλιθοι διατίθενται σε μια σειρά πάχους από 40 mm έως 100 mm, ενώ σε εξαιρετικές περιπτώσεις εφαρμόζονται κυβόλιθοι πάχους 120 mm. Σε έργα οδοποιίας και γενικότερα όπου αναμένεται κανονική διέλευση οχημάτων χρησιμοποιούνται μπλοκ των 80 mm. Μονάδες πάχους 100 mm ενδείκνυνται για πεζοδρόμια βαρέως τύπου, τα οποία συναντώνται συνήθως σε ναυπηγεία και λιμάνια. Αξιοσημείωτο είναι πως πλέον αποφεύγεται η χρήση κυβόλιθων πάχους 40 mm, διότι, είναι ιδιαίτερα επιρρεπή στην θραύση κατά τη φάση της συμπίεσης.

Τα περισσότερα ορθογώνια μπλοκ είναι διαμορφωμένα σε συγκεκριμένο μέγεθος, 100 mm x 200 mm x 50 – 100 mm (βλ. Εικόνα 2.6), με ακριβώς 50 μπλοκ ανά τετραγωνικό μέτρο.



Εικόνα 2.6: Τυπικό μπλοκ σκυροδέματος (Block Paving - An Introduction to Block and Brick Paving)

Τέλος, αξιοσημείωτο είναι πως το χρώμα των κυβόλιθων ποικίλει και επιτυγχάνεται, συνήθως, με κάποιας μορφής μεταλλικό οξείδιο.

Άμμος κλινοστρωμνής και αρμών

Οι κυβόλιθοι τοποθετούνται πάνω σε ένα στρώμα άμμου, το οποίο συμπυκνώνεται με τη χρήση δονητικής πλάκας συμπίεσης. Εάν δεν δοθεί η δέουσα προσοχή στην ποιότητα της άμμου και εάν δεν εξασφαλιστεί ομοιομορφία στο πάχος του στρώματος κλινοστρωμνής, ενδέχεται να προκύψουν σοβαρές ανωμαλίες στο προφίλ της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Τα κενά μεταξύ των παρακείμενων κυβόλιθων (πλάτους 2 έως 5 mm) γεμίζουν επίσης με άμμο, γνωστή και ως «άμμος πλήρωσης», η οποία είναι σχετικά λεπτότερη από την άμμο κλινοστρωμνής και όσο το δυνατόν πιο στεγνή. Βασική απαίτηση της δομής της άμμου είναι ο περιορισμός των λεπτών σωματιδίων, αργίλου και ιλύος, στο 10%, διότι καθιστούν δύσκολη την πλήρωση των αρμών. Επιπλέον, δεν συνίσταται η χρήση τσιμέντου, ως υλικό πλήρωσης, λόγω της δυσχρηστίας του αλλά και της δυσμενής επιρροής του στην ευκαμψία του οδοστρώματος (Maskey, Sashin).

Βάση και υπόβαση

Τα υλικά βάσης και υπόβασης έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση του οδοστρώματος και οι απαιτήσεις τους εξαρτώνται από τα αναμενόμενα φορτία κυκλοφορίας και την αντοχή του υπεδάφους. Ειδικότερα, η υπόβαση αποτελεί την κύρια φέρουσα στρώση του οδοστρώματος. Και οι δύο έχουν σχεδιαστεί για να κατανείμουν το επιφανειακό φορτίο στη στρώση έδρασης και εφόσον τα υλικά τους

είναι σωστά διαβαθμισμένα επιτυγχάνεται σωστή αποστράγγιση και αποτρέπεται η καθίζηση και η δημιουργία αυλάκωσης.

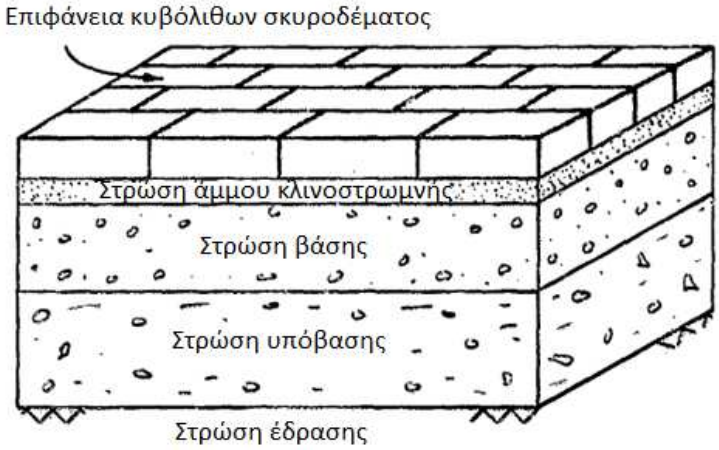
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται, συνήθως, για τη βάση είναι τα εξής:

- Αδέσμευτα θρυμματισμένα πετρώματα
- Υδατοδιαλυτό μακαντάμ
- Υγρό μίγμα μακαντάμ
- Τσιμεντοειδή θρυμματισμένα πετρώματα
- Λεπτό τσιμεντένιο σκυρόδεμα

Η ποιότητα των υλικών υπόβασης είναι κατώτερη από αυτή των υλικών της βάσης και περιλαμβάνει, συνήθως, τα εξής:

- Φυσικά χαλίκια
- Άμμο και χαλίκια επεξεργασμένα με τσιμέντο
- Σταθεροποιημένα υλικά

Η αναλυτική δομή της πλακόστρωσης με κυβόλιθους σκυροδέματος φαίνεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Διατομή οδοστρώματος με κυβόλιθους σκυροδέματος (CBP)

Η επιλογή των κατάλληλων υλικών εξαρτάται από παράγοντες που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα, την οικονομία αλλά και περιβαλλοντικούς παράγοντες (Rollings, 1983).

2.6.3 Τομείς εφαρμογής

Η πλακόστρωση με κυβόλιθους έχει αποτελέσει σημαντικό τομέα ανάπτυξης τόσο στην ευρωπαϊκή όσο και στην παγκόσμια βιομηχανία πλακόστρωσης, τα τελευταία χρόνια. Οι τεχνικές μαζικής παραγωγής έχουν μειώσει τις τιμές των κατασκευασμένων μπλοκ σε λογικά επίπεδα και έχουν καταστήσει αυτόν τον τύπο πλακόστρωσης ιδανικό για τα περισσότερα έργα.

Ωστόσο, όλα τα έργα πλακόστρωσης δεν είναι τα ίδια, αλλά εξαρτώνται από τα φορτία και τις πιέσεις που επιβάλλονται. Συνεπώς, τα οδοστρώματα κατασκευάζονται με διαφορετικά πρότυπα και αυτό συχνά απαιτεί διαφορετικά υλικά ή πάχη των στρωμάτων. Ανάλογα με το είδος της κυκλοφορίας, υπάρχουν τέσσερις τομείς που εφαρμόζονται τα οδοστρώματα με κυβόλιθους σκυροδέματος.

1. **<u>Περιοχές χωρίς κυκλοφορία:</u>**

   Κτιριακές εγκαταστάσεις, μονοπάτια, εμπορικά κέντρα, πεζόδρομοι, μνημεία, δημόσιοι κήποι/πάρκα, σταθμοί λεωφορείων, σιδηροδρομική πλατφόρμα κλπ.

2. **<u>Περιοχές με μικρή κυκλοφορία:</u>**

   Χώροι στάθμευσης αυτοκινήτων, δρόμοι γραφείων, δρόμοι οικιστικών αποικιών, αγροτικοί δρόμοι, αγροικίες κλπ.

3. **<u>Περιοχές με μεσαία κυκλοφορία:</u>**

   Λεωφόροι, επαρχιακοί και αστικοί δρόμοι, πρατήρια καυσίμων κλπ.

4. **<u>Περιοχές με βαριά/πολύ βαριά κυκλοφορία:</u>**

   Τερματικοί εμπορευματοκιβωτίων/λεωφορείων, λιμάνια/ναυπηγεία, περιοχές εξόρυξης, δρόμοι σε βιομηχανικά συγκροτήματα, δάπεδα/οδοστρώματα εργοστασίων κλπ.

3. Παραγωγή κυβόλιθων σκυροδέματος

3.1 Εξοπλισμός

Η χρήση μηχανημάτων κατασκευής κυβόλιθων σκυροδέματος έχει αυξηθεί με την πάροδο των ετών. Με τον εκσυγχρονισμό τους καινοτομούν, έτσι ώστε να μπορούν να μειώσουν την απαιτούμενη ενέργεια λειτουργίας τους. Παράλληλα, η αποτελεσματική και γρήγορη γραμμή παραγωγής αυτών των μηχανημάτων συμβάλλει στη μείωση του κόστους ανά μονάδα μπλοκ.

Υπάρχουν δύο τύποι εξοπλισμού για την κατασκευή μπλοκ σκυροδέματος, ιδανικών για πλακοστρώσεις: η μηχανή κατασκευής κυβόλιθων από σκυρόδεμα (Concrete Paver Block Making Machine, Εικόνα 3.1) και η πολυστρωματική μηχανή (Multilayer Machine, Εικόνα 3.2).

<u>Μηχανή κατασκευής κυβόλιθων από σκυρόδεμα</u>

Χρησιμοποιείται στον κατασκευαστικό κλάδο για την παραγωγή μπλοκ σκυροδέματος, ιδανικά για οδοστρώματα υψηλής ποιότητας. Αυτά τα μηχανήματα προσφέρουν διάφορα οφέλη σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής μπλοκ. Συγκεκριμένα, είναι ικανά να κατασκευάζουν εκατοντάδες κυβόλιθους σκυροδέματος καθημερινά, χωρίς καμία πιθανότητα σφάλματος, γεγονός που αυξάνει την παραγωγική ικανότητα και την έγκαιρη ολοκλήρωση της κάθε παραγγελίας.

Κατά τη διαδικασία παραγωγής, σκληρό άκαμπτο σκυρόδεμα ωθείται μέσα σε καλούπια υπό πίεση και δονείται έντονα, σε υψηλή συχνότητα. Το ολοκληρωμένο μπλοκ αφήνεται στη συνέχεια εκτός μηχανήματος, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αρχική σκλήρυνση. Έπειτα, οι κυβόλιθοι τοποθετούνται σε παλέτες και αποθηκεύονται, καθώς η σκλήρυνση συνεχίζεται.

Υπάρχουν δύο τύποι της μηχανής κατασκευής κυβόλιθων από σκυρόδεμα: οι χειροκίνητοι κα οι ημιαυτόματοι. Τέλος, οι κυβόλιθοι που μπορούν να παραχθούν είναι μπλοκ οδοστρώματος, συμπαγή μπλοκ και κοίλα μπλοκ.

Εικόνα 3.1: Brickwell BW 8004 BLOCK MACHINE (Types of Concrete Block Making Machine Models)

Πολυστρωματική μηχανή

Οι πολυστρωματικές μηχανές είναι ειδικά σχεδιασμένες για μαζική παραγωγή μπλοκ σκυροδέματος. Κατά τη διαδικασία κατασκευής, όπως και στον απλό τύπο μηχανών, στεγνό άκαμπτο σκυρόδεμα πιέζεται μέσα σε καλούπια και υπόκειται σε έντονο κραδασμό. Κάθε φορά χυτεύεται μια ολόκληρη σειρά μπλοκ, που επαρκεί για τη μία στρώση της παλέτας που αποστέλλεται. Αφού αφαιρεθεί το καλούπι, πάνω από τα συγκεκριμένα μπλοκ, απλώνεται μια λεπτή στρώση άμμου, και στη συνέχεια μία άλλη στρώση μπλοκ χυτεύεται απευθείας στην καλυμμένη με άμμο, κάτω στρώση. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου ολοκληρωθεί η χύτευση μιας παλέτας 8 με 10 στρώσεων κυβόλιθων. Εάν χρησιμοποιείται μια σταθερή πολυστρωματική μηχανή (stationary multilayer machine), η παλέτα με τους κυβόλιθους απομακρύνεται και ακολουθεί η διαδικασία της χύτευσης μπλοκ σε μια νέα παλέτα. Σε αντίθετη περίπτωση (traveling multilayer machine), η παλέτα παραμένει στη θέση της και το μηχάνημα κινούμενο σε ράγες πραγματοποιεί τη διαδικασία της χύτευσης των μπλοκ της διπλανής παλέτας. Τέλος, η σκλήρυνση των κυβόλιθων γίνεται, συνήθως, με τον αέρα και ενδέχεται να καλυφθούν με πολυαιθυλένιο προκειμένου να αποτραπεί το στέγνωμά τους κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας (Rollings, 1983).

Εικόνα 3.2: ELKOBLOCK-36M multilayer block making machine (Elkoblock-36M Multilayer Block Making Machine)

Η απόδοση των δύο μηχανών είναι εξίσου καλή και η διαφοροποίησή τους εντοπίζεται, κυρίως, στο μέγεθος της παραγόμενης ποσότητας.

3.2 Αναλογία μίγματος σκυροδέματος

Το μίγμα σκυροδέματος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή κυβόλιθων οδοστρωμάτων αποτελείται από τσιμέντο, νερό και αδρανή (άμμος, χαλίκι) (βλ. Εικόνα 3.3). Οι ακριβείς αναλογίες του κάθε μίγματος θα εξαρτηθούν από τη διαθεσιμότητα των υλικών, τις δυνατότητες των μηχανών και την επιθυμητή υφή και ποιότητα του τελικού κυβόλιθου σκυροδέματος.

Εικόνα 3.3: Συστατικά κυβόλιθων σκυροδέματος

Τσιμέντο

Το τσιμέντο καταλαμβάνει περίπου το 14% του μίγματος και ο πιο συνηθισμένος τύπος που χρησιμοποιείται, είναι ο Τύπος 1 (τσιμέντο Portland).

Χαρακτηριστικό του είναι πως όταν αναμιγνύεται με νερό γίνεται πιο σκληρό και σχηματίζεται μια πάστα που συνδέεται με τα τυχόν αδρανή που υπάρχουν. Με την προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας τσιμέντου εξασφαλίζεται καλύτερη προσκόλληση, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως το μίγμα γίνεται ισχυρότερο.

Αδρανή

Η αναλογία των αδρανών είναι 70% *άμμος* και 30% *χαλίκια*.

Η *άμμος* συντελεί στην αποτροπή σχηματισμού θυλάκων αέρα, στο μίγμα, διότι συμπληρώνει τα κενά μεταξύ των χαλικιών. Οι θύλακες υπονομεύουν σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του σκυροδέματος, αλλά καθώς η άμμος συνδέεται με το τσιμέντο και το νερό εξασφαλίζεται συνοχή. Η άμμος, επιπλέον, παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε θλίψη, κάνοντας το τελικό μίγμα ιδιαίτερα ανθεκτικό.

Τα *χαλίκια*, επίσης επηρεάζουν άμεσα τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, σχηματίζουν ένα ανθεκτικό πλαίσιο για το μίγμα και εργασιμότητά του διαφοροποιείται ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα τους.

3.3 Επιλογή χρώματος κυβόλιθων

3.3.1 Βασικά είδη

Το πιο εμφανές χαρακτηριστικό της πλακόστρωσης από κυβόλιθους είναι το χρώμα. Δεν υπάρχει συγκεκριμένος οδηγός για την επιλογή του καταλληλότερου συνδυασμού χρωμάτων για κάθε κατηγορία έργου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τελική απόφαση είναι η επίδραση του περιβάλλοντος και του περιβάλλοντα χώρου, η αλληλεπίδραση φωτός και σκιάς και, το πιο σημαντικό, το προσωπικό γούστο του σχεδιαστή/κατασκευή. Η πλακόστρωση χωρίζεται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το χρώμα των κυβόλιθων:

- **Πλακόστρωση με μονόχρωμους κυβόλιθους**

  Το οδόστρωμα αποτελείται από μπλοκ ενιαίου, ομοιόμορφου χρώματος (βλ. Εικόνα 3.4).

Εικόνα 3.4: Πλακόστρωση με μονόχρωμους κυβόλιθους (Block Paving - Choosing a Block or Brick Paver)

- **<u>Πλακόστρωση με πολύχρωμους κυβόλιθους</u>**

Το οδόστρωμα αποτελείται από μπλοκ με περισσότερα από ένα χρώματα. Μπορεί να είναι μείγμα δύο, τριών ή περισσότερων χρωμάτων, σε ίση αναλογία ή διαφορετικών ποσοτήτων (βλ. Εικόνα 3.5).

Εικόνα 3.5: Πλακόστρωση με πολύχρωμους κυβόλιθους (Block Paving - Choosing a Block or Brick Paver)

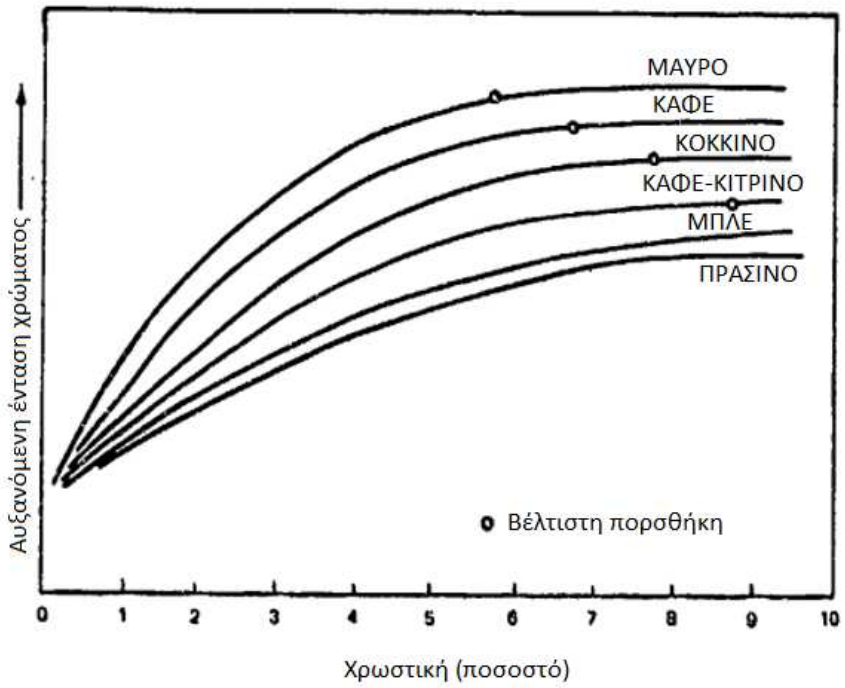
Σημαντικό είναι κατά την επιλογή, να ληφθεί υπόψη πως τα ανοιχτά χρώματα αντανακλούν το φως και κάνουν μια περιοχή να φαίνεται μεγαλύτερη, σε αντίθεση με τα σκούρα χρώματα που την κάνουν να φαίνεται μικρότερη και απορροφούν το φως.

3.3.2 Διαδικασία χρωματισμού και χαρακτηριστικά χρωστικών

Οι κυβόλιθοι σκυροδέματος χρωματίζονται με χρωστικές. Οι χρωστικές χρησιμοποιούνται για τον μόνιμο χρωματισμό του σκυροδέματος, δηλαδή για τη βαφή του με διαφορετικό χρώμα από το φυσικό χρώμα του τσιμέντου και των αδρανών.

Οι σκόνες χρωστικής είναι σημαντικά λεπτότερες από το τσιμέντο, επομένως, η αναλογία νερού προς χρωστική είναι πιθανό να είναι υψηλή. Οι διακυμάνσεις στην ποσότητα των χρωστικών εξαρτώνται από το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων. Η ζήτηση που έχει η κάθε χρωστική ουσία σε νερό, σε συνδυασμό με τον πρόσθετο ρυθμό που απαιτείται για την επίτευξη ικανοποιητικού κορεσμού και ανθεκτικότητας χρώματος, καθορίζει την επίδραση που έχει κάθε χρωστική στον σχεδιασμό του μίγματος κυβόλιθων. Οι χρωστικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για τον ολοκληρωμένο χρωματισμό του σκυροδέματος είναι είτε οργανικές είτε ανόργανες ενώσεις, γενικά αδιάλυτες στο νερό και αποτελούνται από πολύ μικρά σωματίδια, έτσι ώστε να κατανέμονται ομοιόμορφα μέσα στη μάζα του σκυροδέματος (Lee H.S., Lee J.Y. , Yu M.Y., 2003). Παρόλο που οι οργανικές χρωστικές παρέχουν εντυπωσιακούς, φωτεινούς τόνους χρωμάτων, παρουσιάζουν αλλοίωση στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος και επηρεάζονται εύκολα από τις καιρικές συνθήκες. Για τον χρωματισμό των κυβόλιθων σκυροδέματος, ιδανικών για πλακοστρώσεις, χρησιμοποιούνται συνθετικά ή φυσικά οξείδια σιδήρου, τα οποία προσδίδουν χρώματα ανθεκτικά στο χρόνο, όπως κόκκινο, κίτρινο, καφέ και γκρίζο.

Η ένταση των χρωμάτων των κυβόλιθων σκυροδέματος μπορεί να αυξηθεί, έως ένα σημείο, με την προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας χρωστικών. Από αυτό το σημείο και έπειτα, επιπλέον προσθήκη δεν έχει περαιτέρω επίδραση (βλ. Εικόνα 3.6). Η βέλτιστη περιεκτικότητα σε συνθετικές χρωστικές είναι, τις περισσότερες φορές, το 5% του βάρους του τσιμέντου, με μικρές διαφορές σε συγκεκριμένα χρώματα.



Εικόνα 3.6: Επίδραση ποσότητας χρωστικής στην ένταση του χρώματος

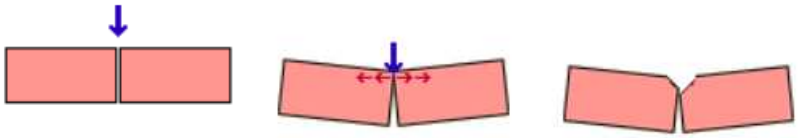
Οι χρωστικές ουσίες είναι αδρανείς και δεν επηρεάζουν με κάποιον τρόπο τις χημικές αντιδράσεις του σκυροδέματος. Εφόσον η αναλογία νερού – τσιμέντου, στο μίγμα σκυροδέματος, διατηρείται σταθερή, η προσθήκη χρωστικής ουσίας δεν θα επηρεάσει την τελική αντοχή του προϊόντος. Ωστόσο, η εργασιμότητα του μίγματος μπορεί να μειωθεί όταν η χρωστική προστεθεί σε σταθερή ποσότητα νερού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κατασκευαστικά προβλήματα, όπως προσκόλληση στα εξαρτήματα των μηχανών. Για την αποκατάσταση της εργασιμότητας, ενδεχομένως να χρειαστεί να προστεθεί επιπλέον νερό στο μίγμα, κάτι που μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της αντοχής του κυβόλιθου σκυροδέματος (Rollings, 1983).

3.4 Επιλογή σχήματος κυβόλιθων σκυροδέματος

Παρόλο που από τα ρωμαϊκά χρόνια ήταν διαδεδομένη η χρήση ορθογώνιων κυβόλιθων σκυροδέματος, με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της χρήσης και παραγωγής τους, πλέον, διατίθενται στην αγορά σε πολλά και διαφορετικά σχήματα. Μάλιστα, αξιοσημείωτο είναι πως τα διαμορφωμένα, αλληλοσυνδεόμενα μπλοκ σκυροδέματος (βλ. 2.6.2), λόγω του σχήματός τους, αντιστέκονται περισσότερο σε περιστροφικές κινήσεις και είναι ικανά να αντέξουν μεγαλύτερα φορτία. Ωστόσο, πιο διαδεδομένη είναι η χρήση των τυπικών ορθογώνιων κυβόλιθων, καθώς είναι

απλούστερη η κατασκευή, η παλετοποίηση και η αποστολή τους σε διάφορα μέρη ανά τον κόσμο.

Πολλές φορές χρησιμοποιούνται ορθογώνιοι κυβόλιθοι με λοξοτομημένες άκρες, επιλογή που βασίζεται σε μια αρχή της μηχανικής. Συγκεκριμένα, η γωνία (90°) των μπλοκ αποτελεί ένα αδύναμο σημείο της πλακόστρωση. Εάν δύο γειτονικοί κυβόλιθοι συμπιεστούν από φορτίο κεντραρισμένο στη διεπαφή τους, τότε η δύναμη βαραίνει τις δύο άνω γωνίες (βλ. Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Συμπίεση διεπαφής ορθογώνιων κυβόλιθων από επιβαλλόμενο φορτίο

Αυτή η πίεση που ασκείται στους κυβόλιθους δεν είναι, πλέον, μια εντελώς θλιπτική δύναμη, αλλά ένα μέρος της μετατρέπεται σε εφελκυσμό. Η θλιπτική αντοχή των κυβόλιθων σκυροδέματος είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά τους, γεγονός που επιτρέπει την καταπόνησή τους από αντίστοιχα φορτία. Ωστόσο, η ιδιαίτερα μικρή εφελκυστική αντοχή τους, μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία και θραύση της επιφάνειάς τους (βλ. Εικόνα 3.8).

Εικόνα 3.8: Καταστροφή κυβόλιθου σκυροδέματος λόγω εφελκυστικής δύναμης (Block Paving - Choosing a Block or Brick Paver)

Τέτοιου είδους προβλήματα μπορούν να αποφευχθούν με τους κυβόλιθους σκυροδέματος με λοξοτομημένες άκρες. Παρ' όλ' αυτά, η χρήση τους περιορίζεται σε περιοχές που είναι πιθανό να εντοπιστούν βαριά φορτία ή κυκλοφορία οχημάτων.

3.5 Απαιτήσεις και μέθοδοι δοκιμής/ Πρότυπο EN 1338

3.5.1 Γενικά

Το πρότυπο EN 1338 εγκρίθηκε από την CEN τον Οκτώβριο του 2002 και τέθηκε σε ισχύ στην Ελλάδα μέσω της αντίστοιχης προδιαγραφής του ΕΛΟΤ (EN 1338:2003, 2003). Το συγκεκριμένο πρότυπο αποσαφηνίζει τα υλικά, τις απαιτήσεις και τις μεθόδους ελέγχου που είναι αναγκαίες για την κατασκευή κυβόλιθων οδοστρωσίας από σκυρόδεμα.

Πριν την παράδοση ενός φορτίου κυβόλιθων, για να θεωρηθεί αποδεκτό, ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία ελέγχων. Η διαδικασία δειγματοληψίας και τα κριτήρια συμμόρφωσης για το κάθε φορτίο κατατάσσονται σε 2 περιπτώσεις:

- Περίπτωση I: Το προϊόν δεν έχει υποβληθεί σε εξέταση της συμμόρφωσης από τρίτους (π.χ. εξωτερικό ανεξάρτητο φορέα).
- Περίπτωση II: Το προϊόν έχει υποβληθεί σε εξέταση της συμμόρφωσης από τρίτους.

3.5.2 Έλεγχοι αποδοχής

Οι έλεγχοι αποδοχής που πρέπει να γίνουν στο δείγμα κυβόλιθων αφορούν τα εξής:

1) Εμφάνιση
2) Πάχος 2^{ης} στρώσης
3) Σχήμα και διαστάσεις
4) Χαρακτηριστική αντοχή σε εφελκυσμό από διάρρηξη
5) Φορτίο θραύσης
6) Αντοχή σε απότριψη
7) Αντίσταση σε πέδηση/ολίσθηση (μόνο όπου απαιτείται έλεγχος)
8) Αντοχή σε καιρικές συνθήκες

Οι μέθοδοι ελέγχου αναγράφονται στο πρότυπο σε μια σειρά από παραρτήματα. Στη συνέχεια παρατίθενται η συνοπτική παρουσίαση των ελέγχων και των αντίστοιχων απαιτήσεων (βλ. Πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1: Έλεγχοι αποδοχής κυβόλιθων

(EN 1338:2003, 2003)

Ιδιότητα	**Απαιτήσεις**	**Μέθοδος ελέγχου**	**Αριθμός δοκιμίων**		**Κριτήρια συμμόρφωσης**
			Περίπτωση I	Περίπτωση II [3]	
Εμφάνιση	Σύμφωνα με §5.4 προτύπου	Παράρτημα J	8 [1]	4 (16)	**Κανένας** κυβόλιθος δεν θα παρουσιάζει ρωγμές, μάδημα ή αποκόλληση
Πάχος 2ης στρώσης	Σύμφωνα με §5.1 προτύπου	C.6 [2]	8	4 (16)	**Ελάχιστο** πάχος 2ης στρώσης **4 mm**
Σχήμα και διαστάσεις	Σύμφωνα με §5.2 προτύπου	Παράρτημα C	8 [1]	4 (16)	Επιτρεπτές αποκλίσεις από τις δηλωμένες διαστάσεις: - Μήκος ±2mm - Πλάτος ±2mm - Πάχος ±3mm
Χαρακτηριστική Αντοχή σε εφελκυσμό από διάρρηξη	Σύμφωνα με §5.3.3 προτύπου	Παράρτημα F	8	4 (16)	Ο μέσος όρος της αντοχής δοκιμίων **≥3,6MPa** και **κανένα** δοκίμιο δεν θα έχει αντοχή < 2,9 MPa
Φορτίο θραύσης					≥250 N/mm μήκους διάρρηξης για όλα τα δοκίμια
Αντοχή σε απότριψη	Σύμφωνα με §5.3.4 προτύπου	Παράρτημα G ή H	3	3	**Παράρτημα G** Κατ. 1 : Δεν μετράται Κατ. 2: ≤ 23mm Κατ. 3: ≤ 20mm ή **Παράρτημα H** Κατ. 1 : Δεν μετράται Κατ. 2: ≤ 20000mm3 / 5000mm2 Κατ. 3: ≤ 18000mm3 / 5000mm2
Αντίσταση σε πέδηση / ολίσθηση (μόνο όπου απαιτείται έλεγχος)	Σύμφωνα με §5.3.5 προτύπου	Παράρτημα I	5	5	Θα δηλωθεί η ελάχιστη τιμή της μέτρησης.
Αντοχή σε καιρικές συνθήκες	Σύμφωνα με §5.3.2 προτύπου	Παράρτημα E ή Παράρτημα D	3		Κατ. 1: δεν μετράται Κατ.2: υδαταπορρόφηση ≤6% κβ Κατ. 3: Απώλεια μάζας MO ≤ 1,0 kg/m^2 και καμία μέτρηση > 1,5 kg/m^2

[1] Αυτοί οι κυβολιθοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω δοκιμές

[2] Το C.6 εφαρμόζεται μόνο σε κυβόλιθους με 2η στρώση

3) Οι αριθμοί σε παρένθεση είναι ο αριθμός των δοκιμίων που πρέπει να ληφθούν ως δείγμα στην περίπτωση που δεν πληρούνται οι προδιαγραφές, και να γίνουν νέοι έλεγχοι.

Για την καλύτερη απόδοση του οδοστρώματος, είναι σημαντικό να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στους ελέγχους και τις οριακές τιμές, αλλά και στις ακόλουθες επεξηγήσεις:

1) Η δοκιμή για θέματα εμφάνισης θα πραγματοποιείται πριν από όλες τις δοκιμές και θα εκτελείται από τον αγοραστή και τον πωλητή σε περιοχή που θα έχουν συμφωνήσει, συνήθως είτε επιτόπου στο έργο ή στο εργοστάσιο.

2) Οι δοκιμές, εκτός από αυτές που αφορούν θέματα εμφάνισης, θα λαμβάνουν χώρα σε εργαστήριο το οποίο συμφωνείται από τον αγοραστή και τον πωλητή. Και οι δύο θα έχουν την ευκαιρία να παρακολουθήσουν τη δειγματοληψία και την εκτέλεση των δοκιμών. Οι δοκιμές μπορούν να εκτελεστούν με τον διακριβωμένο εργαστηριακό εξοπλισμό του πωλητή.

3) Σε περίπτωση διαφωνίας θα ελέγχονται μόνο οι διαμφισβητούμενες ιδιότητες.

4) Με βάση το πρότυπο, **οι υποχρεωτικοί έλεγχοι είναι αυτοί που βρίσκονται σε γκρι φόντο στον πίνακα.** Δηλαδή, η εμφάνιση, το πάχος της 2^{ης} στρώσης (αν υπάρχει), το σχήμα και οι διαστάσεις, η αντοχή σε εφελκυσμό από διάρρηξη (διατμητική αντοχή) και το φορτίο θραύσης ανά μήκος διάρρηξης.

5) Οι υπόλοιποι έλεγχοι είναι προαιρετικοί και μπορούν να γίνονται αν ο κατασκευαστής ή ο πελάτης το επιθυμούν.

6) Σύμφωνα με το πρότυπο, **αν οι έλεγχοι που διενεργεί ο κατασκευαστής (συμμόρφωση προς τις απαιτήσεις) δεν ελέγχονται από τρίτο ανεξάρτητο φορέα, τότε είναι υποχρεωτική η διαδικασία ελέγχου από τον πελάτη.**

7) Στην περίπτωση που η συμμόρφωση του προϊόντος προς τις απαιτήσεις ελέγχεται σε τακτά χρονικά διαστήματα, όπως ορίζεται στο πρότυπο, από τρίτο ανεξάρτητο φορέα τότε, ο έλεγχος δεν είναι υποχρεωτικός παρά μόνο στην περίπτωση διένεξης.

8) Υπάρχουν έξι συστήματα συμμόρφωσης των δομικών προϊόντων βάσει της Οδηγίας 89/106 της ΕΕ (βλ. Πίνακας 3.2). **Οι κυβόλιθοι από σκυρόδεμα ανήκουν στο Σύστημα Συμμόρφωσης 4: Απαιτούνται έλεγχοι ΜΟΝΟ από τον κατασκευαστή** και όχι από κάποιο εξωτερικό φορέα. Οι υποχρεωτικοί έλεγχοι που απαιτούνται για κάθε σύστημα συμμόρφωσης φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 3.2):

Πίνακας 3.2: Απαιτούμενοι έλεγχοι με βάση το Σύστημα Συμμόρφωσης (λαμβανόμενος από τη Οδηγία 89/106 της ΕΕ για δομικά υλικά)

Annex III of CPD	2(i)		2(ii) first possibility		2(ii) second possibility	2(ii) third possibility
Conformity attestation: Commission numbering system	1+	1	2+	2	3	4
Tasks for the manufacturer						
Factory production control	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Further testing of samples taken at factory according to prescribed test plan	✓	✓	✓			
Initial type testing			✓	✓		✓
Tasks for the notified body						
Initial type testing	✓	✓			✓	
Certification of FPC	✓	✓	✓	✓		
Surveillance of FPC	✓	✓	✓			
Audit testing of samples taken from the factory on the market or on construction sites	✓					
✓ = task required						

Επομένως, για κατηγορία συμμόρφωσης 4 απαιτούνται:

- Αρχικός έλεγχος τύπου (από τον κατασκευαστή)
- Έλεγχος παραγωγής του εργοστασίου (από τον κατασκευαστή).

3.5.3 Περαιτέρω πληροφορίες

Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 1338, παρέχεται η δυνατότητα στον κατασκευαστή, που είναι εγκατεστημένος στην ΕΕ, ή στον αντιπρόσωπό του, να θέσει τη σήμανση CE (από τα αρχικά των λέξεων Conformite Europeenne), εφόσον συντάσσει και διατηρεί μία δήλωση συμμόρφωσης.

Η δήλωση πρέπει να περιλαμβάνει:

- το όνομα και τη διεύθυνση του κατασκευαστή ή του εξουσιοδοτημένου αντιπροσώπου του, που είναι εγκατεστημένος στην ΕΕ, και ο τόπος παραγωγής
- την περιγραφή του προϊόντος (τύπος, χαρακτηρισμός, χρήση), όπως και αντίγραφο των πληροφοριών που συνοδεύουν τη σήμανση CE
- τις διατάξεις που πληροί το προϊόν.

Προκειμένου το προϊόν να έχει τη σήμανση CE (βλ. Εικόνα 3.9), πρέπει να είναι σύμφωνο με την οδηγία 93/68/ΕΚ του Συμβουλίου της ΕΕ και να συνοδεύεται από τις ακόλουθες πληροφορίες:

- την επωνυμία ή το διακριτικό σήμα του παραγωγού και την έδρα του
- τα δύο τελευταία ψηφία της ημερομηνίας πιστοποίησης
- τον αριθμό του εν λόγω Ευρωπαϊκού προτύπου (EN 1338)
- τον τύπο του προϊόντος (προκατασκευασμένο σκυρόδεμα)
- τα χαρακτηριστικά του προϊόντος
- την προβλεπόμενη χρήση.

Επιπρόσθετα, για κυβόλιθους που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε έργα οδοστρωσίας με κίνηση πεζών και οχημάτων, πρέπει να αναγράφεται η αντοχή σε θραύση, η αντίσταση σε ολίσθηση και η ανθεκτικότητα.

CE

Anyco Ltd, P.O. Box 21, B 1050
00 TM

EN 1338
Precast concrete block

Intended Use:	Internal flooring	External flooring	Roofing
Emission of asbestos	Pass	X	X
Breaking strength	Pass	Pass	X
Slip/skid resistance	Satisfactory	Satisfactory	X
Thermal conductivity [W/(mK)]	1,2	X	X
External fire performance	X	X	Deemed to satisfy
Durability	Satisfactory	Satisfactory	X
Reaction to fire	A1	X	X
X = not relevant;			

Εικόνα 3.9: Παράδειγμα σήμανσης CE κυβόλιθων (EN 1338)

Η σήμανση CE αποτελεί το «διαβατήριο» του προϊόντος για τη μόνιμη διάθεσή του στην αγορά όλων των κρατών μελών της ΕΕ. Με αυτόν τον τρόπο δηλώνεται η συμμόρφωση με τα εναρμονισμένα ευρωπαϊκά πρότυπα (hEN) ή τις Ευρωπαϊκές Τεχνικές Εγκρίσεις (ETE) και εφαρμόζεται ένα κατάλληλο κοινό σύστημα πιστοποίησης από αναγνωρισμένους/κοινοποιημένους οργανισμούς.

4. Στάδια κατασκευής οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος

4.1 Σχεδιασμός

Ο καλός σχεδιασμός ενός οδοστρώματος με κυβόλιθους σκυροδέματος είναι απαραίτητος για ένα επιτυχημένο έργο, τόσο για το εμφανισιακό κομμάτι, δηλαδή για λόγους αισθητικής, όσο και για το τεχνικό κομμάτι, δηλαδή για λόγους ασφάλειας και σωστής λειτουργίας. Η προετοιμασία, λοιπόν, ενός κατασκευαστικού σχεδίου (βλ. Εικόνα 4.1) συντελεί στο σωστό προγραμματισμό και οργάνωση του έργου. Το κόστος αυτής της προετοιμασίας συχνά ανακτάται στον χρόνο που εξοικονομείται από τυχόν διαφωνίες που ενδέχεται να προκύψουν κατά τη διάρκεια κατασκευής του πλακόστρωτου.

Εικόνα 4.1: Σχέδιο κατασκευής προετοιμασμένο εκ των προτέρων (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)

Η περιοχή προγραμματισμένης πλακόστρωσης θα πρέπει να επισημανθεί εκ των προτέρων με ένα περιθώριο +300 mm από κάθε ελεύθερη άκρη, για τη διευκόλυνση της χρήσης των υλικών και της διαμόρφωσης του κρασπέδου. Άμμος, σπρέι, σύρματα σύνδεσης και πάσσαλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επισήμανση της περιοχής.

4.2 Επιλογή και παραγγελία κυβόλιθων

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από μεγέθη, σχήματα και χρώματα. Η επιλογή πρέπει να γίνει, έτσι ώστε να συνδυάζονται αρμονικά με τον περιβάλλοντα χώρο, αλλά και να μην ξεπερνούν τον προϋπολογισμό του έργου. Σε κάθε παραγγελία θα πρέπει να υπολογίζεται μία επιπλέον ποσότητα, διότι ενδέχεται να χρειαστεί να γίνει κοπή των κυβόλιθων, προκειμένου να ταιριάξουν σωστά στα όρια του έργου. Ανάλογα με το σχήμα της επιφάνειας που πρόκειται να καλυφθεί, δηλαδή εάν αποτελείται από πολλές ευθείες ή πολλές γωνίες και καμπύλες, η επιπρόσθετη ποσότητα κυμαίνεται από 5% έως 10% της απαιτούμενης.

4.3 Εκσκαφή

Το τυπικό βάθος εκσκαφής είναι 200 – 250 mm κάτω από το τελικό επίπεδο πλακόστρωσης και δικαιολογείται, συνήθως, ως εξής:

- Στρώση βάσης 100 – 150 mm
- Στρώση άμμου 40 mm
- Στρώση κυβόλιθων 50 mm.

Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων οργανικών υλών είναι εκσκαφείς και στη συνέχεια τα υλικά αυτά εναποτίθενται σε τυπικούς κάδους (βλ. Εικόνα 4.2) , οι οποίοι συγκρατούν ποσότητα ίση με 4.5 m^3. Επομένως, για βάθος εκσκαφής 200 mm, υπολογίζεται ότι για κάθε 20 – 25 mm πλακόστρωσης απαιτείται μία εναπόθεση της ποσότητας που έχει εκσκαφθεί.

Εικόνα 4.2: Κάδος εναπόθεσης χωματουργικών υλικών (από προσωπικό αρχείο)

Μια πιο πρακτική και οικονομική επιλογή, είναι η χρήση του μηχανήματος Grab Wagon (βλ. Εικόνα 4.3), το όποιο έχει τη δυνατότητα να συλλέξει διπλάσια ποσότητα (9 m^3) από αυτή των τυπικών κάδων.

Εικόνα 4.3: Μηχάνημα Grab Wagon (What Is A Grab Wagon?)

Η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος εξαρτάται από το μέγεθος του έργου και τα καθορισμένα χρονικά πλαίσια (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction).

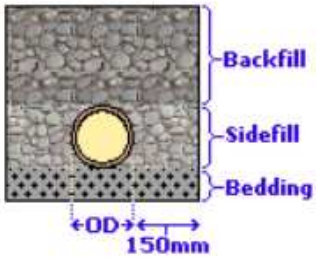
4.4 Εγκατάσταση υπόγειων αποστραγγιστικών έργων

Η αποστράγγιση του πλακόστρωτου οδοστρώματος είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της επιτυχίας του έργου και χωρίζεται σε *επιφανειακή* και *υπόγεια*.

Η *επιφανειακή* αποστράγγιση, σε μεγάλα έργα πλακόστρωσης (π.χ. πλατείες), γίνεται με τη χρήση σωλήνων. Συγκεκριμένα, τα ύδατα οδηγούνται στις εσχάρες και μέσω τον φρεατίων καταλήγουν σε αγωγούς.

Για την *υπόγεια* αποστράγγιση χρησιμοποιούνται διάτρητοι σωλήνες, με σκοπό την απομάκρυνση και τη διάθεση των πλεοναζόντων υδάτων που υπάρχουν στο εσωτερικό του εδάφους. Το σύστημα βασίζεται στο συνδυασμό βαρύτητας και υδροστατικής πίεσης για τη δημιουργία ροής εντός των σωλήνων. Οι αγωγοί εγκαθίστανται συνήθως με ήπια κλίση, 1:100 – 1:200, προς το σημείο εκροής ή διάθεσης.

Το πλάτος της τάφρου υπολογίζεται, συνήθως, ως η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα (OD) συν 150 mm πλευρική πλήρωση εκατέρωθεν (βλ. Εικόνα 4.4) .



Εικόνα 4.4: Μέγεθος τάφρου υπόγειου αγωγού αποστράγγισης (Drainage - Land Drainage for Fields and Gardens)

Η τάφρος θα πρέπει να ανασκαφεί εκ των προτέρων και να επενδυθεί με το γεωύφασμα. Το υλικό στρωμνής τοποθετείται στη βάση της τάφρου και πάνω από αυτό ακουμπάει ο σωλήνας. Στη συνέχεια, εξασφαλίζεται η σωστή ευθυγράμμιση και κλίση του και τέλος προστίθενται τα υλικά πλευρικής πληρώσεως και επίχωσης.

Το υλικό που περιβάλλει τον σωλήνα πρέπει να είναι καλά διαβαθμισμένο χαλίκι, με διάμετρο τουλάχιστον 75 mm εκατέρωθεν και πάνω από αυτόν. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η επιθυμητή ροή των υπόγειων υδάτων και η καθοδήγησή τους στο εσωτερικό του διάτρητου αγωγού, μέσω των οπών που υπάρχουν στην επάνω επιφάνειά του (βλ. Εικόνα 4.5).

Εικόνα 4.5: Τομή διάτρητου σωλήνα (Drainage - Land Drainage for Fields and Gardens)

Σχετικά με τον τύπο των σωλήνων αποχέτευσης μπορεί να είναι είτε πλαστικοί (βλ. Εικόνα 4.6) είτε από τσιμέντο (βλ. Εικόνα 4.7). Σε έργα πλακόστρωσης προτιμάται η χρήση πλαστικών σωλήνων, διότι είναι ευκολότερη η μεταξύ τους προσαρμογή αλλά και ο καθαρισμός τους, χάρη στις λείες επιφάνειές τους.

Εικόνα 4.6: Πλαστικός σωλήνας αποστράγγισης (Drainage - Land Drainage for Fields and Gardens)

Εικόνα 4.7: Τσιμεντοσωλήνες αποστράγγισης (από προσωπικό αρχείο)

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτό το στάδιο της κατασκευής εγκαθίστανται και υποδομές φωτισμού, σύστημα άρδευσης, σε περίπτωση που στο έργο πλακόστρωσης προβλέπεται η δημιουργία χώρου με φυτά και δέντρα, και σύστημα ύδρευσης, όταν πρόκειται να λειτουργήσει κάποια βρύση (π.χ. σε πλατεία).

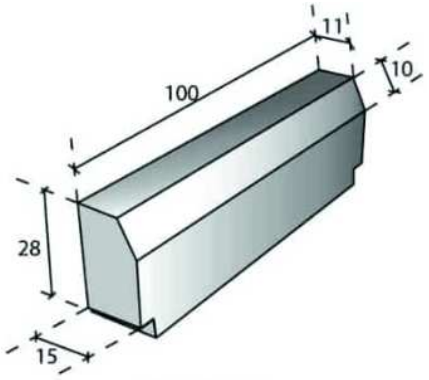
4.5 Εγκατάσταση συστημάτων συγκράτησης άκρων

4.5.1 Γενικά

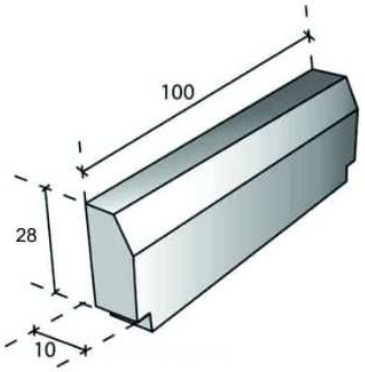
Οι κυβόλιθοι σκυροδέματος των πλακόστρωτων οδοστρωμάτων τείνουν να μετακινηθούν προς τη διαμήκη ή την εγκάρσια διεύθυνση, λόγω της διέλευσης και των ελιγμών των οχημάτων. Η περιστροφική κίνηση και η μετατόπιση των μπλοκ προς τα πλάγια αντισταθμίζεται από ειδικά κράσπεδα τοποθετημένα και σωστά αγκυρωμένα στα άκρα του οδοστρώματος. Αυτά είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, ώστε να αντέχουν το φορτίο των τροχών κυκλοφορίας χωρίς να υποστούν ζημιά (Sharma S.D., Sikdar P.K., Rao Y.V., 2004).

4.5.2 Τυπικές διατομές κρασπέδων

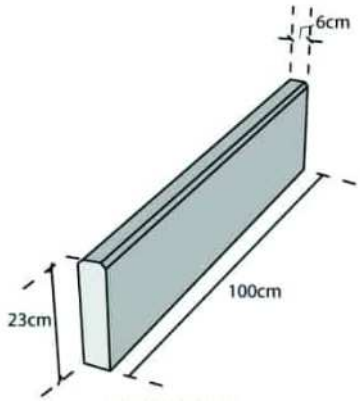
Ανάλογα με την κατηγορία του έργου που πρόκειται να υλοποιηθεί, χρησιμοποιούνται και οι αντίστοιχοι τύποι κρασπέδων (βλ. Εικόνα 4.8, Εικόνα 4.9, Εικόνα 4.10, Εικόνα 4.11, Εικόνα 4.12).



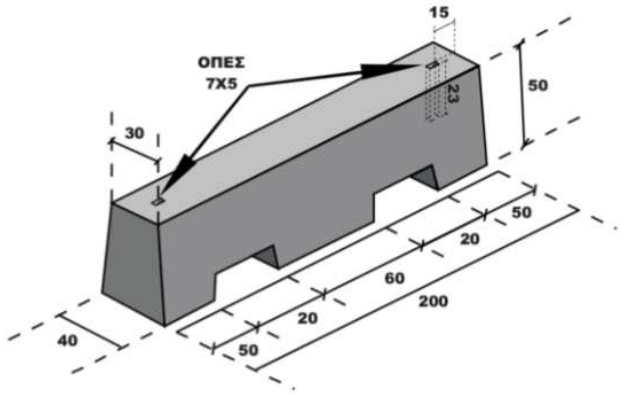
Εικόνα 4.8: Κράσπεδο οδοποιίας 100 x 15 x 28, βάρους 85 kg (EN 1340:2003, 2003)



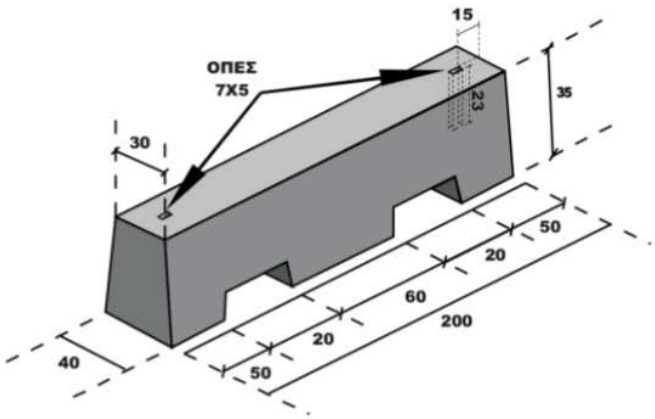
Εικόνα 4.9: Κράσπεδο οδοποιίας 100 x 10 x 28, βάρους 61 kg (EN 1340:2003, 2003)



Εικόνα 4.10: Κράσπεδο – Διαχωριστικό κήπου 100 x 6 x 23, βάρους 1.35 kg (EN 1340:2003, 2003)



Εικόνα 4.11: Κράσπεδο νησίδα 200 x 40 x 50, βάρους 770 kg (EN 1340:2003, 2003)



Εικόνα 4.12: Κράσπεδο νησίδα 200 x 40 x 35, βάρους 557 kg (EN 1340:2003, 2003)

Παρατήρηση: Στις νησίδες χρησιμοποιούνται κράσπεδα με εμφανώς μεγαλύτερες διαστάσεις, έτσι ώστε σε περίπτωση εκτροπής οχήματος να έχουν αυξημένη αντοχή.

4.5.3 Είδος σκυροδέματος

Η αγκύρωση των κρασπέδων γίνεται σε σκυρόδεμα, έτσι ώστε να αντέχουν το φορτίο των τροχών κυκλοφορίας, χωρίς να υποστούν αλλοίωση. Το σκυρόδεμα μπορεί να προέρχεται είτε από έτοιμο μίγμα είτε να συντίθενται επιτόπου. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να έχει τουλάχιστον 28ήμερη θλιπτική αντοχή 7.5 MPa, εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως βάση και 20 – 50 MPa εάν πρόκειται να στηρίξει πλευρικά το κράσπεδο.

Έτοιμο μίγμα σκυροδέματος

Για ποσότητες 1 m^3 ή μεγαλύτερες είναι προτιμότερη η χρήση έτοιμου μίγματος σκυροδέματος, με ομοιόμορφη αντοχή και σωστές αναλογίες. Μοναδικό μειονέκτημα είναι πως ενδέχεται να ξεκινήσει να πήζει πριν χρησιμοποιηθεί ολόκληρη η ποσότητά του.

Επί τόπου σύνθεση σκυροδέματος

Όταν η απαιτούμενη ποσότητα σκυροδέματος είναι μικρότερη από 1 m^3, τότε συνήθως προτιμάται να γίνει επιτόπου σύνθεσή του με ειδικούς αναμεικτήρες.

Για την παραγωγή σκυροδέματος ST1-C7.5 (θλιπτική αντοχή 7.5 MPa) αναμειγνύονται 6 μονάδες χαλικιού, με 3 μονάδες άμμου και 1 μονάδα τσιμέντου Portland.

Για την παραγωγή σκυροδέματος ST4-C20 (θλιπτική αντοχή 20 MPa) αναμειγνύονται 4 μονάδες χαλικιού, με 2 μονάδες άμμου και 1 μονάδα τσιμέντου Portland.

Μόλις τα ξερά συστατικά ανακατευτούν καλά, ακολουθεί η σταδιακή προσθήκη νερού. Το σκυρόδεμα πρέπει να είναι τόσο υγρό ώστε να μπορεί να μορφοποιηθεί, δίχως όμως να καταρρεύσει.

4.5.4 Διαδικασία εγκατάστασης

Η διαδικασία εγκατάστασης συστημάτων συγκράτησης άκρων χωρίζεται σε 3 βασικά στάδια:

1) Τοποθέτηση υλικού κλινοστρωμνής

   Το σκυρόδεμα της βάσης, πάχους περίπου 100 – 150 mm πριν τη συμπύκνωση, τοποθετείται κατά μήκος της επιφάνειας που πρόκειται να καλυφθεί με κράσπεδο. Η εναπόθεση γίνεται σταδιακά. Κάθε φορά διαστρώνονται 10 m^2 υλικού και συμπυκνώνονται. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία με τη χρήση φτυαριού ή σπάτουλας γίνεται επίπεδη η επιφάνεια πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί το κράσπεδο (βλ. Εικόνα 4.13).

Εικόνα 4.13: Διάστρωση σκυροδέματος κλινοστρωμνής (Concrete Bedded Edgings & Kerbs)

2) Τοποθέτηση κρασπέδου

   Τα κράσπεδα τοποθετούνται πάνω στο σκυρόδεμα της βάσης και συμπιέζονται κάθετα προς τα κάτω. Είναι απαραίτητο να διασφαλίζονται τα επιθυμητά επίπεδα και κλίσεις, γι' αυτό συχνά πραγματοποιούνται έλεγχοι με αλφάδι (βλ. Εικόνα 4.14).

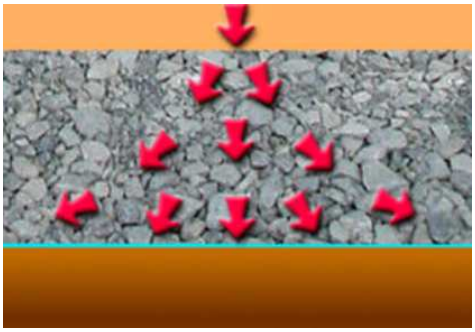
Εικόνα 4.14: Τοποθέτηση κρασπέδου (Concrete Bedded Edgings & Kerbs)

3) Τοποθέτηση πλευρικού σκυροδέματος

Μόλις ολοκληρωθεί η τοποθέτηση και ευθυγράμμιση του κρασπέδου, εναποτίθενται πλευρικά του (στο πίσω μέρος), σκυρόδεμα μεγαλύτερης αντοχής από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στη στρώση κλινοστρωμνής. Ο λόγος που απαιτείται καλύτερη ποιότητα σκυροδέματος είναι επειδή στη βάση το υλικό (bedding concrete) συγκρατεί το κράσπεδο σταθερά στο επιθυμητό επίπεδο, ενώ πλευρικά (haunching concrete) εμποδίζει τη μετακίνησή του εκτός των επιθυμητών ορίων.
Κατά κανόνα, το σκυρόδεμα που βρίσκεται πλευρικά πρέπει να έχει πλάτος τουλάχιστον ίσο με το πλάτος του κρασπέδου ή 75 mm για μονοπάτια κατοικιών, 100 mm για δρόμους και 100 – 150 mm για αυτοκινητόδρομους.

4.6 Κατασκευή στρώσεων βάσης/υπόβασης

Η στρώση υπόβασης (στρώση εξυγίανσης) λειτουργεί κατανέμοντας ένα σημειακό φορτίο σε μια μεγαλύτερη επιφάνεια (βλ. Εικόνα 4.15). Η σύμπλεξη μεταξύ γειτονικών σωματιδίων του υλικού υπόβασης εξασφαλίζει ότι μια λεπτή στρώση, αποτελούμενη από σωστά θρυμματισμένα και διαβαθμισμένα αδρανή, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ικανότητα του εδάφους να μεταφέρει βαριά φορτία.



Εικόνα 4.15: Διασπορά φορτίου στη στρώση υπόβασης (Sub-bases)

Το υλικό της υπόβασης πρέπει να απλώνεται σε στρώσεις όχι παχύτερες των 150 mm. Σε περίπτωση που απαιτείται μεγαλύτερο βάθος, η διάστρωση γίνεται σταδιακά. Συγκεκριμένα, κάθε στρώμα των 150 mm ή λιγότερο, συμπιέζεται πλήρως πριν την τοποθέτηση και συμπίεση του επόμενου και η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος.

Επομένως, για μια υπόβαση 250 mm, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν δύο στρώσεις των 125 mm ή μία των 150 mm και μία των 100 mm. Επίσης, για μία υπόβαση 425 mm, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν δύο στρώσεις των 150 mm και μία των 125 mm (βλ. Εικόνα 4.16) .

Εικόνα 4.16: Επιμέρους στρώσεις υπόβασης πάχους 425 mm (Sub-bases)

Μόλις ολοκληρωθεί η διάστρωση του υλικού της υπόβασης (βλ. Εικόνα 4.17) ακολουθεί η διαδικασία της συμπύκνωσης (βλ. Εικόνα 4.18) , με τον κατάλληλο εξοπλισμό (δονητικοί συμπιεστές), τόσο κατά τη διαμήκη όσο και κατά την εγκάρσια διεύθυνση, όπου αυτό είναι εφικτό.

Εικόνα 4.17: Διάστρωση υλικού υπόβασης (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)

Εικόνα 4.18: Δονητικός συμπιεστής υλικού υπόβασης (Sub-bases)

Ο αριθμός των απαραίτητων περασμάτων, ώστε να επιτευχθεί αποτελεσματική συμπύκνωση, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η χωρητικότητα και η ταχύτητα του συμπιεστή, οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών, το πάχος της στρώσης και η περιεκτικότητά της σε υγρασία (Inter Connected Paving Blocks (ICPB), 2012).

Μετά την ολοκλήρωση της συμπίεσης είναι απαραίτητο να γίνει έλεγχος του επιπέδου της υπόβασης, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα υπερκείμενα στρώματα θα έχουν ομοιόμορφο πάχος, με μια επιτρεπτή απόκλιση +10 mm έως -15 mm. Κάθε τμήμα που αποκλίνει από αυτά τα όρια θα πρέπει να αποκολλάται ή να συμπληρώνεται με πρόσθετο υλικό και να συμπιέζεται εκ νέου στο σωστό επίπεδο.

Ο απλούστερος τρόπος να ελεγχθεί το επίπεδο της συμπιεσμένης υπόβασης είναι με την τεχνική της εμβάπτισης. Σύμφωνα με αυτήν, μια τεντωμένη γραμμή χορδής καρφώνεται σε δύο σταθερά σημεία. Στη συνέχεια με τη χρήση μέτρου ή

σημαδεμένου ξύλου ελέγχεται η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας και της χορδής (βλ. Εικόνα 4.19). Σε μεγάλες περιοχές, όπου η χορδή μπορεί να είναι επιρρεπής σε χαλάρωση, η διαδικασία μπορεί να γίνει με τη χρήση πασσάλων.

Εικόνα 4.19: Μέτρηση επιπέδου υπόβασης (Sub-bases)

Μια επιπλέον απαίτηση σχετικά με την επιφάνεια της υπόβασης είναι πως δεν πρέπει να περιλαμβάνει κενά. Αντιθέτως, είναι σημαντικό να χαρακτηρίζεται από ομαλότητα και ομοιομορφία, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση λεπτόκοκκων υλικών. Παρ' όλ' αυτά, επειδή το υλικό της υπόβασης συνήθως παραδίδεται σε μεγάλες ποσότητες, είναι πιθανό ορισμένα σημεία να έχουν μικρότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα. Αυτό μελλοντικά ενδέχεται να προκαλέσει την καθίζηση του οδοστρώματος, διότι δημιουργούνται κενά μέσα στα οποία μπορεί να διαρρεύσει το κοκκώδες υλικό των υπερκείμενων στρώσεων. Είναι απαραίτητο, επομένως, να εξασφαλίζεται η κάλυψή τους πριν τη μετάβαση στο επόμενο στάδιο της κατασκευής (Sub-bases).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως σε περίπτωση που το έδαφος είναι ιδιαίτερα μαλακό ή εντοπίζονται σε αυτό βαθιά ριζωμένα φυτά, συνίσταται να τοποθετηθεί πάνω από την στρώση εξυγίανσης κατάλληλο γεωύφασμα. Τα γεωυφάσματα μπορούν να λειτουργήσουν ως ριζικοί φραγμοί και να αποτρέψουν τη βύθιση του υπερκείμενου υλικού υπόβασης στο αργιλώδες μαλακό υπέδαφος (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction).

Τέλος, συνήθως πάνω από τη στρώση υπόβασης, τοποθετείται η στρώση βάσης, αποτελούμενη τις περισσότερες φορές από σκυρόδεμα, σε ένα πάχος περίπου 150 mm, μετά την τελική συμπύκνωση. Το σκυρόδεμα είναι είτε εργοστασιακό είτε παρασκευάζεται στον χώρο του εργοταξίου με φορητούς αναμικτήρες ή αυτοκινούμενες μπετονιέρες.

4.7 Διάστρωση και συμπίεση άμμου κλινοστρωμνής

Για την καλύτερη απόδοση του οδοστρώματος, πριν την τοποθέτηση των κυβόλιθων, πραγματοποιείται διάστρωση μιας ομοιόμορφης ποσότητας άμμου. Το πάχος της συγκεκριμένης στρώσης, στη χαλαρή μορφή κυμαίνεται από 25 έως 50 mm, ενώ μετά τη συμπύκνωση από 20 έως 40 mm. Συνιστάται το τελικό πάχος της να είναι κοντά στα 20 με 25 mm, προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος τοπικής υπερσυμπίεσης, η οποία θα επηρέαζε το επίπεδο της ανώτερης επιφάνειας του πλακόστρωτου οδοστρώματος. Επίσης, η περιεκτικότητα σε υγρασία της άμμου είναι απαραίτητο να ελέγχεται συχνά και να διατηρείται σε ένα ποσοστό 6 με 8% (Sharma S.D., Sikdar P.K., Rao Y.V., 2004).

Η άμμος κλινοστρωμνής απαγορεύεται να χρησιμοποιείται για την πλήρωση των κενών της επιφάνειας της βάσης/υπόβασης. Τα κενά αυτά, εφόσον υπάρχουν, θα πρέπει να καλύπτονται με το υλικό των αντίστοιχων στρώσεων και στη συνέχεια να ακολουθεί η διάστρωση του υπερκείμενου στρώματος της άμμου.

Η διαδικασία της κατασκευής χωρίζεται σε 3 βασικά τμήματα:

1) <u>Εναπόθεση υλικού</u>

   Στο αρχικό στάδιο, το υλικό κλινοστρωμνής εναποτίθενται στην περιοχή όπου πρόκειται να γίνει η διάστρωση (βλ. Εικόνα 4.20). Στη συνέχεια απλώνεται με τη χρήση φτυαριού ή/και τσουγκράνας σε ένα επίπεδο 30 με 50 mm υψηλότερα από το απαιτούμενο (βλ. Εικόνα 4.21).

Εικόνα 4.20: Εναπόθεση υλικού κλινοστρωμνής (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)

Εικόνα 4.21: Διάστρωση υλικού κλινοστρωμνής (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)

2) Αρχική συμπίεση άμμου κλινοστρωμνής

Στο δεύτερο στάδιο η άμμος συμπυκνώνεται ελαφρώς με χρήση συμπιεστή δονούμενης πλάκας ή ελαφριού κυλίνδρου (βλ. Εικόνα 4.22).

Εικόνα 4.22: Συμπύκνωση άμμου με συμπιεστή δονούμενης πλάκας (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)

3) Τελική συμπύκνωση άμμου κλινοστρωμνής

Στο τελικό στάδιο, ολοκληρώνεται η διαδικασία της συμπύκνωσης με τη μεταφορά μιας σανίδας επίστρωσης (πήχης) από αλουμίνιο, σίδηρο ή ξύλο (βλ. Εικόνα 4.23). Πιο συνηθισμένη είναι η χρήση πήχη αλουμινίου, διότι είναι ελαφρύτερος και επομένως περισσότερο εύχρηστος, ενώ δεν είναι λίγες

οι φορές που επιλέγεται δονητικός πήχης, ο οποίος λειτουργεί μηχανικά. Σκοπός είναι η δημιουργία μιας ομαλής επιφάνειας και η εξασφάλιση του επιθυμητού βάθους της στρώσης.

Εικόνα 4.23: Τελική συμπύκνωση με χρήση ξύλινου πήχη (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)

Σε αυτό το σημείο δίνονται και οι κατάλληλες κλίσεις προς τη διεύθυνση απορροής ομβρίων.

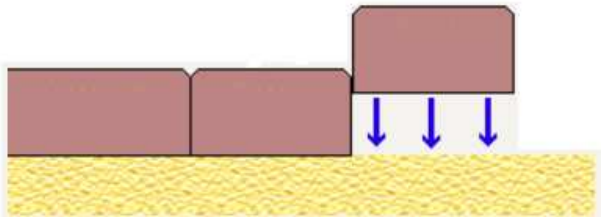
4.8 Τοποθέτηση κυβόλιθων

Η τοποθέτηση των μπλοκ γίνεται συνήθως με χειρωνακτική εργασία (βλ. Εικόνα 4.24). Μηχανικά βοηθήματα χρησιμοποιούνται σε μεγάλα έργα ή/και όταν υπάρχει πίεση χρόνου.

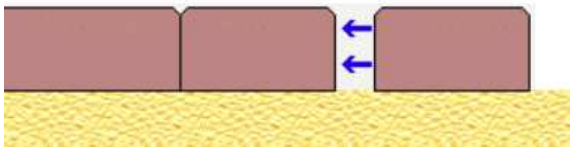
Εικόνα 4.24: Τοποθέτηση κυβόλιθων με χειρωνακτική εργασία (από προσωπικό αρχείο)

Η διαδικασία ξεκινάει από τα άκρα της περιοχής που πρόκειται να γίνει η πλακόστρωση και προχωράει σταδιακά μέχρι το κέντρο. Επίσης, όπου είναι εφικτό, προτείνεται η τοποθέτηση να ακολουθεί μία κατεύθυνση. Σε επικλινές έδαφος αφετηρία είναι το χαμηλότερο σημείο και η κατασκευή συνεχίζεται ανηφορικά, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα ερπυσμού (Sharma S.D., Prashant Kumar, Nanda P.K., 2005), (Sharma S.D., Sikdar P.K., Rao Y.V., 2004).

Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι κυβόλιθοι είναι σωστά συνδεδεμένοι μεταξύ τους, η τοποθέτηση γίνεται με έναν συγκεκριμένο τρόπο. Ειδικότερα, κάθε μπλοκ σκυροδέματος τοποθετείται απευθείας κάθετα στην άμμο (βλ. Εικόνα 4.25), χωρίς να ολισθαίνει στο έδαφος διαταράσσοντας το υλικό της κλινοστρωμνής (βλ. Εικόνα 4.26).



Εικόνα 4.25: Σωστός τρόπος τοποθέτησης κυβόλιθων



Εικόνα 4.26: Λανθασμένος τρόπος τοποθέτησης κυβόλιθων

Σκοπός είναι να βρίσκεται συνεχώς σε επαφή με το μπλοκ που έχει τοποθετηθεί προηγουμένως, προβλέποντας συγχρόνως το μέγεθος του μεταξύ τους αρμού. Οι διαστάσεις της άρθρωσης κυμαίνονται από 2 έως 5 mm (BS 7533-101, 2021), με τον ιδανικό σύνδεσμο να είναι στα 3 mm. Εάν το κενό μεταξύ των κυβόλιθων είναι μεγαλύτερο από 6 mm και σε αυτό έχουν παγιδευτεί κόκκοι άμμου, η εμπλοκή τους είναι ασθενής, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας μη αποδοτικής επιφάνειας οδοστρώματος.

4.9 Ευθυγράμμιση και κοπή κυβόλιθων

Όταν ολοκληρωθεί η τοποθέτηση των κυβόλιθων ελέγχεται εάν είναι σωστά ευθυγραμμισμένοι με τη χρήση μιας τεντωμένης χορδής κατά μήκος των διαγώνιων διαδρομών. Εν συνεχεία προσαρμόζονται, εφόσον είναι απαραίτητο, με ειδικό εργαλείο ευθυγράμμισης (βλ. Εικόνα 4.27).

Εικόνα 4.27: Διαδικασία ευθυγράμμισης κυβόλιθων (Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction)

Μετά την ευθυγράμμιση, ακολουθεί η κοπή των κυβόλιθων, στα σημεία που αυτό είναι απαραίτητο, με ειδικά μηχανήματα (block splitters) (βλ. Εικόνα 4.28). Υπάρχουν διάφοροι τύποι των συγκεκριμένων μηχανημάτων , ωστόσο για την κοπή κυβόλιθων πιο συνηθισμένη είναι η χρήση αυτών με άνοιγμα σιαγόνας περίπου 100 mm και μήκος σιαγόνας 300 – 450 mm.

Εικόνα 4.28: Block splitter (από προσωπικό αρχείο)

Η διαδικασία της κοπής βασίζεται στις ακόλουθες δύο αρχές, έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία κομματιών κυβόλιθων μικρού μεγέθους με κίνδυνο τη βύθισή τους στο υποκείμενο στρώμα της άμμου:

1) Ιδανικά θα πρέπει να κόβεται μόνο η μία από τις τέσσερις άκρες των κυβόλιθων, εάν και αυτή η αρχή τις περισσότερες φορές παραβιάζεται.
2) Κάθε κοπή δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το $^1/_4$ του κυβόλιθου (BS 7533-101, 2021).

4.10 Συμπίεση στρώματος κυβόλιθων

Για τη συμπύκνωση των κυβόλιθων χρησιμοποιείται συμπιεστής δονητικής πλάκας, αφού πρώτα καθαριστεί καλά η επιφάνεια του οδοστρώματος από τυχόν υλικά που έχουν προκύψει από τις διάφορες εργασίες. Για να είναι επιτυχημένη η διαδικασία απαιτούνται τουλάχιστον δύο περάσματά του πάνω από το πλακόστρωτο, σε διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους. Το μηχάνημα μέσω της δόνησης συμπιέζει τους κυβόλιθους σκυροδέματος κάθετα προς τα κάτω, μέχρις ότου ενοποιηθούν με το στρώμα κλινοστρωμνής. Λόγω του ότι η επιφάνεια της πλάκας εκτείνεται σε πολλούς κυβόλιθους ταυτόχρονα, οποιαδήποτε μικρή διακύμανση στο πάχος τους διορθώνεται όταν τίθενται σε λειτουργία ο συμπιεστής.

Κατά τη διάρκεια της δονητικής συμπίεσης των μπλοκ, ένα μέρος της άμμου κλινοστρωμνής γεμίζει τις μεταξύ τους αρθρώσεις. Η ποσότητα της άμμου που θα γεμίσει τους αρμούς εξαρτάται από το μέγεθος της πίεσης που ασκεί ο συμπιεστής. Οι τυπικοί συμπιεστές έχουν βάρος περίπου 90 kg, επιφάνεια πλάκας 0.3 m^2 και εφαρμόζουν δύναμη 15 kN, ενώ οι συμπιεστές βαρέως τύπου ζυγίζουν 300 – 600 kg, έχουν επιφάνεια πλάκας 0.5 – 0.6 m^2 και εφαρμόζουν δύναμη 30 – 65 kN.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου συμπιεστή δονητικής πλάκας εξαρτάται από την κατηγορία του οδοστρώματος, σύμφωνα με το BS 7533-101 (BS 7533-101, 2021), και τις τιμές των παραμέτρων που ορίζονται με βάση αυτή (βλ. Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά συμπιεστή δονητικής πλάκας βάσει κατηγορίας οδοστρώματος

Κατηγορία οδοστρώματος	Περιγραφή	Ελάχιστη διάσταση πλάκας (m^2)	Ελάχιστη δύναμη ανά m^2 (kN/m^2)	Συχνότητα (Hz)	Ελάχιστη μάζα (kg)
I & II	Βαρία κυκλοφορία	0.25	75	65-100	200
III & IV	Κυκλοφορία οχημάτων	0.2	60	75-100	80

Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως για βαριά κυκλοφορία απαιτείται μεγαλύτερη διάσταση πλάκας (0.25 m^2), ενώ για πιο ήπια κυκλοφορία μικρότερη διάσταση (0.2 m^2).

4.11 Πλήρωση αρμών με άμμο

Σύμφωνα με το Βρετανικό Πρότυπο BS 7533:3, οι αρμοί μεταξύ των παρακείμενων κυβόλιθων σκυροδέματος δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 5 mm. Η πλήρωση των κενών γίνεται με στεγνή άμμο θαλάσσης, η οποία σταθεροποιεί τους κυβόλιθους στη θέση τους. Η επιτυχημένη σύνδεση των μπλοκ συντελεί στη μεταφορά φορτίων μεταξύ τους.

Προκειμένου να εισχωρήσει η άμμος στα κενά, σκουπίζεται επανειλημμένα με μια σκούπα. Μόλις οι αρμοί καλυφθούν πλήρως, η περίσσεια της άμμου συλλέγεται για να επαναχρησιμοποιηθεί. Έπειτα, ο συμπιεστής δονητικής πλάκας τίθενται πάλι σε λειτουργία και με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται η διαδικασία της συμπύκνωσης.

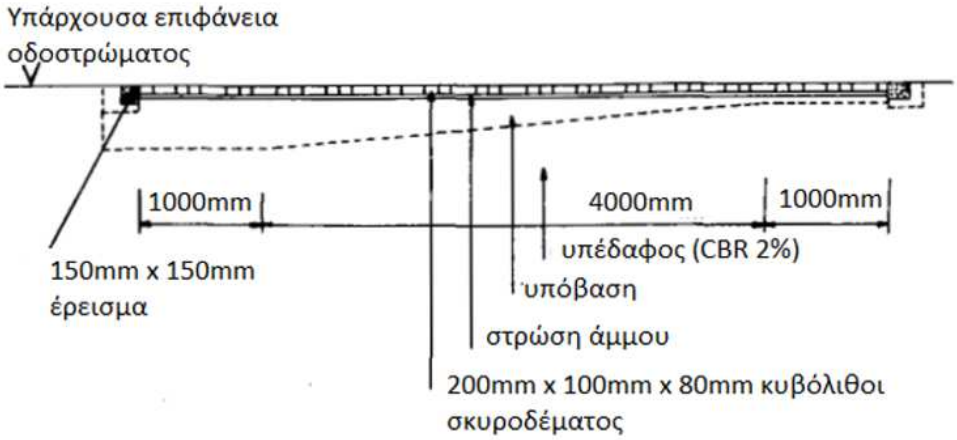
Υπάρχει πιθανότητα η άμμος σύνδεσης να καθιζάνει κατά τη διάρκεια των πρώτων εβδομάδων, μετά την παράδοση του έργου, και θα πρέπει άμεσα να συμπληρωθεί στα σημεία που αυτό είναι εμφανές.

5. Μηχανική συμπεριφορά οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος

5.1 Μελέτη ευαισθησίας

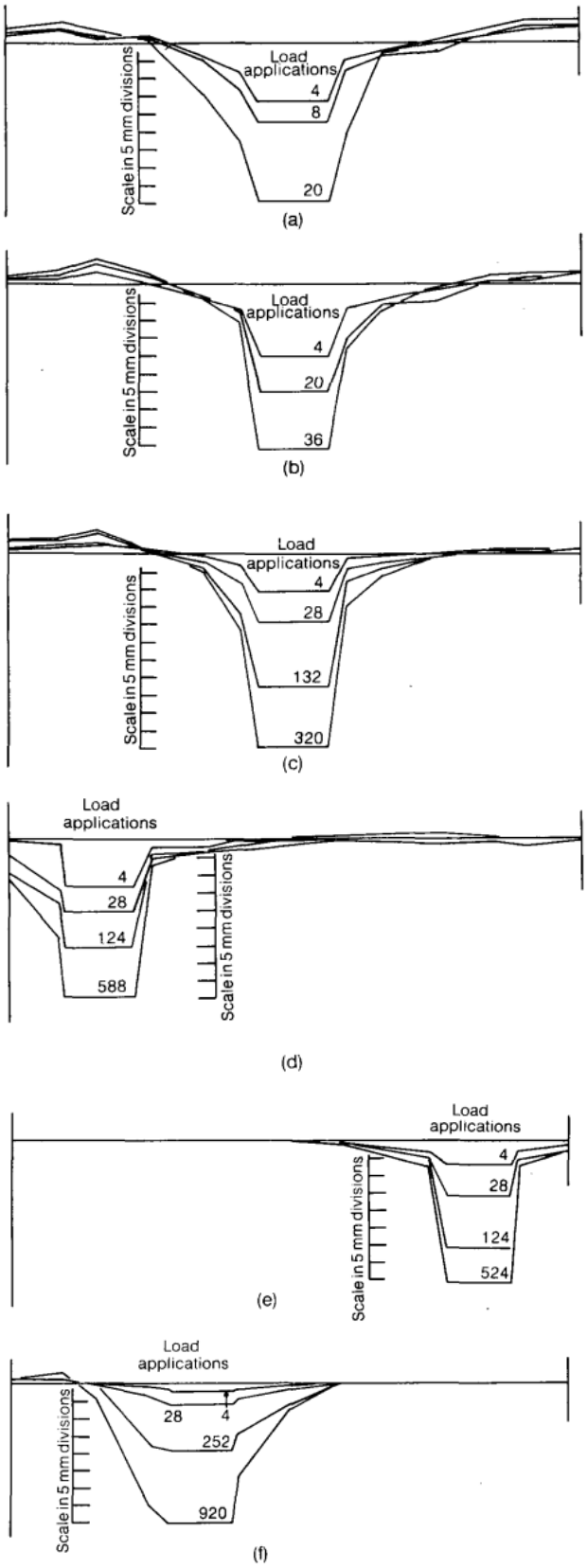
Ένα θεμελιώδες ζήτημα στη μελέτη των οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος είναι ο έλεγχος της ευαισθησίας τους έναντι διαφόρων παραμέτρων. Στην (Knapton J. ,Barber S.D., 1979) διερευνήθηκε η επίδραση του πάχους της στρώσης υπόβασης στην παραμόρφωση της επιφάνειας και την ανάπτυξη αλληλοσύνδεσης μεταξύ των κυβόλιθων σκυροδέματος. Τελικός σκοπός ήταν μέσω της περιγραφής της δοκιμής που έγινε σε πειραματικό οδόστρωμα και της σύγκρισης των αποτελεσμάτων με μια αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού και υπάρχουσες σχεδιαστικές συστάσεις του Road Note 29 (Road 29 Guide to the structural design of pavements for new roads. 3rd edition, 1970), να καθοριστεί η γενική συμπεριφορά των κυβόλιθων.

Στο παρακάτω πειραματικό οδόστρωμα (βλ. Εικόνα 5.1) εφαρμόστηκε φόρτιση, μέσω χαλύβδινης πλάκας, σε 7 σημεία, στα οποία το πάχος της στρώσης υπόβασης μετρήθηκε 50 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm.



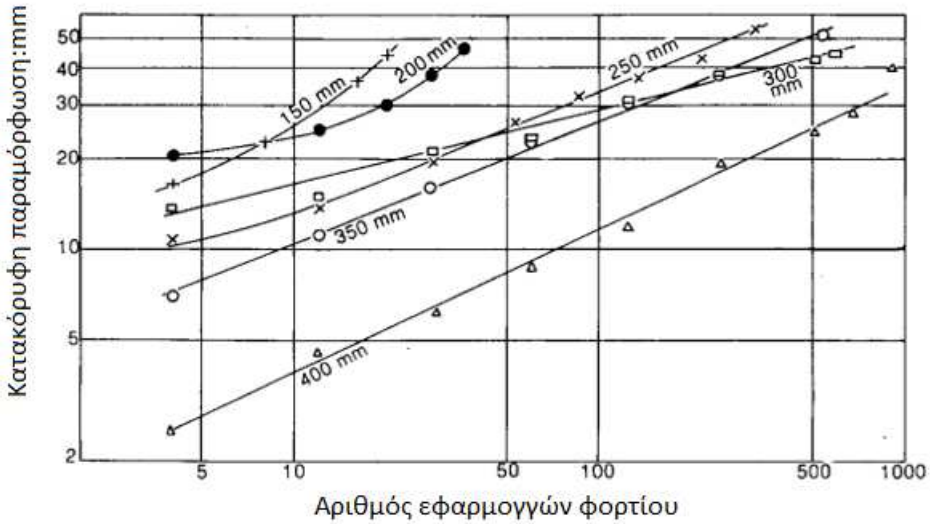
Εικόνα 5.1: Διατομή πειραματικού οδοστρώματος

Η προοδευτική παραμόρφωση του πειραματικού οδοστρώματος στα διάφορα σημεία φόρτισης, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Προοδευτική παραμόρφωση πειραματικού οδοστρώματος: (a) υπόβαση 150mm, (b) υπόβαση 200mm, (c) υπόβαση 250mm, (d) υπόβαση 300mm, (e) υπόβαση 350mm, (d) υπόβαση 400mm (Knapton J. ,Barber S.D., 1979)

Διαπιστώθηκε, λοιπόν, πως όσο αυξανόταν το βάθος της υπόβασης απαιτούνταν μεγαλύτερος αριθμός εφαρμογών φορτίου για να υπάρξει παραμόρφωση παρόμοιου μεγέθους, χωρίς απαραίτητα δομική αστοχία. Επίσης, όσο μεγαλύτερο ήταν το πάχος της συγκεκριμένης στρώσης τόσο μικρότερη ήταν η διάτμηση που παρατηρούνταν μεταξύ των αρμών. Η λογαριθμική απεικόνιση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3: Γραφική παράσταση της μέγιστης παραμόρφωσης σε σχέση με τον αριθμό εφαρμογών φορτίου

Προκειμένου να συγκριθεί η απόδοση του πειραματικού οδοστρώματος με αυτήν ενός συμβατικού οδοστρώματος σχεδιασμού, μετατράπηκε η φόρτιση που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα σε ισοδύναμο αριθμό τυπικών αξόνων.

Το μέγεθος και η πίεση επαφής του φορτίου δοκιμής και του τυπικού άξονα συγκρίνονται παρακάτω (βλ. Πίνακας 5.1).

Πίνακας 5.1: Σύγκριση φορτίου δοκιμής με τυπικό άξονα

	Τυπικός άξονας	**Φορτίο δοκιμής**
Φορτίο (kN)	40	63
Πίεση επαφής (MN/m^2)	0.5	2
Ακτίνα επαφής (mm)	160	100
Ισοδύναμος αριθμός τυπικών αξόνων	1	30

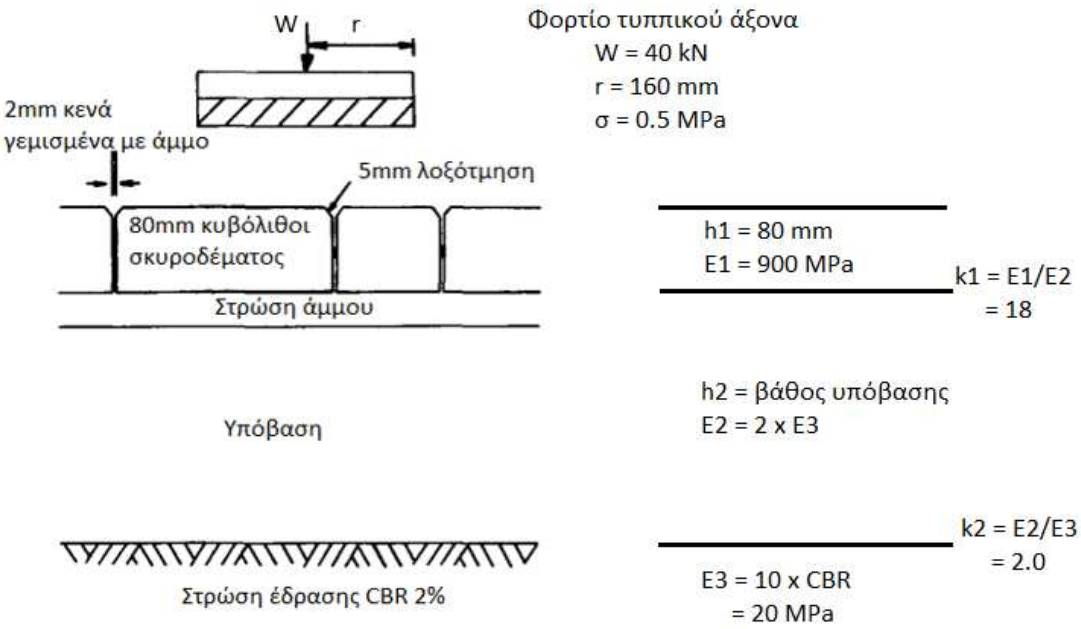
Στη συνέχεια, για να υπολογιστεί η σχεδιαστική διάρκεια ζωής, το οδόστρωμα της μελέτης χωρίστηκε σε τρία τμήματα (βλ. Εικόνα 5.4) και σχετικά με τα μέτρα ελαστικότητας, έγιναν οι εξής τρεις παραδοχές :

1) Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, E_3, MN/m^2, υπολογίστηκε από την εμπειρική σχέση:

$$E_3 = 10 \times CBR \tag{1}$$

2) Το μέτρο ελαστικότητας υποβάσεως, E_2, για κοκκώδη υλικά, είναι 2 – 4 φορές το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, με μέσο συντελεστή περίπου 2.5. Στη συγκεκριμένη μελέτη ο λόγος E_2/E_3 θεωρήθηκε ίσος με 2.0.

3) Το σύνθετο μέτρο ελαστικότητας της επιφάνειας των κυβόλιθων σκυροδέματος έλαβε την τιμή 900 MPa.



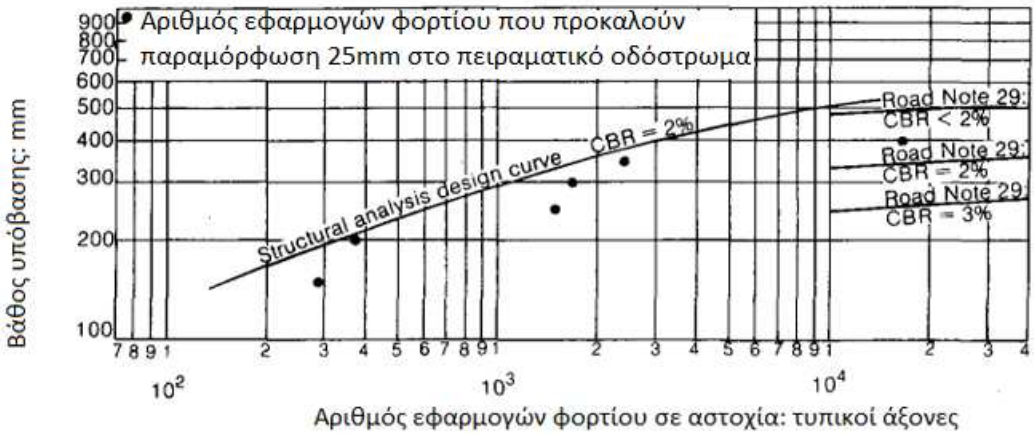
Εικόνα 5.4: Δομική ανάλυση οδοστρώματος

Για διαφορετικά πάχη υπόβασης (h_2) και με τη χρήση της ακόλουθης σχέσης, εκτιμήθηκε η διάρκεια ζωής τους οδοστρώματος (σε τυπικούς άξονες):

$$N = (21600/\varepsilon_{z3})^{3.571}, \tag{2}$$

όπου ε_{Z3}, η κατακόρυφη παραμόρφωση.

Τα πειραματικά και τα θεωρητικά αποτελέσματα συγκρίνονται στο ακόλουθο σχήμα (βλ. Εικόνα 5.5). Η γραφική παράσταση παρουσιάζει την καμπύλη σχεδιασμού για στρώση έδρασης με CBR 2%. Ο αριθμός των εφαρμογών φορτίου που απαιτούνται για να δώσουν παραμόρφωση 25 mm (θεωρούμενη αστοχία), σε κάθε σημείο φόρτισης, έχουν μετατραπεί σε τυπικούς άξονες και απεικονίζονται στο σχήμα. Επίσης, οι καμπύλες σχεδιασμού από το Road Note 29 (Road 29 Guide to the structural design of pavements for new roads. 3rd edition, 1970), προστίθενται όταν η διάρκεια ζωής υπερβαίνει τους 10^4 τυπικούς άξονες.



Εικόνα 5.5: Σύγκριση εκτιμώμενης και πραγματικής διάρκειας ζωής οδοστρώματος

Εξάγεται, επομένως, το συμπέρασμα πως το οδόστρωμα θα έχει ικανοποιητική απόδοση, διότι όλα τα αποτελέσματα βρίσκονται κάτω από την αναλυτική καμπύλη σχεδιασμού. Οι κυβόλιθοι από σκυρόδεμα, λοιπόν, μπορούν να παρέχουν μια επιτυχημένη μορφή πλακόστρωτου οδοστρώματος. Με την προϋπόθεση ότι θα τοποθετηθούν σε μια επαρκή υπόβαση, για την αποτροπή άμεσης διατμητικής αστοχίας κατά μήκος των αρμών τους, η επιφάνεια μπορεί να διαδώσει τα υψηλά συγκεντρωμένα φορτία σε μεγάλη έκταση. Επιπρόσθετα, προκειμένου να αναπτυχθεί πλήρης αλληλοσύνδεση μεταξύ των κυβόλιθων, είναι απαραίτητη η συμπίεση της επιφάνειας. Τέλος, διαπιστώνεται πως ένα οδόστρωμα με κυβόλιθους μπορεί να αντέξει μεγάλες επιφανειακές παραμορφώσεις. Μόνο ένα μικρό ποσοστό των μπλοκ καταστρέφεται, άρα σε περιοχές που δεν αναμένεται να καταπονηθούν από υψηλά φορτία, μπορεί να υπάρξει μια μικρή ανοχή σε ό,τι αφορά τα κριτήρια αστοχίας.

5.2 Ανάλυση τάσης – καταπόνησης

Η ανάλυση τάσης-καταπόνησης των οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι που πρέπει να εξετάζεται και να λαμβάνεται υπόψη στη φάση του σχεδιασμού. Στην (Paola Di Mascio, 2019) μελετήθηκε η επίδραση του μοτίβου κατασκευής των κυβόλιθων στην αντοχή σε κόπωση, στις οριζόντιες μετατοπίσεις και στις κάθετες παραμορφώσεις. Σκοπός της έρευνας ήταν να γίνει έλεγχος αυλάκωσης και κόπωσης μέσω της μεθόδου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αλλά και υπολογισμός της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος βάσει των εξής παραγόντων: το πάχος των κυβόλιθων, των αρμών και της άμμου κλινοστρωμνής.

Για τον υπολογισμό της κατάστασης τάσης – παραμόρφωσης, χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα κυκλοφορίας (βλ. Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2: Δεδομένα φορτίων κυκλοφορίας

Τύπος οχήματος	Κωδικός οχήματος	Μεικτό φορτίο οχήματος (kN)	Φορτίο άξονα (kN)	Φορτίο τροχού (kN)	Δυναμικό φορτίο τροχού (kN)	Κωδικός φορτίου τροχού
Λεωφορείο	V_1	30	10	5	5.5	P_1
			20	10	11	P_2
Ελαφρύ φορτηγό	V_2	120	80	40	44	P_3
			40	20	22	P_4

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών της κάθε στρώσης και τα χαρακτηριστικά των κυβόλιθων (βλ. Πίνακας 5.3, Πίνακας 5.4).

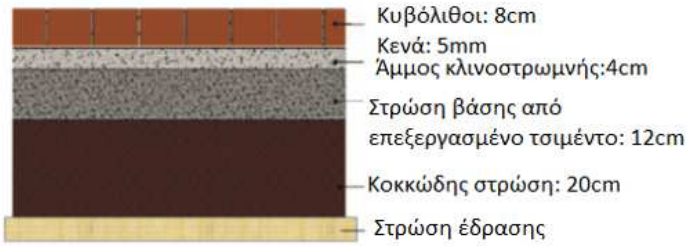
Πίνακας 5.3: Μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών

Υλικό	Συντελεστής ελαστικότητας σε τάση ή συμπίεση (MPa)	Αναλογία Poisson	Αντοχή σε εφελκυσμό σ_t (MPa)
Άμμος κλινοστρωμνής/αρμών	100	0.30	0.25
Επεξεργασμένο τσιμέντο	400	0.20	
Κοκκώδες υλικό	250	0.35	

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά κυβόλιθων σκυροδέματος

Χαρακτηριστικά	Τιμή
Μήκος (cm)	10
Πλάτος (cm)	20
Πάχος (cm)	6-8-10
Τελικό φορτίο (N/mm)	250
Πυκνότητα (kg/m^3)	2200
Αντοχή σε κάμψη (MPa)	>4.6

Ο υπολογισμός της κατακόρυφης μετατόπισης, μετά την επιβολή του φορτίου τροχού P_3 (βλ. Πίνακας 5.2), έγινε στο ακόλουθο οδόστρωμα (βλ. Εικόνα 5.6). Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης μετρήθηκε, σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T274 – 82 (AASHTO, 1982), ίσο με 150 MPa και το πάχος της θεωρήθηκε 40 cm για την πραγματοποίηση της ανάλυσης.

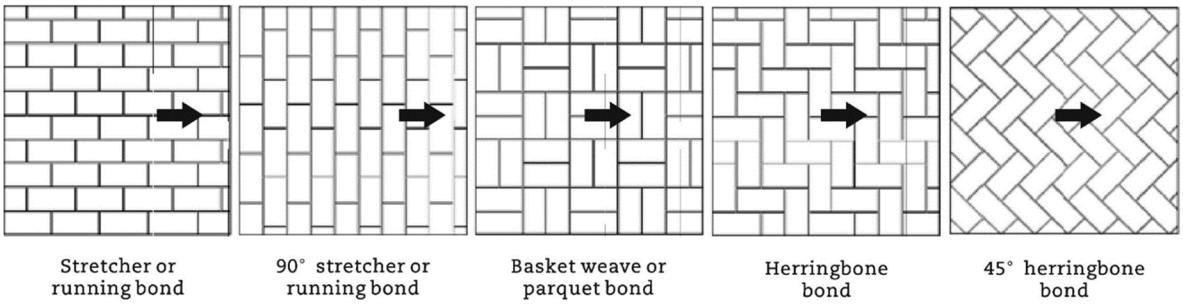


Εικόνα 5.6: Πλακόστρωτο οδόστρωμα ανάλυσης

Η σύγκριση έγινε μεταξύ 5 μοτίβων πλακόστρωσης (βλ. Εικόνα 5.7):

- Σύνδεση 1 → Stretcher or running

- Σύνδεση 2 → 90° stretcher or running
- Σύνδεση 3 → Basket weave or parquet
- Σύνδεση 4 → Herringbone
- Σύνδεση 5 → 45° herringbone



Εικόνα 5.7: Εξεταζόμενα μοτίβα (τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της κίνησης) (Paola Di Mascio, 2019)

Για κάθε μοτίβο, λήφθηκαν υπόψη τρεις διαφορετικές θέσεις φορτίου και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις (Δz) (βλ. Πίνακας 5.5).

Πίνακας 5.5: Τιμές του Δz για διαφορετικά μοτίβα και θέσεις φορτίου

Θέση	Δ_z για διαφορετικά μοτίβα (mm)				
	1	2	3	4	5
A	-1,93	-1,88	-1,84	-1,74	-1,73
B	-1,78	-1,87	-1,80	-1,69	-1,58
C	-1,87	-1,73	-1,72	-1,73	-1,61

Για να γίνει ανάλυση των φαινομένων της κόπωσης και της αυλάκωσης, εξετάστηκαν οι συνδυασμοί μοτίβου-θέσης: 1A, 2B, 3C. 4B, 5B. Ο Πίνακας 5.6 παραθέτει τη μέγιστη τάση εφελκυσμού (σ_N) στη στρώση βάσης και την κατακόρυφη παραμόρφωση (δ_z) της κοκκώδους στρώσης και της στρώσης έδρασης, έχοντας ως αναφορά το οδόστρωμα της Εικόνα 5.6. Για κάθε δεδομένο εισόδου, ο Πίνακας 5.6 δίνει τον μέγιστο αριθμό επιτρεπόμενων επαναλήψεων N του φορτίου σχεδιασμού P_3.

Πίνακας 5.6: Δεδομένα εισόδου και αποτελέσματα για ανάλυση κόπωσης και αυλάκωσης

Αποτελέσματα	Μοτίβο - Θέση				
	1A	**2B**	**3C**	**4B**	**5B**
Βάση					
σ_N (Mpa)	0,039	0,033	0,035	0,034	0,032
N	1,33E+20	7,50E+20	4,22E+20	5,62E+20	1,00E+21
Κοκκώδης στρώση					
δ_z (mm)	-0,345	-0,340	-0,341	-0,332	-0,333
N	2,92E+06	3,09E+06	3,06E+06	3,40E+06	3,36E+06
Υπέδαφος					
δ_z (mm)	-0,247	-0,247	-0,239	-0,241	-0,239
N	10,93E+06	10,93E+06	12,45E+06	12,05E+06	12,45E+06

Ο υπολογισμός του N για τη στρώση βάσης έγινε σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$\sigma_N = \sigma_R (1 - K * \log N)\,, \qquad (3)$$

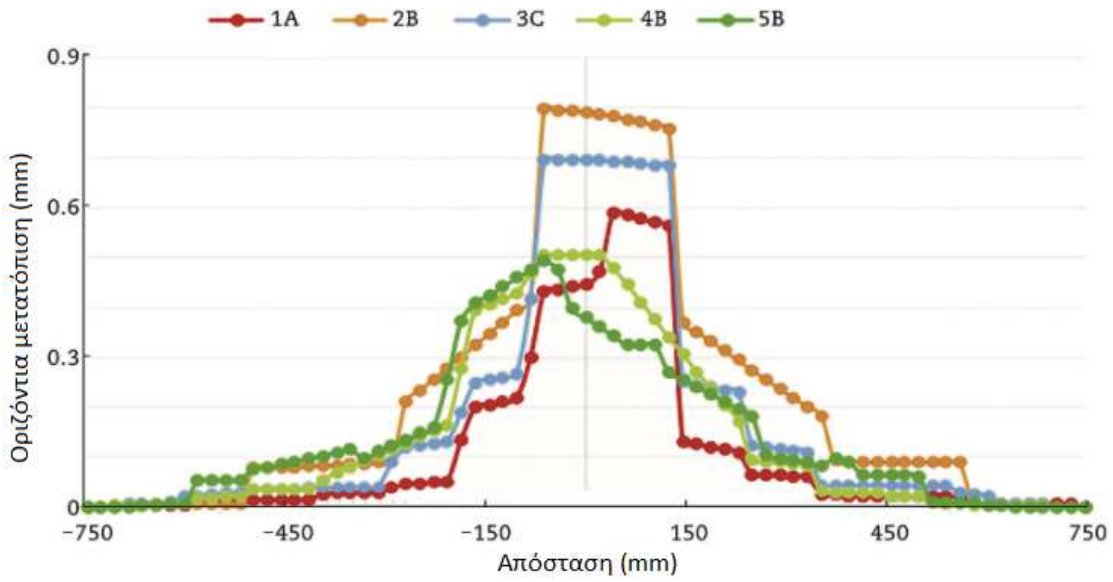
όπου K είναι ο συντελεστής παλινδρόμησης ίσος με 0.04, σ_R η εφελκυστική αντοχή της στρώσης βάσης από επεξεργασμένο τσιμέντο και σ_N η τάση εφελκυσμού.

Για την κοκκώδη στρώση και τη στρώση έδρασης, το N υπολογίστηκε σύμφωνα με τη φθορά από αυλάκωση μέσω της σχέσης:

$$\log N = -7.21 - 395 \log(\varepsilon_z)\,, \qquad (4)$$

όπου ε_z η κατακόρυφη παραμόρφωση.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις δ_h των κυβόλιθων, που προκαλούνται από το φορτίο P_3 (βλ. Εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8: Οριζόντιες μετατοπίσεις (Paola Di Mascio, 2019)

Τέλος, εξετάστηκε η επιρροή του πάχους των κυβόλιθων, των αρμών και της άμμου κλινοστρωμνής, στην παραμόρφωση του πλακόστρωτου και συγκεκριμένα στη διάρκεια ζωής, αναλύοντας τη στρώση βάσης (βλ. Πίνακας 5.7).

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα διαφορετικών διαμορφώσεων

Δεδομένα εισόδου	**Πλάτος αρμού: 5mm Πάχος άμμου κλινοστρωμνής: 4cm Πάχος κυβόλιθων (cm)**			**Πάχος κυβόλιθων: 8cm Πάχος άμμου κλινοστρωμνής: 4cm Πλάτος αρμού (mm)**			**Πλάτος αρμού: 5mm Πάχος κυβόλιθων: 8cm Πάχος άμμου κλινοστρωμνής (cm)**		
	6	**8**	**10**	**3**	**4**	**5**	**3**	**4**	**5**
N (10^6)	2.76	2.92	3.13	2.99	2.95	2.92	2.97	2.92	2.90

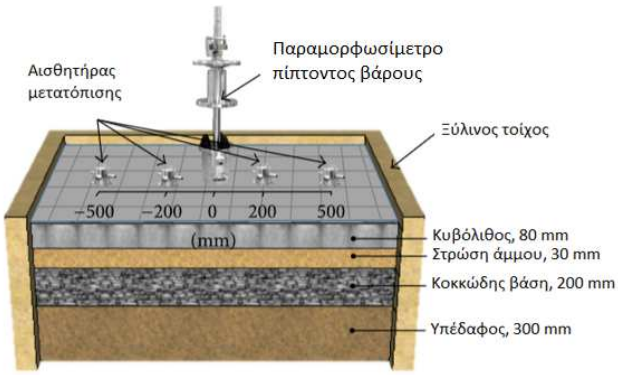
Τελικώς, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας έγινε προφανές πως με την κατασκευή του μοτίβου 1 προκύπτουν οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις (δηλ. -1.93 mm), μεταξύ των 15 εξεταζόμενων (βλ. Πίνακας 5.5), ενώ με το μοτίβο 5 παρατηρούνται οι μικρότερες (δηλ. -1.58 mm). Ακόμα, εξήχθη το συμπέρασμα πως η κρίση του οδοστρώματος ξεκινάει από την κοκκώδη στρώση, η αυλάκωση της οποίας προκαλεί την ολοκληρωτική αστοχία. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυλάκωσης και κόπωσης, καταλήγουμε επίσης, πως τη μικρότερη διάρκεια ζωής οδοστρώματος έχει ο συνδυασμός 1A, ενώ οι συνδυασμοί 4B και 5B συνεπάγονται αύξηση κατά τουλάχιστον 10%-15% του N σε σχέση με τον 1A (βλ. Πίνακας 5.6). Το γεγονός πως τα μοτίβα 4 και 5 επιτρέπουν μεγαλύτερο αριθμό διελεύσεων οφείλεται στο ότι το φορτίο των τροχών επηρεάζει περισσότερους

κυβόλιθους από τις άλλες διαμορφώσεις. Πράγματι, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων που επηρεάζονται από το φορτίο, τόσο καλύτερη είναι η κατανομή της τάσης. Όσον αφορά τις μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις, τα αποτελέσματα των συνδυασμών 4B και 5B είναι παρόμοια με εκείνα που προέκυψαν από τις αναλύσεις της κόπωσης και της αυλάκωσης. Συγκεκριμένα, εξασφαλίζουν την καλύτερη συμπεριφορά τάσης-καταπόνησης, σε αντίθεση με το μοτίβο 2. Τέλος, από τις τρεις παραμέτρους που εξετάστηκαν, δηλαδή το πάχος των κυβόλιθων, το πλάτος των αρμών και της στρώσης άμμου κλινοστρωμνής, αποδείχθηκε ότι η πιο κρίσιμη ήταν η πρώτη. Ειδικότερα, για πάχος 8 cm και 10 cm, προκύπτει αύξηση των επιτρεπόμενων επαναλήψεων, N, κατά 7% και 15%, αντίστοιχα, σε σχέση με το πάχος των 6 cm. Για ανάλογη αύξηση των υπόλοιπων δύο παραμέτρων, η επιρροή στη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος είναι εμφανώς μικρότερη (βλ. Πίνακας 5.7).

5.3 Πρόβλεψη παραμόρφωσης οδοστρωμάτων

Στην ανάλυση των οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος είναι σημαντικό να εξετάζεται η προβλεπόμενη παραμόρφωσή τους. Στην (Lin W., Cho Y. Kim I.T., 2016) εξετάστηκε το συγκεκριμένο φαινόμενο μέσω τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και δοκιμής δυναμικής φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη τα σχήματα των κυβόλιθων και τα μοτίβα κατασκευής. Σκοπός τους ήταν να αποδείξουν πως τα σχήματα των κυβόλιθων δεν έχουν μεγάλη επίδραση στην κατανομή του φορτίου, σε αντίθεση με τα κατασκευαστικά μοτίβα και ιδιαίτερα ότι το μοτίβο “herringbone bond” εμφανίζει τη μικρότερη παραμόρφωση.

Ειδικότερα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.9, διεξήχθη δοκιμή φόρτισης και αξιολογήθηκαν τρία κατασκευαστικά μοτίβα: stretcher (μοτίβο), basket weave (μοτίβο 2) και herringbone bond (μοτίβο 3).



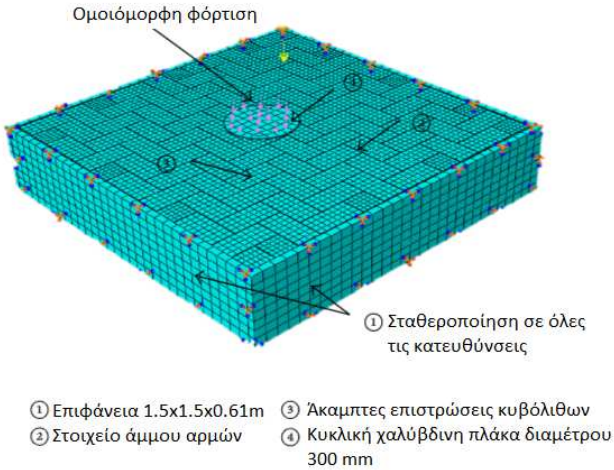
Εικόνα 5.9: Δοκιμή δυναμικής εργαστηριακής φόρτισης

Ένα ελαφρύ παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Light Falling Weight Deflectometer – LFWD) χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς εκτροπής φορτίου. Συγκεκριμένα, ένα φορτίο 9000 N εφαρμόστηκε σε μια πλάκα ακτίνας 150 mm στο κέντρο της περιοχής δοκιμής. Για να προσδιοριστεί το εύρος της παραμόρφωσης που προκαλείται από τη φόρτιση, εγκαταστάθηκαν αισθητήρες μετατόπισης. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της συμπεριφοράς του φορτίου και της παραμόρφωσης που αυτό δημιουργεί. Ο Πίνακας 5.8 συνοψίζει τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση και την κανονικοποιημένη τιμή που υπολογίστηκαν με δεδομένα φορτίου-παραμόρφωσης, τα οποία ελήφθησαν από τη δοκιμή δυναμικής φόρτισης.

Πίνακας 5.8: Δεδομένα παραμόρφωσης τριών διαφορετικών μοτίβων

		Φορτίο (N)	**D_0**	**D_1**	**D_2**	**D_3**	**D_4**
Stretcher bond (μοτίβο 1)	Μέση τιμή	9146.4	1.172	0.436	0.124	0.511	0.140
	Τυπική απόκλιση	91.6	0.023	0.061	0.014	0.045	0.021
	Κανονικοποίηση στα 9000 N	9000.0	1.153	0.429	0.122	0.503	0.138
Basket weave (μοτίβο 2)	Μέση τιμή	8729.9	1.026	0.487	0.103	0.573	0.154
	Τυπική απόκλιση	78.8	0.034	0.018	0.016	0.044	0.032
	Κανονικοποίηση στα 9000 N	9000.0	1.058	0.502	0.106	0.591	0.159
Herringbone bond (μοτίβο 3)	Μέση τιμή	9319.3	0.918	0.567	0.135	0.437	0.144
	Τυπική απόκλιση	64.4	0.049	0.051	0.008	0.042	0.025
	Κανονικοποίηση στα 9000 N	9000.0	0.886	0.547	0.131	0.422	0.139

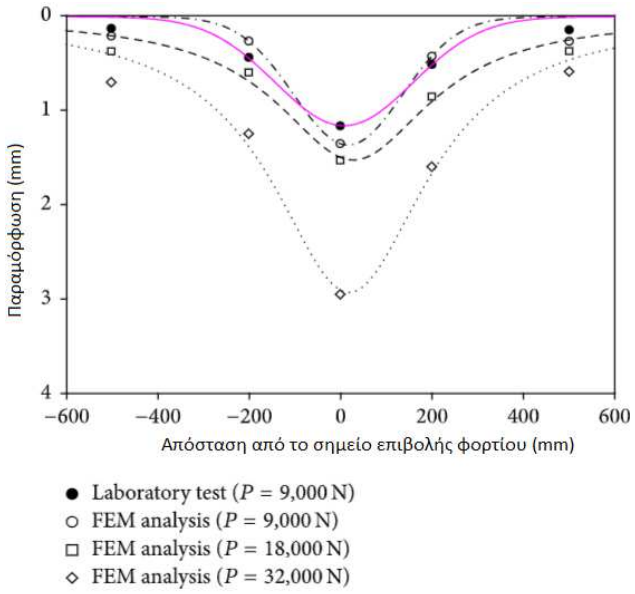
Έπειτα, έγινε τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων του οδοστρώματος με κυβόλιθους σκυροδέματος. Η Εικόνα 5.10 δείχνει τη διαμόρφωση του συστήματος για τη δομική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη τρία στρώματα: την επιφανειακή στρώση με τους κυβόλιθους, το στρώμα άμμου κλινοστρωμνής και τη στρώση βάσης, σε μια περιοχή 1.5 m x 1.5 m. Οι κυβόλιθοι συνδέθηκαν με ένα στοιχείο άμμου και το πλάτος των αρμών σταθεροποιήθηκε στα 3 mm. Όλα τα στοιχεία μοντελοποιήθηκαν ως στερεά – παραμορφώσιμα, με ομοιογενή και ελαστική ιδιότητα. Το μοντέλο, στη συνέχεια, υποβλήθηκε σε γραμμική ανάλυση στατικής φόρτισης. Η φόρτιση των κυβόλιθων εφαρμόστηκε ομοιόμορφα μέσω κυκλικών χαλύβδινων πλακών διαμέτρου 300 mm. Σημειώνεται πως το υπέδαφος ορίστηκε ως ένα σύνολο στοιχείων ελατηρίου, συντελεστή k.



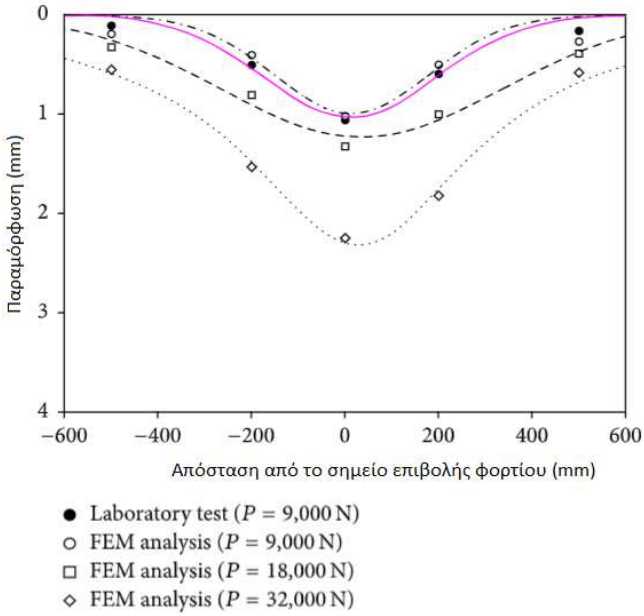
Εικόνα 5.10: 3D μοντέλο δομικής ανάλυσης

Τρία κατασκευαστικά μοτίβα προσομοιώθηκαν και το μέτρο ελαστικότητας της βάσης αξιολογήθηκε για τέσσερις διαφορετικές τιμές: 100 MPa, 300 MPa, 500 MPa και 740 MPa. Επιπλέον, η αντίδραση της στρώσης έδρασης εξετάστηκε σε τρία επίπεδα: υψηλό (300 pci), μεσαίο (200 pci) και χαμηλό (100 pci). Στο μοντέλο, επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά πάχη μπλοκ, 60 mm, 80 mm, 100 mm και το βάθος της στρώσης βάσης κυμάνθηκε από 150 mm έως 300 mm.

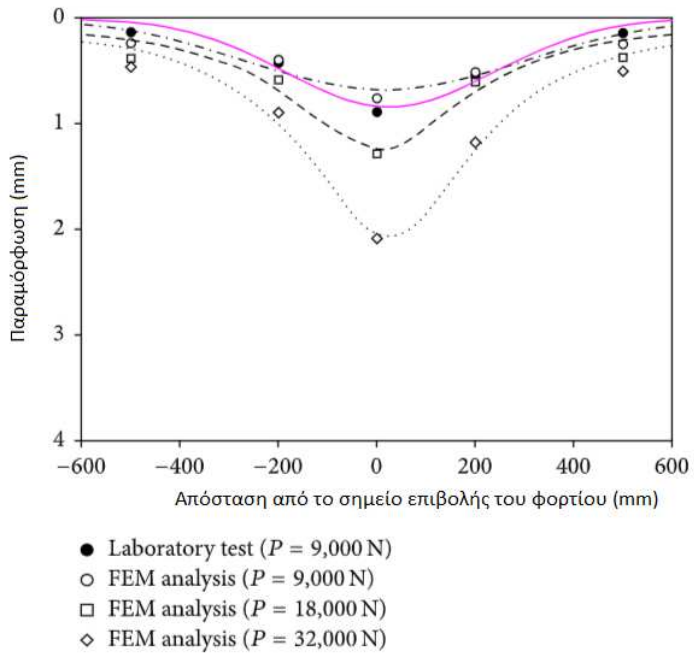
Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών και της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων παρουσίασαν σημαντικές ομοιότητες (βλ. Εικόνα 5.11, Εικόνα 5.12, Εικόνα 5.13).



Εικόνα 5.11: Σύγκριση παραμόρφωσης από ανάλυση και εργαστηριακή δοκιμή (μοτίβο 1)



Εικόνα 5.12: Σύγκριση παραμόρφωσης από ανάλυση και εργαστηριακή δοκιμή (μοτίβο 2)



Εικόνα 5.13: Σύγκριση παραμόρφωσης από ανάλυση και εργαστηριακή δοκιμή (μοτίβο 3)

Τέλος, εφαρμόστηκε μια πολλαπλή ανάλυση παλινδρόμησης, η οποία μειώνει αισθητά τον χρόνο σχεδιασμού. Η μέγιστη παραμόρφωση (σε mm) θεωρήθηκε εξαρτημένη μεταβλητή και υπολογίστηκε σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$D_0 = 3.847 - 0.201SF - 0.002R_0 + 5.356e^{-5}P_0 - 0.073p_h - 0.02h_1 - 0.005h_2 - 0.001E_b$$

(5)

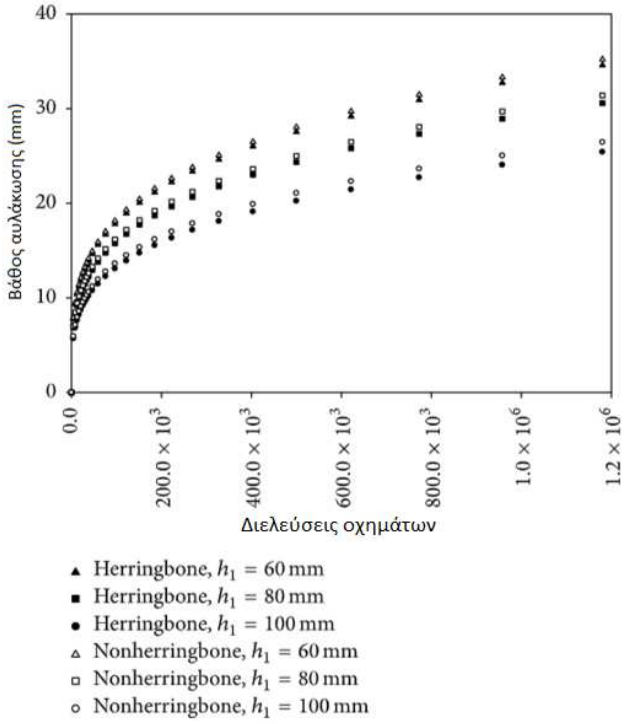
όπου SF ο συντελεστής σχήματος, R_0 η διάμετρος της περιοχής επαφής (mm), P_0 το εφαρμοσμένο φορτίο (N), h_1 το πάχος των κυβόλιθων (mm), h_2 το πάχος της στρώσης βάσης (mm), p_h: p_h = 1 όταν εξετάζεται το μοτίβο 3 και p_h = 0 στις υπόλοιπες περιπτώσεις και E_b το μέτρο ελαστικότητας της βάσης (MPa).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση παλινδρόμησης, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του βάθους αυλάκωσης, σύμφωνα με το μοντέλο πρόβλεψης του Sun (Sun, 1996) και την ακόλουθη εξίσωση:

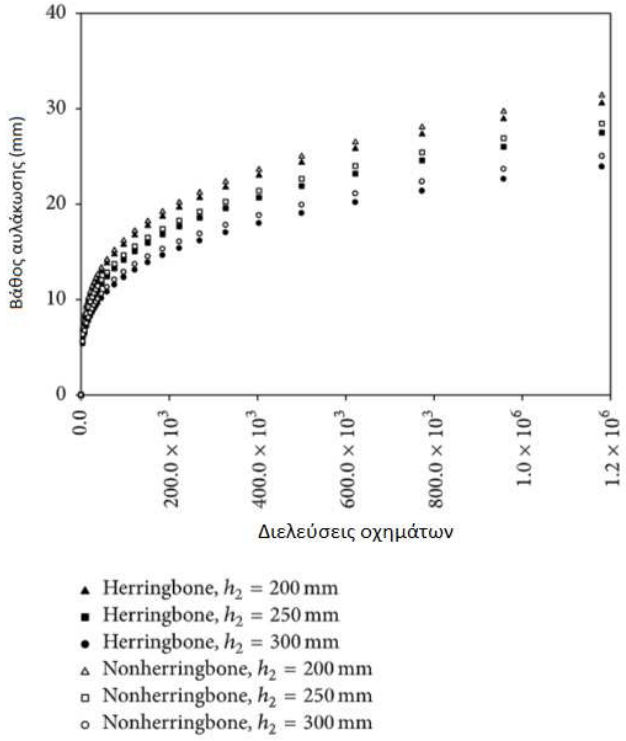
$$RD = 961 * C * D_0 * p_0^{-0.16} * r_0^{-2.21} * e^{(-0.24D_0 - 0.11h)} * N^{0.265}, \qquad (6)$$

όπου RD είναι το βάθος αυλάκωσης (mm), D_0 η ελαστική παραμόρφωση (mm), p_0 η πίεση φορτίου (MPa), r_0 η ακτίνα των περιοχών φόρτισης (cm), h το πάχος των κυβόλιθων (cm), N ο αριθμός των επαναλήψεων φορτίου και C ο συντελεστής διαμόρφωσης του τροχού. C=1 για μονό τροχό και C= 1.17, 1.25 και 1.34 για διπλούς τροχούς με h= 8, 10 και 12 cm, αντίστοιχα.

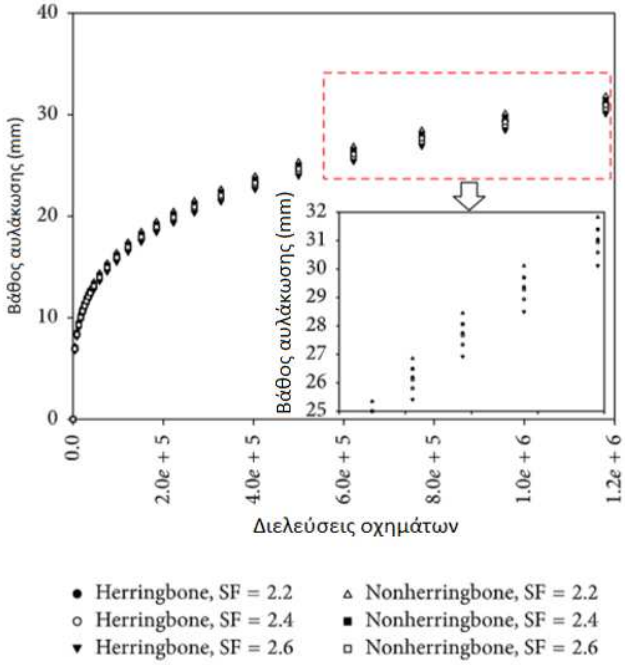
Προκειμένου, να εκτιμηθεί η αυλάκωση με βάση διαφορετικές μεταβλητές, εξετάστηκαν πάχη κυβόλιθων με τιμές 60 mm, 80 mm και 100 mm, πάχη στρώσης βάσης με τιμές 200 mm, 250 mm και 300 mm και συντελεστές σχήματος SF με τιμές 2.2, 2.4 και 2.6. (βλ. Εικόνα 5.14, Εικόνα 5.15, Εικόνα 5.16).



Εικόνα 5.14: Διαφορά στο βάθος αυλάκωσης ανάλογα με το πάχος του κυβόλιθου



Εικόνα 5.15: Διαφορά στο βάθος αυλάκωσης ανάλογα με το πάχος της στρώσης βάσης



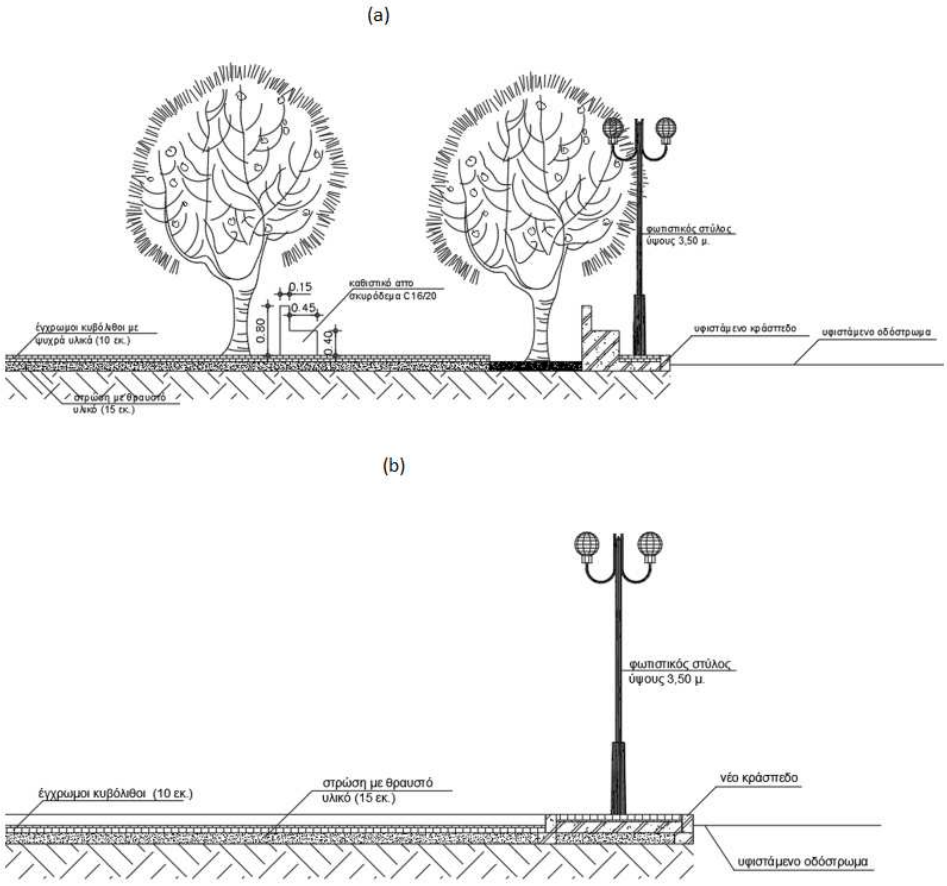
Εικόνα 5.16: Διαφορά στο βάθος αυλάκωσης ανάλογα με το σχήμα των κυβόλιθων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με βάση την ανάλυση ήταν πως κατά τη διάρκεια της πρώιμης ηλικίας, το βάθος αυλάκωσης αυξήθηκε απότομα για όλες τις μεταβλητές. Ακόμα παρατηρήθηκε πως η αυλάκωση άρχισε να διαφέρει σε μεγάλο βαθμό όσο αυξανόταν ο κυκλοφοριακός φόρτος. Επιπρόσθετα, καθώς το πάχος του κυβόλιθου μεταβλήθηκε από 60 mm σε 100 mm, το βάθος αυλάκωσης μειώθηκε κατά 25% (βλ. Εικόνα 5.14). Για σταθερό πάχος κυβόλιθων 80 mm, καθώς το πάχος της βάσης αυξήθηκε από 200 mm σε 300 mm, το βάθος αυλάκωσης μειώθηκε κατά 22% (βλ. Εικόνα 5.15). Η αύξηση του βάθους της επιφανειακής στρώσης κατά 20 mm, έχει ανάλογη επίδραση στην αυλάκωση με την αύξηση του πάχους της στρώσης βάσης από 50 mm σε 100 mm. Επιπρόσθετα, διαπιστώθηκε ότι το σχήμα των κυβόλιθων δεν έχει σημαντικές επιπτώσεις στην κατανομή του φορτίου (βλ. Εικόνα 5.16). Τέλος, η τοποθέτηση σε μοτίβο κατασκευής 3 (herringbone bond) αποδείχθηκε ότι μειώνει την αυλάκωση έως και 2 mm. Ωστόσο, είναι ασαφές το συμπέρασμα πως το κατασκευαστικό μοτίβο είναι ο μόνος καθοριστικός παράγοντας στην επίδραση της κατανομής φορτίου. Επειδή το πλακόστρωτο οδόστρωμα με κυβόλιθους σκυροδέματος λειτουργεί ως ένας πολύπλοκος μηχανισμός αλληλοσύνδεσης, με οριζόντιες, κάθετες και περιστροφικές κινήσεις, φαίνεται παράλογο να αξιολογηθεί η απόδοσή του διαχωρίζοντας πολύ αυστηρά τα κατασκευαστικά μοτίβα και τα σχήματα των μπλοκ.

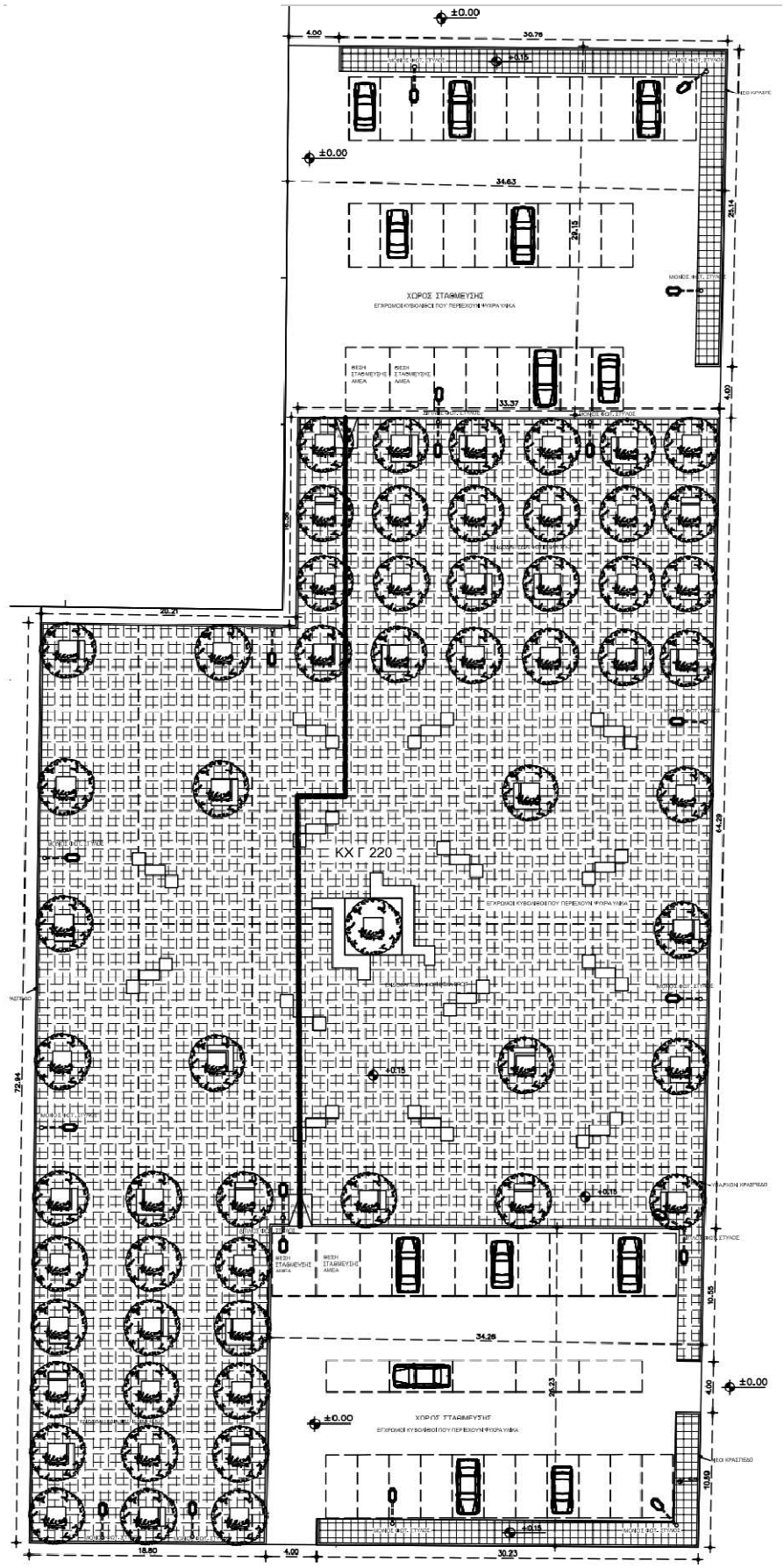
6. Μελέτη εφαρμογής

6.1 Περιγραφή έργου

Κατά τη διάρκεια του έτους 2022 πραγματοποιήθηκε έργο Ανάπλασης Κοινόχρηστου Χώρου, σε επαρχιακή πόλη, στο οποίο υπήρχε η δυνατότητα πρόσβασης στα στοιχεία. Το εν λόγω έργο αφορά, συγκεκριμένα, την κατασκευή χώρου στάθμευσης και πλατείας. Η επίστρωση του χώρου στάθμευσης έγινε με κυβόλιθους σκυροδέματος βιομηχανικού τύπου γκρι-μολυβί και κόκκινο-λευκό για το περίγραμμα των θέσεων, ενώ η επίστρωση της πλατείας έγινε με κυβόλιθους σκυροδέματος που περιέχουν ψυχρά υλικά. Οι τομές και η κάτοψη του έργου παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.1 και στην Εικόνα 6.2, αντίστοιχα.

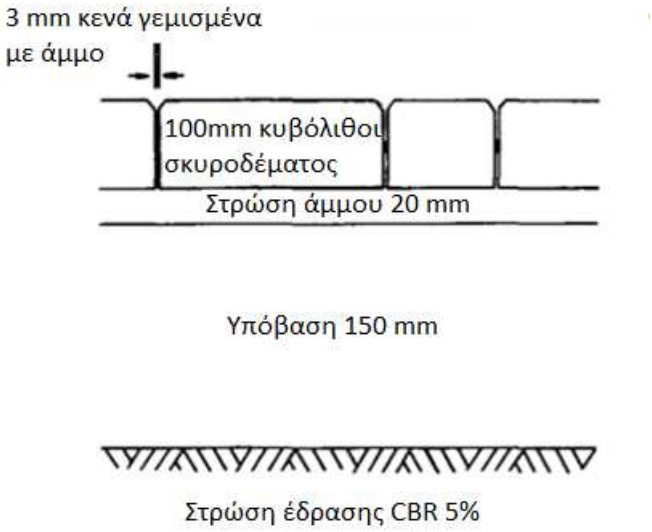


Εικόνα 6.1: (a) Τμήμα τομής πλατείας, (b) Τμήμα τομής χώρου στάθμευσης



Εικόνα 6.2: Κάτοψη έργου

Στην Εικόνα 6.3 δίνεται αναλυτικά η διατομή του πλακόστρωτου οδοστρώματος και τα πάχη της κάθε στρώσης.



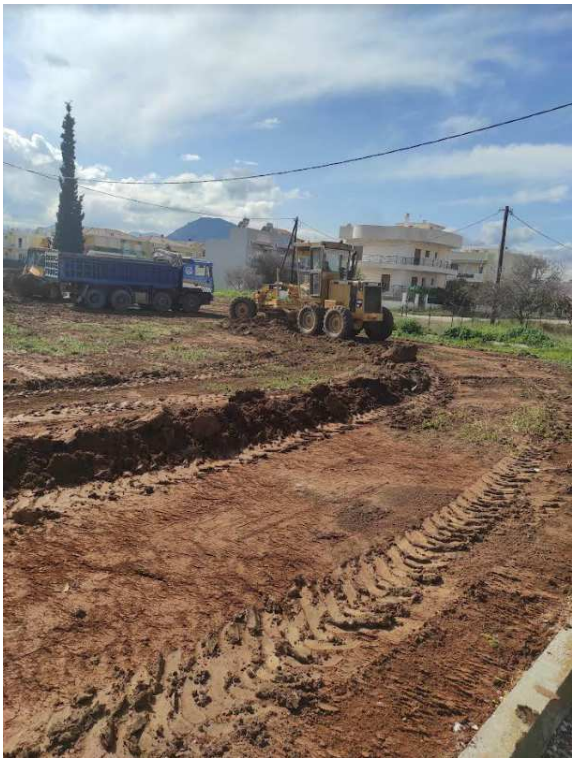
Εικόνα 6.3: Διατομή πλακόστρωτου οδοστρώματος

Η υπόψη διατομή πλακόστρωτου (με κυβόλιθους από σκυρόδεμα) οδοστρώματος αξιοποιείται, στη συνέχεια, για την πραγματοποίηση αναλύσεων που σχετίζονται με τη φέρουσα ικανότητά του.

6.2 Στάδια κατασκευής οδοστρώματος έργου

Για την πραγματοποίηση του έργου ακολουθήθηκαν όλα τα στάδια κατασκευής ενός οδοστρώματος με κυβόλιθους. Αρχικά, έγινε εκθάμνωση εδάφους με την αποκόμιση και συσσώρευση των προϊόντων στις θέσεις φόρτωσης, σύμφωνα με την μελέτη και την ΕΤΕΠ 02-01-01-00 "Καθαρισμός, εκχέρσωση και κατεδαφίσεις στη ζώνη εκτέλεσης των εργασιών" (ΕΤΕΠ 02-01-01-00, 2009).

Αργότερα, πραγματοποιήθηκαν γενικές εκσκαφές, όπου το έδαφος ήταν γαιώδες – ημιβραχώδες, με χρήση μηχανικών μέσων (βλ. Εικόνα 6.4) , σύμφωνα με την ΕΤΕΠ 02-03-00-00 "Γενικές εκσκαφές κτιριακών έργων" (ΕΤΕΠ 02-03-00-00, 2009).



Εικόνα 6.4: Διαδικασία εκσκαφής (από προσωπικό αρχείο)

Ακόμα, στα σημεία που επρόκειτο να τοποθετηθούν τα κράσπεδα έγιναν εκσκαφές θεμελίων και τάφρων, με στόχο την σωστή οριοθέτηση του έργου. Η διαδικασία ήταν σύμφωνη με την ΕΤΕΠ 02-04-00-00 "Εκσκαφές θεμελίων τεχνικών έργων" (ΕΤΕΠ 02-04-00-00, 2009).

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας των εκσκαφών, ακολούθησε η εγκατάσταση των υπόγειων αποστραγγιστικών έργων αλλά και των υποδομών φωτισμού, συστήματος άρδευσης και ύδρευσης.

Η πραγματοποίηση της εγκατάστασης συστημάτων συγκράτησης άκρων, έγινε με την τοποθέτηση προκατασκευασμένων κρασπέδων από σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25, διατομής πλάτους 0.15 m και ύψους 0.25 έως 0.30 m. Η στερέωσή τους έγινε με κατασκευή, πίσω από αυτά, συνεχούς πρίσματος διατομής 0.10 x 0.20 m από σκυρόδεμα κατηγορίας C8/10 και ο εγκιβωτισμός/αρμολόγησή τους με τσιμεντοκτονία αναλογίας 650 kg τσιμέντου ανά m^3 άμμου. Η εκτέλεση των εργασιών έγινε σύμφωνα με την ΕΤΕΠ 05-02-01-00 "Κράσπεδα, ρείθρα και τάφροι ομβρίων καταστρώματος οδών επενδυμένες με σκυρόδεμα" (ΕΤΕΠ 05-02-01-00, 2017).

Στο επόμενο στάδιο, πραγματοποιήθηκε κατασκευή της στρώσης εξυγίανσης/υπόβασης (βλ. Εικόνα 6.5) από θραυστά υλικά προελεύσεως λατομείου (αδρανή οδοστρωσίας, λιθοσυντρίματα, σκύρα κλπ.). Η διάστρωση έγινε σε

μεταβλητό πάχος, έως 15 cm και στη συνέχεια ακολούθησε η διαβροχή και η συμπύκνωση του υλικού με δονητικές πλάκες.

Εικόνα 6.5: Επίστρωση υλικών στρώσης εξυγίανσης (από προσωπικό αρχείο)

Σε αυτό το στάδιο δόθηκαν και οι κατάλληλες κλίσεις προς τη διεύθυνση απορροής ομβρίων.

Πάνω από την υπόβαση, διαστρώθηκε άμμος, το συνολικό πάχος της οποίας μετά τη συμπύκνωση, ήταν 2 cm. Έπειτα, ακολούθησε η τοποθέτηση των κυβόλιθων διαστάσεων 100 mm x 200 mm x 100 mm. Για την πλατεία χρησιμοποιήθηκαν έγχρωμοι κυβόλιθοι σκυροδέματος περιέχοντες ψυχρά υλικά και για τον χώρο στάθμευσης τυπικοί έγχρωμοι κυβόλιθοι σκυροδέματος.

Η απαιτούμενη υψηλή ανακλαστικότητα των κυβόλιθων με ψυχρά υλικά, προσδόθηκε με ενσωμάτωση ψυχρών υλικών στην επιφανειακή τους στοιβάδα, και όχι με επίστρωση, επίπαση και επάλειψη αυτών σε συμβατικής κατασκευής κυβόλιθους.

Οι επιδόσεις των ψυχρών κυβόλιθων εξαρτώνται από την ανακλαστικότητα της επιφάνειάς τους στην ηλιακή ακτινοβολία (Solar Reflectance, SR) και πληρούν τις ακόλουθες ελάχιστες απαιτήσεις (βλ. Πίνακας 6.1).

Πίνακας 6.1: Ελάχιστες επιδόσεις λευκών και έγχρωμων κυβόλιθων με ψυχρά υλικά

Κατηγοριοποίηση προϊόντων	Αρχικός συντελεστής ανακλαστικότητας στην ηλιακή ακτινοβολία (SR)	Αρχικός συντελεστής ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα (SRnir)	Αρχικός συντελεστής εκπομπής στο υπέρυθρο (Infrared Emittance)
ΟΜΑΔΑ 1 αποχρώσεις ωχράς, κίτρινου, πορτοκαλί	SR >= 0.50	>= 0.50	>= 0.85
ΟΜΑΔΑ 2 αποχρώσεις καφέ, ωχρά, κίτρινο, κεραμιδί, μπλε, πράσινο, γκρι	SR >= 0.40	>= 0.50	>= 0.85

Οι κυβόλιθοι σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν, όσον αφορά τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά και τις ανοχές διαστάσεων, πληρούν τις απαιτήσεις του Πρότυπου ΕΛΟΤ ΕΝ 1338 (EN 1338:2003, 2003).

Μετά την τοποθέτηση των κυβόλιθων, ακολούθησε η συμπύκνωσή τους με συμπιεστή δονητικής πλάκας και η κάλυψη των μεταξύ τους αρμών (3 mm) με άμμο.

Η τελική μορφή του έργου παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.6 και στην Εικόνα 6.7.

Εικόνα 6.6: Τελική μορφή οδοστρώματος έργου (από προσωπικό αρχείο)

Εικόνα 6.7: Τελική μορφή οδοστρώματος έργου (από προσωπικό αρχείο)

6.3 Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας

Η εκτίμηση της διάρκειας ζωής ενός οδοστρώματος αποτελεί ένα ζήτημα ύψιστης σημασίας κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού. Για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας της διατομής του οδοστρώματος (βλ. Εικόνα 6.3), χρησιμοποιήθηκε ο νόμος αστοχίας [$N = (21600/\varepsilon_{z3})^{3.571}$] και τα χαρακτηριστικά του φορτίου τυπικού άξονα (W = 40 kN, r = 160 mm, σ = 0.5 MPa) του κεφαλαίου 5.1.

Τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις εξής τρεις παραδοχές:

- E_3 = 10 x CBR = 10 x 5 = 50 MPa
- E_2 = 3 x E_3 = 3 x 50 = 150 MPa
- E_1 = 3000 MPa, όπου E_1 το σύνθετο μέτρο ελαστικότητας της στρώσης των κυβόλιθων και της άμμου αρμών/κλινοστρωμνής, το οποίο προέκυψε από το γινόμενο k_1 x E_2. Η τιμή του k_1 θεωρήθηκε ίση με 20, ύστερα από βιβλιογραφική ανασκόπηση και σύμφωνα με τους Πίνακες του Παραρτήματος της παρούσας εργασίας που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του N.

Για τον υπολογισμό των επιτρεπόμενων διελεύσεων, η τάση που εφαρμόζεται στη στρώση έδρασης από ένα φορτίο τυπικού άξονα, $\sigma_{z2} - \sigma_{r3}$, μετατράπηκε σε παραμόρφωση ε_{z3}, μέσω του τύπου:

$$\varepsilon_{z3} = \sigma(\sigma_{z2} - \sigma_{r3}) / \mathrm{E}_3 \tag{7}$$

Επίσης, η τιμή του $\sigma_{z2} - \sigma_{r3}$ προέκυψε από γραμμική παρεμβολή της σειράς πινάκων του Jones A., οι οποίοι δίνουν τις τάσεις σε ελαστικά συστήματα τριών στρώσεων (Jones A., 1962) (βλ. Παράρτημα).

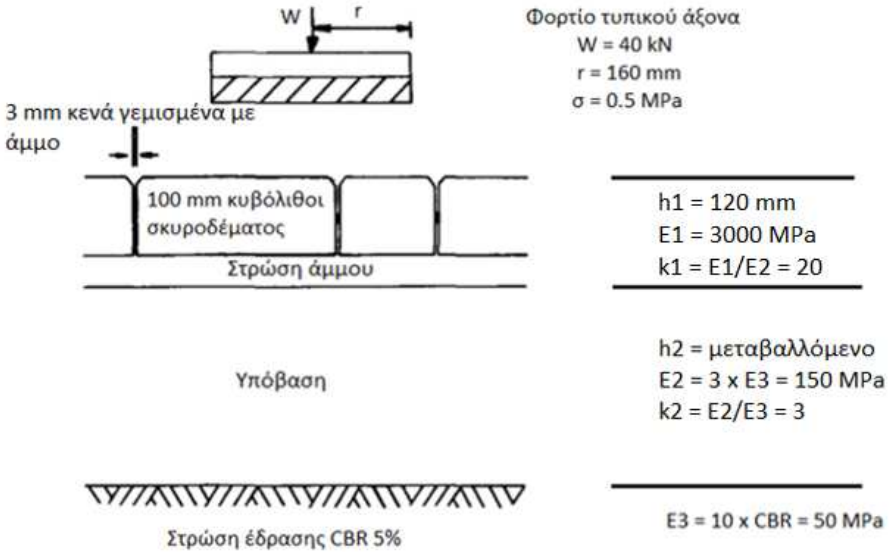
Επομένως, για H= h_1/h_2 = 120/150 = 0.8, k_1= 20, k_2= 3 και α= r/h_2 = 160/150 = 1.1, προκύπτει **επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων N = 29670**.

6.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση που θα έχει στη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, η μεταβολή του πάχους της στρώσης υπόβασης (h_2) και του CBR (%) της στρώσης έδρασης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, αλλάζοντας, ξεχωριστά, την τιμή των δύο παραμέτρων.

<u>Μελέτη ευαισθησίας με μεταβαλλόμενο h_2</u>

Η Εικόνα 6.8 παρουσιάζει τη διατομή και τα χαρακτηριστικά τα οποία παραμένουν σταθερά.



Εικόνα 6.8: Σταθερά χαρακτηριστικά διατομής για μεταβαλλόμενο h_2

Ο Πίνακας 6.2 συνοψίζει τα βήματα για την εκτίμηση της σχεδιαστικής διάρκειας ζωής του οδοστρώματος, αυξανόμενου του πάχους h_2. Τιμές μικρότερες των 150 mm δεν εξετάστηκαν, διότι θεωρούνται ακατάλληλες για βάθος υπόβασης πλακόστρωτου οδοστρώματος.

Πίνακας 6.2: Βήματα εκτίμησης διάρκειας ζωής για μεταβαλλόμενο h_2

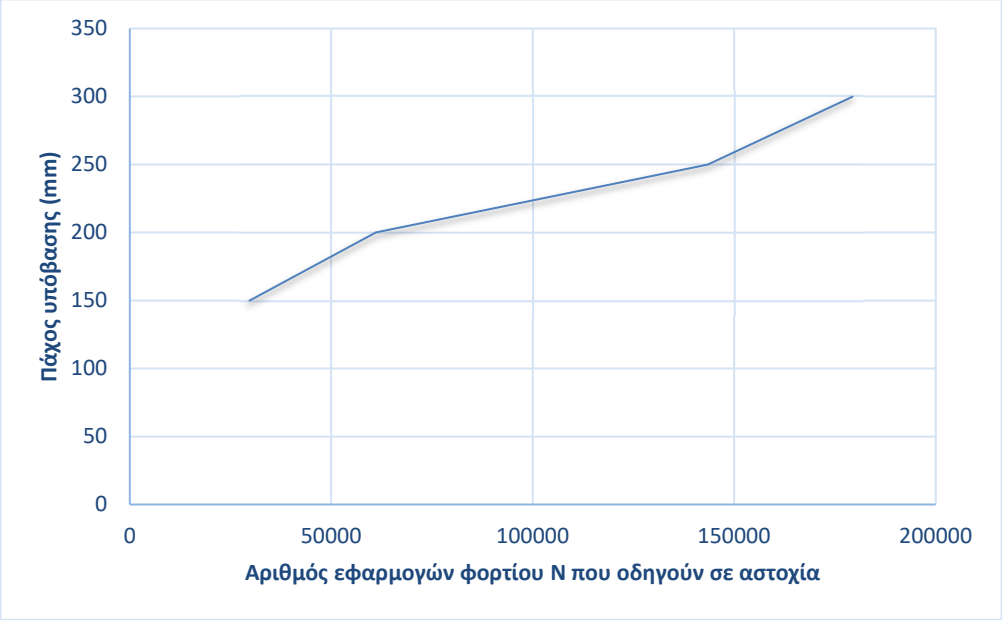
h_2	$H = h_1/h_2$	$\alpha = r/h_2$	$(\sigma_{z2}-\sigma_{r3})$*	ε_{z3} x 10^6**	N***
150	0,80	1,1	0,1208	1208	**29670**
200	0,60	0,8	0,0987	987	**61060**
250	0,48	0,6	0,0777	777	**143465**
300	0,40	0,5	0,0730	730	**179317**

*Από γραμμική παρεμβολή των αποτελεσμάτων του Jones

**$\varepsilon_{z3} = \sigma(\sigma_{z2}-\sigma_{r3})/E_3$ μm

***Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής οδοστρώματος: $N = (21600/\varepsilon_{z3})^{3.571}$ τυπικοί άξονες

Τέλος, η Εικόνα 6.9 παρουσιάζει γραφικά τη μεταβολή στη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, αυξανόμενου του βάθους υπόβασης, με σταθερό CBR 5%.

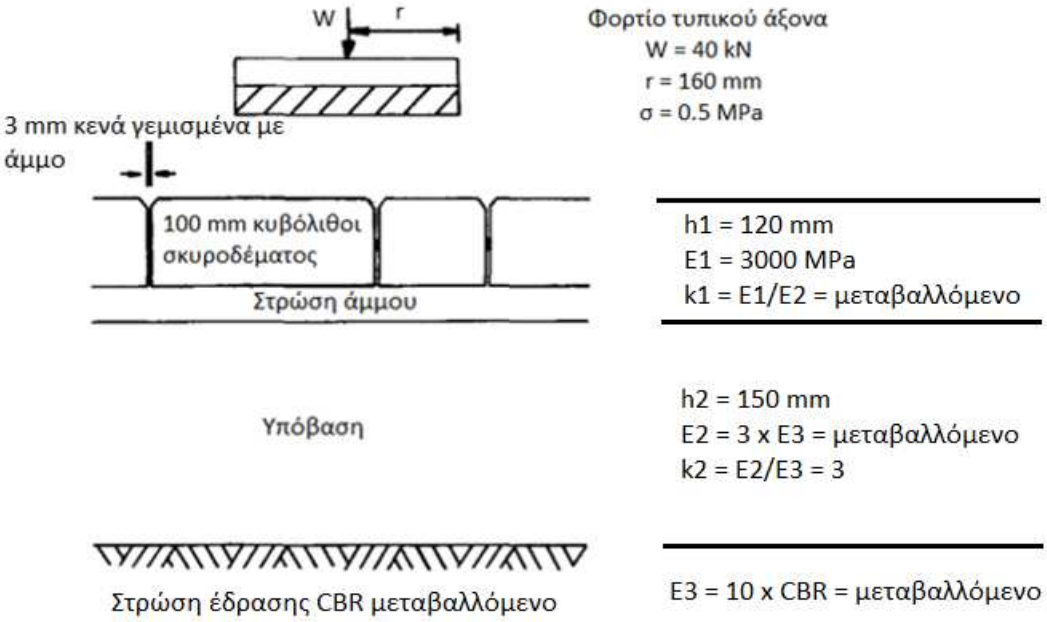


Εικόνα 6.9: Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής αυξανόμενου του βάθους υπόβασης

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει πως όσο το πάχος της στρώσης υπόβασης αυξάνεται, το οδόστρωμα επιτρέπει μεγαλύτερο αριθμό εφαρμογών φορτίου μέχρι να φτάσει σε αστοχία. Μάλιστα, παρατηρείται πως ο μέσος ρυθμός μεταβολής είναι 0.0012 (ή 0.12%). Ακόμα, η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση (135%) παρατηρείται για μεταβολή από 200 mm σε 250 mm, ενώ για περαιτέρω αύξηση (από 250 mm σε 300 mm), το ποσοστό αυτό μειώνεται σημαντικά (25%).

Μελέτη ευαισθησίας με μεταβαλλόμενο CBR(%)

Η Εικόνα 6.10 παρουσιάζει τη διατομή και τα χαρακτηριστικά τα οποία παραμένουν σταθερά.



Εικόνα 6.10: Σταθερά χαρακτηριστικά διατομής για μεταβαλλόμενο CBR

Για τη συγκεκριμένη ανάλυση το E_1 θεωρήθηκε σταθερό και ίσο με 3000 MPa, δηλαδή όσο υπολογίστηκε για την κατασκευασμένη διατομή (με $k_1 = 20$).

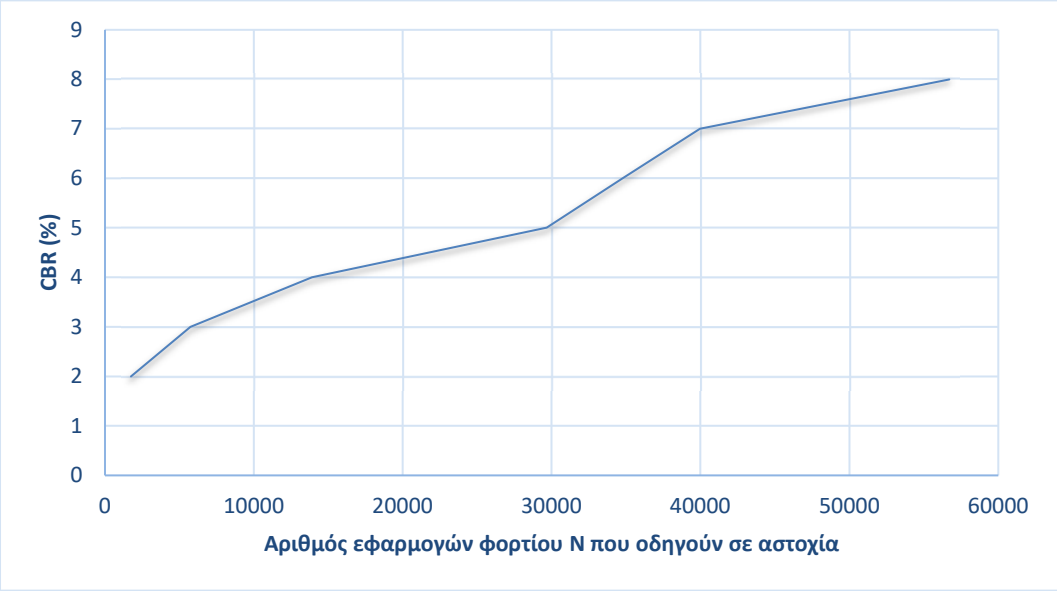
Ο Πίνακας 6.3 συνοψίζει τα βήματα για την εκτίμηση της σχεδιαστικής διάρκειας ζωής του οδοστρώματος, με μεταβαλλόμενο CBR.

Πίνακας 6.3: Βήματα εκτίμησης διάρκειας ζωής για μεταβαλλόμενο CBR

CBR (%)	E_3 (MPa)	E_2 (MPa)	k_1 (E_1/E_2)	k_2 (E_2/E_3)	$(\sigma_{z2}-\sigma_{r3})$*	ε_{z3} x 10^6**	N***
2	20	60	50	3	0,10693	2673	**1739**
3	30	90	33	3	0,11479	1913	**5744**
4	40	120	25	3	0,11943	1493	**13927**
5	50	150	20	3	0,12080	1208	**29670**
6	60	180	17	3	0,13867	1156	**34758**
7	70	210	14	3	0,15557	1111	**39972**
8	80	240	13	3	0,16121	1008	**56709**

*Από γραμμική παρεμβολή των αποτελεσμάτων του Jones
**$\varepsilon_{z3} = \sigma(\sigma_{z2}-\sigma_{r3})/E_3$ μm
***Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής οδοστρώματος: $N = (21600/\varepsilon_{z3})^{3.571}$ τυπικοί άξονες

Τέλος, η Εικόνα 6.11 παρουσιάζει γραφικά τη μεταβολή στη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, αυξανόμενου του CBR.



Εικόνα 6.11: Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής αυξανόμενου του CBR (%)

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι αύξηση των τιμών του CBR κατά 1% προκαλεί αύξηση του αριθμού των εφαρμογών φορτίου που οδηγούν σε αστοχία, με έναν μέσο ρυθμό μεταβολής ίσο με 0.0001 (ή 0.01%). Η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση (230%) παρατηρείται για μεταβολή του CBR από 2% σε 3%. Παρά ταύτα σε αυτό το εύρος τιμών οι επιτρεπόμενες διελεύσεις είναι πολύ χαμηλές, άρα η διασφάλιση ενός CBR έδρασης μεγαλύτερο από 3% κρίνεται απαραίτητη για

την κατασκευή του οδοστρώματος. Σημαντικό, όμως, είναι να ληφθεί υπόψη πως όταν το CBR ξεπεράσει την τιμή 5% η ποσοστιαία αύξηση των αξονικών διελεύσεων γίνεται κατά μέσο όρο 25%.

Εν κατακλείδι, φαίνεται ότι η αρχική διατομή με πάχος υπόβασης h_2 150 mm και CBR στρώσης έδρασης 5% είναι αρκετά ικανοποιητική, δεδομένου ότι η προβλεπόμενη χρήση της είναι για στάθμευση οχημάτων και όχι για καθημερινή διέλευση μεγάλων φορτίων. Παρ' όλα αυτά, εάν ήταν επιθυμητή η βελτίωση της τιμής του N, θα ήταν προτιμότερη η αύξηση του h_2, διότι ο ρυθμός μεταβολής που προέκυψε από τη συγκεκριμένη ανάλυση (0,12%) είναι μεγαλύτερος από αυτόν που δίνει η αύξηση του CBR (0,01%). Ο βέλτιστος συνδυασμός αύξησης του h_2 και του CBR αναμφίβολα θα οδηγούσε σε μεγιστοποίηση της φέρουσας ικανότητας της υπό διερεύνησης διατομής.

7. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η ενδελεχής ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, στοιχειοθετεί ότι η πλακόστρωση με κυβόλιθους σκυροδέματος (CBP) αποτελεί μία ενδεδειγμένη λύση για την κατασκευή οδοστρωμάτων σε περιοχές όπου δεν προβλέπεται η ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων και οι συμβατικοί τύποι κρίνονται ακατάλληλοι, λόγω λειτουργικών και περιβαλλοντικών περιορισμών. Τα οφέλη του συγκεκριμένου τύπου οδοστρώματος γίνονται αντιληπτά σε όλα τα στάδια, από την κατασκευή έως και τη συντήρηση και συνοψίζονται παρακάτω:

1. **Ανθεκτικότητα:** Η απλή βιομηχανική παραγωγή των κυβόλιθων χωρίς μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, μικρό κόστος και απλές πρώτες ύλες εξασφαλίζει τη διαθεσιμότητά τους σε σταθερή ποιότητα και υψηλή ακρίβεια διαστάσεων. Τα μπλοκ όταν κατασκευάζονται σύμφωνα με τον σχεδιασμό και τις προδιαγραφές παρέχουν ανθεκτικότητα και μάλιστα εφόσον εξασφαλίζεται η αλληλοσύνδεσή τους, μπορούν να διαρκέσουν για περίπου 20 χρόνια. Η σύνδεση γίνεται μέσω μιας συνεχούς δομής άμμου αρμών προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η περιστροφική τους κίνηση. Ως εκ τούτου το CBP λειτουργεί ως ένα ενιαίο σύστημα, στο οποίο λαμβάνονται υπόψη όλα τα στρώματα, το επιφανειακό, η άμμος κλινοστρωμνής και τα υποκείμενα. Επομένως, χάρη σε αυτή τη σύνθετη δράση, μπορεί να δεχτεί ακόμα και μεγάλα σημειακά φορτία, κάτι που καθιστά κατάλληλη την εφαρμογή του τόσο σε πεζόδρομους όσο και σε περιοχές με διακίνηση οχημάτων (π.χ. αστικές οδούς).
2. **Εύκολη και γρήγορη κατασκευή:** Η κατασκευή οδοστρωμάτων με κυβόλιθους σκυροδέματος είναι σχετικά γρήγορη. Η εγκατάσταση των κυβόλιθων είναι εύκολη και συνήθως δεν χρειάζεται ειδικός εξοπλισμός για την τοποθέτησή τους. Επίσης, τα μπλοκ δεν απαιτούν σκλήρυνση, με αποτέλεσμα το οδόστρωμα να χρησιμοποιείται αμέσως μετά την αποπεράτωση των εργασιών.
3. **Αντοχή σε όλες τις καιρικές συνθήκες:** Οι επιστρώσεις των κυβόλιθων παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Ειδικότερα, δεν παραμορφώνονται από έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας, αντίθετα δημιουργούν μια άκρως αντιολισθητική επιφάνεια και έχουν καλή μηχανική αντοχή. Επιπλέον, επιτρέπουν την εύκολη αποστράγγιση των νερών της βροχής λόγω του τρόπου κατασκευής τους αλλά και του υποστρώματος της

άμμου. Η ρηγμάτωση, που είναι ένα σύνηθες φαινόμενο στα ασφαλτικά οδοστρώματα, δεν αποτελεί πρόβλημα στην περίπτωση των αλληλοσυνδεόμενων κυβόλιθων, χάρις στους αρμούς που παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Σε ψυχρότερα κλίματα, μάλιστα, όπου παρουσιάζονται έντονες χιονοπτώσεις, τα οδοστρώματα από κυβόλιθους σκυροδέματος είναι η ιδανική επιλογή. Οι επιστρώσεις σκυροδέματος αντιστέκονται στη φθορά των κύκλων ψύξης και απόψυξης, σε αντίθεση με τα συνηθισμένα ασφαλτικά οδοστρώματα. Ακόμα, τα προϊόντα αποπάγωσης, όπως το χλωριούχο ασβέστιο ή το αλάτι, δεν βλάπτουν τους κυβόλιθους, και τα συστήματα τήξης του χιονιού λειτουργούν ικανοποιητικά απομακρύνοντας το χιόνι και μειώνοντας τον κίνδυνο ολίσθησης.

4. **Εύκολη συντήρηση:** Ένα βασικό πλεονέκτημα των οδοστρωμάτων με κυβόλιθους είναι ότι δεν χρειάζονται ειδική συντήρηση, όπως αυτά από χυτό σκυρόδεμα ή άσφαλτο. Λόγω της φύσης του υλικού δεν απαιτείται στίλβωση. Οι επιστρώσεις συντηρούνται εύκολα με τακτικό σκούπισμα και περιστασιακό ξέβγαλμα. Ακόμα, σε περίπτωση που χρειαστεί επισκευή η επιφανειακή στρώση, μπορεί να γίνει αφαίρεση της πληγείσας περιοχής, επαναταξινόμηση - συμπίεση εκ νέου της βάσης και της άμμου στρωμνής και επανατοποθέτηση των ίδιων κυβόλιθων, εφόσον δεν έχουν καταστραφεί. Η διαδικασία αυτή, εκτός από οικονομικά ωφέλιμη, προσφέρει και ένα αισθητικά άρτιο αποτέλεσμα, δίχως μπαλώματα.

5. **Αισθητική:** Η πλακόστρωση με κυβόλιθους προσφέρει ένα ευχάριστο αισθητικά αποτέλεσμα. Τα μπλοκ, τα οποία διατίθενται σε συνεχώς διευρυνόμενη ποικιλία σχημάτων, μεγεθών και χρωμάτων, μπορούν να εγκατασταθούν σε πολυάριθμους δεσμούς και μοτίβα κατασκευής. Αυτό επιτρέπει τόσο την οριοθέτηση του χώρου όσο και την εστίαση σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Στον αντίποδα, μέσα από τη μελέτη των χαρακτηριστικών των κυβόλιθων, της μηχανικής συμπεριφοράς τους αλλά και των σταδίων κατασκευής του συγκεκριμένου τύπου πλακόστρωσης, προκύπτει πως υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί σε ό,τι αφορά τη χρήση τους. Τα βασικά μειονεκτήματα είναι τα εξής:

1. **Απαίτηση αυστηρού ποιοτικού ελέγχου:** Βασική προϋπόθεση για την ανθεκτικότητα των κυβόλιθων είναι να περνάνε από αυστηρό ποιοτικό έλεγχο στις εγκαταστάσεις του εργοστασίου. Τα χαρακτηριστικά τους πρέπει να βρίσκονται εντός των ορίων των προδιαγραφών (EN 1338:2003, 2003), διότι

έστω και μια μικρή απόκλιση, ενδέχεται να επηρεάσει την απόδοση του πλακόστρωτου οδοστρώματος.

2. **Πολύπλοκος σχεδιασμός:** Το οδόστρωμα με κυβόλιθους σκυροδέματος λειτουργεί ως ένα πολύπλοκος μηχανισμός αλληλοσύνδεσης και ιδιαίτερα στην περίπτωση που στα υποκείμενα στρώματα περιέχεται βάση από σκυρόδεμα, για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του απαιτούνται αριθμητικές προσομοιώσεις με σημαντική υπολογιστική πολυπλοκότητα.

3. **Ανάγκη προσεκτικής υλοποίησης των σταδίων κατασκευής:** Παρόλο που η κατασκευή του οδοστρώματος με κυβόλιθους σκυροδέματος είναι εύκολη και γρήγορη, μέχρι και την ολοκλήρωση του έργου, είναι σημαντικό να δίνεται προσοχή σε όλα τα στάδια των εργασιών. Συγκεκριμένα, τυχόν αποκλίσεις στην επιφάνεια των υποκείμενων στρώσεων θα επηρεάσουν και το επίπεδο των κυβόλιθων, προκαλώντας διαφορικές καθιζήσεις. Ως εκ τούτου, μετά τη συμπύκνωση του κάθε στρώματος θα πρέπει να γίνεται ενδελεχής έλεγχος και κάλυψη των κενών που ενδεχομένως υπάρχουν. Ακόμη, η τοποθέτηση των κυβόλιθων είναι απαραίτητο να γίνεται με μεγάλη προσοχή, διότι σε περίπτωση που το κενό μεταξύ τους υπερβεί τα 6 mm ή εγκλωβιστεί ανάμεσά τους υλικό από την στρώση της άμμου κλινοστρωμνής, θα υπάρξει μελλοντικά πρόβλημα στη σωστή λειτουργία του οδοστρώματος.

4. **Τακτική απομάκρυνση φυτών από την επιφάνεια του οδοστρώματος:** Σε περίπτωση που δεν κατασκευαστεί βάση από σκυρόδεμα είναι αρκετά σύνηθες, μετά την έναρξη λειτουργίας του έργου, να εμφανιστούν ανεπιθύμητα φυτά στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η απομάκρυνσή τους είναι υποχρέωση του μηχανικού, όπως επίσης και η αντικατάσταση των κυβόλιθων που ενδεχομένως έχουν καταστραφεί. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, τις περισσότερες φορές, τοποθετείται πάνω από τη στρώση εξυγίανσης γεωύφασμα, το οποίο λειτουργεί ως ριζικός φραγμός.

5. **Αλλοιώσεις στο χρώμα των κυβόλιθων:** Μακροπρόθεσμα, οι κυβόλιθοι από σκυρόδεμα ενδέχεται να παρουσιάσουν αλλοιώσεις στο χρώμα τους, προκαλούμενες από την επιφανειακή τριβή και φθορά. Όταν οι κυβόλιθοι κατασκευάζονται σε μια στρώση και δίνονται προς χρήση, η πάστα του τσιμέντου στην επιφάνειά τους ίσως φθαρεί, εκθέτοντας τα χονδρόκοκκα αδρανή στην επιφάνεια του προϊόντος. Επομένως, δημιουργείται ένα χρωματικό αποτέλεσμα που είναι διαφορετικό από τον ιστό του χρωματισμένου τσιμέντου. Για να εξαλειφθεί αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας σχεδιασμός μίγματος σκυροδέματος με πιο λεπτόκοκκο αδρανές και τσιμέντο με ειδικές ρητίνες.

Με την προϋπόθεση ότι οι προαναφερόμενοι περιορισμοί αντιμετωπίζονται, οι κυβόλιθοι από σκυρόδεμα μπορούν να παρέχουν μια επιτυχημένη μορφή πλακόστρωτου οδοστρώματος.

Όσον αφορά τη μηχανική συμπεριφορά τους, από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε πως όταν κάτω από τη στρώση των κυβόλιθων και της άμμου κλινοστρωμνής, περιλαμβάνεται μόνο η στρώση υπόβασης/εξυγίανσης, εφόσον το πάχος της είναι επαρκές, δηλαδή μεγαλύτερο από 150 mm, τα επιφανειακά φορτία μπορούν να διαδοθούν σε μεγάλη έκταση. Απαραίτητο είναι, ωστόσο, μέσω της επαρκούς συμπίεσης, να εξασφαλίζεται η αλληλοσύνδεση μεταξύ των κυβόλιθων. Με τη συγκεκριμένη δομή, το οδόστρωμα αποκτά μια ελαστική συμπεριφορά, γεγονός που επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλών παραμορφώσεων, διατηρώντας ταυτόχρονα αναλλοίωτη την επιφάνεια των κυβόλιθων.

Επίσης, από μελέτη διεθνών ερευνών, προέκυψε πως σε περίπτωση κατασκευής βάσης σκυροδέματος πάνω από την στρώση εξυγίανσης, ο αριθμός των επιτρεπόμενων διελεύσεων αυξάνεται σημαντικά. Σε κάθε περίπτωση (με ή χωρίς βάση σκυροδέματος), η διάρκεια ζωής του συγκεκριμένου τύπου πλακόστρωτου έχει αποδειχθεί πως εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κατασκευαστικό μοτίβο των κυβόλιθων. Οι μικρότερες κατακόρυφες και οριζόντιες μετατοπίσεις σημειώνονται για τη σύνδεση “herringbone”, διότι το φορτίο των τροχών επηρεάζει μεγαλύτερο αριθμό κυβόλιθων, με αποτέλεσμα την καλύτερη κατανομή της τάσης. Ωστόσο, εμφανώς μικρότερη φαίνεται να είναι η επίδραση του σχήματος των κυβόλιθων, του πάχους των αρμών και της άμμου κλινοστρωμνής, στην απόδοση του οδοστρώματος. Τέλος, η αύξηση του πάχους της επιφανειακής στρώσης ή της στρώσης βάσης σκυροδέματος έχει αποδειχθεί πως μειώνει σημαντικά το μέγεθος της προβλεπόμενης αυλάκωσης, η οποία μελλοντικά ενδέχεται να οδηγήσει στην αστοχία του πλακόστρωτου.

Προκειμένου, να προσδιοριστεί η επίδραση που έχει το πάχος της στρώσης υπόβασης και η τιμή του CBR της στρώσης έδρασης στη μηχανική συμπεριφορά κατασκευασμένου πλακόστρωτου οδοστρώματος (χωρίς βάση σκυροδέματος), στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, μεταβάλλοντας ξεχωριστά τις τιμές αυτών των δύο παραμέτρων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνεται να συμπλέουν με αντίστοιχα συμπεράσματα που έχουν καταγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Ειδικότερα, αποδείχθηκε ότι όταν το βάθος της υπόβασης αυξάνεται ανά 50 mm, ο αριθμός των επιτρεπόμενων εφαρμογών φορτίου που οδηγούν σε αστοχία αυξάνεται με έναν ρυθμό μεταβολής 0.12%. Αντίστοιχα, η αύξηση των τιμών του CBR κατά 1% προκαλεί αύξηση του αριθμού εφαρμογών φορτίου, με έναν μέσο ρυθμό μεταβολής 0.01%. Επίσης, η διαπίστωση ότι για τιμές του CBR 2% με 3%, η αστοχία θα επέλθει για μικρό αριθμό διελεύσεων (N), οδηγεί

στην απαίτηση για CBR έδρασης μεγαλύτερο του 3%. Τέλος, προέκυψε ότι για CBR 5%, η αύξηση του N είναι σημαντική, στοιχείο που οδηγεί στο συμπέρασμα πως η εξασφάλιση της φέρουσας ικανότητας της έδρασης σε αυτό το επίπεδο μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση ενός οδοστρώματος με κυβόλιθους σκυροδέματος.

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι ο κλάδος του σχεδιασμού των υπόψη πλακόστρωτων οδοστρωμάτων αν και πολύπλοκος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η συμπεριφορά τους. Πρόταση για περαιτέρω έρευνα, αποτελεί η πραγματοποίηση μελέτης ευαισθησίας σε διατομή οδοστρώματος με κυβόλιθους σκυροδέματος, που περιέχει σταθεροποιημένη βάση από επεξεργασμένο τσιμέντο, ώστε να εξεταστεί η επάρκεια των χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων και η επίδραση που θα έχει στο πλακόστρωτο η μεταβολή των τιμών τους.

8. Βιβλιογραφία

AASHTO. (1982). *Standard Method of Testing for Resilient Modulus of Subgrade Soils.* Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.

ASTM. (2004). *Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar, C144.* West Conshohocken, Pa, USA: ASTM International.

ASTM. (2008). *Standard specification for concrete aggregates, C33/C33M.* West Conshohocken, Pa, USA: ASTM International.

Baker, I. (1903). *A Treatise on Roads and Pavements.* New York: John Wiley and Sons.

Block Paving - An Introduction to Block and Brick Paving. Ανάκτηση 4 1, 2023, από Pavingexpert: https://www.pavingexpert.com/blocks

Block Paving - Choosing a Block or Brick Paver. Ανάκτηση 4 4, 2023, από Pavingexpert: https://www.pavingexpert.com/blocks03

Boomsma W.,Huurman M. (2006). Mechanical behaviour of a permeable base and bedding material and the rutting behaviour. *In: Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Block Paving.* San Francisco, Calif, USA, 6-8 November 2006.

BS 7533-101. (2021). *Pavements constructed with clay, concrete or natural stone paving units. Code of practice for the structural design of pavements using modular paving units.* London: British Standards Institution.

Concrete Bedded Edgings & Kerbs. Ανάκτηση 5 1, 2023, από Pavingexpert: https://www.pavingexpert.com/edging3#table

Drainage - Land Drainage for Fields and Gardens. Ανάκτηση 4 20, 2023, από Pavingexpert: https://www.pavingexpert.com/drain03

Elkoblock-36M Multilayer Block Making Machine. Ανάκτηση 3 29, 2023, από elkon: https://www.elkon.net/products/concrete-paver-block-making-machines/elkoblock-36m/

EN 1340:2003. (2003). *Concrete kerb units - Requirements and test methods.* Brussels: European Committee Standardization.

History Of Paving. (2021, 4 3). Ανάκτηση από Boss Paving: https://bosspaving.co.za/history-of-paving-by-boss-paving-specialists/

Houben L., Molenaar A., Fuchs G., Moll H. (1984). Analysis and design of concrete block pavements. *In: Proceedings of 2nd International Conference on Concrete Block Paving, 10-12 April 1984.* Delft, Netherlands.

Inter Connected Paving Blocks (ICPB). (2012, 1 31). Ανάκτηση από constructionduniya: https://constructionduniya.blogspot.com/2012/01/inter-connected-paving-blocks.html

Jones A. (1962). *Tables of stresses in three-layer elastic systems.* Washington DC: Highway Research Board.

Knapton J. ,Barber S.D. (1979). The behaviour of a concrete block pavement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 66*(2), σσ. 277-292.

Lee H.S., Lee J.Y. , Yu M.Y. (2003). Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks. *Cement and Concrete Research, 33*(11), 1889-1896.

Lin W. G. , Ryu S. W., Cho Y. H. (2016). Performance of permeable block pavements in accelerated pavement test and rainfall simulation. *Journal of Performance of Constructed Facilities, 30*(1), 04014186.

Lin W., Cho Y. Kim I.T. (2016). Development of Deflection Prediction Model for Concrete Block Pavement Considering the Block Shapes and Construction Patterns. *Advances in Materials Science and Engineering, 2016*, 5126436.

Maskey, Sashin. *Construction Sequence for Concrete Paver Block.* Ανάκτηση 4 3, 2023, από LinkedIn: https://www.linkedin.com/pulse/construction-sequence-concrete-paver-block-sachin-maskey

Miner, M. (1945). Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics, 12*(3), 159-164.

Paola Di Mascio, L. M. (2019, 12). Concrete block pavements in urban and local roads: Analysis of stress-strain condition and proposal for a catalogue. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 557-566.

Pavement History. Ανάκτηση 3 17, 2022, από Pavement Interactive: https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-types-and-history/pavement-history/

Paver Blocks - Types, Shapes, Uses, and Benefits. (2020, 4 12). Ανάκτηση από The Constructor: https://theconstructor.org/building/paver-blocks-types-shapes-uses-and-benefits/39188/

Road 29 Guide to the structural design of pavements for new roads. 3rd edition. (1970). London: Road Research Laboratory.

Rollings, R. S. (1983). *Concrete Block - Pavements, Technical Report GL-83-3.* Washington, D.C.: Chief of Engineers, U.S. Army.

Sharma S.D., Prashant Kumar, Nanda P.K. (2005). *Interlocking Concrete Block Pavements: New Trends in Construction, Civil Engineering & Construction Review, (Roads).* New Delhi.

Sharma S.D., Sikdar P.K., Rao Y.V. (2004). Interlocking Concrete Block Pavements – Its Prospects. *Seminar on Design Construction and Maintenance of Cement Concrete Pavements.* New Delhi.

Step-by-Step Guide to Block Pavement Construction. Ανάκτηση 4 25, 2023, από Pavingexpert: https://www.pavingexpert.com/bpvseq01

Sub-bases. Ανάκτηση 5 5, 2023, από Pavingexpert: https://www.pavingexpert.com/subbase

Sun, L. (1996). Design theory and method of interlocking concrete block paving for port areas. *In: Proceedings of 5th International Conference on Concrete Block Paving*, σσ. 463-472.

Types of Concrete Block Making Machine Models. Ανάκτηση 3 29, 2023, από Constro Facilitator: https://constrofacilitator.com/types-of-concrete-block-making-machine-models/

Via Appia Antica & Catacombs of Rome. Ανάκτηση 3 15, 2023, από rome site: https://romesite.com/via-appia-antica.html

What Is A Grab Wagon?. Ανάκτηση 4 15, 2023, από AHD Plant Ltd: https://ahdplanthire.co.uk/articles/what-is-a-grab-wagon/

Yaginuma H., Tanaka M., Kasahara A., Yazawa S. (2003). Development of a standard for block dimensions for use under Japanese conditions. *In: Proceedings of 7th International Conference on Concrete Block Paving, 12-15 October 2003*.

ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-02-02-00. (2009). *"Πλακοστρώσεις – λιθοστρώσεις.* Αθήνα: Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης.

EN 1338:2003. (2003). *Concrete paving blocks - Requirements and test methods.* Londn: European Committee Standardization.

ΕΤΕΠ 02-01-01-00. (2009). *"Καθαρισμός, εκχέρσωση και κατεδαφίσεις στη ζώνη εκτέλεσης των εργασιών".* Αθήνα: Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης.

ΕΤΕΠ 02-03-00-00. (2009). *"Γενικές εκσκαφές κτιριακών έργων".* Αθήνα: Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης.

ΕΤΕΠ 02-04-00-00. (2009). *"Εκσκαφές θεμελίων τεχνικών έργων"*. Αθήνα: Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης.

ΕΤΕΠ 05-02-01-00. (2017). *"Κράσπεδα, ρείθρα και τάφροι ομβρίων καταστρώματος οδών επενδυμένες με σκυρόδεμα"*. Αθήνα: Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης.

9. Παράρτημα: Πίνακες Jones A.

$H = 0.25$

$k_1 = 2.0$

a_1	σ_{s_1}	$\sigma_{s_1}-\sigma_{r_1}$	$\sigma_{s_1}-\sigma_{r_2}$	σ_{s_2}	$\sigma_{s_2}-\sigma_{r_2}$	$\sigma_{s_2}-\sigma_{r_3}$
						$k_2 = 0.2$
0.1	0.15577	0.28658	0.14329	0.01348	0.00277	0.01384
0.2	0.43310	0.72176	0.36088	0.05259	0.01075	0.05377
0.4	0.79551	1.03476	0.51738	0.19094	0.03842	0.19211
0.8	1.00871	0.88833	0.44416	0.54570	0.10337	0.51687
1.6	1.02425	0.66438	0.33219	0.90563	0.14102	0.70510
3.2	0.99617	0.41539	0.20773	0.93918	0.09804	0.49020
						$k_2 = 2.0$
0.1	0.15524	0.28362	0.14181	0.00710	0.01353	0.00677
0.2	0.42809	0.70225	0.35112	0.02783	0.05278	0.02639
0.4	0.77939	0.96634	0.48317	0.10306	0.19178	0.09589
0.8	0.96703	0.66885	0.33442	0.31771	0.55211	0.27605
1.6	0.98156	0.17331	0.08665	0.66753	0.95080	0.47540
3.2	0.99840	−0.05691	−0.02846	0.93798	0.89390	0.44695
						$k_2 = 20.0$
0.1	0.15436	0.27580	0.13790	0.00179	0.02728	0.00136
0.2	0.42462	0.67115	0.33557	0.00706	0.10710	0.00536
0.4	0.76647	0.84462	0.42231	0.02697	0.39919	0.01996
0.8	0.92757	0.21951	0.10976	0.09285	1.26565	0.06328
1.6	0.91393	−1.22411	−0.61205	0.26454	2.94860	0.14743
3.2	0.95243	−3.04320	−1.52160	0.60754	4.89878	0.24494
						$k_2 = 200.0$
0.1	0.15414	0.26776	0.13388	0.00036	0.03814	0.00019
0.2	0.42365	0.63873	0.31937	0.00143	0.15040	0.00075
0.4	0.76296	0.71620	0.35810	0.00557	0.57046	0.00285
0.8	0.91600	−0.28250	−0.14125	0.02064	1.92636	0.00963
1.6	0.88406	−3.09856	−1.54928	0.07014	5.35936	0.02680
3.2	0.89712	−9.18214	−4.59107	0.21692	12.64318	0.06322

$H = 0.25$

$k_1 = 20.0$

a_1	σ_{s_1}	$\sigma_{s_1}-\sigma_{r_1}$	$\sigma_{s_1}-\sigma_{r_2}$	σ_{s_2}	$\sigma_{s_2}-\sigma_{r_2}$	$\sigma_{s_2}-\sigma_{r_3}$
						$k_2 = 0.2$
0.1	0.04596	0.61450	0.03072	0.01107	0.00202	0.01011
0.2	0.15126	1.76675	0.08834	0.04357	0.00793	0.03964
0.4	0.41030	3.59650	0.17983	0.16337	0.02931	0.14653
0.8	0.85464	4.58845	0.22942	0.51644	0.08771	0.43854
1.6	1.12013	2.31165	0.11558	1.01061	0.14039	0.70194
3.2	0.99676	1.24415	0.06221	0.99168	0.07587	0.37934
						$k_2 = 2.0$
0.1	0.04381	0.63215	0.03162	0.00530	0.00962	0.00481
0.2	0.14232	1.83766	0.09188	0.02091	0.03781	0.01891
0.4	0.37882	3.86779	0.19339	0.07933	0.14159	0.07079
0.8	0.75904	5.50796	0.27540	0.26278	0.44710	0.22355
1.6	0.98743	4.24281	0.21213	0.61673	0.90115	0.45058
3.2	1.00064	1.97494	0.09876	0.91258	0.93254	0.46627
						$k_2 = 20.0$
0.1	0.04236	0.65003	0.03250	0.00123	0.01930	0.00096
0.2	0.13708	1.90693	0.09535	0.00488	0.07623	0.00381
0.4	0.35716	4.13976	0.20699	0.01888	0.29072	0.01454
0.8	0.68947	6.48948	0.32447	0.06741	0.98565	0.04928
1.6	0.85490	6.95639	0.34782	0.20115	2.55231	0.12762
3.2	0.90325	6.05854	0.30293	0.48647	4.76234	0.23812
						$k_2 = 200.0$
0.1	0.04204	0.65732	0.03287	0.00024	0.02711	0.00014
0.2	0.13584	1.93764	0.09688	0.00095	0.10741	0.00054
0.4	0.35237	4.26004	0.21300	0.00372	0.41459	0.00207
0.8	0.67286	6.94871	0.34743	0.01399	1.46947	0.00735
1.6	0.81223	8.55770	0.42789	0.04830	4.36521	0.02183
3.2	0.82390	10.63614	0.53181	0.15278	10.93570	0.05468

$H = 0.25$

$k_1 = 200.0$

a_1	σ_{z_1}	$\sigma_{z_1}-\sigma_{r_1}$	$\sigma_{z_1}-\sigma_{r_2}$	σ_{z_2}	$\sigma_{z_2}-\sigma_{r_2}$	$\sigma_{z_2}-\sigma_{r_3}$
						$k_2 = 0.2$
0.1	0.01139	0.866[illegible]	0.00[illegible]33	0.00539	0.00090	0.00451
0.2	0.04180	2.71354	0.01357	0.02334	0.00357	0.01784
0.4	0.14196	6.83021	0.03415	0.09024	0.01365	0.06824
0.8	0.42603	13.19664	0.06598	0.31785	0.04624	0.23118
1.6	0.94520	13.79134	0.06896	0.83371	0.10591	0.52955
3.2	1.10738	2.72901	0.01365	1.10259	0.08308	0.43037
						$k_2 = 2.0$
0.1	0.00909	0.96553	0.00483	0.00259	0.00407	0.00203
0.2	0.03269	3.10763	0.01554	0.01027	0.01611	0.00806
0.4	0.10584	8.37852	0.04189	0.04000	0.06221	0.03110
0.8	0.30477	18.95534	0.09478	0.14513	0.21860	0.10930
1.6	0.66786	31.18909	0.15595	0.42940	0.58553	0.29277
3.2	0.98447	28.98500	0.14493	0.84545	0.89191	0.44595
						$k_2 = 20.0$
0.1	0.00776	1.03738	0.00544	0.00065	0.00861	0.00043
0.2	0.02741	3.59448	0.01797	0.00257	0.03421	0.00171
0.4	0.08631	10.30923	0.05155	0.01014	0.13365	0.00668
0.8	0.23137	26.41442	0.13207	0.03844	0.49135	0.02457
1.6	0.46835	57.46409	0.28732	0.13143	1.53833	0.07692
3.2	0.71083	99.29034	0.49645	0.37342	3.60964	0.18048
						$k_2 = 200.0$
0.1	0.00744	1.19099	0.00596	0.00014	0.01311	0.00007
0.2	0.02616	4.00968	0.02005	0.00056	0.05223	0.00026
0.4	0.08141	11.96405	0.05982	0.00224	0.20551	0.00103
0.8	0.21203	32.97364	0.16487	0.00871	0.77534	0.00388
1.6	0.40876	82.77997	0.41390	0.03234	2.63962	0.01320
3.2	0.56613	189.37439	0.94687	0.11049	7.60287	0.03801

$H = 0.5$

$k_1 = 2.0$

a_1	σ_{z_1}	$\sigma_{z_1}-\sigma_{r_1}$	$\sigma_{z_1}-\sigma_{r_2}$	σ_{z_2}	$\sigma_{z_2}-\sigma_{r_2}$	$\sigma_{z_2}-\sigma_{r_3}$
						$k_2 = 0.2$
0.1	0.04496	0.08398	0.04199	0.00903	0.00181	0.00906
0.2	0.15978	0.28904	0.14452	0.03551	0.00711	0.03554
0.4	0.44523	0.72313	0.36156	0.13314	0.02634	0.13172
0.8	0.83298	1.03603	0.51802	0.42190	0.07992	0.39962
1.6	1.05462	0.83475	0.41737	0.85529	0.13973	0.69363
3.2	0.99967	0.45119	0.22560	0.94506	0.10667	0.53336
						$k_2 = 2.0$
0.1	0.04330	0.08250	0.04125	0.00465	0.00878	0.00439
0.2	0.15325	0.28318	0.14159	0.01836	0.03454	0.01727
0.4	0.42077	0.70119	0.35060	0.06974	0.12954	0.06477
0.8	0.75633	0.96681	0.48341	0.23256	0.41187	0.20594
1.6	0.93447	0.70726	0.35363	0.56298	0.85930	0.42965
3.2	0.98801	0.33878	0.16939	0.88655	0.96353	0.48176
						$k_2 = 20.0$
0.1	0.04193	0.08044	0.04022	0.00117	0.01778	0.00089
0.2	0.14808	0.27574	0.13787	0.00464	0.07027	0.00351
0.4	0.40086	0.67174	0.33587	0.01799	0.26817	0.01341
0.8	0.69098	0.86191	0.43095	0.06476	0.91168	0.04558
1.6	0.79338	0.39588	0.19794	0.19803	2.38377	0.11919
3.2	0.85940	− 0.41078	− 0.20539	0.49238	4.47022	0.22351
						$k_2 = 200.0$
0.1	0.04160	0.07864	0.03932	0.00024	0.02515	0.00013
0.2	0.14676	0.26853	0.13426	0.00095	0.09968	0.00050
0.4	0.39570	0.64303	0.32152	0.00374	0.38497	0.00192
0.8	0.67257	0.74947	0.37474	0.01416	1.36766	0.00684
1.6	0.74106	− 0.02761	− 0.01381	0.04972	4.08937	0.02045
3.2	0.75176	− 1.88545	− 0.94273	0.15960	10.25631	0.05128

$H = 0.5$

$k_1 = 20.0$

a_1	σ_{s_1}	$\sigma_{s_1}-\sigma_{r_1}$	$\sigma_{s_1}-\sigma_{r_2}$	σ_{s_2}	$\sigma_{s_2}-\sigma_{r_2}$	$\sigma_{s_2}-\sigma_{r_3}$
						$k_2 = 0.2$
0.1	0.01351	0.16526	0.00826	0.00596	0.00098	0.00488
0.2	0.05079	0.58918	0.02946	0.02361	0.00386	0.01929
0.4	0.16972	1.66749	0.08337	0.09110	0.01474	0.07369
0.8	0.47191	3.23121	0.16156	0.31904	0.04967	0.24834
1.6	0.97452	3.54853	0.17743	0.82609	0.11279	0.56395
3.2	1.09911	1.27334	0.06367	1.08304	0.09527	0.47637
						$k_2 = 2.0$
0.1	0.01122	0.17997	0.00900	0.00259	0.00440	0.00220
0.2	0.04172	0.64779	0.03239	0.01023	0.01744	0.00872
0.4	0.13480	1.89817	0.09491	0.03993	0.06722	0.03361
0.8	0.35175	4.09592	0.20480	0.14419	0.23476	0.11738
1.6	0.70221	6.22002	0.31100	0.42106	0.62046	0.31023
3.2	0.97420	5.41828	0.27091	0.82256	0.93831	0.46916
						$k_2 = 20.0$
0.1	0.00990	0.19872	0.00994	0.00063	0.00911	0.00046
0.2	0.03648	0.72264	0.03613	0.00251	0.03620	0.00181
0.4	0.11448	2.19520	0.10976	0.00988	0.14116	0.00706
0.8	0.27934	5.24726	0.26236	0.03731	0.51585	0.02579
1.6	0.50790	10.30212	0.51511	0.12654	1.59341	0.07967
3.2	0.70903	16.38520	0.81926	0.35807	3.69109	0.18455
						$k_2 = 200.0$
0.1	0.00960	0.21440	0.01072	0.00013	0.01355	0.00007
0.2	0.03526	0.78493	0.03925	0.00054	0.05395	0.00027
0.4	0.10970	2.44430	0.12221	0.00214	0.21195	0.00106
0.8	0.26149	6.23424	0.31172	0.00331	0.79588	0.00398
1.6	0.45078	14.11490	0.70574	0.03070	2.67578	0.01338
3.2	0.57074	29.95815	1.49791	0.10470	7.61457	0.03807

H = 0.5

k_1 = 200.0

a_1	σ_{z_1}	$\sigma_{z_1}-\sigma_{r_1}$	$\sigma_{z_1}-\sigma_{r_2}$	σ_{z_2}	$\sigma_{z_2}-\sigma_{r_2}$	$\sigma_{z_2}-\sigma_{r_3}$
						k_2 = 0.2
0.1	0.00363	0.22388	0.00112	0.00256	0.00033	0.00163
0.2	0.01414	0.81903	0.00410	0.01021	0.00130	0.00648
0.4	0.05256	2.52558	0.01263	0.04014	0.00506	0.02529
0.8	0.18107	6.11429	0.03057	0.15048	0.01844	0.09221
1.6	0.53465	10.82705	0.05414	0.48201	0.05399	0.26993
3.2	1.04537	9.34212	0.04671	1.00671	0.08624	0.43121
						k_2 = 2.0
0.1	0.00215	0.26620	0.00133	0.00094	0.00128	0.00064
0.2	0.00826	0.98772	0.00494	0.00373	0.00509	0.00254
0.4	0.02946	3.19580	0.01598	0.01474	0.01996	0.00998
0.8	0.09508	8.71973	0.04360	0.05622	0.07434	0.03717
1.6	0.27135	20.15765	0.10079	0.19358	0.23838	0.11919
3.2	0.62399	34.25229	0.17126	0.52912	0.54931	0.27466
						k_2 = 20.0
0.1	0.00149	0.31847	0.00159	0.00023	0.00257	0.00013
0.2	0.00564	1.19598	0.00598	0.00094	0.01025	0.00051
0.4	0.01911	4.02732	0.02014	0.00372	0.04047	0.00202
0.8	0.05574	12.00835	0.06004	0.01453	0.15452	0.00773
1.6	0.13946	32.77028	0.16385	0.05399	0.53836	0.02692
3.2	0.30247	77.62943	0.38815	0.18091	1.56409	0.07820
						k_2 = 200.0
0.1	0.00133	0.37065	0.00135	0.00005	0.00387	0.00002
0.2	0.00498	1.40493	0.00702	0.00022	0.01544	0.00008
0.4	0.01649	4.86215	0.02431	0.00086	0.06118	0.00031
0.8	0.04553	15.33902	0.07670	0.00340	0.23698	0.00118
1.6	0.10209	45.93954	0.22970	0.01315	0.86345	0.00432
3.2	0.18358	128.13051	0.64065	0.04854	2.80877	0.01404

$H = 1.0$

$k_1 = 2.0$

a_1	σ_{s_1}	$\sigma_{s_1}-\sigma_{r_1}$	$\sigma_{s_1}-\sigma_{r_2}$	σ_{s_2}	$\sigma_{s_2}-\sigma_{r_2}$	$\sigma_{s_2}-\sigma_{r_3}$
						$k_2 = 0.2$
0.1	0.01241	0.02186	0.01093	0.00490	0.00096	0.00478
0.2	0.04816	0.08396	0.04198	0.01943	0.00378	0.01890
0.4	0.17203	0.28366	0.14433	0.07496	0.01448	0.07241
0.8	0.48612	0.71684	0.35842	0.26193	0.04924	0.24620
1.6	0.91312	0.97206	0.48603	0.67611	0.11558	0.57790
3.2	1.04671	0.60091	0.30046	0.95985	0.12527	0.62637
						$k_2 = 2.0$
0.1	0.01083	0.02179	0.01090	0.00241	0.00453	0.00227
0.2	0.04176	0.08337	0.04169	0.00958	0.01797	0.00899
0.4	0.14665	0.28491	0.14246	0.03724	0.06934	0.03467
0.8	0.39942	0.71341	0.35670	0.13401	0.24250	0.12125
1.6	0.71032	1.02680	0.51340	0.38690	0.63631	0.31815
3.2	0.92112	0.90482	0.45241	0.75805	0.97509	0.48754
						$k_2 = 20.0$
0.1	0.00963	0.02249	0.01124	0.00061	0.00920	0.00046
0.2	0.03697	0.08618	0.04309	0.00241	0.03654	0.00183
0.4	0.12805	0.29640	0.14820	0.00950	0.14241	0.00712
0.8	0.33263	0.76292	0.38146	0.03578	0.51815	0.02591
1.6	0.52721	1.25168	0.62584	0.12007	1.56503	0.07825
3.2	0.65530	1.70723	0.85361	0.33669	3.51128	0.17556
						$k_2 = 200.0$
0.1	0.00925	0.02339	0.01170	0.00013	0.01319	0.00007
0.2	0.03561	0.09018	0.04509	0.00051	0.05252	0.00026
0.4	0.12348	0.31470	0.15735	0.00202	0.20609	0.00103
0.8	0.31422	0.83274	0.41637	0.00783	0.76955	0.00385
1.6	0.46897	1.53521	0.76760	0.02874	2.53100	0.01265
3.2	0.51161	2.76420	1.38210	0.09751	6.99283	0.03496

$H = 1.0$

$k_1 = 20.0$

a_1	σ_{s_1}	$\sigma_{s_1}-\sigma_{r_1}$	$\sigma_{s_1}-\sigma_{r_2}$	σ_{s_2}	$\sigma_{s_2}-\sigma_{r_2}$	$\sigma_{s_2}-\sigma_{r_3}$
						$k_2 = 0.2$
0.1	0.00417	0.04050	0.00202	0.00271	0.00039	0.00195
0.2	0.01641	0.15675	0.00784	0.01080	0.00155	0.00777
0.4	0.06210	0.55548	0.02777	0.04241	0.00606	0.03028
0.8	0.21057	1.53667	0.07683	0.15308	0.02198	0.10991
1.6	0.58218	2.77359	0.13868	0.49705	0.06327	0.31635
3.2	1.06296	2.55195	0.12760	1.00217	0.09906	0.49525
						$k_2 = 2.0$
0.1	0.00263	0.04751	0.00238	0.00100	0.00160	0.00080
0.2	0.01029	0.18481	0.00924	0.00397	0.00637	0.00319
0.4	0.03810	0.66727	0.03336	0.01565	0.02498	0.01249
0.8	0.12173	1.97428	0.09871	0.05938	0.09268	0.04634
1.6	0.31575	4.37407	0.21870	0.20098	0.29253	0.14626
3.2	0.66041	6.97695	0.34885	0.53398	0.65446	0.32723
						$k_2 = 20.0$
0.1	0.00193	0.05737	0.00287	0.00024	0.00322	0.00016
0.2	0.00751	0.22418	0.01121	0.00098	0.01283	0.00064
0.4	0.02713	0.82430	0.04121	0.00387	0.05063	0.00253
0.8	0.08027	2.59672	0.12984	0.01507	0.19267	0.00963
1.6	0.17961	6.77014	0.33851	0.05549	0.66326	0.03316
3.2	0.34355	15.23252	0.76163	0.18344	1.88634	0.09432
						$k_2 = 200.0$
0.1	0.00176	0.06733	0.00337	0.00006	0.00478	0.00002
0.2	0.00683	0.26401	0.01320	0.00022	0.01908	0.00010
0.4	0.02443	0.98346	0.04917	0.00088	0.07557	0.00038
0.8	0.06983	3.23164	0.16158	0.00348	0.29194	0.00146
1.6	0.14191	9.28148	0.46407	0.01339	1.05385	0.00527
3.2	0.22655	24.85236	1.24262	0.04911	3.37605	0.01688

$H = 1.0$

$k_1 = 200.0$

z_1	σ_{z_1}	$\sigma_{z_1}-\sigma_{r_1}$	$\sigma_{z_1}-\sigma_{r_2}$	σ_{z_2}	$\sigma_{z_2}-\sigma_{r_2}$	$\sigma_{z_2}-\sigma_{r_3}$
						$k_2 = 0.2$
0.1	0.00117	0.05507	0.00028	0.00097	0.00010	0.00051
0.2	0.00464	0.21467	0.00107	0.00388	0.00041	0.00203
0.4	0.01814	0.78191	0.00391	0.01538	0.00160	0.00801
0.8	0.06766	2.38055	0.01190	0.05952	0.00607	0.03037
1.6	0.22994	5.57945	0.02790	0.21214	0.02028	0.10140
3.2	0.62710	9.29529	0.04648	0.60056	0.04847	0.24236
						$k_2 = 2.0$
0.1	0.00049	0.06883	0.00034	0.00029	0.00035	0.00017
0.2	0.00195	0.26966	0.00135	0.00116	0.00138	0.00069
0.4	0.00746	1.00131	0.00501	0.00460	0.00545	0.00273
0.8	0.02647	3.24971	0.01625	0.01797	0.02092	0.01046
1.6	0.08556	8.92442	0.04462	0.06671	0.07335	0.03668
3.2	0.25186	20.83387	0.10417	0.22047	0.21288	0.10644
						$k_2 = 20.0$
0.1	0.00027	0.08469	0.00042	0.00007	0.00062	0.00003
0.2	0.00104	0.33312	0.00167	0.00028	0.00248	0.00012
0.4	0.00384	1.25495	0.00627	0.00110	0.00985	0.00049
0.8	0.01236	4.26100	0.02130	0.00436	0.03825	0.00191
1.6	0.03379	12.91809	0.06459	0.01683	0.13989	0.00699
3.2	0.08859	36.04291	0.18021	0.06167	0.45544	0.02277
						$k_2 = 200.0$
0.1	0.00021	0.10075	0.00050	0.00002	0.00037	0.00000
0.2	0.00082	0.39741	0.00199	0.00006	0.00347	0.00002
0.4	0.00298	1.51234	0.00756	0.00025	0.01381	0.00007
0.8	0.00893	5.28939	0.02645	0.00100	0.05403	0.00027
1.6	0.02065	17.01872	0.08509	0.00392	0.20250	0.00101
3.2	0.04154	52.23615	0.26118	0.01505	0.70098	0.00350