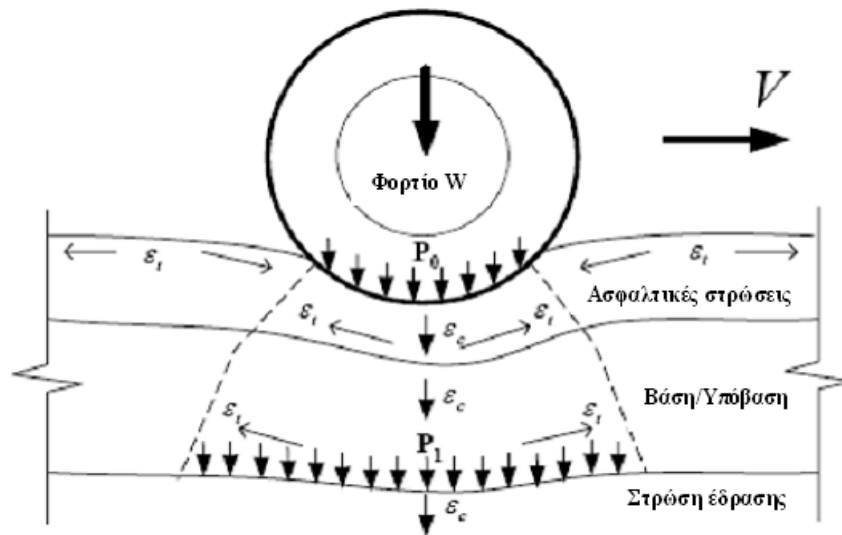




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ



ΤΣΑΪΜΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

Επιβλέπων: Λοΐζος Ανδρέας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2012

Θα ήθελα να ευχαριστήσω
τον καθηγητή κ. Λοΐζο Ανδρέα
για τη δυνατότητα που μου προσέφερε
να υλοποιήσω την παρούσα εργασία
καθώς επίσης και την κ. Πλατή Χριστίνα
για την πολύτιμη βοήθειά της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω
την οικογένειά μου και
τους φίλους μου για την υποστήριξή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, διερευνήθηκε η δημιουργία και η ανάγκη πρόβλεψης παραμενουσών παραμορφώσεων στα ασφαλτικά οδοστρώματα. Βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί κατάλληλο πρότυπο ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς για την πρόβλεψη των παραμενουσών παραμορφώσεων σε ένα πειραματικό οδόστρωμα. Αν και η φιλοσοφία του προτύπου, όπως και άλλων συναφών προτύπων, είναι η αξιοποίηση εργαστηριακών δεδομένων, για την ενεργοποίησή του στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται κυρίως επί τόπου στοιχεία οδοστρώματος για την τροφοδότησή του. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια οδικού πειράματος πραγματοποιούνται επί τόπου μη καταστρεπτικές δοκιμές με τα εξελιγμένα Συστήματα του Εργαστηρίου Οδοποιίας για την καταγραφή των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος που απαιτούνται για την πρόβλεψη των παραμενουσών παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα της πρόβλεψης συγκρίθηκαν με τις μετρημένες παραμένουσες παραμορφώσεις μετά τη διέλευση συγκεκριμένου φόρτου κυκλοφορίας από το υπό διερεύνηση οδόστρωμα. Γενικά διαπιστώθηκε μία γενική σύγκλιση μετρημένων και προβλεπόμενων παραμορφώσεων για τα επί τόπου στοιχεία. Το αποτέλεσμα αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αξιοποίηση επί τόπου στοιχείων υποστηρίζει με σημαντικό βαθμό αξιοπιστίας τις διαδικασίες πρόβλεψης των παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας ενός οδοστρώματος και κατά επέκταση τις διαδικασίες διαχείρισης και συντήρησης σε βάθος χρόνου λειτουργίας του.

ABSTRACT

In the present thesis, a research about the development and the need for prediction of permanent deformation in asphalt pavements was conducted. With regard to the literature, a suitable model of viscoelastic analysis was selected in order to predict the permanent deformations in an experimental pavement. Although this model and other related models are based on laboratory data, in this thesis in situ data are utilized. In particular, as far as the road test is concerned there were conducted in situ non destructive testing methods with the advanced NTUA Highway Engineering Laboratory Systems for the collection of the necessary pavement characteristics. The comparison between predicted and measured deformations showed a general agreement, as far as in situ data are concerned. This result suggests that the utilization of in situ data supports with a significant degree of reliability the predictive procedures for deformations along the pavement surface and hence the management and maintenance procedures in the long term of its function.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Αντικείμενο	2
1.3 Δομή.....	3
2. ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	5
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Παράγοντες επίδρασης στην παραμένουσα παραμόρφωση.....	6
2.3 Βασικά στάδια ανάπτυξης παραμενουσών παραμορφώσεων	10
2.4 Μορφές της παραμένουσας παραμόρφωσης.....	11
2.4.1 Τροχοαυλάκωση.....	11
2.4.2 Έλλειψη ομαλότητας.....	14
2.4.3 Τοπικές καθιζήσεις.....	15
2.5 Επιπτώσεις της παραμένουσας παραμόρφωσης.....	15
2.6 Ανάγκη πρόβλεψης και μέτρησης της παραμένουσας παραμόρφωσης	16
3. ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ.....	17
3.1 Γενικά.....	17
3.2 Θεώρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων των στρώσεων.....	18
3.3 Ιξωδοελαστική συμπεριφορά των υλικών των στρώσεων των οδοστρωμάτων.....	20
3.4 Πρότυπα πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης.....	21
4. ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	31
4.1 Γενικά.....	31
4.2 Πρότυπο πρωταρχικής απόκρισης.....	32
4.3 Πρότυπο φθοράς.....	33
4.4 Πρότυπο πρόβλεψης του μεγέθους της παραμένουσας παραμόρφωσης.....	34
4.5 Προσδιορισμός των ιδιοτήτων των υλικών μέσω εργαστηριακών δοκιμών.....	37
4.6 Βελτιώσεις του ιξωδοελαστικού προτύπου	39
4.6.1 Πρότυπο πρωταρχικής απόκρισης.....	40
4.6.2 Πρότυπο γενικής απόκρισης.....	40
4.6.3 Πρότυπο φθοράς- Πρότυπο παραμένουσας παραμόρφωσης	40
4.7 Υπολογισμός της παραμένουσας παραμόρφωσης.....	41

4.8 Προσδιορισμός των παραμέτρων α και μ της παραμένουσας παραμόρφωσης του υλικού της κάθε στρώσης.....	42
4.8.1 Εργαστηριακές δοκιμές.....	42
4.8.2 Παράμετροι α και μ για τα υλικά βάσης/υπόβασης και στρώσης έδρασης.....	44
4.8.3 Παράμετροι α και μ για τα ασφαλτικά υλικά.....	46
5. ΟΔΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ.....	49
5.1 Σκοπός οδικού πειράματος.....	49
5.2 Κατασκευαστικά στοιχεία.....	49
5.3 Στρωματογραφία.....	52
5.4 Μηχανικά χαρακτηριστικά.....	54
5.5 Κλιματολογικά στοιχεία.....	57
5.6 Κυκλοφοριακά δεδομένα.....	57
5.5 Μέτρηση παραμενουσών παραμορφώσεων.....	58
6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΛΛΟΓΗΣ.....	60
6.1 Γενικά.....	60
6.2 Πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος.....	60
6.3 Ανάστροφος υπολογισμός (backcalculation).....	61
6.4 Επεξεργασία κλιματολογικών στοιχείων.....	63
6.5 Επεξεργασία κυκλοφοριακών δεδομένων.....	64
6.6 Διερεύνηση των παραμέτρων α και μ της παραμένουσας παραμόρφωσης των υλικών.....	64
6.6.1 Ανάλυση ευαισθησίας.....	64
6.6.2 Προσδιορισμός των α και μ	68
7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	70
7.1 Προβλεπόμενες παραμένουσες παραμορφώσεις.....	70
7.1.1 Προβλεπόμενες παραμένουσες παραμορφώσεις βάσει της διατομής σχεδιασμού.....	70
7.1.2 Προβλεπόμενες παραμένουσες παραμορφώσεις βάσει επί τόπου στοιχείων.....	71
7.2 Μετρημένες παραμένουσες παραμορφώσεις.....	77
7.3 Σύγκριση προβλεπόμενων και μετρημένων τιμών.....	79
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	86

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Καθώς το φυσικό έδαφος δεν μπορεί να φέρει τα φορτία της κυκλοφορίας χωρίς να παραμορφωθεί σημαντικά, είναι απαραίτητη η κατασκευή πάνω από αυτό μίας, ή συνήθως περισσότερων στρώσεων, από υλικό ανώτερης ποιότητας. Οι στρώσεις αυτές αποτελούν το οδόστρωμα και μεταβιβάζουν στο έδαφος σημαντικά μειωμένες τις τάσεις που προκαλούνται από την κυκλοφορία των οχημάτων. Επιπρόσθετα, συμβάλλουν στην προστασία του από την επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών όπως είναι η υψηλή θερμοκρασία και ο παγετός.

Εν τούτοις με το πέρασμα του χρόνου η επιρροή της κυκλοφορίας και οι καιρικές συνθήκες μπορούν να φθείρουν το οδόστρωμα με αποτέλεσμα να μειώνεται η φέρουσα ικανότητά του. Έτσι, υποβαθμίζεται το επίπεδο εξυπηρέτησής του και αδυνατεί να παρέχει στους χρήστες ασφάλεια, άνεση και καλή ποιότητα κύλισης.

Μία συνέπεια της φθοράς των οδοστρωμάτων είναι η ανάπτυξη παραμενουσών παραμορφώσεων, που σύμφωνα με τις αρχές σχεδιασμού των οδοστρωμάτων οφείλεται στην αστοχία-παραμορφωσιμότητα του εδάφους. Ωστόσο παραμένουσα παραμόρφωση μπορεί να αναπτυχθεί και λόγω της παραμόρφωσης των ασφαλικών στρώσεων. Γενικά, η μόνιμη παραμόρφωση προκαλείται από τη δυναμική καταπόνηση του οδοστρώματος, τη μειωμένη ποιότητα των υλικών των στρώσεών του και την επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών. Οδηγεί στην υποβάθμιση αφενός μεν των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος και αφετέρου δε του επιπέδου εξυπηρετικότητας προς τους χρήστες της οδού. Συνεπώς, προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα εμφάνισής της, ιδιαίτερα κατά το πρώτα διαστήματα λειτουργίας του οδοστρώματος, κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση της συμπεριφοράς του έναντι των παραγόντων που επηρεάζουν τη δομική του κατάσταση. Στα πλαίσια της διερεύνησης αυτής εντάσσεται και η ανάγκη πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης.

Η πρόβλεψη της μόνιμης παραμόρφωσης κρίνεται αναγκαία τόσο κατά τη φάση σχεδιασμού και κατασκευής όσο και κατά τη φάση λειτουργίας ενός οδοστρώματος. Διερευνά την επίδραση των παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξή της και μπορεί να παρέχει αξιόλογες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του οδοστρώματος έναντι των φορτίων κυκλοφορίας. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα στον Κύριο της οδού ή του οδικού δικτύου καλύτερης διαχείρισής του. Η συστηματική και έγκαιρη συντήρηση των οδοστρωμάτων αποτελεί ένα βασικό εργαλείο των συστημάτων διαχείρισής τους. Η συνεχής παρακολούθησή τους και ο καθορισμός του

κατάλληλου χρόνου επέμβασης παρατείνει τη διάρκεια ζωής τους και επαναφέρει τη λειτουργικότητά τους στα κατάλληλα επίπεδα εξυπηρέτησης.

Η πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω στατιστικών, εμπειρικών ή μηχανικών προτύπων. Τα πρώτα προϋποθέτουν μακροχρόνια παρακολούθηση των στοιχείων που αφορούν σε ένα οδόστρωμα και είναι περιορισμένης εμβέλειας, ενώ τα εμπειρικά πρότυπα στηρίζονται σε εμπειρικές λειτουργίες και σχέσεις, που προκύπτουν από στοιχεία που μετρήθηκαν ή παρατηρήθηκαν. Συνεπώς, προκειμένου να διερευνηθεί ορθά η συμπεριφορά ενός οδοστρώματος και να προβλεφθεί η παραμένουσα παραμόρφωσή του, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών του, αξιοποιώντας κατάλληλα μηχανικά πρότυπα.

Τα μηχανικά πρότυπα μπορεί να βασίζονται σε θεωρήσεις που λαμβάνουν υπόψη τους την ελαστική και ιξωδοελαστική συμπεριφορά των στρώσεων ενός οδοστρώματος, αλλά και σε σύνθετες αναλύσεις (π.χ. ιξωδοπλαστική ανάλυση). Εν τούτοις, λόγω της μη αντιπροσωπευτικότητας της ελαστικής θεώρησης και της πολυπλοκότητας των σύνθετων αναλύσεων, κρίνεται πως για την πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης καταλληλότερη είναι η ιξωδοελαστική ανάλυση.

1.2 Αντικείμενο

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης. Αντικείμενό της αποτελεί η διερεύνηση των μηχανικών προτύπων εκτίμησης της παραμένουσας παραμόρφωσης και η αξιοποίηση του προτύπου εκείνου που θα υιοθετηθεί για την πρόβλεψη. Συνήθως, τα μηχανικά πρότυπα που περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση στηρίζονται σε εργαστηριακές δοκιμές και στοιχεία της μελέτης σχεδιασμού. Ωστόσο, στην προκειμένη περίπτωση διερευνάται η πρόβλεψη της παραμόρφωσης με τη χρήση στοιχείων από επί τόπου μετρήσεις. Το συγκεκριμένο πρότυπο, λοιπόν, τροφοδοτείται με στοιχεία που προκύπτουν από την πραγματοποίηση ενός οδικού πειράματος το οποίο περιλαμβάνει μετρήσεις με μη καταστρεπτικές μεθόδους (Non-Destructive Testing Methods, NDTs). Η αξιοποίηση αυτή των επί τόπου στοιχείων πιστεύεται πως παρέχει τη δυνατότητα μίας πιο ρεαλιστικής πρόβλεψης της δημιουργίας παραμενουσών παραμορφώσεων. Κατά αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα των προβλέψεων μπορούν να ενταχθούν και να αξιοποιηθούν σε ένα γενικότερο πλαίσιο προστασίας των οδοστρωμάτων. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται και ελέγχονται τόσο με τα αντίστοιχα των στοιχείων σχεδιασμού, όσο και με μετρημένες τιμές των παραμορφώσεων οδοστρώματος, το οποίο χρησιμοποιείται ως πειραματικό στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.3 Δομή

Ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων που αποτελούν την παρούσα εργασία:

Το κεφάλαιο 2 αναφέρεται στο πρόβλημα της παραμένουσας παραμόρφωσης γενικότερα. Διερευνώνται οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της μόνιμης παραμόρφωσης και παρουσιάζονται τα πιθανά στάδια και οι μορφές της. Οι επιπτώσεις της εμφάνισής της εντείνουν την ανάγκη πρόβλεψής της, χωρίς βέβαια να αποδυναμώνεται η σημασία των μετρήσεων.

Στο κεφάλαιο 3 εξετάζονται τα υφιστάμενα πρότυπα πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης. Αρχικά, παρουσιάζονται οι θεωρήσεις πάνω στις οποίες βασίζεται η ανάπτυξη προτύπων πρόβλεψης. Έπειτα, ακολουθούν τα πρότυπα πρόβλεψης βάσει διεθνών βιβλιογραφικών αναφορών. Η βιβλιογραφική αυτή ανασκόπηση στοχεύει στην εύρεση του κατάλληλου προτύπου διερεύνησης της παραμένουσας παραμόρφωσης.

Το κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει το ιξωδοελαστικό πρότυπο που επιλέχθηκε για την πρόβλεψη της μόνιμης παραμόρφωσης. Γίνεται μία εκτενής αξιολόγηση του προτύπου βάσει των αρχών που έθεσαν οι ερευνητές που το ανέπτυξαν. Επιπλέον, αναφέρονται μεταγενέστερες βελτιώσεις του προτύπου καθώς και τα αποτελέσματα συναφών ερευνών.

Ακολουθεί το κεφάλαιο 5 που περιγράφει το οδικό πείραμα, κατά το οποίο συλλέχθηκαν επί τόπου στοιχεία οδοστρώματος με μη καταστρεπτικές μεθόδους, τα οποία ήταν απαραίτητα για την τροφοδότηση του προτύπου ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς. Περιγράφονται αναλυτικά όλες οι διαδικασίες συλλογής των στοιχείων, των οποίων η επεξεργασία πραγματοποιείται στο επόμενο κεφάλαιο.

Έτσι, στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται οι διαδικασίες επεξεργασίας και ανάλυσης των συλλεχθέντων στοιχείων. Οι διαδικασίες αυτές είναι απαραίτητες προκειμένου τα ακατέργαστα στοιχεία συλλογής να μετατραπούν σε εργάσιμα δεδομένα για την τροφοδότηση του προτύπου πρόβλεψης.

Το κεφάλαιο 7 περιέχει τα αποτελέσματα του προτύπου πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται μία συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των προβλεπόμενων και των μετρημένων τιμών. Παράλληλα, πραγματοποιείται σύγκριση για την παραμένουσα παραμόρφωση η πρόβλεψη της οποίας έγινε βάσει των στοιχείων της διατομής του υπό διερεύνηση οδοστρώματος.

Στο κεφάλαιο 8 εμπεριέχονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν βάσει της ανάλυσης των αποτελεσμάτων πρόβλεψης και γενικότερα της συνολικής διερεύνησης που παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

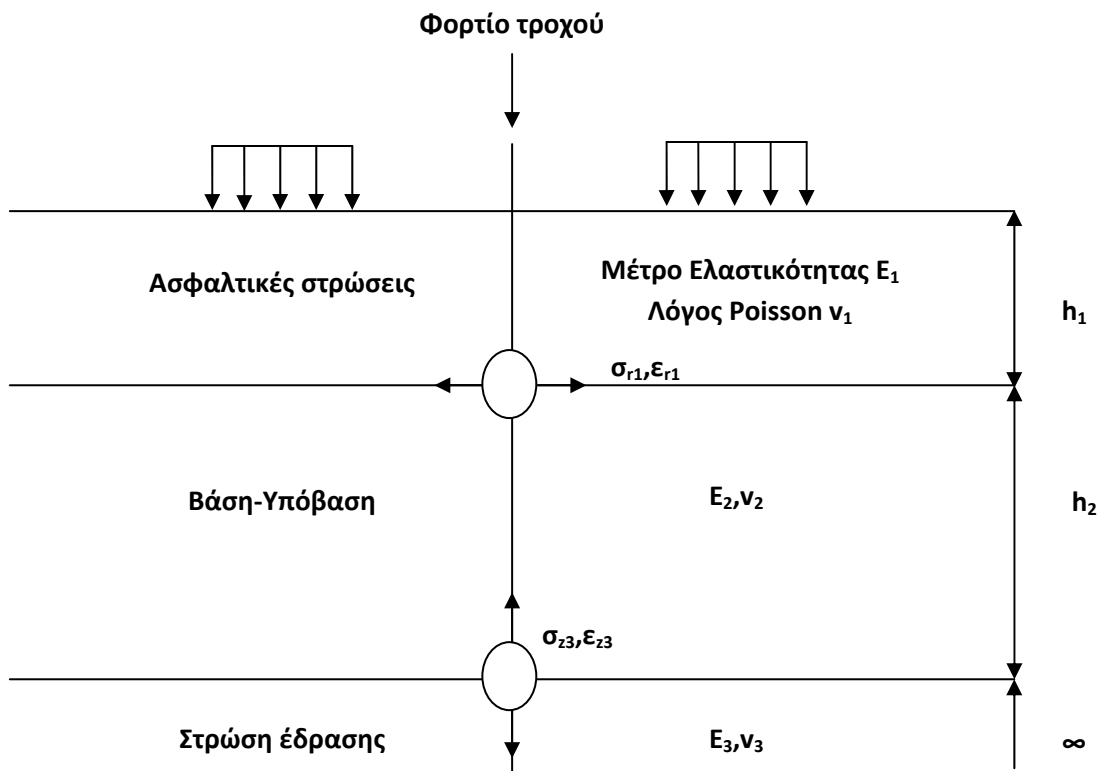
2. ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

2.1 Γενικά

Η εξασφάλιση της άνεσης και της ασφάλειας των χρηστών μίας οδού αποτελεί το κύριο μέλημα για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Ένα οδόστρωμα κατασκευάζεται με στόχο την ασφαλή μεταβίβαση των φορτίων κυκλοφορίας στο υπέδαφος και την αποφυγή δημιουργίας φθορών, κρίσιμων για τη λειτουργικότητά του. Έτσι, λοιπόν, ο ορθός σχεδιασμός, η σωστή κατασκευή και η κατάλληλη διαχείρισή του είναι τρεις βασικές συνιστώσες που συντελούν στην καλή λειτουργία και στην παράταση της διάρκειας ζωής του.

Ο καθορισμός των παραγόντων από τους οποίους εξαρτάται η φέρουσα ικανότητά ενός οδοστρώματος, καθώς και η μελέτη της δομικής καταπόνησής του απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η δυνατότητα μεταβίβασης των φορτίων κυκλοφορίας για τα οποία έχει σχεδιαστεί. Ο προσδιορισμός των κρίσιμων θέσεων ενός οδοστρώματος αποτελεί το πρώτο βήμα προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του και η δομική του κατάσταση έναντι των επιβαλλόμενων φορτίων.

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα εντοπίζονται δύο κρίσιμες θέσεις. Η πρώτη αντιστοιχεί στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων όπου εμφανίζονται προβλήματα που αφορούν στην αντοχή σε ρηγμάτωση λόγω κοπώσεως του ασφαλτομίγματος, ενώ η δεύτερη στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης, όπου έχουμε την αστοχία-παραμορφωσιμότητά της. Αντίστοιχα, τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη των παραπάνω θέσεων είναι η εφελκυστική τάση και παραμόρφωση ($\sigma_{r1}, \epsilon_{r1}$) και η κατακόρυφη τάση και παραμόρφωση ($\sigma_{z3}, \epsilon_{z3}$), όπως φαίνεται και στο σχήμα της Εικόνας 2.1 (Λοΐζος, 1990 και 2008).



Εικόνα 2.1: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος (Λοΐζος, 2008)

Η παραμόρφωση ενός οδοστρώματος μπορεί να είναι ελαστική (ρηγματώσεις) ή παραμένουσα. Η ανάπτυξη της μόνιμης παραμόρφωσης αποτελεί μία κρίσιμη κατάσταση για το οδόστρωμα που ελλοχεύει κινδύνους για τους χρήστες της οδού. Σύμφωνα με τις αρχές σχεδιασμού των οδοστρωμάτων προκαλείται λόγω της αστοχίας της στρώσης έδρασης και της υπέρβασης της θλιπτικής αντοχής της (Εικόνα 2.1). Ωστόσο, η ανάπτυξη παραμενουσών παραμορφώσεων μπορεί να οφείλεται και στην παραμόρφωση των ασφαλτικών στρώσεων. Συνεπώς, η διερεύνηση της παραμένουσας παραμόρφωσης παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον και αποτελεί ένα θεμελιώδες κεφάλαιο στην επιστημονική περιοχή των οδοστρωμάτων.

2.2 Παράγοντες επίδρασης στην παραμένουσα παραμόρφωση

Στην κατασκευή των εύκαμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ασφαλτομιγμάτων ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου. Βασικό συστατικό τους αποτελεί το συνδετικό υλικό, δηλαδή η πετρελαϊκή άσφαλτος. Συνεπώς, οι ιδιότητες της ασφάλτου επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος.

Χαρακτηριστικό μέγεθος της ασφάλτου είναι το ιξώδες, που αποτελεί μία έκφραση της συνοχής της και μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το ιξώδες μαζί με τον βαθμό διείδυσης και τη θερμοκρασία μάλθωσης επηρεάζουν τις ρεολογικές ιδιότητες και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου. Στο τελευταίο επιδρά και η ολκιμότητα, δηλαδή η αντοχή της ασφάλτου σε εφελκυσμό, καθώς επίσης και η

θερμοκρασία, αύξηση της οποίας επιφέρει αύξηση της παραμορφωσιμότητας (Λοΐζος, 2008).

Το ασφαλτόμιγμα αποτελείται από δύο υλικά με διαφορετική μηχανική συμπεριφορά, και περιγράφεται ως ένα ιξωδοελαστικό υλικό. Αυτό συμβαίνει καθώς η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου κάτω από συνήθεις συνθήκες υπερισχύει έναντι της ελαστικής, κυρίως, συμπεριφοράς των συμπτυκνωμένων αδρανών. Η παρακάτω σχέση αποτελεί την έκφραση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος και επισημαίνει την εξάρτησή του από τον χρόνο φόρτισης (t) και τη θερμοκρασία (T):

$$S_m = (\sigma/\varepsilon)_{T,t} \quad (2.1)$$

όπου:

σ : η επιβαλλόμενη τάση και

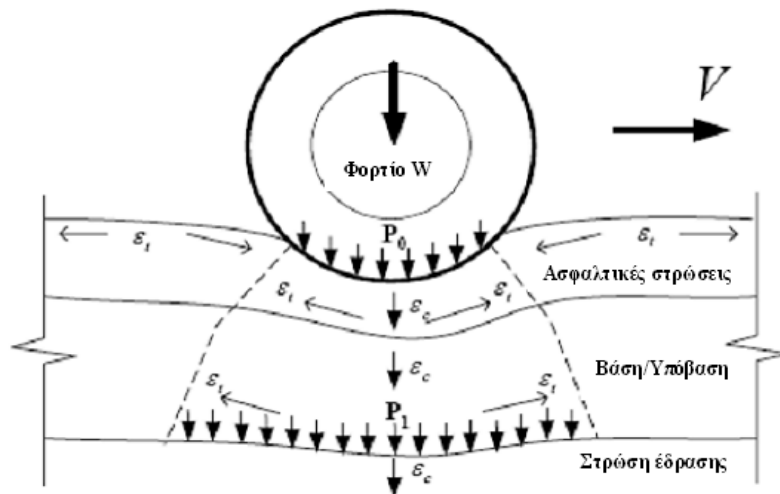
ε : η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση

Το μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος, το ποσοστό των κενών αέρος, το ποσοστό των κενών στον σκελετό των αδρανών και οι ογκομετρικές ποσοστιαίες αναλογίες αδρανών-ασφάλτου είναι μερικοί ακόμη παράγοντες που επηρεάζουν την κατάσταση της δομής του οδοστρώματος (Λοΐζος, 2008).

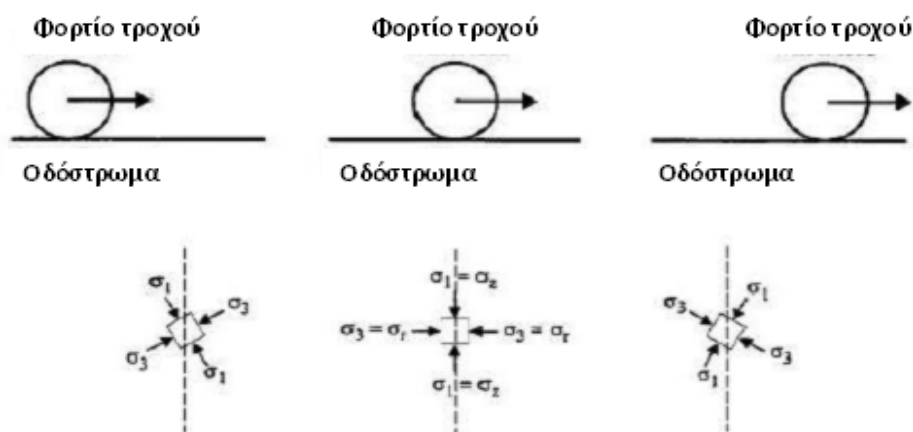
Επιπρόσθετα, οι στρώσεις ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, δηλαδή οι ασφαλτικές στρώσεις, οι βάση-υπόβαση και η στρώση έδρασης χαρακτηρίζονται από το μέτρο ελαστικότητας E , τον λόγο Poisson ν και το μέτρο διάτμησης G , ποσότητες οι οποίες αποτυπώνουν τη συμπεριφορά των υλικών κάθε στρώσης. Επιπλέον ο καθορισμός του πάχους κάθε στρώσεως είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τη αξιολόγηση της αντοχής του οδοστρώματος στην εμφάνιση παραμενουσών παραμορφώσεων.

Η καταπόνηση που υφίστανται τα ασφαλτικά οδοστρώματα από τα φορτία της κυκλοφορίας αποτελεί έναν ακόμα σημαντικό παράγοντα που συντελεί στην ανάπτυξη της μόνιμης παραμόρφωσης. Συνεπώς, οι κυκλοφοριακές συνθήκες επηρεάζουν το μέγεθος και το ρυθμό συσσώρευσης της παραμένουσας παραμόρφωσης (Εικόνα 2.2). Ένα εύκαμπτο οδόστρωμα, λοιπόν, υφίσταται κυρίως δυναμική καταπόνηση από τα επαναλαμβανόμενα φορτία της κυκλοφορίας. Κατά τη διέλευση ενός τροχού από ένα σημείο του οδοστρώματος η επιφάνεια επαφής μεταβάλλεται από μία ελάχιστη τιμή, σε μία μέγιστη και στη συνέχεια πάλι σε μία ελάχιστη. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη δυναμική φόρτιση του οδοστρώματος μέχρι μία μέγιστη τιμή, στην αποφόρτισή του και στην εμφάνιση οριζόντιων, κατακόρυφων (θλιπτικών) και διατμητικών τάσεων (Εικόνα 2.3 και Εικόνα 2.4). Ο

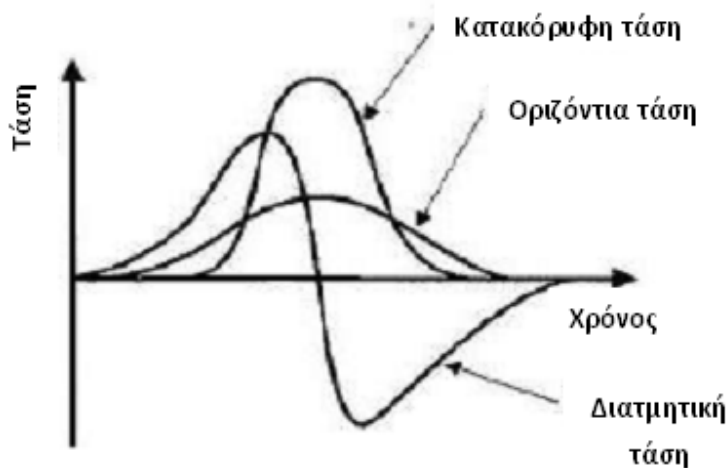
χρόνος επιβολής των φορτίων είναι ανάλογος της ταχύτητας του οχήματος, ενώ η μορφή της φόρτισης είναι περίπου ημιτονοειδής με διάρκεια 0.1 δευτερόλεπτα για την επιφανειακή στρώση και μεγαλύτερη στο υπέδαφος (0.4 δευτερόλεπτα). Έτσι λοιπόν, η συχνότητα της φόρτισης, όπως επίσης και το μέγεθος, η ποικιλία και η διάταξη των επιβαλλόμενων φορτίων καθορίζουν την καταπόνηση και τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Επιπλέον, όσον αφορά στα φορτία κυκλοφορίας, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζει η πίεση, το είδος των ελαστικών (π.χ. τα ελαστικά με καρφιά φθείρουν το ασφαλτικό υλικό) και η εγκάρσια θέση των τροχών. Συνεπώς η κυκλοφορία των οχημάτων προκαλεί φθορές στο οδόστρωμα και τελικά υποβαθμίζει τη λειτουργικότητά του (Λοΐζος, 1990 και 2008).



Εικόνα 2.2: Συμπεριφορά ενός οδοστρώματος έναντι της επιβολής φορτίου τροχού (CHEN et al., 2009)



Εικόνα 2.3: Τάσεις που αναπτύσσονται κάτω από το φορτίο ενός τροχού κατά την κατεύθυνση της κυκλοφορίας- Περιστροφή των κύριων τάσεων (Acikgoz and Rauf, 2010)

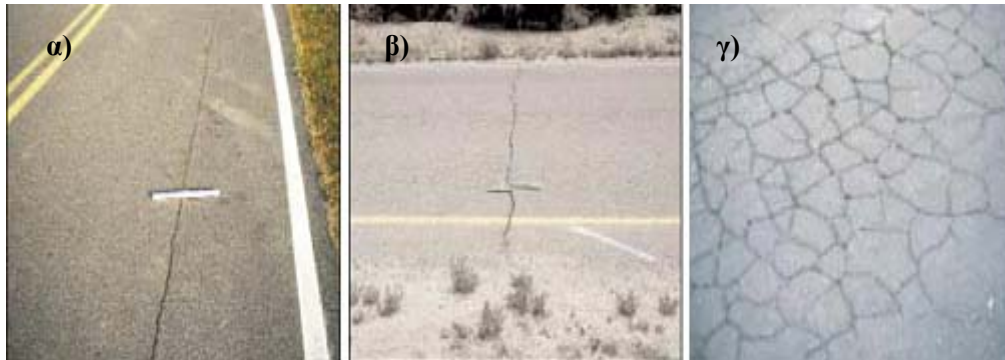


Εικόνα 2.4: Τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα τυχαίο σημείο κατά τη διάρκεια της διελεύσεως φορτίου (Acikgoz and Rauf, 2010)

Το διάγραμμα της Εικόνας 2.4 γενικά υποδηλώνει πως οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες τάσεις μεταβάλλονται κατά παρόμοιο τρόπο με τη διαφορά ότι το κύμα φορτίσεως για τις οριζόντιες τάσεις είναι μεγαλύτερο και με μικρότερη ένταση από το κύμα των κατακόρυφων τάσεων (και συνήθως παρουσιάζει τάσεις εφελκυσμού στο κάτω μέρος των δύσκαμπτων στρώσεων). Επίσης, η διατμητική τάση παρουσιάζει μια αντιστροφή πρόσημου (θλίψη-εφελκυσμός) στο σημείο όπου ο τροχός διέρχεται πάνω από το σημείο (Λοΐζος, 2008).

Επιμέρους παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη παραμένουσας παραμόρφωσης είναι η υπάρχουσα ρηγμάτωση, η διατομή της οδού (αν βρίσκεται σε επίχωμα ή όρυγμα), το ποσοστό της υγρασίας και η άμεση ηλιακή ακτινοβολία.

Όσον αφορά στη ρηγμάτωση, που οφείλεται στην κόπωση της ασφαλικής στρώσης λόγω των επαναλαμβανόμενων φορτίων κυκλοφορίας, η αρχή της δημιουργίας της παρατηρείται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων όπου έχουμε τις μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις (Εικόνα 2.1). Παραδείγματα τέτοιων ρωγμών είναι οι κατά μήκος ρηγματώσεις, οι εγκάρσιες ρωγμές, οι αλιγατορικές ρηγματώσεις, οι ορθογωνικές ρηγματώσεις τύπου μπλοκ και οι ρωγμές ανάκλασης στους αρμούς (Εικόνα 2.5). Λόγω της εμφάνισης των ρωγμών αυτών μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας E της ασφαλικής στρώσης και η φέρουσα ικανότητα έναντι των φορτίων κυκλοφορίας, με αποτέλεσμα να μεταβιβάζονται μεγαλύτερες τάσεις στις πιο αδύναμες περιοχές της βάσης και υπόβασης (Acikgoz and Rauf, 2010).



Εικόνα 2.5: Παραδείγματα α) κατά μήκος ρωγμών, β) εγκάρσιων και γ) αλιγατορικών ρηγματώσεων, αντίστοιχα (Miller and Bellinger, 2003)

Στην περίπτωση που η διατομή της οδού βρίσκεται σε όρυγμα, αν το επίπεδο του νερού, λόγω της ανασκαφής, πλησιάσει την επιφάνεια τότε η βάση και η υπόβαση παρουσιάζουν μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία και μειώνεται το μέτρο ελαστικότητάς τους. Συνεπώς η ύπαρξη ορυγμάτων επιδρά στη μόνιμη παραμόρφωση (Acikgoz and Rauf, 2010).

Εν συνεχεία, η αυξημένη περιεκτικότητα σε νερό επιφέρει μεγαλύτερη παραμένουσα παραμόρφωση λόγω της υπερβολικής πίεσης πόρων που μειώνει τη δυσκαμψία των υλικών. Αντιθέτως, επαρκής ποσότητα νερού έχει θετική επίδραση στην αντοχή και την εντατική κατάσταση των ασύνδετων υλικών (Acikgoz and Rauf, 2010).

Τέλος, η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει τη θερμοκρασία της ασφάλτου, μειώνοντας, έτσι, το μέτρο ελαστικότητας E . Κατ' επέκταση μεταβιβάζονται μεγαλύτερες τάσεις στις στρώσεις από ασύνδετα υλικά (Acikgoz and Rauf, 2010). Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο στην Ελλάδα, που κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών έχουμε μεγάλα ποσοστά ηλιακής ακτινοβολίας.

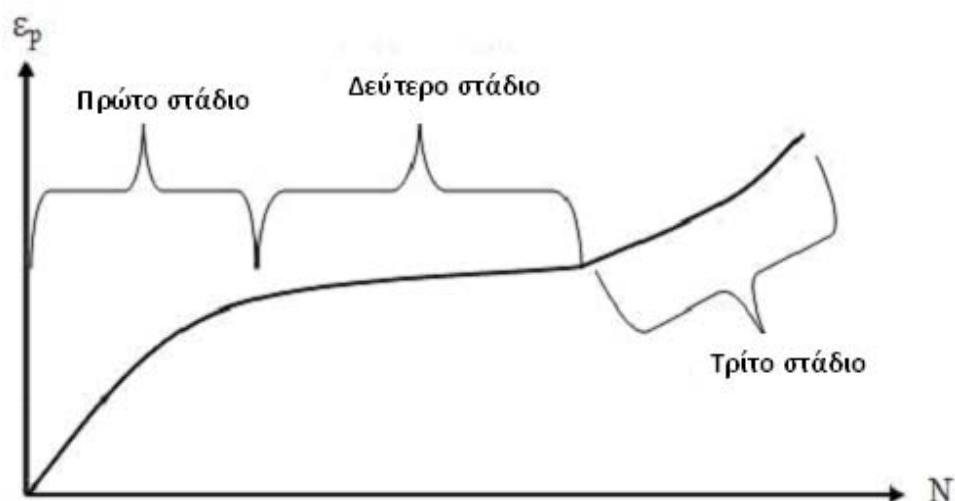
2.3 Βασικά στάδια ανάπτυξης παραμενουσών παραμορφώσεων

Οι Zhou και Scullion (2002) διερευνούν τα τρία πιθανά στάδια της παραμένουσας παραμόρφωσης, που απεικονίζονται και στο διάγραμμα της Εικόνας 2.6:

Πρώτο στάδιο: Είναι το αρχικό στάδιο, όπου η μόνιμη παραμόρφωση πραγματοποιείται με ταχείς ρυθμούς και υφίσταται κατά τη φάση της προ-συμπίεσης. Παρατηρείται μεταβολή του όγκου των υλικών και το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα προκειμένου να αυξήσει την αντοχή του σε περαιτέρω παραμόρφωση.

Δεύτερο στάδιο: Στο στάδιο αυτό ο ρυθμός της μόνιμης παραμόρφωσης είναι αργός και σταθερός, ενώ παρατηρείται αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης με τον ίδιο ρυθμό.

Τρίτο στάδιο: Το τελευταίο στάδιο αντιστοιχεί σε υψηλά επίπεδα της παραμένουσας παραμόρφωσης, η οποία συσχετίζεται με την πλαστική παραμόρφωση. Στο τρίτο στάδιο δεν παρατηρείται ογκομετρική μεταβολή.



Εικόνα 2.6: Τα τρία στάδια της μόνιμης παραμόρφωσης (Acikgoz and Rauf, 2010)

Στο τέλος του δεύτερου σταδίου παρατηρείται υπέρβαση ενός ορίου τάσεων με αποτέλεσμα να αυξάνεται πάλι ο ρυθμός της παραμένουσας παραμόρφωσης. Το όριο αυτό ονομάζεται Πλαστικό Όριο Προσαρμογής (Acikgoz and Rauf, 2010).

2.4 Μορφές της παραμένουσας παραμόρφωσης

2.4.1 Τροχοαυλάκωση

Μία μορφή παραμένουσας παραμόρφωσης είναι η τροχοαυλάκωση. Η τροχοαυλάκωση οφείλεται στη μόνιμη παραμόρφωση μερικών ή όλων των στρώσεων του οδοστρώματος ή του υπεδάφους και προκαλείται από τη σχετική μετακίνηση των υλικών τους εξαιτίας της κυκλοφοριακής φόρτισης. Η μορφή αυτή της παραμένουσας παραμόρφωσης συσχετίζεται με την εγκάρσια κατανομή (προφίλ) της επιφάνειας του οδοστρώματος (Λοΐζος, 1990 και 2008).

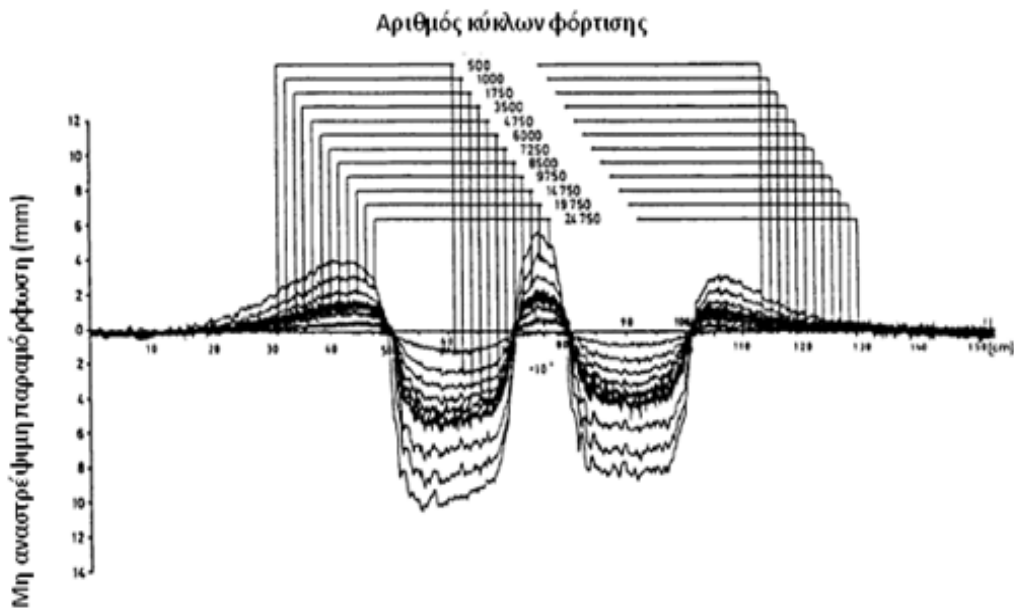
Η τροχοαυλάκωση αναπτύσσεται σταδιακά υπό την επίδραση των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων και συνήθως αποτυπώνεται με τη μορφή παραμορφώσεων κατά μήκος των ιχνών των τροχών, συνοδευόμενη από μικρές ανακατατάξεις στα άκρα. Οι δύο αιτίες που συμβάλλουν στη δημιουργία των

τροχοαυλάκωσης είναι η συμπύκνωση και η διατμητική παραμόρφωση (Sousa et al., 1991). Η εμφάνιση της ενδέχεται να συμβεί σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος.

Σύμφωνα με έρευνες που έγιναν από τη δοκιμή AASHO Road Test (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1962) και τους Hofstra και Klomp (1972) η διατμητική παραμόρφωση είναι καθοριστική στο μηχανισμό της τροχοαυλάκωσης, με τη συμπύκνωση (δηλαδή η μείωση του όγκου και κατ' επέκταση αύξηση της πυκνότητας) να έχει δευτερεύοντα ρόλο. Το διάγραμμα της Εικόνας 2.7, που συμπεριλαμβάνεται στην εργασία των Eisenmann και Hilmer (1987), απεικονίζει την επίδραση του αριθμού των φορών που διέρχεται ο τροχός στο προφίλ της επιφάνειας μιας πλάκας του εργαστηρίου. Οι συγκεκριμένοι συγγραφείς κατέληξαν στο ακόλουθο συμπέρασμα:

Στην αρχική φάση, η συμπίεση λόγω των φορτίων της κυκλοφορίας είναι ο πρωταρχικός μηχανισμός ανάπτυξης της παραμένουσας παραμόρφωσης. Μετά το αρχικό στάδιο όμως το μεγαλύτερο μέρος της συμπίεσης λόγω των κυκλοφοριακών συνθηκών έχει ολοκληρωθεί, οπότε περαιτέρω τροχοαυλάκωση προκαλείται από τη διατμητική παραμόρφωση. Γι' αυτό η διατμητική παραμόρφωση θεωρείται η κυριότερη αιτία της ανάπτυξης τροχοαυλάκωσης στο μεγαλύτερο μέρος της ζωής ενός οδοστρώματος.

Οι Hofstra και Klomp (1972) διαπίστωσαν πως η παραμόρφωση των ασφαλτικών στρώσεων ήταν μεγαλύτερη στην επιφάνεια επιβολής της φορτίσεως και μειωνόταν βαθμιαία σε συνάρτηση με το βάθος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τροχοαυλάκωση αποτελεί μία μόνιμη παραμόρφωση και συνεπώς με την αύξηση του βάθους αυξάνεται η αντίσταση και μειώνονται οι διατμητικές τάσεις. Επίσης, οι Uge και van de Loo (1974) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η περαιτέρω αύξηση του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων πέραν ενός ορίου δεν επιφέρει επιπλέον αύξηση της παραμόρφωσης στο εσωτερικό τους. Τα παραπάνω αποδεικνύουν πως για υλικά με συνήθη δυσκαμψία, η τροχοαυλάκωση περιορίζεται στις ασφαλτικές στρώσεις (Sousa et al., 1991).



Εικόνα 2.7: Επίδραση του αριθμού των φορών που διέρχεται ο τροχός στο εγκάρσιο προφίλ της επιφάνειας (Sousa et al., 1991)



Εικόνα 2.8: Τροχοαλάκωση λόγω αδύναμων ασφαλτικών στρώσεων (Garba, 2002)

Ασφαλτομίγματα με χαμηλή διατηρητική αντοχή, απαραίτητη για την αντίσταση στα επαναλαμβανόμενα φορτία της κυκλοφορίας, παρουσιάζουν έντονο πρόβλημα εμφάνισης τροχοαλακώσεων (Εικόνα 2.8). Το πρόβλημα αυτό γίνεται εντονότερο ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, που παρατηρούνται μεγάλες θερμοκρασίες στο οδόστρωμα (Garba, 2002).



Εικόνα 2.9: Συσσώρευση νερού στο ίχνος τροχού (Dawson and Kolisoja, 2004)

Η εμφάνιση της τροχοαυλάκωσης σε ένα οδόστρωμα συμβάλλει στη δημιουργία του φαινομένου της υδρολίστεσης των τροχών. Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η συσσώρευση νερού στις αυλακώσεις της επιφάνειας ενός οδοστρώματος με αποτέλεσμα να χάνεται η επιφάνεια επαφής ελαστικού και οδοστρώματος, καθιστά επικίνδυνη την οδήγηση (Εικόνα 2.9), (Λοΐζος, 2008).

2.4.2 Έλλειψη ομαλότητας

Η έλλειψη κατά μήκος ομαλότητας στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος αποτελεί μία ακόμη μορφή της παραμένουσας παραμόρφωσης. Χαρακτηριστικά, ο Ullidtz (1998) διερευνώντας το φαινόμενο της απουσίας ομαλότητας σε ένα οδόστρωμα, εξηγεί πώς αυτή είναι αποτέλεσμα των διακυμάνσεων σε όλο το μήκος του. Οι διακυμάνσεις αυτές σχετίζονται με το πάχος των στρώσεων, το μέτρο ελαστικότητας, την περιεκτικότητα σε άσφαλτο, τη δυναμική καταπόνηση κλπ. Η έλλειψη ομαλότητας αποτελεί μία εκτίμηση της μεταβολής της παραμένουσας παραμόρφωσης κατά μήκος του οδοστρώματος (Kenis et al., 1982). Συγκεκριμένα, σαν έλλειψη ομαλότητας ορίζεται το σύνολο των κατά μήκος αποκλίσεων του οδοστρώματος από την πραγματική επίπεδη επιφάνεια, με χαρακτηριστικές διαστάσεις που επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά των οχημάτων, τη δυναμική των φορτίσεων των οδοστρωμάτων και την ποιότητα κύλισης (Λοΐζος, 2008 και Sayers και Karamihas, 1998).

Η κατά μήκος έλλειψη ομαλότητας περιγράφεται από τους κυματισμούς της επιφάνειας του οδοστρώματος. Μεγάλου μήκους κυματισμοί οφείλονται κατά κύριο λόγο στις υποκείμενες στρώσεις, ενώ οι μικρού μήκους κυματισμοί σχετίζονται με την επιφανειακή στρώση. Η ενδεχόμενη αρχική έλλειψη ομαλότητας, που ενδέχεται να οφείλεται σε κατασκευαστικά λάθη ή σε ανεπάρκεια ποιότητας υλικού και εξοπλισμού, συνήθως εντείνεται με το πέρασμα του χρόνου. Η υποβάθμιση αυτή οφείλεται σε παράγοντες που επηρεάζουν την παραμένουσα παραμόρφωση, όπως είναι τα φορτία της κυκλοφορίας και οι περιβαλλοντικές συνθήκες (Λοΐζος, 2008).

Η απουσία ομαλότητας έχει σοβαρό αντίκτυπο στην άνεση των χρηστών μίας οδού και στο κόστος συντήρησης των οχημάτων. Επιπλέον, μεγαλύτερη έλλειψη ομαλότητας συνεπάγεται πιο πολλές και μεγάλες μεταβολές των κατακόρυφων δυνάμεων, ενώ δημιουργούνται, επίσης, πλευρικές δυνάμεις μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος (Λοΐζος, 2008).

2.4.3 Τοπικές καθιζήσεις

Μία άλλη μορφή παραμενουσών παραμορφώσεων είναι καθιζήσεις μικρής έκτασης στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος (Εικόνα 2.10).



Εικόνα 2.10: Τοπική καθίζηση στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος

Πιθανά αίτια δημιουργίας των τοπικών καθιζήσεων είναι η καθίζηση των υποκείμενων στρώσεων, τα φορτία κυκλοφορίας, η έλλειψη αντοχής βάσης λόγω ανεπαρκούς πάχους, κατασκευαστικά λάθη ή η χρήση κακής ποιότητας υλικών.

2.5 Επιπτώσεις της παραμένουσας παραμόρφωσης

Η μόνιμη παραμόρφωση ενός οδοστρώματος υποβαθμίζει το επίπεδο της λειτουργικότητάς του και επιδρά αρνητικά στην ασφάλεια και την άνεση των χρηστών μίας οδού. Η μείωση της ποιότητας και της ταχύτητας κύλισης, η αύξηση του κόστους λειτουργίας ενός οχήματος, η φθορά της αναρτήσεως και των ελαστικών του, καθώς επίσης και η αύξηση της κατανάλωσης των καυσίμων είναι μερικές από τις συνέπειες της εμφάνισης παραμενουσών παραμορφώσεων. Ιδιαίτερα, στην περίπτωση εκτεταμένων φθορών υπάρχει κίνδυνος απώλειας ελέγχου του οχήματος που ενδεχομένως να αποβεί μοιραία για το χρήστη. Ακόμη μία επίπτωση της παραμένουσας παραμόρφωσης είναι η υδρολίσθηση η οποία μπορεί να εγκυμονεί κινδύνους για το χρήστη. Επιπρόσθετα, η εμφάνιση και η διάδοση μόνιμων παραμορφώσεων στο οδόστρωμα επιφέρει μεγάλο κόστος συντήρησης και επισκευής για τον Κύριο ή το Διαχειριστή μίας οδού. Τέλος, η δημιουργία παραμενουσών παραμορφώσεων συντελεί στην περαιτέρω δυναμική καταπόνηση και φθορά του

οδοστρώματος. Έτσι, μειώνεται η διάρκεια ζωής του και το οδόστρωμα τελικά αστοχεί.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί πως η παρατεταμένη εμφάνιση μόνιμων παραμορφώσεων ενδέχεται να συντελέσει και σε αστοχία λόγω κοπώσεως ενός οδοστρώματος λόγω των εφελκυστικών παραμορφώσεων στην επιφάνεια (Barksdale, 1972 και TRB AFD80, 2011).

2.6 Ανάγκη πρόβλεψης και μέτρησης της παραμένουσας παραμόρφωσης

Σύμφωνα, λοιπόν, με όσα προαναφέρθηκαν, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης. Η αύξηση και η διαφοροποίηση των αξονικών φορτίων, η ανάπτυξη τεχνολογιών που επηρεάζουν τον τρόπο κατασκευής ενός ασφαλτομίγματος και οι επαναλήψεις φόρτισης που καταπονούν ένα οδόστρωμα, επιβάλλουν την ανάπτυξη μεθόδων διερεύνησης και προτύπων πρόβλεψης μόνιμων παραμορφώσεων. Πέραν όμως από τη αξιοποίηση των προτύπων πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης είναι απαραίτητη και η επί τόπου οπτική επισκόπηση για την πληρέστερη αξιολόγηση ενός οδοστρώματος. Επιπρόσθετα, μέσω των ποικίλων μεθόδων μέτρησης της μόνιμης παραμόρφωσης προκύπτει ένα σύνολο πληροφοριών που μπορεί να αξιοποιηθεί στα πλαίσια ενός συστήματος διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων.

Ένας παραδοσιακός τρόπος μέτρησης της παραμένουσας παραμόρφωσης στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος είναι η τοποθέτηση πήχη στον άξονα της οδού. Παρόλο που η μέθοδος αυτή δίνει μία άμεση μέτρηση, είναι ιδιαιτέρως χρονοβόρα και δεν παρέχει πληροφορία σε όλο το μήκος της οδού. Η ανάπτυξη, ωστόσο, εξελιγμένων συστημάτων προφίλομέτρησης δίνουν τη δυνατότητα ταχείας, απρόσκοπτης και συνεχούς καταγραφής ενδεχόμενων παραμεινουσών παραμορφώσεων σε ένα οδόστρωμα. Τα προφιλόμετρα υψηλής ταχύτητας είναι από τα πιο ευρέως διαδεδομένα συστήματα που χρησιμοποιούνται τόσο για τη μέτρηση της τροχοαυλάκωσης όσο και για την εκτίμηση της ομαλότητας ενός οδοστρώματος. Καταγράφουν τα χαρακτηριστικά των κατανομών της επιφάνειας του οδοστρώματος σε υψηλές ταχύτητες κίνησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του είδους των προφιλόμετρων είναι το Σύστημα Laser Profiler (LP) του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ. Βέβαια, η τοπογραφική αποτύπωση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος σε συνδυασμό με υψηλή πυκνότητα των απαιτούμενων σημείων αποτύπωσης αποτελεί μία ακριβέστερη μέθοδο καταγραφής της γεωμετρικής κατανομής τη επιφάνειας. Εν τούτοις, το μέγεθος των απαιτούμενων σημείων καθιστά τη διαδικασία αυτή εξαιρετικά χρονοβόρα και δαπανηρή (Λοΐζος, 2008).

3. ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

3.1 Γενικά

Προκειμένου να περιορίσουμε τα πιθανά προβλήματα που προκύπτουν από την ανάπτυξη της παραμένουσας παραμόρφωσης, εμφανίστηκε η ανάγκη πρόβλεψης του μεγέθους της πριν την κατασκευή ενός οδοστρώματος. Η ανάπτυξη μεθόδων ανάλυσης για την εκτίμηση των τάσεων και των οριζόντιων και κατακόρυφων παραμορφώσεων που προκαλούνται από τα φορτία κυκλοφορίας συνέβαλε στην εξέλιξη συστημάτων σχεδιασμού οδοστρωμάτων που περιλαμβάνουν πρότυπα πρόβλεψης των παραμενουσών παραμορφώσεων. Τα συστήματα αυτά βασίζονται σε αναλυτικές, μηχανικές ή μηχανικές-εμπειρικές διαδικασίες. Επιπρόσθετα, ένα μεγάλο μέρος τους περιλαμβάνει κριτήρια για τη μείωση των τιμών της παραμόρφωσης της στρώσης έδρασης σε τέτοιο επίπεδο έτσι ώστε να αποκλείεται η μόνιμη παραμόρφωση στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων σχεδιασμού οδοστρωμάτων περιλαμβάνουν οι έρευνες των: Shell (Claessen et al., 1977), Asphalt Institute (Shook et al., 1982) και State of Kentucky (Southgate et al., 1977). Τέλος, ορισμένοι όπως οι Barksdale και Miller (1977) έθεσαν όρια στην κατακόρυφη τάση, αντί για την παραμόρφωση, της στρώσης έδρασης.

Ο προσδιορισμός των ορίων της τάσης ή της παραμόρφωσης βασίζεται στην υπόθεση ότι αν η μέγιστη κατακόρυφη θλιπτική τάση ή παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης είναι μικρότερη από μία κρίσιμη τιμή, τότε η παραμένουσα παραμόρφωση περιορίζεται σε ένα ανεκτό όριο για καθορισμένο αριθμό επιβαλλόμενων φορτίων. Δυστυχώς, η υπόθεση αυτή δεν αποκλείει την εμφάνιση μόνιμης παραμόρφωσης στην ασφαλτική στρώση. Οι Claessen et al. (1977) σε μια προσπάθεια βελτίωσης της παραπάνω υπόθεσης, συμπεριλαμβάνουν πρόσθετη ανάλυση για την εκτίμηση του ποσοστού της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στην ασφαλτική στρώση. Η διερεύνηση αυτή στηρίζεται σε μία θεώρηση που αφορά στις ανηγμένες παραμορφώσεις των στρώσεων ενός οδοστρώματος και βασίζεται στην ελαστική ανάλυση ενός στρωματοποιημένου μέσου.

Επιπρόσθετα, στα πλαίσια της διερεύνησης της πρόβλεψης των παραμενουσών παραμορφώσεων έγιναν προσπάθειες ανάλυσης της συμπεριφοράς των στρώσεων ενός οδοστρώματος. Έτσι, διαμορφώθηκαν θεωρήσεις που σχετίζονται με την ελαστική και την ιξωδοελαστική συμπεριφορά των στρώσεων και βασίζονται σε νόμους που διέπουν τη μηχανική των υλικών. Νεότερες έρευνες είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη σύνθετων αναλύσεων (ιξωδοπλαστική ανάλυση, κ.ά.). Ωστόσο, λόγω πολυπλοκότητας των αναλύσεων αυτών και έλλειψης κατάλληλων

λογισμικών, οι σύνθετες αναλύσεις δεν είναι αξιοποιήσιμες. Έτσι, η ανάπτυξη μηχανικών προτύπων πρόβλεψης της παραμόρφωσης βασίζεται στην ελαστική ή ιξωδοελαστική ανάλυση.

3.2 Θεώρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων των στρώσεων

Η θεώρηση αυτή συνίσταται στη χρήση χαρακτηριστικών της μόνιμης παραμόρφωσης, όπως αυτά προσδιορίζονται από εργαστηριακές δοκιμές και σε μία διαδικασία ανάλυσης της δομής ενός οδοστρώματος βάσει της γραμμικής ή μη γραμμικής ελαστικής θεωρίας. Η γενική αρχή που διέπει αυτή τη μέθοδο προτάθηκε πρώτα από τους Barksdale (1972) και Romain (1972). Παρόλο που η μη γραμμική ελαστική θεωρία παρέχει αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας (Brown και Bell, 1977), δεν παρατηρείται εκτεταμένη χρήση της λόγω της πολυπλοκότητάς της.

Σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή, κάθε στρώση ενός οδοστρώματος χωρίζεται σε έναν αριθμό επιμέρους στρώσεων. Στη συνέχεια βάσει της ελαστικής ανάλυσης, η εντατική κατάσταση υπολογίζεται στο μέσο κάθε επιμέρους στρώσης ακριβώς κάτω από το φορτίο του τροχού (Εικόνα 3.1). Για την πρόβλεψη του μεγέθους της μόνιμης παραμόρφωσης επιβάλλεται ένας δεδομένος αριθμός φορτίων τροχού. Η μέση τάση στο κέντρο κάθε επιμέρους στρώσεως χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντίστοιχης αξονικής πλαστικής παραμόρφωσης μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση, για δεδομένο αριθμό επαναλήψεων της φόρτισης, προκύπτει από το άθροισμα των γινομένων της μέσης πλαστικής παραμόρφωσης στο μέσο κάθε επιμέρους στρώσης και του αντίστοιχου πάχους (Sousa et al., 1991), δηλαδή:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n [(\varepsilon_i^p) * (\Delta z_i)] \quad (3.1)$$

όπου:

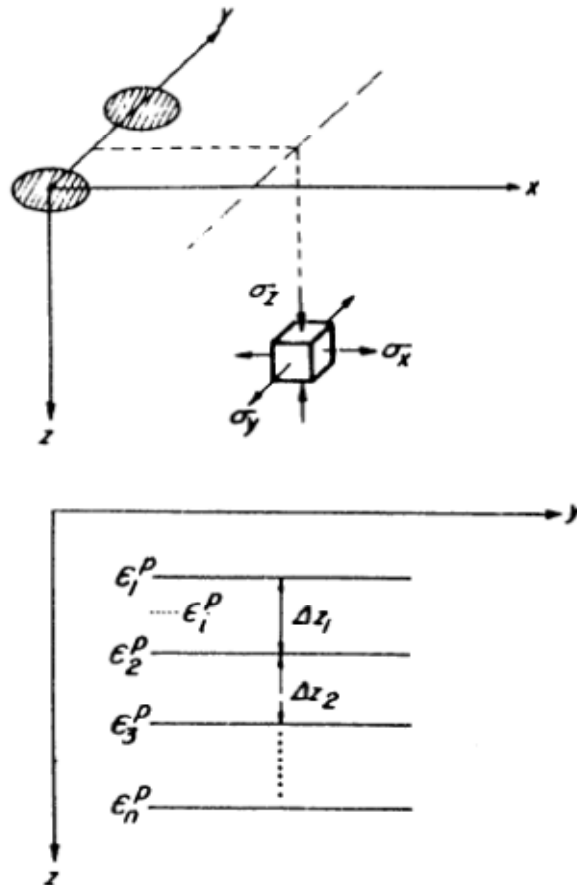
Δp : συνολική παραμένουσα παραμόρφωση

ε_i^p : μέση πλαστική παραμόρφωση στη στρώση i

Δz_i : πάχος της στρώσης i , και

n : συνολικός αριθμός των επιμέρους στρώσεων

Η μέθοδος αυτή έχει υιοθετηθεί σε διάφορες μορφές από πολλούς ερευνητές, προκειμένου να αναπτύξουν πρότυπα πρόβλεψης της μόνιμης παραμόρφωσης, βάσει ελαστικών αναλύσεων της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων.



Εικόνα 3.1: Δομικό σύστημα ενός οδοστρώματος για την εκτίμηση της μόνιμης παραμόρφωσης (Sousa et al., 1991)

Η παρούσα θεώρηση αποτελεί μία απλοποιημένη μηχανική προσέγγιση για την πρόβλεψη του μεγέθους της μόνιμης παραμόρφωσης και παρέχει την δυνατότητα της χρήσης γραμμικής ή μη γραμμικής ελαστικής ανάλυσης. Εν τούτοις, απαιτούνται πρόσθετες βελτιώσεις για την επέκταση της πρόβλεψης της παραμόρφωσης από τη κεντρική γραμμή της φόρτισης σε ολόκληρη τη ζώνη της. Αυτές οι βελτιώσεις μπορεί να περιλαμβάνουν εργαστηριακές δοκιμές αξονικής θλίψης, ερπυσμού ή επαναλαμβανόμενων φορτίσεων. Στην περίπτωση που οι προβλέψεις εκτείνονται πέραν του κέντρου της φορτιζόμενης περιοχής, οι εργαστηριακές διαδικασίες πρέπει να ενσωματώσουν την πρόβλεψη των εντατικών καταστάσεων που συμπεριλαμβάνουν και διατμητικές συνιστώσες. Οι τελευταίες εμφανίζονται πέραν την κεντρικής γραμμής και είναι ιδιαίτερα σημαντικές κοντά στα άκρα των ελαστικών (Sousa et al., 1991).

3.3 Ιξωδοελαστική συμπεριφορά των υλικών των στρώσεων των οδοστρωμάτων

Όπως προαναφέρθηκε, η δημιουργία προτύπων πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης μπορεί να βασιστεί σε ελαστική ή ιξωδοελαστική ανάλυση των οδοστρωμάτων. Ωστόσο, η ελαστική ανάλυση που βασίζεται στη θεώρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων των στρώσεων, δεν είναι αντιπροσωπευτική της πραγματικότητας, καθώς η συμπεριφορά των στρώσεων ενός οδοστρώματος δεν είναι ελαστική. Αντίθετα, η ιξωδοελαστική θεώρηση χαρακτηρίζει ένα οδόστρωμα καλύτερα.

Στην ιξωδοελαστική ανάλυση, ο προσδιορισμός της εντατικής κατάστασης σε συγκεκριμένα σημεία της δομής ενός οδοστρώματος γίνεται βάσει των κυκλοφοριακών φορτίων και των εξαρτώμενων από το χρόνο ιδιοτήτων των υλικών. Οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να καθοριστούν μέσω των προτύπων πεπερασμένων στοιχείων του Maxwell και/ ή του Kelvin με διάφορες ρυθμίσεις ή μέσω γενικευμένων αποδεκτών σχέσεων. Ένα βασικό πλεονέκτημα της ανάλυσης αυτής είναι ότι τα φορτία του κινούμενου τροχού εξετάζονται άμεσα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιβολή του σωστού ρυθμού φόρτισης σε κάθε υλικό στοιχείο και τη δυνατότητα εκτίμησης της εγκάρσιας πλαστικής ροής των υλικών κάτω από τον κινούμενο τροχό (Sousa et al., 1991).

Παρόλο που η μη γραμμική ανάλυση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ενδέχεται να αποτυπώνει πιο ρεαλιστικά τη συμπεριφορά ενός οδοστρώματος, οι μαθηματικές δυσκολίες που προκύπτουν περιορίζουν τις αναλύσεις σε γραμμικές (Barksdale και Leonards, 1967). Στη γραμμική ανάλυση, γίνεται η παραδοχή ότι οι ιδιότητες των υλικών μιας συγκεκριμένης στρώσης είναι ίδιες σε όλη την έκταση της στρώσης ανεξάρτητα από το αν το υλικό υπόκειται σε εφελκυσμό ή θλίψη.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η μέθοδος της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς, η γενικευμένη γραμμική ελαστική ιξωδοελαστική συμπεριφορά είναι προσπελάσιμη. Ωστόσο οι υπολογισμοί είναι χρονοβόροι και η υπόθεση της γραμμικότητας αμφισβητήσιμη (Thrower, 1977). Επίσης, ένα μη γραμμικό πρότυπο ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς δεν ενδείκνυται για τη δημιουργία κατάλληλων μη γραμμικών εξισώσεων εξαρτώμενων από τον χρόνο, εξαιτίας της υπολογιστικής προσπάθειας και του μεγέθους των εργαστηριακών εργασιών που απαιτούνται. Τα ίδια μειονεκτήματα έχει και μία ιξωδοπλαστική θεωρία συνδυασμένη με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (Thrower, 1977).

3.4 Πρότυπα πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης

Για την επίτευξη ακριβέστερων προβλέψεων της παραμένουσας παραμόρφωσης των οδοστρωμάτων έγιναν προσπάθειες από πολλούς ερευνητές να βελτιώσουν τα ήδη υπάρχοντα πρότυπα. Οι βελτιώσεις αυτές περιλαμβάνουν σχέσεις της μηχανικής, χαρακτηρισμούς των υλικών, θερμοκρασιακές μεταβολές ανάλογα με το βάθος των στρώσεων, κλπ. Παρακάτω συνοψίζονται μερικά από τα πιο σημαντικά πρότυπα, τα οποία διερευνούν τη συμπεριφορά των υλικών των στρώσεων. Τα πρότυπα αυτά παρουσιάζονται με χρονολογική σειρά.

Οι Barksdale και Leonards (1967) ενσωμάτωσαν στο πρότυπό τους τη γραμμική ιξωδοελαστική θεωρία, εφαρμόζοντας στατική φόρτιση στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος. Κατέγραψαν τις εξαρτημένες από το χρόνο ιδιότητες των υλικών βάσει τριαξονικών δοκιμών επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Για τη διαμόρφωση του προτύπου έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Οι δυνάμεις αδράνειας λόγω καταπόνησης αγνοήθηκαν.
- Επιλέχθηκε στατική επαναλαμβανόμενη φόρτιση έναντι του κινούμενου φορτίου.
- Οι στρώσεις εκτείνονταν άπειρα κατά την οριζόντια διεύθυνση.
- Το μέτρο ελαστικότητας θεωρήθηκε σταθερό σε όλες τις στρώσεις και
- Η άσφαλτος και η άργιλος χαρακτηρίστηκαν ως γραμμικά ιξωδοελαστικά στερεά.

Οι τιμές της παραμένουσας παραμόρφωσης που υπολογίστηκαν βάσει του συγκεκριμένου προτύπου παρουσίασαν μία σύγκλιση με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές της δοκιμής AASHO Road Test. Συνεπώς, το πρότυπο που πρότειναν οι συγγραφείς μπορεί να αποτελέσει μία σχετικά καλή προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς των ασφαλτικών οδοστρωμάτων.

Οι Brown και Bell (1977) ακολούθησαν τη θεώρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων και συνέκριναν τις προβλεπόμενες τιμές της παραμένουσας παραμόρφωσης με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από μετρήσεις του πειράματος Nottingham Test Track. Γενικά, διαπίστωσαν μία λογική συμφωνία μεταξύ των συνολικών μετατοπίσεων που προβλέφθηκαν και των αντίστοιχων που μετρήθηκαν. Ωστόσο, στις περιπτώσεις όπου παρατηρήθηκε κάποια διαταραχή, τα αποτελέσματα των προβλέψεων δεν ήταν ικανοποιητικά. Οι ιδιότητες των υλικών μετρήθηκαν βάσει της τριαξονικής δοκιμής με επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Οι Brown και Bell (1977) επέλεξαν να χρησιμοποιήσουν τη μέθοδο φορτίο-τάση (p-q) για τον προσδιορισμό των εντατικών καταστάσεων στην εφελκυστική ζώνη του οδοστρώματος. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή η εντατική κατάσταση ενός σημείου ενός χώρου τριών διαστάσεων μπορεί να περιγραφεί από τις εξής παραμέτρους:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3.2)$$

όπου:

p: η κανονική τάση και

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3.3)$$

όπου:

τ_{oct} : η οχταεδρική διατμητική τάση

Για λόγους ευκολίας χρησιμοποιείται ο ακόλουθος όρος q της διατμητικής τάσης:

$$q = \frac{3}{\sqrt{2}}\tau_{oct} \quad (3.4)$$

που στην περίπτωση της αξονικής συμμετρίας ($\sigma_2 = \sigma_3$), όπως συμβαίνει στην τριαξονική δοκιμή, ο όρος q είναι η παρεκκλίνουσα τάση και ισούται με:

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (3.5)$$

Οι Kirwan et al. (1977) παρουσίασαν ένα πρότυπο πρόβλεψης της μόνιμης παραμόρφωσης, απλό για τις πρακτικές εφαρμογές. Βασίστηκαν στη θεώρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων και χρησιμοποίησαν ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων, το DEFPAV. Για την εκτίμηση των δυναμικών ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος, οι συγγραφείς πρότειναν μία σχέση μεταξύ της στατικής και της δυναμικής φόρτισης έτσι ώστε να προκύπτουν οι ίδιες αναλογίες της παραμόρφωσης. Πρότειναν, λοιπόν, το επίπεδο της στατικής τάσης που είναι ισοδύναμο με κάθε κύμα δυναμικής πίεσεως, να ισούται με την τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου του δυναμικού παλμού φορτίσεως στο δοκίμιο για τη δοκιμή ερπυσμού. Έτσι, στην περίπτωση της ημιτονοειδούς φορτίσεως, το ισοδύναμο στατικό επίπεδο είναι 61 τοις εκατό των μέγιστων τιμών. Αυτή η θεώρηση προσφέρει μία απλή και πρακτική διαδικασία εκτίμησης των δυναμικών χαρακτηριστικών ενός υλικού.

Για την εκτίμηση της μόνιμης παραμόρφωσης οι συγγραφείς στηρίχτηκαν σε μία μέθοδο χειρισμού της εγκάρσιας κατανομής των φορτίων βασιζόμενη στην ιδέα του χρόνου σκλήρυνσης που περιγράφεται από τον Freeme (1973). Η μέθοδος αυτή συνίσταται αρχικά στον υπολογισμό της μόνιμης παραμόρφωσης ως συνάρτηση του αριθμού των επαναλήψεων των φορτίων τροχού σε κάθε καθορισμένη απόσταση από την κεντρική γραμμή του ίχνους του τροχού. Οι πλαστικές παραμορφώσεις συσσωρεύονται και αποτυπώνονται συνεχώς σε κάθε καμπύλη σύμφωνα με την προηγούμενη μόνιμη παραμόρφωση και τον αριθμό των επαναλήψεων φόρτισης που

αντιστοιχούν στην καμπύλη αυτή. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του προτύπου των Kirwan et al. (1977) με τις μετρημένες τιμές της παραμένουσας παραμόρφωσης των δοκιμών με πολλούς τροχούς στο Nottingham, αποδεικνύει ότι οι τιμές που υπολογίστηκαν ήταν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μετρημένες, ενώ αντιθέτως οι μορφές των καμπυλών των δύο μεγεθών συναρτήσεως των φορών που διέρχεται ο τροχός ήταν όμοιες.

Η θεώρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων των στρώσεων χρησιμοποιήθηκε επίσης και από τους Monismith et al. (1977). Στο συγκεκριμένο πρότυπο εντάχθηκαν βασικές σχέσεις που προκύπτουν από την τριαξονική δοκιμή συμπίεσης με επαναλαμβανόμενη φόρτιση σε μίγματα οδοστρωμάτων, με την υπόθεση ότι οι τάσεις μπορούν να εκτιμηθούν βάσει της θεωρίας των ελαστικών στρώσεων. Η συμπεριφορά του οδοστρώματος προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο λογισμικό, το ELSYM (Elastic Layered System) που αφορά σε ελαστικές στρώσεις. Η ανάλυση έγινε για ένα πλήθος αξονικών φορτίων και για εποχιακές διακυμάνσεις της κυκλοφορίας. Η μέση θερμοκρασία κάθε επιμέρους στρώσης για κάθε μήνα υπολογίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο που προτάθηκε από τον Barber (1957). Η ακόλουθη έκφραση αναπτύχθηκε προκειμένου να συσχετιστεί η μόνιμη πλαστική παραμόρφωση με την εντατική κατάσταση του οδοστρώματος:

$$\varepsilon_z^p = R * [\sigma_z - 0.5 * (\sigma_x + \sigma_y)] \quad (3.6)$$

όπου:

σ_x και σ_y : οριζόντιες τάσεις σε ένα σημείο του οδοστρώματος

σ_z : κατακόρυφη τάση

R: ποσότητα που ισούται με $\delta(T)N^a\bar{\sigma}^{\eta-1}t$ για το ασφαλτοσκυρόδεμα

ε_z^p : κατακόρυφη μόνιμη παραμόρφωση

$\delta(T)$: συνάρτηση της θερμοκρασίας

N: αριθμός των εφαρμογών της τάσης

$\bar{\sigma}$: ισοδύναμη τάση που προσδιορίζεται ως συνάρτηση των κύριων τάσεων

t: χρόνος φόρτισης και

a και η: συντελεστές που προέκυψαν εργαστηριακά

Η παραπάνω εξίσωση τροποποιήθηκε σύμφωνα με τη θεωρία της γραμμικής ελαστικότητας προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των παραμενουσών

παραμορφώσεων σε κάθε εντατική κατάσταση. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε για ένα οδόστρωμα, όπου και παρατηρήθηκε μία λογική σύγκλιση μεταξύ των τιμών της παραμένουσας παραμόρφωσης που υπολογίστηκαν και των αντίστοιχων που παρατηρήθηκαν. Εν τούτοις, στο συγκεκριμένο πρότυπο δεν λαμβάνονται υπόψη η επίδραση της πλευρικής τοποθέτησης του φορτίου και οι αντιστροφές των διατμητικών τάσεων κατά τη διέλευση του φορτίου.

Οι Meyer και Haas (1977) ανέπτυξαν ένα πρότυπο πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης στα ασφαλτικά οδοστρώματα βασιζόμενοι στον προσδιορισμό των ανηγμένων παραμορφώσεων των στρώσεων και σε μαθηματικά πρότυπα όπου οι ιδιότητες των υλικών προέκυψαν από τριαξονικές δοκιμές επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Στη δοκιμή της επαναλαμβανόμενης φόρτισης, οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες τάσεις ελέγχθηκαν ανεξάρτητα. Στατιστικά σημαντικές μεταβλητές που επηρεάζουν τις μόνιμες παραμορφώσεις στα τριαξονικά δοκίμια είναι η εντατική κατάσταση, η θερμοκρασία, η πυκνότητα των ασύνδετων υλικών της βάσης, τα κενά αέρος του ασφαλτοσκυροδέματος και ο αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης, όπως περιγράφει και η ακόλουθη εξίσωση:

$$\varepsilon_p = f(\sigma_1, \sigma_3, T, D, AV, D) \pm E \quad (3.7)$$

όπου:

ε_p : παραμένουσα παραμόρφωση

σ_1 : κατακόρυφη τάση

σ_3 : πλευρική τάση

T: θερμοκρασία

D: πυκνότητα (για τα ασύνδετα υλικά της βάσης)

AV: κενά αέρος (για το ασφαλτοσκυρόδεμα)

E: εκτίμηση του σφάλματος

Η εξίσωση αυτή αποτελεί τη βάση του προτύπου των Meyer και Haas (1977). Οι μόνιμες παραμορφώσεις υπολογίστηκαν σε τυπικά οδοστρώματα, ενώ οι τάσεις που εφαρμόστηκαν, καθορίστηκαν με μη-γραμμικές ελαστικές μεθόδους όπως τεχνικές πεπερασμένων στοιχείων ή επαναληπτικές ελαστικές λύσεις πολλαπλών στρώσεων. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων έγινε με τις μετρημένες τιμές της παραμένουσας παραμόρφωσης της δοκιμής The Brampton Test Road (στο Οντάριο του Καναδά). Οι συγκεκριμένοι ερευνητές ανέπτυξαν ένα πρότυπο στο οποίο οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την παραμένουσα παραμόρφωση είναι το πάχος

της ασφαλικής στρώσης, το μέτρο ελαστικότητας του ασφαλτοσκυροδέματος και της στρώσης έδρασης και ο αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης. Στο πρότυπο αυτό γίνεται χρήση της εξής ισοδυναμίας των στρώσεων: 1 inch ασφαλικής στρώσης ισούται με 2 inch κοκκώδους βάσης ή 3 inch υπόβασης. Επιπλέον οι Meyer και Haas (1977) κατέληξαν σε ένα βέλτιστο πάχος ασφαλικής στρώσης που αντιστοιχεί στην ελάχιστη μόνιμη παραμόρφωση. Σε ένα πραγματικό οδόστρωμα, ωστόσο, πιθανότατα υπάρχει ένα όριο στο βάθος των ασφαλικών επιφανειών πέραν του οποίου πρόσθετη παραμόρφωση είναι ασήμαντη, όπως διαπιστώνεται και στη δοκιμή του AASHTO Road Test. Επίσης, παρατηρήθηκε μία γενική σύγκλιση των τιμών όπως αυτές προέκυψαν από τα πειράματα και από το συγκεκριμένο πρότυπο πρόβλεψης. Ωστόσο, τίθενται περιορισμοί λόγω των τροποποιήσεων που απαιτούνται σε περίπτωση διαφορετικών υλικών από εκείνα του The Brampton Test Road, του κόστους του εξοπλισμού και της διάρκειας της τριαξονικής δοκιμής.

Οι ερευνητές της Shell (van de Loo, 1978, de Hilster και van de Loo, 1977) ανέπτυξαν ένα πρακτικό πρότυπο σύμφωνα με τη θεώρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων, για να προβλέψουν την παραμένουσα παραμόρφωση στην ασφαλική στρώση. Η θεώρηση αυτή αποτέλεσε κομμάτι του συστήματος σχεδιασμού οδοστρωμάτων της Shell.

Ο προσδιορισμός της μόνιμης παραμόρφωσης απαιτεί λεπτομερείς πληροφορίες για τα συστατικά του μίγματος, την κυκλοφορία, τις συνθήκες περιβάλλοντος, μία ελαστική ανάλυση, καθώς επίσης και δεδομένα από μία απλή μονοαξονική δοκιμή ερπυσμού σε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα. Βασική προϋπόθεση είναι ότι οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο εύκαμπτο οδόστρωμα σχετίζονται με τις αντίστοιχες της εργαστηριακής δοκιμής ερπυσμού (Hills, 1973). Διαπιστώθηκε, λοιπόν, πως η ακαμψία του μίγματος (S_{mix}) και η ακαμψία της ασφάλτου (S_{bit}) συσχετίζονται μοναδικά ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας καθώς η S_{bit} είναι συνάρτηση και του χρόνου φόρτισης και της θερμοκρασίας.

Στο συγκεκριμένο πρότυπο η απαιτούμενη ακαμψία της ασφάλτου είναι το ιξώδες συστατικό της συνολικής ακαμψίας ($(S_{bit})_{visc}$), η οποία ισούται με:

$$(S_{bit})_{visc} = \frac{3 \cdot \eta}{N \cdot t_w} \quad (3.8)$$

όπου:

N: συνολικός αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης

t_w : χρόνος φόρτισης για μία εφαρμογή του φορτίου (σε δευτερόλεπτα) και

η : ιξώδες της ασφάλτου (Ns/m^2)

Ο υπολογισμός της μόνιμης παραμόρφωσης των ασφαλικών στρώσεων γίνεται βάσει της εξίσωσης:

$$\Delta h = C_M * h * \left(\frac{\sigma_{av}}{S_{mix}} \right) \quad (3.9)$$

όπου:

σ_{av} : μέση τάση της ασφαλικής στρώσης και ισχύει $\sigma_{av} = Z * \sigma_o$

h : πάχος ασφαλικής στρώσης

S_{mix} : τιμή της ακαμψίας του δείγματος

C_M : διορθωτικός συντελεστής

Z : συντελεστής που καθορίζεται από την ελαστική ανάλυση των στρώσεων και

σ_o : τάση επαφής μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος

Επιπλέον στο πρότυπο αυτό η ασφαλική στρώση (ή οι ασφαλικές στρώσεις) χωρίζεται σε τρεις επιμέρους στρώσεις και υπολογίζεται έτσι η παραμόρφωση σε κάθε μία από αυτές με τις αντίστοιχες τιμές S_{mix} και σ_{av} .

Οι Battiato et al. (1977) διερεύνησαν ένα ιξωδοελαστικό ασυμπίεστο οδόστρωμα δύο στρώσεων που υπόκειται σε μία ακολουθία κινούμενων φορτίων. Τα χαρακτηριστικά των υλικών της ασφαλικής στρώσης, η οποία παρουσιάζει ιξώδη συμπεριφορά, περιγράφηκαν από μία συνάρτηση προσαρμογής για τον ερπυσμό που προέκυψε από εργαστηριακές δοκιμές. Η στρώση έδρασης θεωρήθηκε ελαστική. Οι παραπάνω ερευνητές παρατήρησαν πως τα αποτελέσματα της χωρικής διακύμανσης των μόνιμων παραμορφώσεων στα ιξώδη στοιχεία παρουσιάζουν ενδιαφέρον στη σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν βάσει πειραμάτων στον πραγματικό χώρο. Κατέληξαν, επίσης, στο γεγονός ότι οι παραμορφώσεις λόγω μίας μόνο διέλευσης μπορούν να υπολογιστούν με επαρκή ακρίβεια από μία ισοδύναμη ελαστική μέθοδο. Αντίθετα η επίδραση της επαναλαμβανόμενης φόρτισης απαιτεί μία ιξωδοελαστική ανάλυση.

Ο Huschek (1977) με τη βοήθεια της ιξωδοελαστικής ανάλυσης υπολόγισε την παραμένουσα παραμόρφωση βάσει ενός προτύπου του Maxwell για τη συμπεριφορά των ασφαλικών στρώσεων. Στο πρότυπο αυτό το ιξώδες του αποσβεστήρα αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων φόρτισης και εξαρτάται από το χρόνο. Ο Huschek πρότεινε πως περιορίζοντας το δοκίμιο, προσδιορίζεται καλύτερα η επίδραση της εσωτερικής τριβής στο αδρανές. Το πρότυπο της συμπεριφοράς των ασφαλικών υλικών καθορίζεται από μία μη

περιορισμένης συμπίεσης δοκιμή ερπυσμού, ενώ τα μη ασφαλτικά υλικά θεωρούνται ελαστικά. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη η θερμοκρασιακή διακύμανση στο οδόστρωμα, ο αριθμός και το ποσοστό των φορτίσεων των τροχών, η εγκάρσια διακύμανση της κυκλοφορίας και η ταχύτητα των οχημάτων. Ο υπολογισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων βασίστηκε στο πρόγραμμα BISAR (Bituminous Structures Analysis in Roads). Οι συγγραφείς αξιολόγησαν το πρότυπό τους βάσει των μετρήσεων της παραμένουσας παραμόρφωσης σε ένα πειραματικό δρόμο κοντά στη Ζυρίχη. Έτσι, παρατηρήθηκε μία συσχέτιση των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών. Ωστόσο, τα στοιχεία που αφορούν στην κυκλοφοριακή πυκνότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία, στο φάσμα του φορτίου του τροχού αλλά και σε παράγοντες που λαμβάνουν υπόψη τις διαφορές μεταξύ των εργαστηριακών και των επί τόπου συνθηκών, δεν ήταν ακριβή για την πρόβλεψη της παραμόρφωσης.

Ο Kenis (1977, 1982) ανέπτυξε ένα πρότυπο ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς (VESYS), το οποίο αποτελείται από τέσσερα επιμέρους βασικά αλληλεπιδρώντα πρότυπα, της πρωτοβάθμιας απόκρισης, της γενικής απόκρισης, της φθοράς και της απόδοσης. Το πρώτο πρότυπο αποτελεί μία πιθανολογική γραμμική ιξωδοελαστική επίλυση για τη μέση τάση, παραμόρφωση και απόκλιση, που εξαρτώνται από τον χρόνο, σε προκαθορισμένες θέσεις ενός στρωματοποιημένου ιξωδοελαστικού συστήματος.

Το επιμέρους πρότυπο πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης αποτελεί μέρος του προτύπου φθοράς και βασίζεται στην παραδοχή ότι το μέγεθος της παραμόρφωσης είναι ανάλογο του λογαρίθμου των επαναλήψεων φόρτισης. Η μόνιμη παραμόρφωση όλων των υλικών του οδοστρώματος περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\varepsilon_p(N) = \varepsilon * \mu * N^{-\varepsilon} \quad (3.10)$$

όπου:

α και μ : παράμετροι της παραμένουσας παραμόρφωσης και

ε : μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης περίπου ημιτονοειδούς φόρτισης για κύμα φορτίσεως διάρκειας 0.1 δευτερολέπτων στην διακοσιοστή (200^η) επανάληψη.

Για την πρόβλεψη της συνολικής παραμόρφωσης του οδοστρώματος, χρησιμοποιήθηκε ένα πρότυπο όπου συνδυάστηκαν οι αποκρίσεις των στρώσεων. Το πρότυπο περιγράφεται ως εξής:

$$Y_p(N) = Y\mu_{sys}N^{-a_{sys}} \quad (3.11)$$

όπου:

$Y_p(N)$: επαυξητική παραμένουσα παραμόρφωση ανά παλμό

Y : γενική περίπου ημιτονοειδής μετατόπιση της μέγιστης φόρτισης και

μ_{sys} και α_{sys} : οι παράμετροι της παραμένουσας παραμόρφωσης του συστήματος

Ο Thrower (1977) και οι Thrower et al. (1986) βασίστηκαν στην ανάλυση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς για τον προσδιορισμό της παραμένουσας παραμόρφωσης. Ο συνδυασμός «ξεχωριστών» μεθόδων, στις οποίες αντιστοιχούν ιδιότητες των υλικών για την παραμόρφωση, όπως προέκυψαν από εργαστηριακές δοκιμές, και διακυμάνσεων των τάσεων, που προσδιορίστηκαν ξεχωριστά χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η μόνιμη παραμόρφωση (π.χ. Monismith et al., 1977), μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην εκτίμηση της συμβολής των διαφόρων στρώσεων στην ανάπτυξη παραμένουσας παραμόρφωσης.

Οι Thrower et al. (1986) παρουσίασαν ένα γραμμικό ιξωδοελαστικό πρότυπο για τη συμπεριφορά των υλικών με στόχο να παρέχουν τιμές για τη μακροχρόνια μη αναστρέψιμη παραμόρφωση στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος για δεδομένο ιστορικό φορτίσεως. Επέκτειναν, επίσης, την έρευνά τους σε μη γραμμικά υλικά μέσω μίας αυξητικής γραμμικής ανάλυσης. Στο πρότυπό τους περιλαμβάνονται επιλύσεις για κυκλικά και λωριδωτά φορτία. Μάλιστα, οι επιλύσεις των τελευταίων παρέχουν τη δυνατότητα ανάπτυξης μιας μορφής μόνιμης παραμόρφωσης, όπως θα προέκυπτε και από τα φορτία κυκλοφορίας. Επίσης, διαπιστώθηκε πως η μόνιμη μετατόπιση εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους του ιξώδους και καθόλου από τις ελαστικές ιδιότητες. Για τον υπολογισμό των μόνιμων παραμορφώσεων οι παραπάνω ερευνητές βασίστηκαν σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Ο Goacolu (1987) χρησιμοποίησε πεπερασμένα στοιχεία για τον υπολογισμό της μόνιμης παραμόρφωσης. Διαμόρφωσε ένα πρότυπο δύο διαστάσεων στο οποίο, για την περίπτωση των ασφατικών υλικών έγινε διαχωρισμός ανάμεσα στην αναστρέψιμη και μη αναστρέψιμη συμπεριφορά. Η πρώτη περιγράφεται από το νόμο του Hooke και οι παράμετροί της εξαρτώνται από το ρυθμό φόρτισης και τη θερμοκρασία. Η μη αναστρέψιμη συμπεριφορά περιγράφεται από έναν νόμο ιξωδοπλαστικής ροής, όπου το όριο της πλαστιμότητας μπορεί να φτάσει το μηδέν. Έτσι χρησιμοποίησε ένα λογισμικό, το λεγόμενο CASTOR (Canadian Automatic Small Telescopes for Orbital Research), στο οποίο έλαβε υπόψη τις εξής παραμέτρους:

- Τις κύριες καμπύλες των ασφατικών υλικών
- Τους νόμους που διέπουν τη ροή των ασφατικών υλικών
- Την κατακόρυφη διακύμανση της θερμοκρασίας

- Τις ταχύτητες των οχημάτων
- Τα αξονικά φορτία
- Τις εγκάρσιες θέσεις των αξόνων
- Το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο του Poisson των υλικών του οδοστρώματος.

Στο πρότυπο αυτό διερευνώνται οι μόνιμες παραμορφώσεις, όπως αυτές προκύπτουν στις αντίστοιχες δοκιμές του Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

Οι Mahboub και Little (1988) χρησιμοποίησαν μία απλή εξίσωση για τον χαρακτηρισμό της παραμένουσας παραμόρφωσης:

$$\varepsilon_{vp} = a * t^b \quad (3.12)$$

όπου:

ε_{vp} : ιξωδοπλαστική παραμόρφωση

t: χρόνος και

a και b: σταθερές παλινδρόμησης

Το μέγεθος της μόνιμης παραμόρφωσης Δh (inches) υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta h = H * \left(\frac{Z * S_{tire}}{S_{lab}} \right)^{1.61} * \varepsilon_{vp}(t) \quad (3.13)$$

όπου:

Δh : μέγεθος της παραμένουσας παραμόρφωσης βάσει υπολογισμών (σε inches)

H: πάχος ασφαλτικής στρώσης (σε inches)

Z: συντελεστής διακύμανσης της κατακόρυφης τάσης (προκύπτει βάσει ελαστικών επιλύσεων)

S_{tire} : μέση πίεση επαφής

S_{lab} : τάση με την οποία διεξάγεται η δοκιμή ερπυσμού (psi)

$\varepsilon_{vp}(t)$: ιξωδοπλαστική παραμόρφωση του μίγματος, όπως μετρήθηκε στη δοκιμή ερπυσμού (in/in)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί το πρότυπο του Kenis (1977, 1982) για την πρόβλεψη της παραμένουσας

παραμόρφωσης. Πρόκειται για ένα πρότυπο που έχει αξιοποιηθεί και έχει ελεγχθεί. Το πρότυπο αυτό λαμβάνει υπόψη του βασικές συνιστώσες που καθορίζουν τη συμπεριφορά ενός οδοστρώματος και χρησιμοποιεί πλήρως την ιξωδοελαστική ανάλυση. Συνυπολογίζει τα κλιματολογικά στοιχεία, τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών των επί μέρους στρώσεων και την κυκλοφορία των οχημάτων. Η επιλογή του προτύπου στηρίζεται στην απλότητα και στην ευκολία του, καθώς αυτό αποτελεί ένα εύχρηστο και πρακτικό προσομοίωμα της συμπεριφοράς ενός οδοστρώματος. Ταυτόχρονα με την πρόβλεψη της μόνιμης παραμόρφωσης, δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού και άλλων μηχανισμών φθοράς, όπως είναι η ρηγμάτωση και η έλλειψη ομαλότητας στο οδόστρωμα. Επιπλέον, μπορεί να διερευνηθεί ο Δείκτης Παρούσας Λειτουργικότητας PSI που αφορά στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Συνεπώς, το πρότυπο VESYS μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη σωστή διαχείριση των οδοστρωμάτων τόσο κατά τη φάση της κατασκευής όσο και κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους.

4. ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

4.1 Γενικά

Το πρότυπο ιξώδοελαστικής συμπεριφοράς που πρότεινε ο Kenis (1977) βασίζεται σε θεμελιώδεις αρχές που διέπουν τη συμπεριφορά των υλικών και τη μηχανική ενός στρωματοποιημένου μέσου. Εντάσσεται σε μία διαδικασία σχεδιασμού οδοστρωμάτων με τα εξής πλεονεκτήματα έναντι των εμπειρικών διαδικασιών σχεδιασμού:

- Παρέχει τη δυνατότητα αξιοποίησής του σε ένα μεγάλο εύρος υλικών.
- Λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των στρώσεων και τη μοναδικότητα της συμπεριφοράς κάθε υλικού όταν χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένα οδοστρώματα.
- Συνυπολογίζει την επίδραση του περιβάλλοντος (θερμοκρασία και υγρασία) στις ιδιότητες των υλικών.
- Παρέχει μία βάση διαδικασιών βελτιστοποίησης ενός οδοστρώματος μέσω της πρόβλεψης της απόδοσής του. Οι πληροφορίες που προκύπτουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία οικονομική ανάλυση για μελλοντική διατήρηση και αποκατάσταση του οδοστρώματος.
- Προσαρμόζεται σε όλα τα είδη φόρτισης, όπως το τριαξονικό φορτίο και τα φορτία τροχών με μεταβλητές αποστάσεις μεταξύ τους.
- Ο μηχανικός έχει τη δυνατότητα απόκτησης βάσης δεδομένων για την εντατική κατάσταση και τις παραμορφώσεις ενός οδοστρώματος που σχετίζονται με τη φθορά του.
- Διερευνάται η συμπεριφορά ενός οδοστρώματος και δίνεται η ευκαιρία ανάπτυξης προτύπων που αφορούν σε άλλες μορφές φθορών.

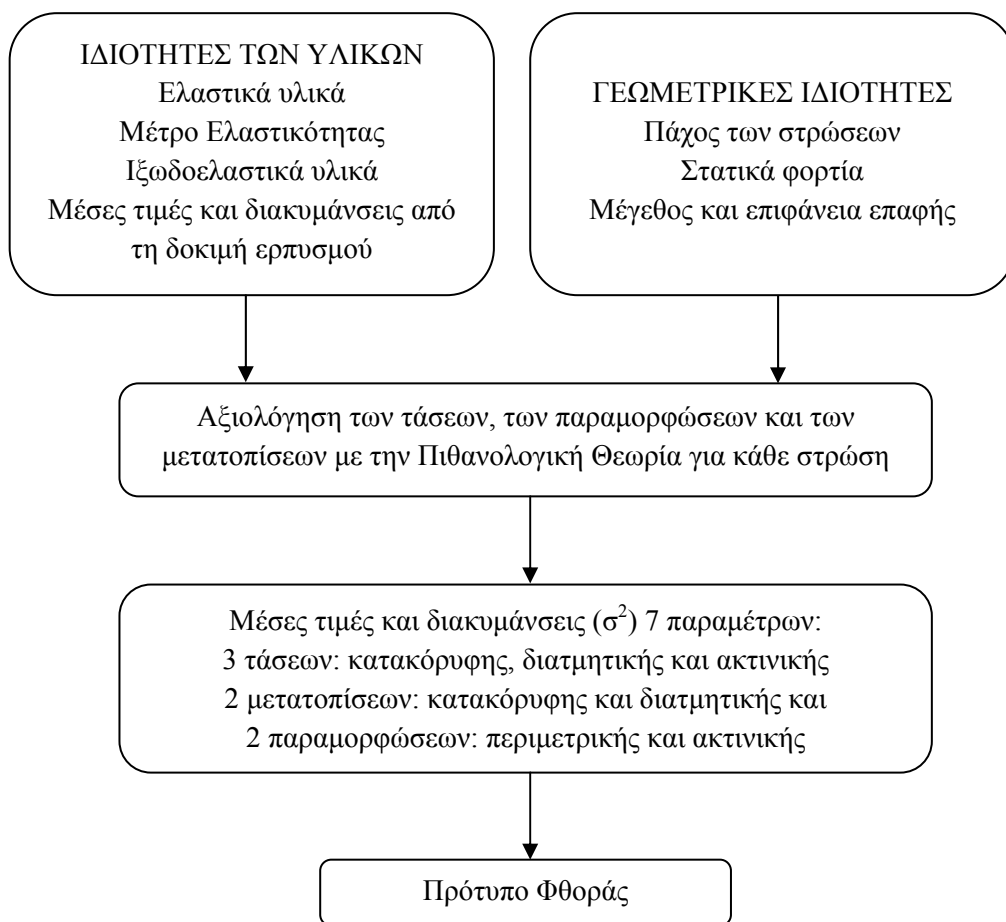
Το πρότυπο που διερευνά ο Kenis (1977) συνίσταται σε ένα σύνολο επί μέρους μηχανικών προτύπων που ενσωματώνονται μοναδικά για την ανάλυση της δομικής ακεραιότητας και απόδοσης οδοστρωμάτων αυτοκινητόδρομων. Προβλέπει την παραμένουσα παραμόρφωση που αναπτύσσεται σε ένα οδόστρωμα, τη ρηγμάτωση λόγω κοπώσεως και την απόδοσή του. Η τελευταία, μάλιστα, αποτυπώνεται μέσω του Δείκτη Παρούσας Λειτουργικότητας PSI, ο οποίος αποτελεί μία συνάρτηση της δομικής ακεραιότητας-συνέχειας και της παραμορφώσεως ενός οδοστρώματος. Ο δείκτης PSI εκφράζεται με τις μεταβλητές της ρηγμάτωσης, της

παραμένουσας παραμόρφωσης και της έλλειψης ομαλότητας, χρησιμοποιώντας στοιχεία που αφορούν στις ιδιότητες των υλικών, τη γεωμετρία, την κυκλοφορία και το περιβάλλον. Έτσι, λοιπόν, το πρότυπο αυτό προσφέρει ένα πλήθος λειτουργιών και πληροφοριών για τη δομική κατάσταση ενός οδοστρώματος. Ωστόσο, η παρούσα διπλωματική εργασία εμβαθύνει στην πρόβλεψη παραμενουσών παραμορφώσεων, καθώς αυτό αποτελεί το αντικείμενο της διερεύνησής της.

Η βασική αρχή του προτύπου VESYS ερμηνεύεται ως εξής: όλες οι αποκρίσεις ενός οδοστρώματος μπορούν να εκφραστούν μέσω της γεωμετρίας της δομής, των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών των στρώσεων και της επίδρασης του κλίματος και του φορτίου στις ιδιότητες αυτές. Οι ιδιότητες των υλικών χαρακτηρίζονται ως γραμμικές ελαστικές και/ή γραμμικές ιξωδοελαστικές στην πρωταρχική απόκριση, με δεδομένη την επιρροή της θερμοκρασίας και της τάσης στις κατάλληλες στρώσεις. Επιπλέον, για κάθε μηχανισμό φθοράς που προκαλεί αστοχία σε ένα οδόστρωμα αντιστοιχεί και ένας νόμος φθοράς. Παρακάτω περιγράφονται τα βασικά επιμέρους πρότυπα που εμπεριέχονται στο πρότυπο του Kenis (1977) για την πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης.

4.2 Πρότυπο πρωταρχικής απόκρισης

Το πιθανολογικό ιξωδοελαστικό πρότυπο που χρησιμοποιείται στην ανάλυση του VESYS για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων σε ένα οδόστρωμα είναι παρόμοιο με εκείνο της θεωρίας των ελαστικών στρώσεων. Διαφέρουν, ωστόσο, στο γεγονός ότι οι ιδιότητες των υλικών χαρακτηρίζονται ως στοχαστικές μεταβλητές εξαρτημένες από τον χρόνο (ιξωδοελαστικές). Τα γεωμετρικά προσομοιώματα, οι οριακές συνθήκες και οι συναρτήσεις της φόρτισης είναι ίδια και για τα δύο πρότυπα. Το πρότυπο της πρωταρχικής απόκρισης χρησιμοποιεί τις ομοιότητες αυτές προκειμένου να επικαλεσθεί την αρχή της «ελαστικής- ιξωδοελαστικής αντιστοιχίας» για τη συσχέτιση της ελαστικής λύσης με την αντίστοιχη ιξωδοελαστική.

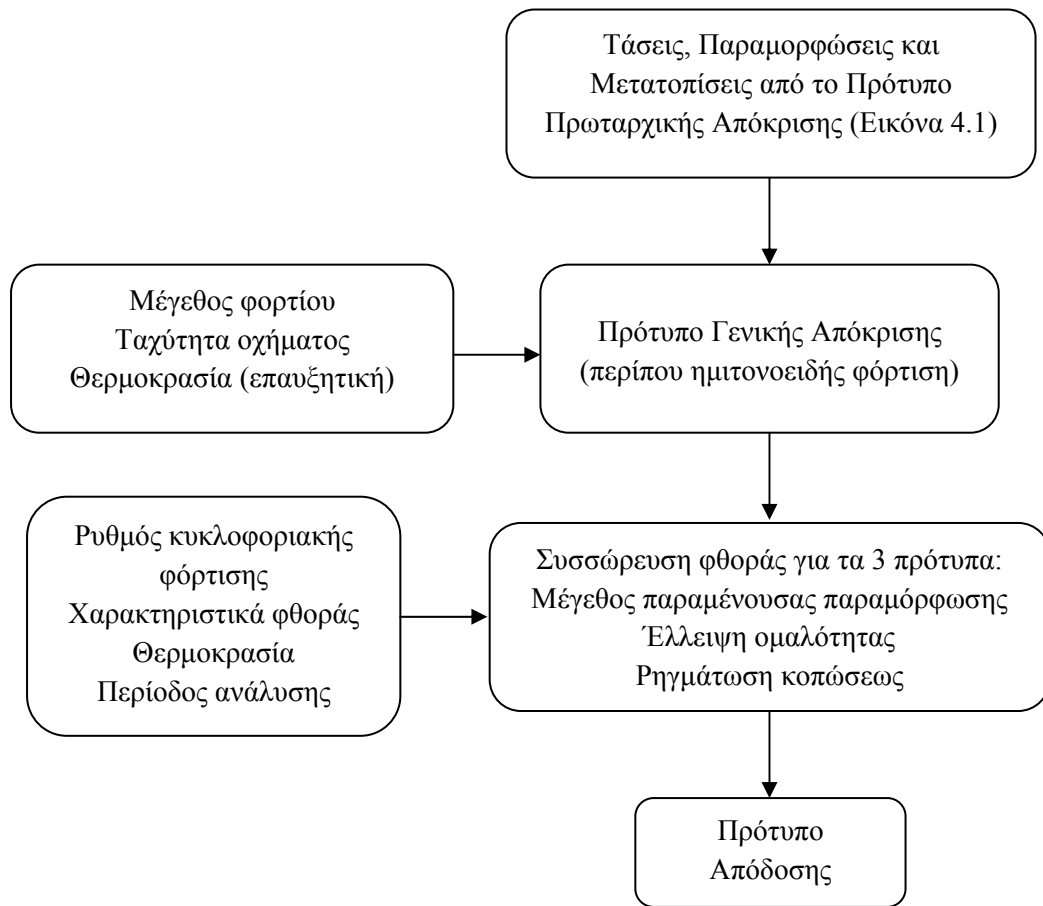


Εικόνα 4.1: Πρότυπο πρωταρχικής απόκρισης (Kenis, 1977)

Στο σχήμα της Εικόνας 4.1 αποτυπώνεται συνοπτικά το πρότυπο της πρωταρχικής απόκρισης. Οι στοχαστικές μεταβλητές εισόδου αντιστοιχούν στις ιδιότητες των υλικών ενώ οι ντετερμινιστικές στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις συνθήκες φόρτισης. Στη συνέχεια ακολουθεί το πρότυπο φθοράς.

4.3 Πρότυπο φθοράς

Το πρότυπο αυτό αποτελείται από τρία ξεχωριστά πρότυπα, κατάλληλα σχεδιασμένα για την πρόβλεψη της συνολικής φθοράς. Το σχήμα της Εικόνας 4.2 που ακολουθεί απεικονίζει τη διαδικασία διαμόρφωσης του προτύπου φθοράς.



Εικόνα 4.2: Πρότυπο φθοράς (Kenis, 1977)

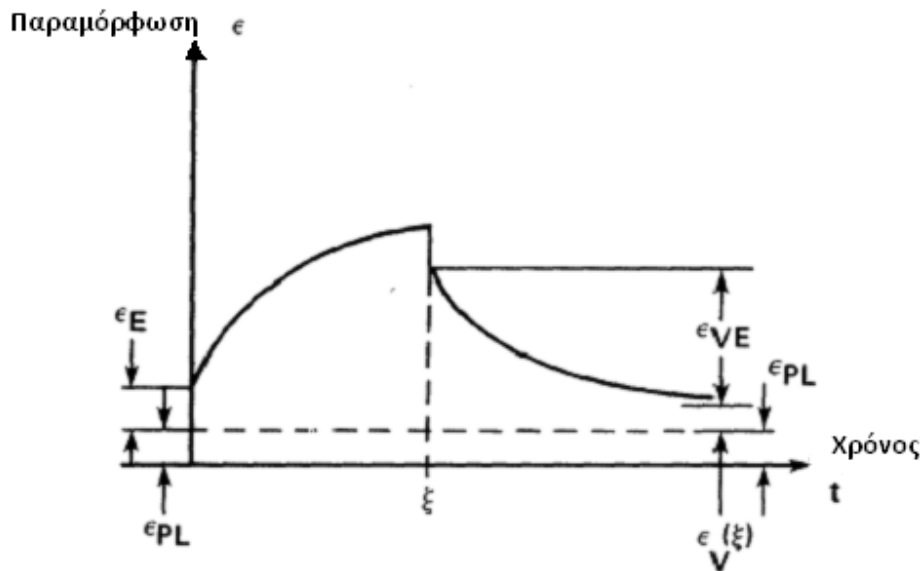
Η απόκριση στα στατικά φορτία εισάγεται στο κατάλληλο πρότυπο φθοράς με στόχο την πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης, της έλλειψης ομαλότητας και της ρηγμάτωσης. Η μετατροπή της στατικής απόκρισης σε απόκριση που θα γινόταν υπό την επίδραση κινούμενου φορτίου με προκαθορισμένη ταχύτητα προηγείται της εισαγωγής της στο πρότυπο φθοράς.

4.4 Πρότυπο πρόβλεψης του μεγέθους της παραμένουσας παραμόρφωσης

Η μόνιμη παραμόρφωση ε_p ενός δείγματος που υπόκειται σε ένα κύμα τάσεως είναι συνάρτηση της τάσης σ , της διάρκειας φορτίσεως ξ , της θερμοκρασίας T και της υγρασίας M :

$$\varepsilon_p = f(\sigma, \xi, T, M) \quad (4.1)$$

- ϵ_E = Ελαστική παραμόρφωση
- ϵ_{VE} = Ιξωδοελαστική παραμόρφωση
- ϵ_V = Ιξώδης παραμόρφωση
- ϵ_{PL} = Πλαστική παραμόρφωση

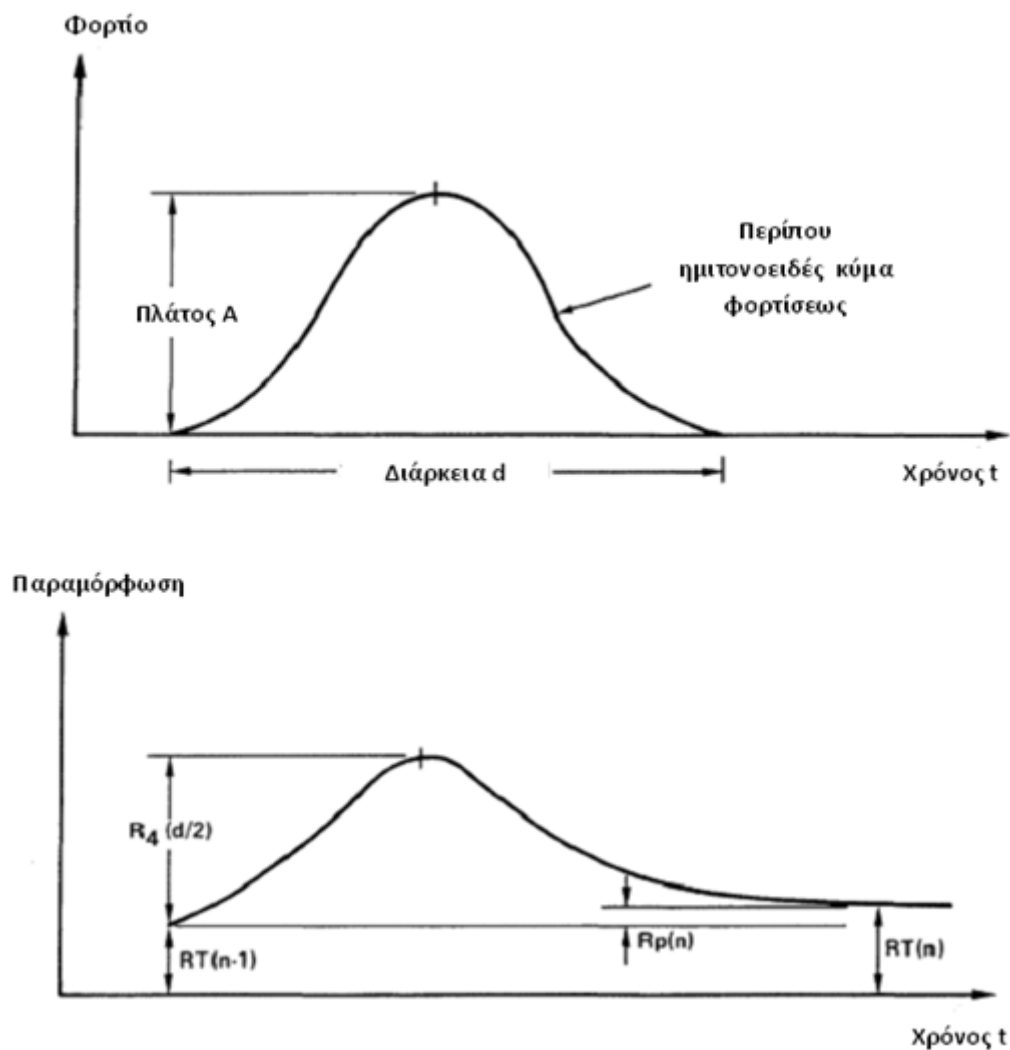


Εικόνα 4.3: Η παραμόρφωση για ένα μοναδικό κύμα τάσεως (Kenis, 1977)

Η συνολική παραμόρφωση απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 4.3 και εκφράζεται μέσω της εξίσωσης:

$$\epsilon(t) = (\epsilon_E + \epsilon_{VE})_{\text{Αναστρέψιμη}} + (\epsilon_V + \epsilon_{PL})_{\text{Μόνιμη}} \quad (4.2)$$

Επιπλέον το διάγραμμα αυτό υποθέτει πως η πλαστική παραμόρφωση είναι εξαρτημένη από την εντατική κατάσταση και ανεξάρτητη του χρόνου. Αντιθέτως, η ιξώδης παραμόρφωση εξαρτάται τόσο από την εντατική κατάσταση όσο και από το χρόνο φόρτισης.



Εικόνα 4.4: Απόκριση στο περίπου ημιτονοειδές κύμα φορτίσεως στη N-οστή επανάληψη (Kenis, 1977)

Η περίπου ημιτονοειδής φόρτιση με πλάτος A και διάρκεια d , η οποία εφαρμόζεται επαναλαμβανόμενα σε ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 4.4. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, η προσαύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης $R_p(N_j)$ λόγω της N -οστής φόρτισης αποτελείται από τις μόνιμες ιξώδεις και μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις, με την προϋπόθεση, ωστόσο, της εξασφάλισης ενός επαρκούς χρονικού διαστήματος μεταξύ των επαναλήψεων. Το διάστημα αυτό χρειάζεται για την πλήρη αποκατάσταση της αναστρέψιμης ιξωδοελαστικής παραμόρφωσης.

Η συνάρτηση $f(N)$ που αποτυπώνει την αναλογία της αυξανόμενης παραμένουσας παραμόρφωσης με το βάθος εκτροπής είναι η εξής:

$$f(N) = \mu_{sys}(N)^{-\alpha_{sys}} \quad (4.3)$$

όπου:

μ_{sys} και α_{sys} : αντιπροσωπευτικές παράμετροι της παραμένουσας παραμόρφωσης της δομής του οδοστρώματος

Η σχέση αυτή αντιστοιχεί με μία λογαριθμική συνάρτηση, μονοτονικά φθίνουσα, του αριθμού των προηγούμενων επιβαλλόμενων φορτίων. Τα χαρακτηριστικά της παραμένουσας παραμόρφωσης υπολογίζονται μέσω του προτύπου VESYS με τη βοήθεια της θεωρίας των στρώσεων και ενός νόμου μόνιμης παραμόρφωσης για κάθε στρώση, όπως αυτός προκύπτει από εργαστηριακά πειράματα. Το μέγεθος της παραμένουσας παραμόρφωσης υπολογίζεται και αθροίζεται μέσω μίας σταδιακής ανάλυσης συγκεκριμένων περιόδων, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι κλιματολογικές και κυκλοφοριακές μεταβολές.

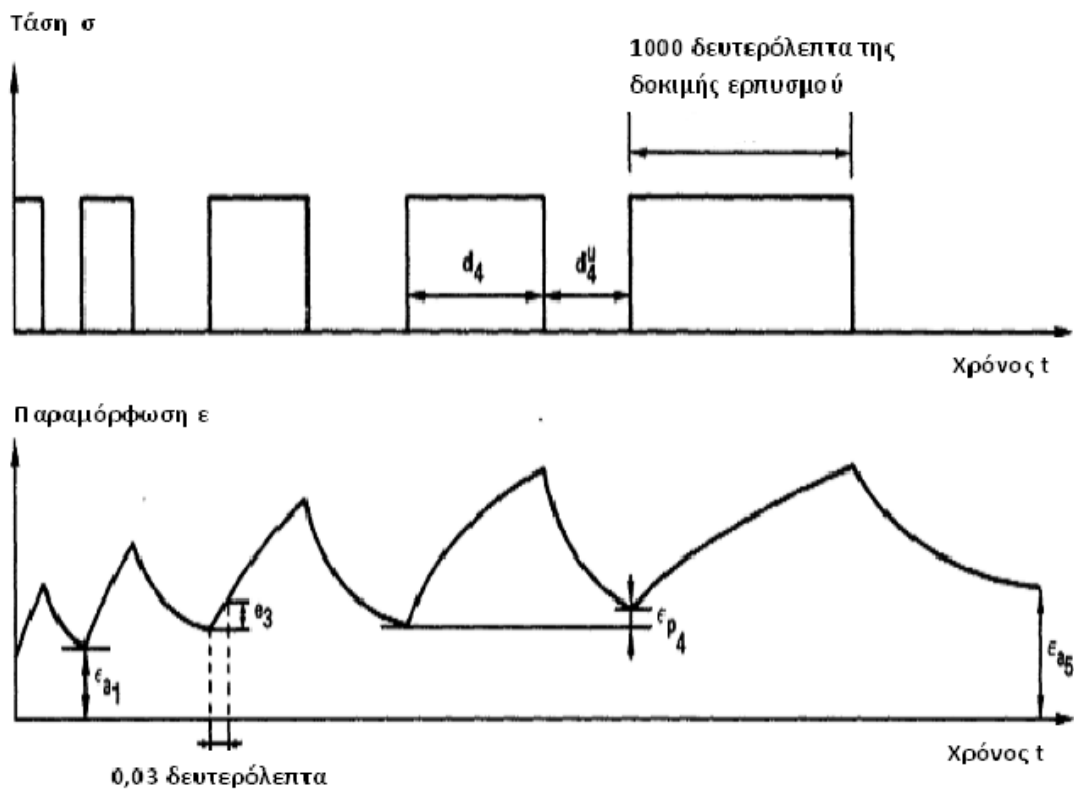
4.5 Προσδιορισμός των ιδιοτήτων των υλικών μέσω εργαστηριακών δοκιμών

Ένα από τα πλεονεκτήματα του προτύπου VESYS είναι η δυνατότητα χρήσης συγκεκριμένων ιδιοτήτων των υλικών που σχετίζονται με τη φόρτιση και το περιβάλλον και η αναγνώριση της μεταβλητότητας τους στη δομή ενός οδοστρώματος. Δύο κατηγορίες μηχανικών ιδιοτήτων απαιτούνται για τη δομική ανάλυση, οι ιδιότητες της πρωταρχικής απόκρισης και της φθοράς. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των υλικών γίνεται μέσω δύο εργαστηριακών δοκιμών:

1. Επιβολή στατικής-δυναμικής φόρτισης για τον προσδιορισμό της επαυξητικής παραμόρφωσης και
2. Δοκιμή σε αντοχή σε καμπτική κόπωση

Η επιβολή στατικής-δυναμικής φόρτισης χρησιμεύει στον προσδιορισμό τόσο των ιδιοτήτων της πρωταρχικής απόκρισης όσο και των ιδιοτήτων της παραμένουσας παραμόρφωσης. Η δεύτερη δοκιμή πραγματοποιείται για τον καθορισμό των παραμέτρων της κοπώσεως (Kenis, 1977 και Federal Highway Administration (FHWA), 1978).

Οι ιδιότητες της μόνιμης παραμόρφωσης αποκτούνται μέσω της δοκιμής στατικής-δυναμικής φορτίσεως σε δείγμα διαμέτρου 4 ιντσών από ψηλά κυλινδρικά δοκίμια των 8 ιντσών. Εφόσον οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από τις επί τόπου εντατικές συνθήκες και τον περιβάλλοντα χώρο, τα δοκίμια πρέπει να υπόκεινται σε ρεαλιστικές εντατικές καταστάσεις και σε μία μέση υγρασία και θερμοκρασία που αναμένονται να επικρατούν στο χώρο που ερευνάται.



0,03 δευτερόλεπτα

d_i = Διάρκεια του i -οστού κύματος φορτίσεως

d_i' = Περίοδος ανάπαυσης μετά το i -οστό κύμα

ε_{pi} = Προσαύξηση της μόνιμης παραμόρφωσης λόγω του i -οστού κύματος φορτίσεως

ε_{ai} = Η συνολική συσσωρευμένη μόνιμη παραμόρφωση λόγω του βήματος των i -οστών κυμάτων $\varepsilon_{ai} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{pi}$

ε_i = Το μέγεθος της παραμόρφωσης όπως μετρήθηκε στα 0,03 δευτερόλεπτα κάθε κύματος φορτίσεως

Εικόνα 4.5: Τάσεις και παραμορφώσεις της στατικής φόρτισης για την επανωξητική παραμόρφωση (Kenis, 1977)

Ο Kenis (1977) πρότεινε δύο εναλλακτικές διαδικασίες προσδιορισμού των ιδιοτήτων της παραμένουσας παραμόρφωσης. Η πρώτη αφορά στα αποτελέσματα των δυναμικών σειρών της δοκιμής επιβολής στατικής-δυναμικής φορτίσεως. Σε ένα χαρτί λογαριθμικής κλίμακας αποτυπώνεται η συσσωρευμένη τάση σε συνάρτηση με τον αριθμό των επαναλήψεων και σχεδιάζεται η κατάλληλη ευθεία που διέρχεται από τα σημεία αυτά. Η τιμή του σημείου τομής της ευθείας με τον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται με το σύμβολο I , ενώ η κλίση της ευθείας με το σύμβολο S . Οι παράμετροι της μόνιμης παραμόρφωσης προσδιορίζονται μέσω των παρακάτω εξισώσεων:

$$\mu_i = \frac{IS}{e} \quad (4.4)$$

$$\alpha_i = 1 - S \quad (4.5)$$

όπου:

e: η παραμόρφωση στην 200-οστή επανάληψη φόρτισης

Η δεύτερη εναλλακτική διαδικασία βασίζεται στα αποτελέσματα της επιβολής στατικής φόρτισης. Έτσι, υπολογίζεται η συνολική μόνιμη παραμόρφωση στο τέλος κάθε αποφόρτισης, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικόνας 4.5. Σε ένα χαρτί λογαριθμικής κλίμακας απεικονίζεται η συνολική μόνιμη παραμόρφωση ϵ_a σε συνάρτηση με τον επαυξητικό χρόνο φόρτισης ($t_{n+i}-t_n$). Όμοια με πριν οι ιδιότητες της παραμένουσας παραμόρφωσης υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.4) και (4.5).

Η δοκιμή της επιβολής στατικής-δυναμικής φόρτισης για τον προσδιορισμό της επαυξητικής παραμόρφωσης περιγράφεται αναλυτικά από την FHWA (1978). Στην αναφορά αυτή, εμπεριέχονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία και πληροφορίες που απαιτούνται για τα εργαστηριακά πειράματα, την προετοιμασία των δοκιμών, τη διαδικασία της δοκιμής και τον εργαστηριακό εξοπλισμό.

4.6 Βελτιώσεις του ιξωδοελαστικού προτύπου

Ένα βασικό μειονέκτημα του προτύπου VESYS (Kenis, 1977) ήταν η αδυναμία χειρισμού των εποχιακών αλλαγών των ιδιοτήτων των υλικών. Συνεπώς έγιναν προσπάθειες βελτίωσης του προτύπου (Kenis et al., 1982), έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή των ιδιοτήτων των υλικών αναλόγως των εποχιακών περιβαλλοντικών αλλαγών και η διάκριση των ομάδων των αξονικών φορτίων. Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η διερεύνηση της δομής ενός οδοστρώματος μέχρι οχτώ στρώσεων και η πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης κάθε στρώσης.

Το βελτιωμένο πρότυπο αυτό αποτελείται από τέσσερα επιμέρους πρότυπα:

- Το πρότυπο πρωταρχικής απόκρισης που λαμβάνει υπόψη την τάση, την παραμόρφωση και τη μετατόπιση λόγω στατικής φόρτισης,
- Το πρότυπο της γενικής απόκρισης που βασίζεται στην τάση, την παραμόρφωση και τη μετατόπιση λόγω της περίπου ημιτονοειδούς φόρτισης,
- Το πρότυπο φθοράς που περιλαμβάνει εξισώσεις για το μέγεθος της παραμένουσας παραμόρφωσης, την αστοχία λόγω κοπώσεως και την έλλειψη ομαλότητας και
- Το πρότυπο της απόδοσης που αφορά στο Δείκτη Παρούσας Λειτουργικότητας.

4.6.1 Πρότυπο πρωταρχικής απόκρισης

Το πρότυπο αυτό είναι μία πιθανολογική γραμμική ιξωδοελαστική λύση, που αναφέρεται στο μέσο όρο και τη διακύμανση των εξαρτώμενων από το χρόνο τάσης, παραμόρφωσης και μετατόπισης σε συγκεκριμένες θέσεις ενός στρωματοποιημένου ιξωδοελαστικού οδοστρώματος. Κάθε στρώση, εκτός της στρώσης έδρασης έχει μοναδικό πάχος, ενώ όλες οι στρώσεις εκτείνονται άπειρα κατά την οριζόντια κατεύθυνση. Η ελεύθερη επιφάνεια του οδοστρώματος είναι απαλλαγμένη από τη διάτμηση και όλες οι επιφάνειες επαφής των στρώσεων χαρακτηρίζονται από πλήρη συνέχεια των τάσεων και των μετατοπίσεων. Τέλος κάθε στρώση έχει ξεχωριστές ιδιότητες των υλικών που μπορούν να χαρακτηριστούν γραμμικές ελαστικές ή γραμμικές ιξωδοελαστικές.

4.6.2 Πρότυπο γενικής απόκρισης

Η πρωταρχική απόκριση ορίζεται από ένα μαθηματικό πρότυπο που περιλαμβάνει μία συνεχή ή σταθερή φόρτιση. Αντιθέτως, η γενική απόκριση ορίζεται από ένα μαθηματικό πρότυπο που λαμβάνει υπόψη κάθε είδους φόρτιση. Αυτή μπορεί να αντιπροσωπεύει κάθε εντατική κατάσταση ενός οδοστρώματος λόγω της επιβολής ενός κινούμενου τροχού στην επιφάνεια. Το κινούμενο φορτίο αντιστοιχεί στη μορφή μίας περίπου ημιτονοειδούς συνάρτησης με δεδομένο πλάτος και διάρκεια.

4.6.3 Πρότυπο φθοράς- Πρότυπο παραμένουσας παραμόρφωσης

Το πρότυπο της παραμένουσας παραμόρφωσης εμπεριέχεται στο πρότυπο φθοράς και χαρακτηρίζεται από την εξίσωση:

$$Y_p(N) = Y\mu_{sys}N^{a_{sys}} \quad (4.6)$$

όπου:

$Y_p(N)$: η επαυξητική παραμένουσα παραμόρφωση ανά κύμα φορτίσεως

Y : η γενική εκτροπή του περίπου ημιτονοειδούς διαγράμματος στην κορυφή της φόρτισης

μ_{sys}, a_{sys} : οι παράμετροι της παραμένουσας παραμόρφωσης για το σύστημα

Η συσσώρευση της παραμένουσας παραμόρφωσης αντιπροσωπεύεται μέσω τη λογαριθμικής αυτής συνάρτησης των N επαναλήψεων φόρτισης.

Οι Kenis et al. (1982) απέδειξαν την αξιοπιστία του προτύπου τους μέσω συγκρίσεων των προβλεπόμενων έναντι των μετρημένων τιμών για ένα ευρύ φάσμα δοκιμών του AASHO Road Test.

4.7 Υπολογισμός της παραμένουσας παραμόρφωσης

Νεότερα οι Zhou και Scullion (2005) διερεύνησαν το πρότυπο του Kenis (1977,1982). Κατέληξαν στις εξισώσεις που περιγράφουν την παραμένουσα παραμόρφωση κάθε στρώσης και πρότειναν εργαστηριακές μεθόδους υπολογισμού των παραμέτρων της μόνιμης παραμόρφωσης των υλικών για κάθε στρώση.

Το πρότυπο VESYS προβλέπει την παραμένουσα παραμόρφωση σε κάθε στρώση. Η παραμόρφωση κάθε στρώσης προστίθεται για να υπολογιστεί η συνολική παραμόρφωση της δομής του οδοστρώματος. Η μόνιμη παραμόρφωση σε κάθε πεπερασμένο στρώμα εκτιμάται λαμβάνοντας υπόψη την αντίστοιχη ελαστική συμπίεση και τον νόμο που διέπει το υλικό της αντίστοιχης στρώσης, ο οποίος αφορά στη μόνιμη παραμόρφωσή του. Σχετικά με τη στρώση που εκτείνεται άπειρα, η μόνιμη παραμόρφωση της στρώσης έδρασης προσδιορίζεται διαφορετικά λόγω της επίδρασης του πολυαξονικού φορτίου.

Η συνολική ελαστική παραμόρφωση μίας στρώσης είναι η συνολική συμπίεση της, δηλαδή η διαφορά της μετατόπισης των αντίστοιχων διεπιφανειών. Για κάθε στρώση i η παραμένουσα παραμόρφωση ισούται με:

$$R_D(N) = (W^+ - W^-) * \frac{\mu}{1-\alpha} * N^{(1-\alpha)} \quad (4.7)$$

Ενώ για την ημι-άπειρη στρώση έδρασης η εξίσωση (4.7) μειώνεται σε:

$$R_{sub}(N) = W_{sub}^+ * \frac{e_t}{e_s} * \frac{\mu}{1-\alpha} * N^{(1-\alpha)} \quad (4.8)$$

Όπου:

$R_D(N)$ = η παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης μετά από N επαναλήψεις φορτίσεως,

W^+ , W^- = η ελαστική μετατόπιση της διεπιφάνειας των στρώσεων i και $i+1$,

μ , α = εργαστηριακές παράμετροι της παραμένουσας παραμόρφωσης των υλικών κάθε στρώσης,

W_{sub}^+ = η μετατόπιση της επιφάνειας της στρώσης έδρασης λόγω του μονοαξονικού φορτίου,

e_t = η παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης λόγω της ομάδας των αξόνων και

e_s = η παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης λόγω του μονού άξονα

Οι εξισώσεις, λοιπόν, δείχνουν πως η μόνιμη παραμόρφωση κάθε στρώσης εξαρτάται κυρίως από τις παραμέτρους της παραμένουσας παραμόρφωσης των υλικών για κάθε στρώση: α και μ . Οι δύο αυτές παράμετροι προσδιορίζονται από εργαστηριακές δοκιμές επαναλαμβανόμενου φορτίου (Zhou and Scullion, 2005).

4.8 Προσδιορισμός των παραμέτρων α και μ της παραμένουσας παραμόρφωσης του υλικού της κάθε στρώσης

4.8.1 Εργαστηριακές δοκιμές

Οι Zhou και Scullion (2005) περιγράφουν αναλυτικά τα πρωτόκολλα των εργαστηριακών δοκιμών που προτείνουν για την παραμένουσα παραμόρφωση. Οι συνθήκες παραμορφώσεως που χρησιμοποιούνται στις εργαστηριακές δοκιμές αντιπροσωπεύουν την ποικιλία των εντατικών καταστάσεων που ενδέχεται να αναπτυχθούν στα εύκαμπτα οδοστρώματα που υπόκεινται σε φορτία τροχών.

Οι δοκιμές που περιγράφονται έχουν εφαρμογή σε εργαστηριακά δείγματα ασύνδετων κοκκώδων υλικών της βάσης/υπόβασης, υλικών της στρώσης έδρασης και υλικών των ασφαλτικών στρώσεων. Αντίστοιχα, οι εντατικές καταστάσεις που επικρατούν για την ανάπτυξη της μόνιμης παραμόρφωσης στηρίζονται στο αν το δείγμα αφορά στη βάση/υπόβαση, τη στρώση έδρασης ή τις ασφαλτικές στρώσεις. Το μέγεθος του δείγματος εξαρτάται από τον μέγιστο κόκκο του υλικού. Επιπλέον, οι τιμές της μόνιμης παραμόρφωσης, όπως αυτές προκύπτουν, λαμβάνονται ως μέτρα των ιδιοτήτων της παραμένουσας παραμόρφωσης και του μέτρου ελαστικότητας των υλικών, επισημαίνοντας την εξάρτησή τους από τις τάσεις.

Τα αποτελέσματα που αφορούν στο μέτρο ελαστικότητας αποτελούν ένα βασικό συστατικό της σχέσης μεταξύ της ακαμψίας και της εντατικής καταστάσεως των υλικών, καθώς αυτή λαμβάνεται υπόψη στη δομική ανάλυση των συστημάτων για τα στρωματοποιημένα οδοστρώματα. Επιπροσθέτως, οι δοκιμές για τη μόνιμη παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας προσομοιώνουν τις συνθήκες που επικρατούν σε ένα οδόστρωμα υπό την επίδραση των φορτίων των τροχών.

Ακολουθεί η περιγραφή των συμβολισμών και των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται στις εργαστηριακές δοκιμές.

Το μέγιστο εφαρμοζόμενο αξονικό φορτίο (P_{max}) είναι το φορτίο που εφαρμόζεται στο δείγμα, αποτελούμενο από το φορτίο επαφής και το κυκλικό φορτίο (η περιορισμένη πίεση δεν συμπεριλαμβάνεται) :

$$P_{max} = P_{contact} + P_{cyclic} \quad (4.9)$$

Το φορτίο επαφής (P_{max}) είναι το κάθετο φορτίο που αναπτύσσεται στο δοκίμιο για τη διατήρηση της επαφής ανάμεσα στο έμβολο φόρτισης και στο καπάκι του δοκιμίου. Το φορτίο επαφής περιλαμβάνει το βάρος από το καπάκι και το στατικό φορτίο που εφαρμόζεται στο έμβολο του φορτιζόμενου συστήματος.

Το κυκλικό αξονικό φορτίο (P_{cyclic}) αντιστοιχεί στο επαναλαμβανόμενο φορτίο που εφαρμόζεται στο δοκίμιο:

$$P_{cyclic} = P_{max} - P_{contact} \quad (4.10)$$

Η μέγιστη αξονική τάση (S_{max}) που εφαρμόζεται στο δοκίμιο αποτελείται από την τάση επαφής και την κυκλική τάση (η περιορισμένη τάση δεν συμπεριλαμβάνεται) :

$$S_{max} = P_{max}/A \quad (4.11)$$

όπου A: το εμβαδόν διατομής του δείγματος

Η κυκλική (ελαστική) αξονική τάση ισούται με:

$$S_{cyclic} = P_{cyclic}/A \quad (4.12)$$

Η τάση επαφής (S_{max}) είναι η αξονική τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο για να διατηρηθεί η επαφή ανάμεσα στο καπάκι του δοκιμίου και το δοκίμιο:

$$S_{contact} = P_{contact}/A \quad (4.13)$$

Η τάση επαφής πρέπει να διατηρείται έτσι ώστε να εφαρμόζεται μία αναλογία συνεχούς ανισοτροπικής περιορισμένης τάσης:

$$(S_{max} + S_3)/S_3 = 1.2 \quad (4.14)$$

όπου S_3 : η περιορισμένη πίεση που εφαρμόζεται στην τριαξονική κυψέλη (δηλαδή η μικρότερη κύρια τάση σ_3).

ϵ_r είναι η ελαστική (ανακτιήσιμη) αξονική παραμόρφωση εξαιτίας του S_{cyclic} .

ϵ_r είναι η ελαστική (ανακτιήσιμη) αξονική οριζόντια παραμόρφωση εξαιτίας του S_{cyclic} .

$$\varepsilon_r = e_r/L \quad (4.15)$$

όπου L: απόσταση μεταξύ των σημείων μέτρησης για την ελαστική αξονική παραμόρφωση e_r .

e_p είναι η μόνιμη (μη ανακτήσιμη) αξονική παραμόρφωση εξαιτίας του S_{cyclic} .

e_p είναι η μόνιμη (μη ανακτήσιμη) αξονική οριζόντια παραμόρφωση εξαιτίας του S_{cyclic} :

$$\varepsilon_p = e_p/L \quad (4.16)$$

όπου L: απόσταση μεταξύ των σημείων μέτρησης της ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης e_p .

Το μέτρο ελαστικότητας (M_r) καθορίζεται ως εξής:

$$M_r = S_{cyclic}/\varepsilon_r \quad (4.17)$$

4.8.2 Παράμετροι α και μ για τα υλικά βάσης/υπόβασης και στρώσης έδρασης

Τα ασύνδετα κοκκώδη υλικά της βάσης και της υπόβασης περιέχουν μίγματα από αδρανή του εδάφους και ακατέργαστα υλικά. Δεν χρησιμοποιείται κάποιο συνδετικό ή σταθεροποιητικό υλικό για τα ασύνδετα κοκκώδη στρώματα της βάσης και της υπόβασης. Τα υλικά αυτά ταξινομούνται στις κατηγορίες 1 και 2, όπως περιγράφουν και οι Zhou και Scullion (2005). Επιπλέον, η στρώση έδρασης μπορεί να αποτελείται είτε από ακατέργαστα υλικά είτε από υλικά τα οποία έχουν προετοιμαστεί κατάλληλα και έχουν υποστεί συμπίεση πριν την τοποθέτησή των στρώσεων της βάσης και της υπόβασης. Τα υλικά αυτά ανήκουν στις κατηγορίες 1, 2 και 3 (Zhou και Scullion, 2005).

Η μόνιμη παραμόρφωση καθορίζεται από επαναλαμβανόμενες δοκιμές συμπίεσης σε δοκίμια με ασύνδετα υλικά και προκύπτει ως η ακάλυπτη παραμόρφωση κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Η διάρκεια φορτίσεως είναι το χρονικό διάστημα όπου το δοκίμιο υπόκειται στον παλμό της κυκλικής φόρτισης. Η χρονική διάρκεια ενός κύκλου αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα ανάμεσα σε διαδοχικές εφαρμογές της κυκλικής τάσης (συνήθως 1.0 δευτερόλεπτο).

Μία επαναλαμβανόμενη αξονική τάση σταθερού μεγέθους και διάρκειας φορτίσεως, με χρονική διάρκεια ενός κύκλου, εφαρμόζεται σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο. Το δείγμα τοποθετείται σε μία τριαξονική κυψέλη, και το δοκίμιο υπόκειται σε μια επαναλαμβανόμενη (κυκλική) τάση και σε μία συνεχή τάση περιορισμού μέσω της πίεσης του αέρα της κυψέλης. Καταγράφονται η συνολική ελαστική (ανακτήσιμη) και μόνιμη αξονική απόκριση του δοκιμίου. Με τη σειρά τους, αυτές

χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι ιδιότητες της μόνιμης παραμόρφωσης και το μέτρο ελαστικότητας.

Η συσκευή φορτίσεως πρέπει να είναι μία ηλεκτρο-υδραυλική μηχανή δοκιμών που αποτελείται από κλειστό βρόχο, με μία γεννήτρια που έχει τη δυνατότητα της εφαρμογής επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης περίπου ημιτονοειδούς μορφής. Η φόρτιση με τη συγκεκριμένη μηχανή πρέπει να πραγματοποιείται εκ των άνω. Κάθε κύμα φορτίσεως πρέπει να έχει διάρκεια 0.1 δευτερόλεπτα για τα υλικά της βάσης και της υπόβασης και να ακολουθεί μία περίοδος παύσης 0.9 δευτερολέπτων. Για τα υλικά της στρώσης έδρασης πρέπει να έχει διάρκεια 0.2 δευτερόλεπτα, την οποία ακολουθεί μια περίοδο παύσης 0.8 δευτερολέπτων. Όσον αφορά στα μη πλαστικά κοκκώδη υλικά, επιτρέπεται, αν είναι επιθυμητό, να μειώνεται η περίοδος ανάπαυσης στα 0.4 δευτερόλεπτα για λόγους συντόμευσης της δοκιμής, ενώ παράλληλα ο χρόνος φορτίσεως μπορεί να αυξηθεί στα 0.15 δευτερόλεπτα αν απαιτείται.



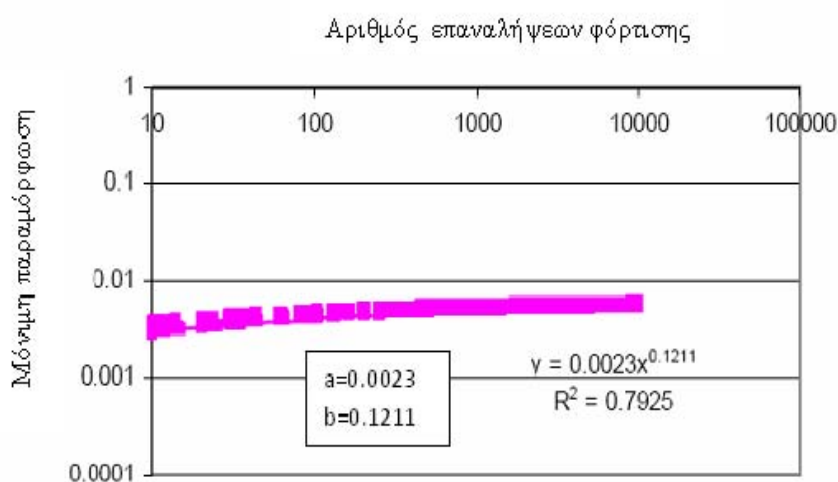
Εικόνα 4.6: Σύστημα τριαξονικής δοκιμής (Zhou and Scullion, 2005)

Η τριαξονική κυψέλη χρησιμοποιείται για να περικλείει το δοκίμιο και το αντίστοιχο υγρό κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Μία τυπική τριαξονική κυψέλη, κατάλληλη για τις δοκιμές του μέτρου ελαστικότητας φαίνεται στην Εικόνα 4.6.

Οι Zhou και Scullion (2005) περιλαμβάνουν στην εργασία τους λεπτομερή περιγραφή της εργαστηριακής δοκιμής, όπως στοιχεία που αφορούν τον εξοπλισμό, την προετοιμασία των δοκιμών κ.ά.

Το πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό των παραμέτρων α και μ αφορά στον υπολογισμό της μέσης αξονικής παραμόρφωσης για κάθε δοκίμιο βγάζοντας τον μέσο όρο από το ζευγάρι γραμμικών μεταβλητών διαφορικών μετασχηματιστών (Linear

Variable Differential Transformers, LVDT) που εκτείνονται μεταξύ της πλάκας της κορυφής και της αντίστοιχης του πυθμένα. Στη συνέχεια μετατρέπεται σε συνολική αξονική οριζόντια παραμόρφωση διαιρώντας με το μήκος του μετρητή, L . Έπειτα υπολογίζεται η συνολική αξονική μόνιμη και ελαστική παραμόρφωση (ϵ_r) στη διακοσιοστή (200^{th}) επανάληψη της φόρτισης. Συγχρόνως σχεδιάζεται η συνολική αξονική μόνιμη παραμόρφωση σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης σε ένα σύστημα αξόνων, όπως φαίνεται και στο παράδειγμα του διαγράμματος της Εικόνας 4.7. Οι παράμετροι της μόνιμης παραμόρφωσης των υλικών καθορίζονται από το σημείο τομής (a) και την κλίση (b) και προκύπτουν από το γραμμικό τμήμα της καμπύλης της μόνιμης παραμορφώσεως (σε λογαριθμική κλίμακα).



Εικόνα 4.7: Παραμένουσα παραμόρφωση σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων φόρτισης (Zhou and Scullion, 2005)

Οι παράμετροι της μόνιμης παραμόρφωσης, μ και α είναι ίσες με:

$$\mu = \frac{\alpha \cdot b}{\epsilon_r} \quad (4.18)$$

$$\alpha = 1 - b \quad (4.19)$$

αντίστοιχα.

4.8.3 Παράμετροι α και μ για τα ασφαλτικά υλικά

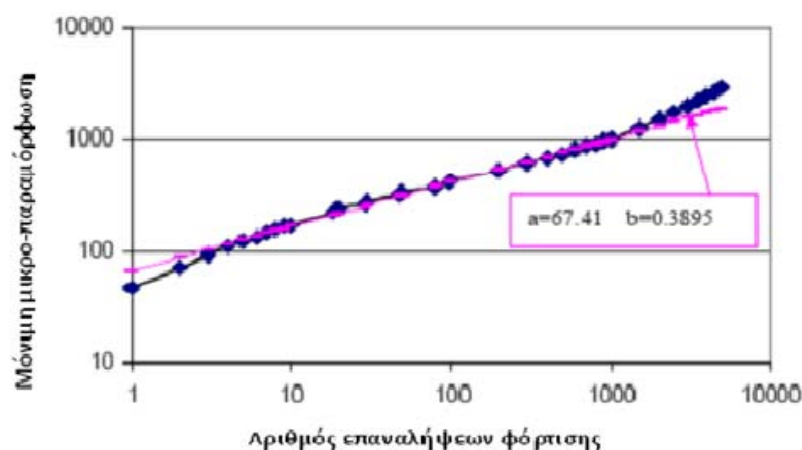
Οι Zhou και Scullion (2005) ακολούθησαν τις προδιαγραφές του AASHTO (AASHTO PP2, AASHTO TP-4, AASHTO T269). Τα προτεινόμενα πρωτόκολλα για τις παραμέτρους α και μ που χρησιμοποιούνται στο πρότυπο VESYS αφορούν στη δοκιμή ασφαλτομιγμάτων σε δύο θερμοκρασίες με καθορισμένο επίπεδο τάσης.

Βασικό στοιχείο της εργαστηριακής δοκιμής είναι η εξασφάλιση του ισοζυγίου της θερμοκρασίας των δοκιμίων με τη θερμοκρασία της κυψέλης. Στην κυψέλη αυτή επικρατούν καθορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος. Ο υπολογισμός της συσσωρευμένης παραμένουσας παραμόρφωσης γίνεται με τη βοήθεια των γραμμικών μεταβλητών διαφορικών μετασχηματιστών LVDT.



Εικόνα 4.8: Περιστροφικός συμπίεστής (Zhou and Scullion, 2005)

Η Εικόνα 4.8 δείχνει έναν περιστροφικό συμπίεστή που αφορά στα εργαστηριακά συμπίεσμένα δοκίμια. Η φόρτιση των δοκιμίων είναι περίπου ημιτονοειδής διάρκειας 0,1 δευτερόλεπτων. Ακολουθεί μία περίοδος ανάπαυσης 0,9 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 4.9: Παραμένουσα παραμόρφωση σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων φόρτισης (Zhou and Scullion, 2005)

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων της παραμένουσας παραμόρφωσης ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την αντίστοιχη των υλικών της βάσης/ υπόβασης και της στρώσης έδρασης, με τη διαφορά ότι η συνολική αξονική μόνιμη και ελαστική παραμόρφωση (ϵ_r) υπολογίζονται στην εκατοστή (100^{th}) επανάληψη της φόρτισης. Το διάγραμμα της Εικόνας 4.9 αποτελεί ένα παράδειγμα υπολογισμού των παραμέτρων α και μ για τα ασφαλτικά υλικά.

5. ΟΔΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ

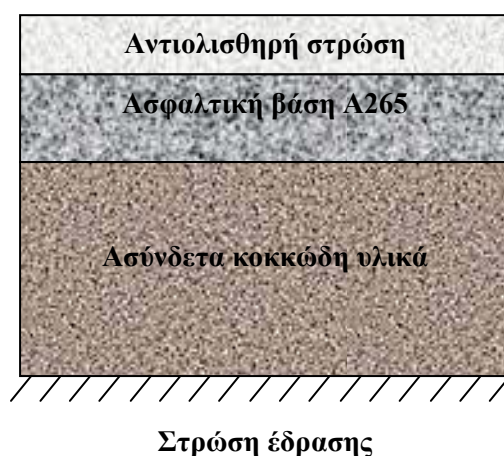
5.1 Σκοπός οδικού πειράματος

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο πρότυπο ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του Kenis είναι απαραίτητος προκειμένου να πραγματοποιηθεί πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης ενός οδοστρώματος. Η μελέτη σχεδιασμού και τα δεδομένα που προκύπτουν βάσει διεθνών προδιαγραφών μπορούν να δώσουν τα στοιχεία που απαιτούνται για την αξιοποίηση του προτύπου. Εναλλακτικά, για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής, έγινε ένα οδικό πείραμα σε τμήμα αυτοκινητόδρομου νέας κατασκευής, όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με μη καταστρεπτικές μεθόδους (Non-Destructive Testing Methods, NDTs) για τη συλλογή επί τόπου (in situ) στοιχείων, τα οποία με κατάλληλη επεξεργασία και ανάλυση εντάσσονται στο πρότυπο. Σκοπός του πειράματος είναι να διερευνηθεί η καταλληλότητα της χρησιμοποίησης των συλλεχθέντων στοιχείων για την πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης. Οι μετρήσεις γίνονται μετά την κατασκευή του υπόψη οδοστρώματος, συνεπώς τα δεδομένα που προκύπτουν αξιοποιούνται για την εκτίμηση της παραμόρφωσης μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής και όχι κατά τη φάση μελέτης.

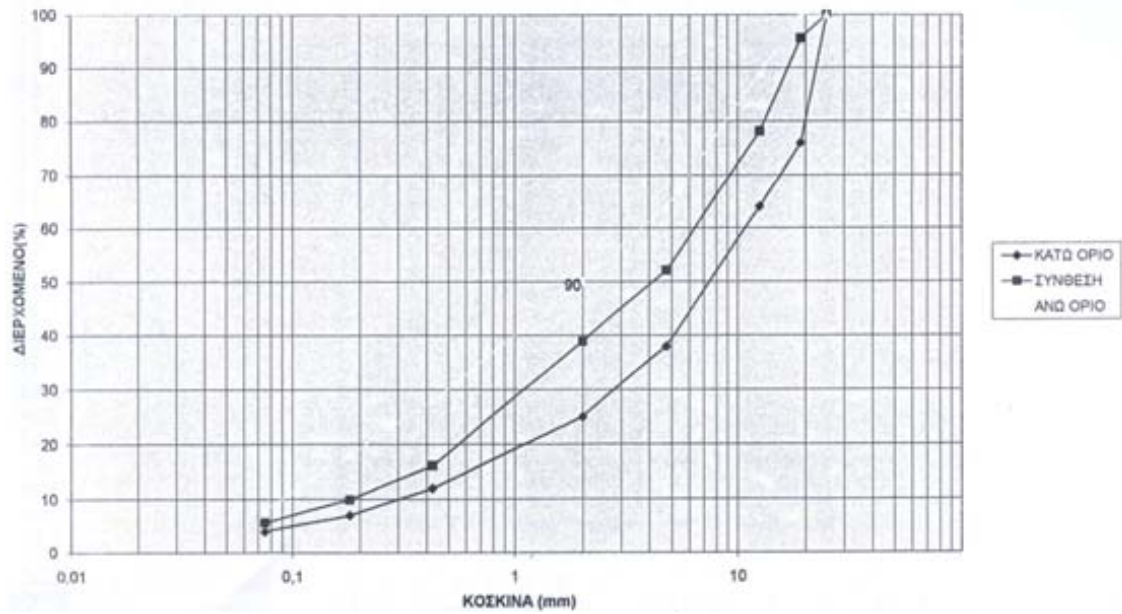
5.2 Κατασκευαστικά στοιχεία

Το εξεταζόμενο πειραματικό οδόστρωμα αφορά σε ένα τμήμα αυτοκινητόδρομου νέας κατασκευής μήκους 600 μέτρων. Το τμήμα αυτό χωρίστηκε σε επιμέρους τμήματα ανά 20 μέτρα ορίζοντας έτσι 31 θέσεις, σε κάθε μία από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Η τυπική διατομή του υπόψη οδοστρώματος φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5.1.



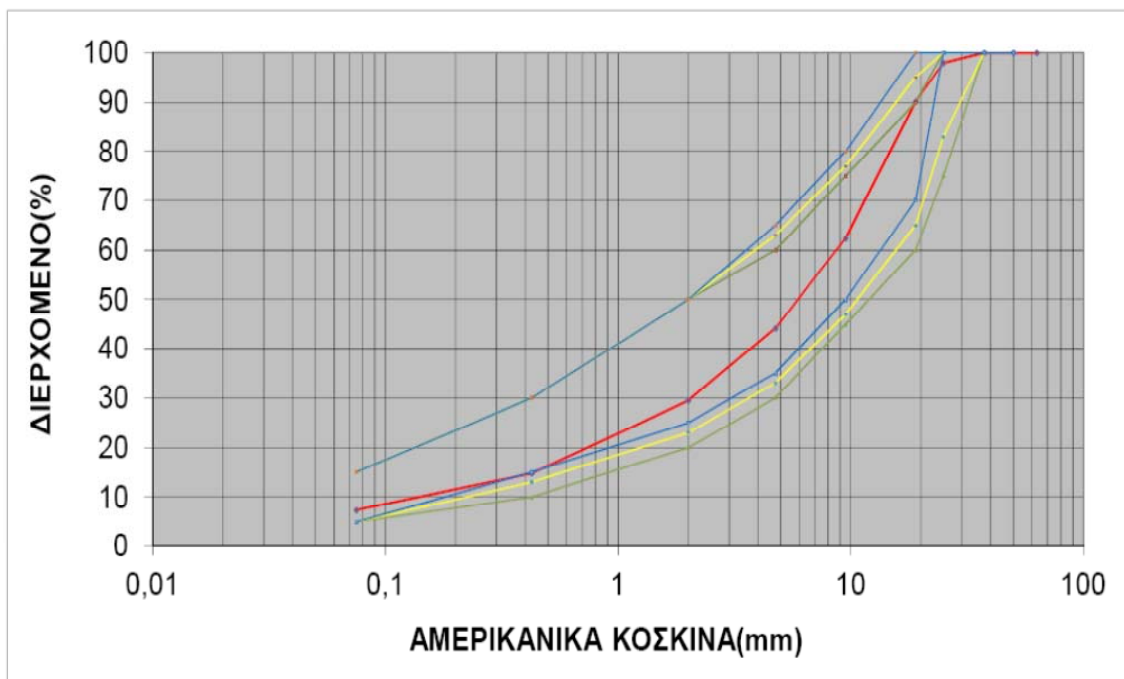
Εικόνα 5.1: Τυπική διατομή πειραματικού οδοστρώματος



Εικόνα 5.3: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών του ασφαλτομίγματος Α265

Τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου 50-70 του ασφαλτομίγματος Α265 είναι: διείσδυση στους 25 °C=58 mm και σημείο μάλθωσης=49.5 °C.

Η στρώση της βάσης/υπόβασης αποτελείται από ασύνδετα κοκκώδη υλικά, για τα οποία έχουν γίνει και οι αντίστοιχες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις (Εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4: Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικών βάσης/υπόβασης

Τέλος, όσον αφορά τη στρώση έδρασης το οδόστρωμα εδράζεται σε βραχώδες έδαφος.

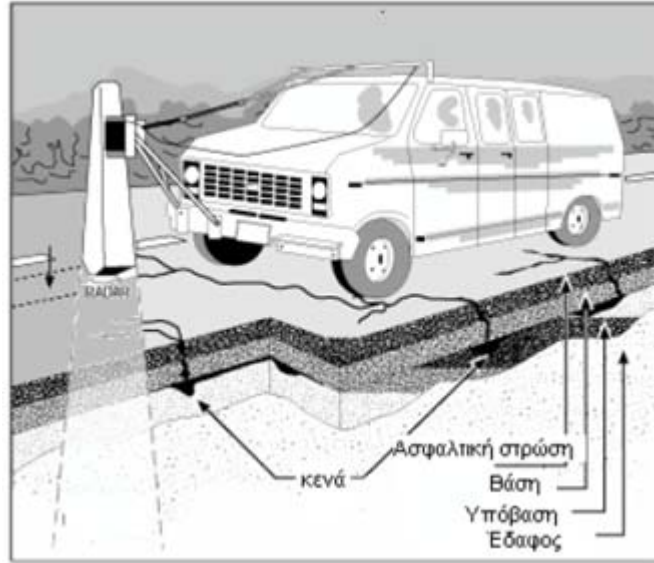
Πρέπει να σημειωθεί πως το οδικό πείραμα πραγματοποιήθηκε αφότου προηγήθηκε η επανασυμπύκνωση του οδοστρώματος. Αυτό σημαίνει πως οι μετρήσεις ξεκίνησαν ένα μήνα μετά την κατασκευή του. Στη διάρκεια του διαστήματος αυτού η επιβολή των κυκλοφοριακών φορτίων είχε ως αποτέλεσμα το οδόστρωμα να επανασυμπυκνωθεί λόγω της επιβολής των πρώτων φορτίων κυκλοφορίας. Έτσι, σε ένα καλώς συμπυκνωμένο οδόστρωμα η δημιουργία της παραμένουσας παραμόρφωσης δεν θα επηρεαστεί από τη μεταβολή του όγκου (βλ. Κεφάλαιο 2).

5.3 Στρωματογραφία

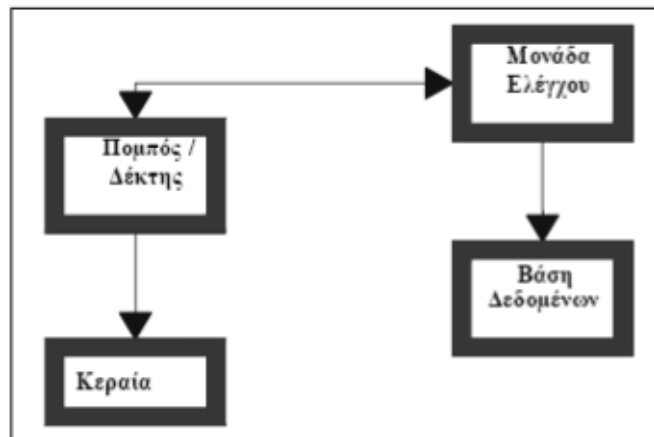
Στα πλαίσια του οδικού πειράματος πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προκειμένου να προσδιοριστούν τα πάχη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας του οδοστρώματος πραγματοποιήθηκε μέσω ενός συστήματος γεωραντάρ (Ground Penetration Radar: GPR). Το σύστημα GPR είναι ένα υψηλής τεχνολογίας μη καταστρεπτικό σύστημα επιτόπου ελέγχου (NDT), το οποίο καταγράφει συνεχόμενα τη στρωματογραφία του οδοστρώματος. Η καταγραφή αυτή οδηγεί στην εκτίμηση των παχών των επιμέρους στρώσεων ανά πολύ μικρές αποστάσεις με σημαντική ακρίβεια (Λοΐζος, 2008).

Σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος είναι η δυνατότητα λειτουργίας σε συνήθεις ταχύτητες κυκλοφορίας. Έτσι, δεν υφίσταται διακοπή της κυκλοφορίας των οχημάτων τη στιγμή που πραγματοποιείται η μέτρηση και δεν χρειάζεται η λήψη ειδικών μέτρων για την οδική ασφάλεια (Λοΐζος, 2008).

Η θεμελιώδης αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία, καθώς η αναγνώριση του εσωτερικού του εδάφους γίνεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το σκαρίφημα της Εικόνας 5.5 απεικονίζει τη διάταξη του συστήματος βάσει του οποίου γίνεται η διερεύνηση του οδοστρώματος. Ένα τυπικό σύστημα γεωραντάρ αποτελείται από τη διάταξη πομπού/δέκτη, την κεραία ή το συνδυασμό κεραιών, τη μονάδα ελέγχου και τη βάση δεδομένων όπου εισάγονται τα στοιχεία συλλογής (Εικόνα 5.6) (Λοΐζος κ.ά., 2005).

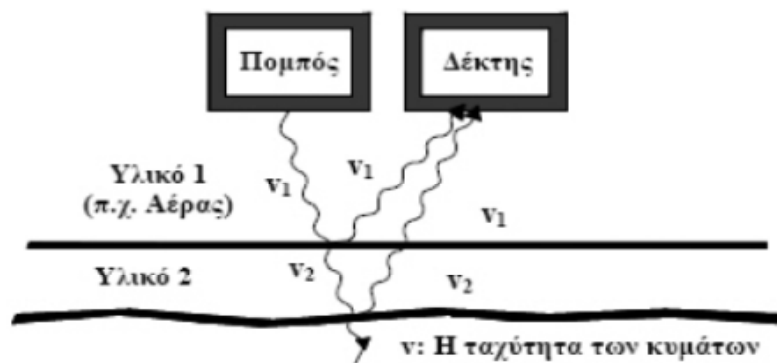


Εικόνα 5.5: Σκαρίφημα της διάταξης συστήματος GPR σε οδούς (Λοΐζος κ.ά., 2005)



Εικόνα 5.6: Μονάδες λειτουργίας ενός συστήματος GPR

Αρχικά το GPR τοποθετείται κοντά στην υπό μελέτη επιφάνεια και μακριά από αντικείμενα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν το ηλεκτρομαγνητικό σήμα (π.χ. μεταλλικές επιφάνειες). Τα ραδιοκύματα κατευθύνονται στο έδαφος. Όταν συναντούν υλικό με διαφορετικά ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά, αφενός μέρος τους ανακλάται πίσω στο δέκτη και αφετέρου μεταβάλλεται η ταχύτητα (v) που τα διαπερνά. Το σύστημα καταγράφει το χρόνο που χρειάζονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα να διαπεράσουν ένα συγκεκριμένο υλικό και να επιστρέψουν στο δέκτη (Εικόνα 5.7). Επίσης, σημαντική είναι και η συμβολή της ταχύτητας των κυμάτων μέσα στα διάφορα υλικά. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται από τη διηλεκτρική σταθερά των υλικών. Ο χρόνος σε συνδυασμό με την ταχύτητα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντίστοιχης απόστασης που διανύουν τα κύματα (Λοΐζος, 2008 και Λοΐζος κ.ά., 2005).



Εικόνα 5.7: Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Λοΐζος κ.ά., 2005)



Εικόνα 5.8: Το σύστημα γεωραντάρ του ΕΜΠ (Λοΐζος κ.ά., 2005)

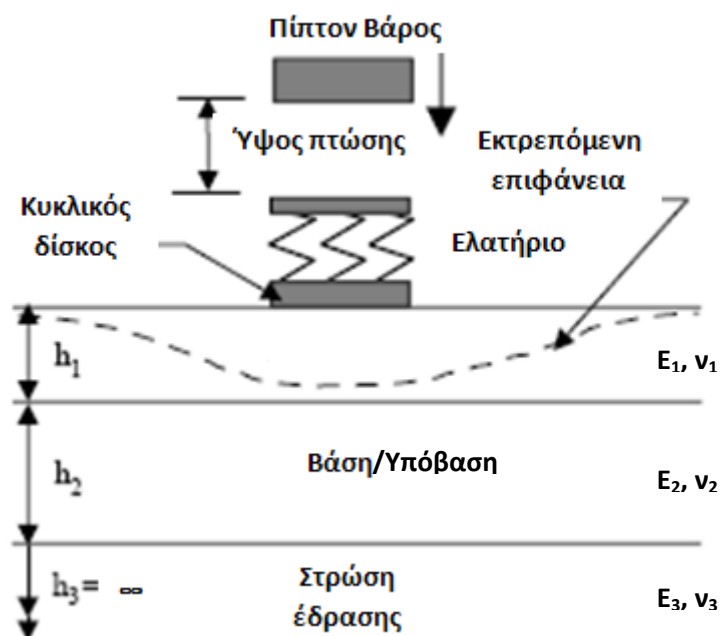
Στην Εικόνα 5.8 απεικονίζεται το σύστημα γεωραντάρ (GPR) του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ. Αξίζει να σημειωθεί πως γενικά, το συγκεκριμένο σύστημα, εκτός από τον προσδιορισμό του πάχους των στρώσεων ενός οδοστρώματος και τη χαρτογράφηση της στρωματογραφίας του εδάφους παρέχει ένα πλήθος εφαρμογών. Μερικές από αυτές είναι ο εντοπισμός κενών μέσα στο έδαφος, η ανίχνευση ελαττωμάτων στο εσωτερικό των κατασκευών και η εφαρμογή του σε έργα σιδηροδρομικής (Λοΐζος, 2008).

5.4 Μηχανικά χαρακτηριστικά

Κρίσιμος για την πρόβλεψη της παραμόρφωσης είναι, επίσης, και ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας E . Σε ένα οδόστρωμα που αποτελείται από περισσότερες από μία στρώσεις, το μέτρο E δεν μπορεί να προσδιοριστεί απευθείας.

Έτσι, ο συνδυασμός πειραματικών εργασιών και ενός ανάστροφου υπολογισμού συμβάλλει στην απόκτηση των επιθυμητών στοιχείων. Στην περίπτωση που οι στρώσεις είναι περισσότερες από δύο (συμπεριλαμβανομένου και της στρώσης έδρασης) η λύση δεν είναι μοναδική και κρίνεται απαραίτητη η κρίση του μηχανικού. Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί συνήθως πρόβλημα για ένα οδόστρωμα με τρεις ή και σε κάποιες περιπτώσεις με τέσσερις στρώσεις (Ullitz, 1998).

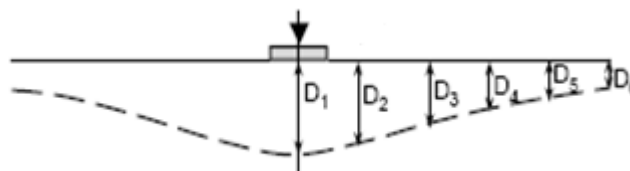
Κατά τη διάρκεια του οδικού πειράματος, λοιπόν, χρησιμοποιήθηκε το Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer), το οποίο αποτελεί ένα από τα πιο εξελιγμένα συστήματα εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος. Χρησιμοποιείται για την καταγραφή στοιχείων του οδοστρώματος με σκοπό στην εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του (Λοΐζος, 2008). Το FWD αποτελεί μία μη καταστρεπτική πειραματική μέθοδο (NDT).



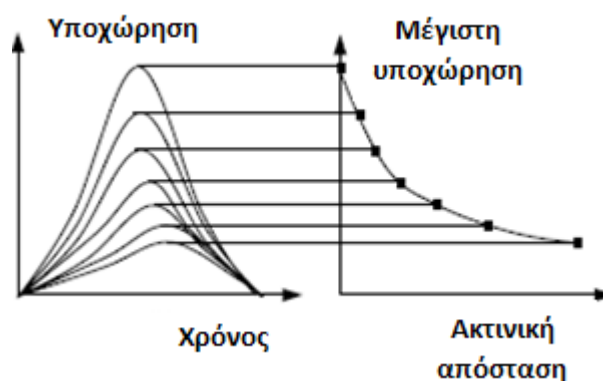
Εικόνα 5.9: Μέτρηση με το FWD (Rakesh et al., 2006)

Η λειτουργία του FWD στηρίζεται στην κάθετη πτώση ενός βάρους που αφήνεται να πέσει υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το βάρος αυτό πέφτοντας προσκρούει σε μια ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια και δημιουργεί μια παλμική φόρτιση. Η φόρτιση μεταβιβάζεται σε έναν κυκλικό δίσκο που βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Η διάρκεια της φορτίσεως είναι συνήθως 25-30 msec ή 45-60 msec ανάλογα με τη συσκευή και το υλικό που επιβάλλεται. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί η προσομοίωση με την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος από τη διέλευση ενός τροχού (Λοΐζος, 2008). Στην Εικόνα 5.9 απεικονίζεται μία σχηματική περιγραφή της λειτουργίας του FWD.

Η φόρτιση που επιβάλλει το παραμορφωσιμόμετρο είναι δυναμική. Αυτό σημαίνει πως κάθε φορά σε οποιοδήποτε σημείο, μόνο ένα μέρος του υλικού επηρεάζεται από τη φόρτιση (Ullitz, 1998). Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις (D_i) κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό (Εικόνα 5.10 και 5.11).



Εικόνα 5.10: Καταγραφή ελαστικών υποχωρήσεων (Rakesh et al., 2006)



Εικόνα 5.11: Τυπικό διάγραμμα υποχωρήσεων από το FWD (Goktepe et al., 2005)

Το διάγραμμα της Εικόνας 5.11 υποδηλώνει τον περίπου ημιτονοειδή χαρακτήρα των καμπύλων της υποχώρησης. Οι καμπύλες αυτές αυξάνονται μη γραμμικά μέχρι μία μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνονται στον εναπομείναντα χρόνο (Goktepe et al., 2005).

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν συστηματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας, καθώς αυτή επηρεάζει την ανάπτυξη των παραμενουσών παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα μετρήθηκε η θερμοκρασία του αέρα και η θερμοκρασία στην επιφάνεια του οδοστρώματος με χρήση υπερύθρων. Επιπρόσθετα, απαραίτητος είναι και ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων. Η θερμοκρασία αυτή προσεγγίστηκε με οπή στο οδοστρώματα και θερμόμετρο. Η καταγραφή των στοιχείων αυτών κρίνεται αναγκαία λόγω της σημαντικής επίδρασης της θερμοκρασίας στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των στρώσεων ενός οδοστρώματος.

Βέβαια, ο προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας δεν επαρκεί για το χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των υλικών. Έτσι, για τις ανάγκες της χρησιμοποίησης του προτύπου VESYS ορίζεται ο λόγος του Poisson ν ο οποίος ισούται με 0.35 για τις ασφαλικές στρώσεις και τη βάση/υπόβαση και με 0.40 για τη στρώση έδρασης.

5.5 Κλιματολογικά στοιχεία

Η θερμοκρασία και η υγρασία αποτελούν δύο ακόμη βασικές συνιστώσες της δομής του ιξωδοελαστικού προτύπου. Στον Πίνακα 5.1 αποτυπώνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασιακή κατανομή της περιοχής που γίνεται η διερεύνηση, σύμφωνα με την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY).

Πίνακας 5.1: Μηνιαία κατανομή της θερμοκρασίας και της υγρασίας (EMY)

Μήνας	Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία (°C)	Μέση Μηνιαία Υγρασία %
Ιανουάριος	10.2	70.6
Φεβρουάριος	10.5	69.6
Μάρτιος	12.6	68.0
Απρίλιος	15.8	65.8
Μάιος	20.5	61.9
Ιούνιος	24.8	58.1
Ιούλιος	27.2	56.3
Αύγουστος	27.0	55.7
Σεπτέμβριος	24.0	59.8
Οκτώβριος	19.1	66.8
Νοέμβριος	14.5	69.9
Δεκέμβριος	11.7	70.4

5.6 Κυκλοφοριακά δεδομένα

Στο τμήμα του νέου αυτοκινητόδρομου που εξετάζεται διατέθηκε η μέση ημερήσια κυκλοφορία των οχημάτων (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2: Μέση ημερήσια κυκλοφορία

	Ημερήσιος Μ.Ο. διελεύσεων
Κατηγορία 1	27
Κατηγορία 2	2950
Κατηγορία 3	184
Κατηγορία 4	111
Σύνολο	3272

Τα οχήματα ταξινομήθηκαν στις εξής κατηγορίες:

- Κατηγορία 1: Δίκυκλα
- Κατηγορία 2: Οχήματα με ή χωρίς ρυμουλκούμενο, και με ύψος μέχρι 2,20 μέτρα.
- Κατηγορία 3: Οχήματα 2-3 αξόνων, με ή χωρίς ρυμουλκούμενο, και με ύψος μεγαλύτερο από 2,20 μέτρα.
- Κατηγορία 4: Οχήματα με ή χωρίς ρυμουλκούμενο, 4 και άνω αξόνων, και με ύψος μεγαλύτερο από 2,20 μέτρα.

5.5 Μέτρηση παραμενουσών παραμορφώσεων

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, προκειμένου να ελεγχθούν οι προβλεπόμενες τιμές της παραμόρφωσης του ιξωδοελαστικού προτύπου για το πειραματικό οδόστρωμα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των παραμορφώσεων κατά μήκος του οδοστρώματος. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν ένα χρόνο έπειτα από τη συλλογή των στοιχείων που είναι απαραίτητα για την εκτίμηση της παραμένουσας παραμόρφωσης, έτσι ώστε να έχει διέλθει ένα ευλόγως μεγάλο φορτίο κυκλοφορίας.

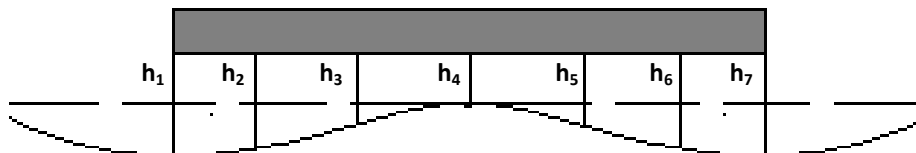
Για την καταγραφή των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκε το προφιλόμετρο υψηλής ταχύτητας Laser Profiler (LP) του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, το οποίο μπορεί να αποδώσει μία εκτίμηση των εγκάρσιων παραμορφώσεων (Εικόνα 5.12). Αποτελεί ένα από τα πιο τεχνολογικά εξελιγμένα και ευρέως διαδεδομένα συστήματα. Το LP καταγράφει τα χαρακτηριστικά των κατανομών της επιφάνειας του οδοστρώματος σε υψηλές ταχύτητες κίνησης. Για την καταγραφή χρησιμοποιείται ένα επιταχυνσιόμετρο και ένας ή περισσότεροι αισθητήρες (laser) που μετράνε την κατακόρυφη απόσταση που διανύεται. Το προφιλόμετρο υψηλής ταχύτητας έχει ως βασική μονάδα μία δοκό στην οποία ενσωματώνονται οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες. Η δοκός προσαρμόζεται στο πίσω μέρος κατάλληλα διαμορφωμένου οχήματος (Λοΐζος, 2008 και Λοΐζος κ.ά., 2005).

Το LP μετράει και καταγράφει κατά την κίνηση του οχήματος τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Την κατακόρυφη μετατόπιση της δοκού από την επιφάνεια του οδοστρώματος.
- Την κατακόρυφη επιτάχυνση της δοκού.
- Τον χρόνο και την απόσταση που καταγράφονται οι δύο προαναφερόμενες παράμετροι (μέσω του ταχύμετρου).



Εικόνα 5.12: Laser Profiler του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ



Εικόνα 5.13: Μέτρηση με προφιλόμετρο 7 αισθητήρων

Οι τιμές των παραμορφώσεων αποκτήθηκαν από τους 7 αισθητήρες του προφιλόμετρου. Ο προσδιορισμός της παραμόρφωσης σε κάθε θέση βασίστηκε στο σκαρίφημα της Εικόνας 5.13.

6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΛΛΟΓΗΣ

6.1 Γενικά

Προκειμένου να αξιοποιηθούν τα στοιχεία συλλογής για την πρόβλεψη της παραμόρφωσης ανά θέση, κατά μήκος του πειραματικού οδοστρώματος, πραγματοποιήθηκε κατάλληλη επεξεργασία και ανάλυση αυτών. Η ορθή ανάλυσή τους καθορίζει την έκβαση των αποτελεσμάτων και τη σωστή λειτουργία της προσομοίωσης για την πρόβλεψη. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία επεξεργασίας και ανάλυσης των στοιχείων αυτών.

6.2 Πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος

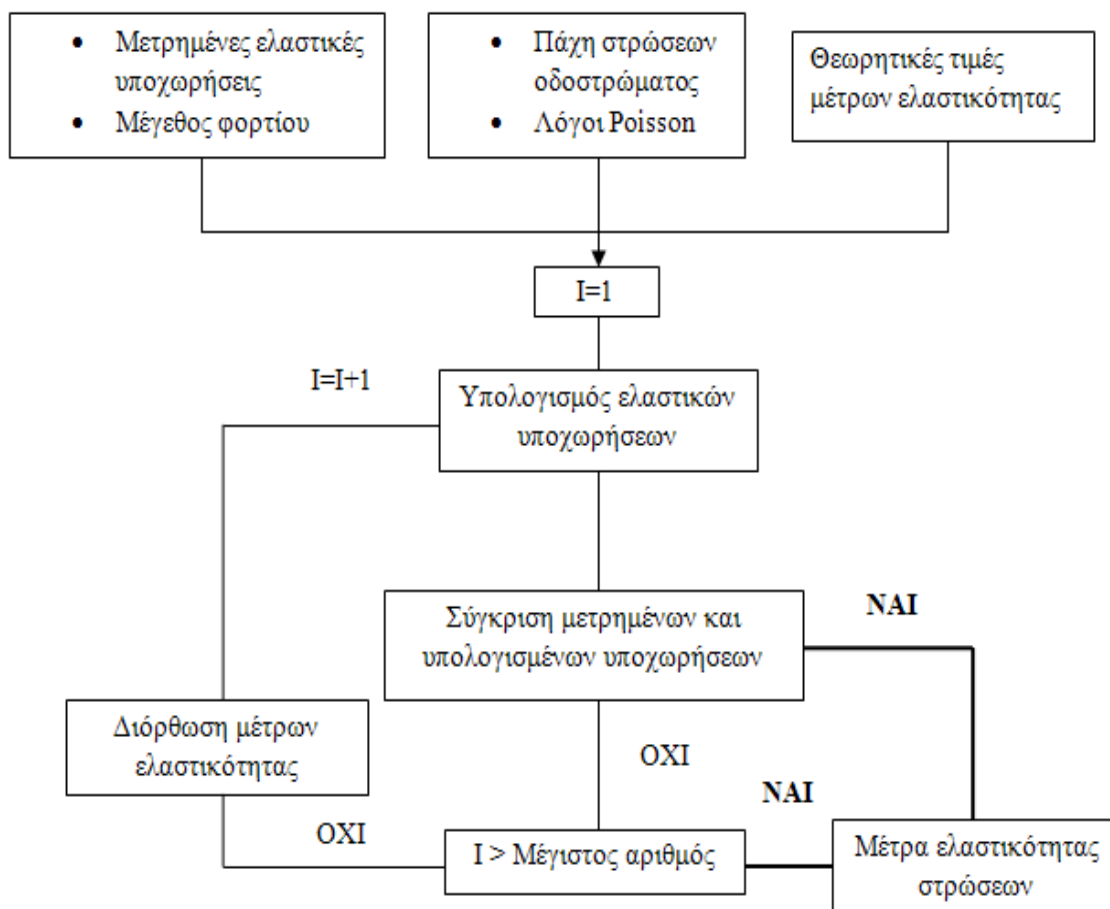
Πίνακας 6.1: Πάχη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος

A/A	Θέση (m)	Ασφαλτική Στρώση (cm)	Βάση/ Υπόβαση (cm)
1	0	14.7	36
2	20	16	36.3
3	40	16	36.6
4	60	16	35.3
5	80	16	35.8
6	100	15.1	39.5
7	120	15.8	37.3
8	140	14.9	34.6
9	160	15.9	36.8
10	180	14.9	35
11	200	14.8	38.5
12	220	16.2	34.3
13	240	16.1	34.8
14	260	16	36.8
15	280	15.8	38.3
16	300	16	38.2
17	320	16.1	35.5
18	340	16.2	34.7
19	360	14	36
20	380	15.3	34
21	400	14.8	35.3
22	420	15.3	34.9
23	440	16.7	34.5
24	460	16.3	35.1
25	480	16.8	35.2
26	500	16.4	33.9
27	520	16.2	34.6
28	540	16.3	37.9
29	560	16.8	33.7
30	580	16.1	37.5
31	600	16	36.5

Κατόπιν συστηματικής ανάλυσης της στρωματογραφίας, εκτιμήθηκαν τα πάχη βάσει της γεωφυσικής θεωρίας και προέκυψαν οι τιμές του Πίνακα 6.1.

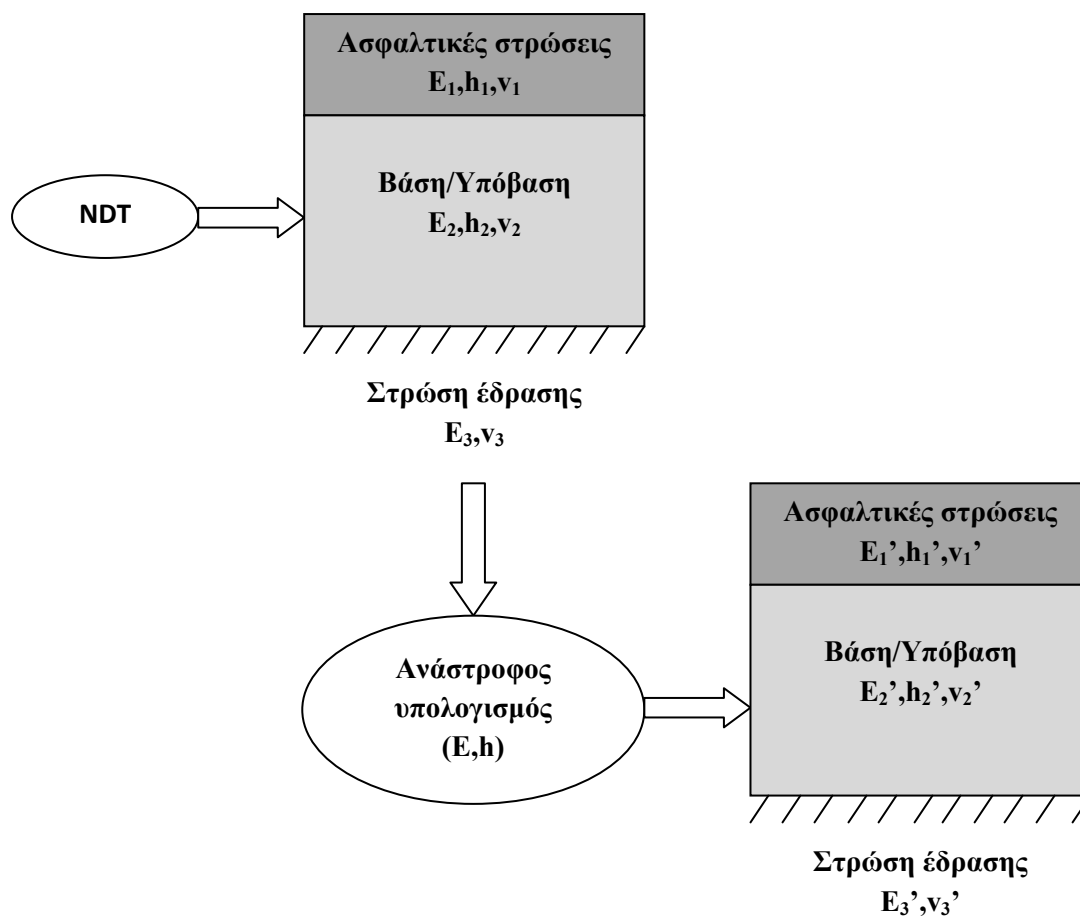
6.3 Ανάστροφος υπολογισμός (backcalculation)

Αξιοποιώντας τα στοιχεία που προκύπτουν από τις μετρήσεις με το σύστημα FWD και τα πάχη που εκτιμήθηκαν, διαμορφώθηκε ένας αλγόριθμος ανάστροφου υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών. Η συνολική διαδικασία ανάλυσης χαρακτηρίζεται από ένα διάγραμμα ροής αποτελούμενο από διαδοχικούς κύκλους υπολογισμών (σχήμα Εικόνας 6.1).



Εικόνα 6.1: Διάγραμμα ροής ανάστροφων υπολογισμών (Λοΐζος, 2008)

Με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού πραγματοποιείται προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των στρώσεων του οδοστρώματος (Εικόνα 6.2). Έτσι, τα καινούρια μηχανικά χαρακτηριστικά που προκύπτουν υιοθετούνται για την πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης μέσω του ιξωδοελαστικού προτύπου.



Εικόνα 6.2: Εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών υλικών επιμέρους στρώσεων οδοστρώματος με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού (Λοΐζος, 2008)

Ο Πίνακας 6.2 περιέχει τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού για τα μέτρα ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων του εξεταζόμενου οδοστρώματος.

Πίνακας 6.2: Μέτρα ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος όπως υπολογίστηκαν με τον ανάστροφο υπολογισμό

A/A	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)
1	8883	674	154
2	8313	633	240
3	8508	621	237
4	7454	831	241
5	7519	240	359
6	8129	444	102
7	6163	496	107
8	9217	585	153
9	7519	644	124
10	8463	604	152
11	8291	514	153
12	5003	2453	178
13	7220	505	154
14	7296	565	180
15	6949	534	237
16	6759	487	157
17	6616	582	184
18	8046	603	174
19	8252	548	298
20	7721	766	192
21	8076	581	237
22	7996	807	222
23	6736	727	322
24	7799	682	238
25	7258	262	967
26	6282	960	174
27	5715	552	298
28	6378	697	293
29	6105	775	270
30	6066	932	282
31	6956	832	415

6.4 Επεξεργασία κλιματολογικών στοιχείων

Για την πρόβλεψη της παραμόρφωσης απαιτείται η εισαγωγή της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και του παράγοντα επίδρασης της υγρασίας. Η πρώτη παράμετρος λαμβάνεται ως έχει από τον Πίνακα 5.3, ενώ για τη δεύτερη, βάσει των δεδομένων από την ΕΜΥ γίνεται η παραδοχή πως ισούται με τη μονάδα. Επιπλέον, βάσει των κλιματολογικών στοιχείων, το διάστημα της πρόβλεψης χωρίζεται σε 12 μήνες, έτσι ώστε να αξιοποιηθούν οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες.

6.5 Επεξεργασία κυκλοφοριακών δεδομένων

Στο πρότυπο VESYS οι αναλύσεις των κυκλοφοριακών στοιχείων γίνονται βάσει της παραδοχής της επίδρασης του φορτίου του μονού τροχού. Έτσι, οι διελεύσεις όλων των οχημάτων του Πίνακα 5.4 μετατράπηκαν σε ισοδύναμες διελεύσεις του τυπικού αξονικού φορτίου. Το τελευταίο ισούται με 80 kN ή 8 t (Λοΐζος, 2008).

Πίνακας 6.3: Ισοδύναμες διελεύσεις του τυπικού αξονικού φορτίου

	Ημερήσιος Μ.Ο. διελεύσεων	ΣΙ _i	ΙΤΑ _i
Κατηγορία 1	27	0	0
Κατηγορία 2	2950	1	2950
Κατηγορία 3	184	2	368
Κατηγορία 4	111	4	444
Σύνολο	3272		3762

Ο Πίνακας 6.3 περιέχει, τους συντελεστές μετατροπής των διελεύσεων κάθε κατηγορίας σε ισοδύναμες διελεύσεις του τυπικού αξονικού φορτίου (Highways Agency, 2006). Ειδικότερα, όσον αφορά στα δίκυκλα έγινε η παραδοχή του μηδενικού συντελεστή ισοδυναμίας, καθώς η επίδραση τους στη δημιουργία παραμένουσας παραμόρφωσης θεωρείται αμελητέα.

Οι συνολικές ισοδύναμες διελεύσεις σε συνδυασμό με το τυπικό αξονικό φορτίο και την πίεση των ελαστικών (827 KPa) αποτελούν τα κυκλοφοριακά δεδομένα που απαιτούνται στο ιξωδοελαστικό πρότυπο.

6.6 Διερεύνηση των παραμέτρων α και μ της παραμένουσας παραμόρφωσης των υλικών

6.6.1 Ανάλυση ευαισθησίας

Επόμενο στάδιο για τη πρόβλεψη της παραμόρφωσης είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων α και μ της παραμένουσας παραμόρφωσης των υλικών. Αρχικά, πραγματοποιείται μία διερεύνηση των παραμέτρων προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδρασή τους στην εκτίμηση της παραμένουσας παραμόρφωσης.

Ο Kenis (1977,1982) διερεύνησε τη συμπεριφορά ορισμένων υλικών και μέσα από εργαστηριακές δοκιμές προσδιόρισε τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας E και των παραμέτρων α και μ της παραμένουσας παραμόρφωσης που τους αντιστοιχούν. Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των τιμών των E , α και μ με το κάθε υλικό.

Πίνακας 6.4: Οι ιδιότητες των υλικών σύμφωνα με το πρότυπο VESYS (Zhou and Scullion, 2004)

	Κατηγορία υλικού	Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	α	μ
Ασφαλτικά υλικά	HMA διαβάθμισης A	2068	0.78	0.35
	HMA διαβάθμισης B	2758	0.78	0.35
	HMA διαβάθμισης C	3447	0.78	0.35
	HMA διαβάθμισης D	3447	0.78	0.35
	Τροποποιημένα HMA	6895	0.89	0.30
	Ανθεκτικά στην παραμένουσα παραμόρφωση	6205	0.89	0.30
Υλικά της Βάσης/υπόβασης	Κοκκώδη κατηγορίας 1	483	0.90	0.20
	Κοκκώδη κατηγορίας 2	345	0.87	0.25
Στρώσης έδρασης	Βραχώδη εδάφη	110	0.90	0.20

Όπως παρατηρούμε τα ασφαλτικά υλικά μπορούμε να τα ταξινομήσουμε σε δύο μεγαλύτερες κατηγορίες λόγω των τιμών των παραμέτρων α και μ :

- Κατηγορία 1: περιλαμβάνει τα υλικά HMA διαβάθμισης A, HMA διαβάθμισης B, HMA διαβάθμισης C και HMA διαβάθμισης D με την παράμετρο α να ισούται με 0.78 και τη μ με 0.35.
- Κατηγορία 2: περιλαμβάνει τα τροποποιημένα HMA και τα υλικά που είναι ανθεκτικά στην παραμένουσα παραμόρφωση. Στην κατηγορία αυτή οι τιμές των α και μ είναι 0.89 και 0.30 αντίστοιχα.

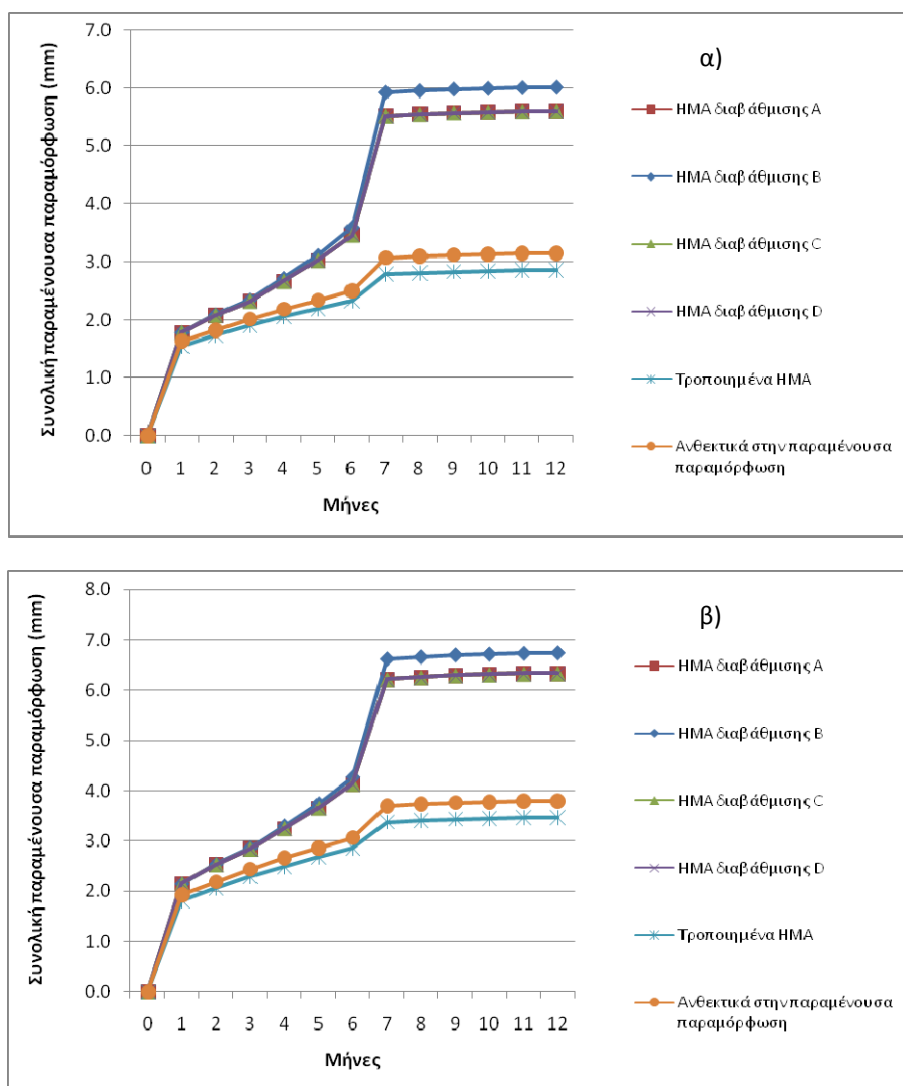
Βάσει αυτής της ταξινόμησης, ασφαλτικά υλικά που μπορούν να ενταχθούν στην κατηγορία 1 θα έχουν παραμέτρους α και μ ίσες με 0.78 και 0.35 αντίστοιχα. Όμοια, για την κατηγορία 2 θα ισχύει $\alpha=0.89$ και $\mu=0.30$.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας των α και μ , περιλαμβάνουν χρήση του προτύπου VESYS, διατηρώντας σταθερή τη στρώση έδρασης (στην προκειμένη περίπτωση βραχώδες έδαφος, αντίστοιχα με τη στρώση έδρασης του πειραματικού οδοστρώματος) και εναλλάσσοντας κάθε φορά τα ασφαλτικά υλικά και τη βάση/υπόβαση. Επιπλέον τα κλιματολογικά και κυκλοφοριακά στοιχεία παραμένουν ίδια σε κάθε δοκιμή, όπως επίσης και το πάχος κάθε στρώσης.

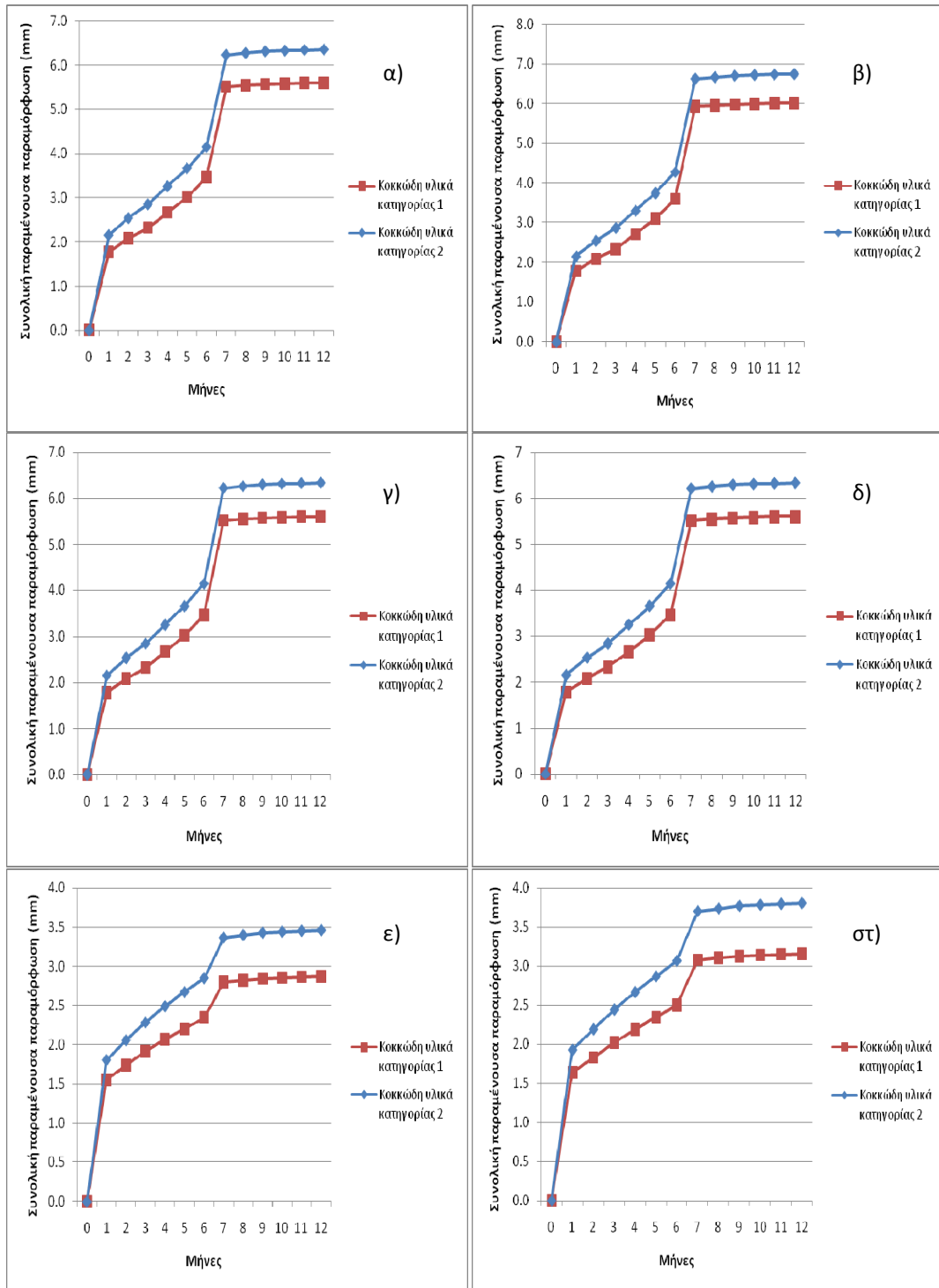
Τα δύο διαγράμματα της Εικόνας 6.3 απεικονίζουν τη συνολική μόνιμη παραμόρφωση ενός οδοστρώματος ανάλογα με την κατηγορία των ασφαλτικών υλικών που διερευνήθηκε. Διαπιστώνεται πως για τα ασφαλτικά υλικά που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία (HMA διαβάθμισης A, HMA διαβάθμισης B, HMA

διαβάθμισης C και HMA διαβάθμισης D) τα αντίστοιχα οδοστρώματα έχουν περίπου ίδια συνολική παραμένουσα παραμόρφωση. Το ίδιο ισχύει και για τα υλικά της δεύτερης κατηγορίας. Συνεπώς, οδοστρώματα των οποίων τα ασφαλτικά υλικά έχουν ίδιες τιμές των παραμέτρων α και μ υφίστανται περίπου ίδια μόνιμη παραμόρφωση.

Επιπρόσθετα, για τα ασφαλτικά υλικά με τις ίδιες τιμές α και μ κρίσιμη για το μέγεθος της παραμένουσας παραμόρφωσης είναι η συμβολή των άλλων ιδιοτήτων των υλικών όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας E. Κατά αυτόν τον τρόπο, με την προϋπόθεση ότι είναι εφικτή η αντιστοίχιση ενός ασφαλτικού υλικού στην κατηγορία 1 ή 2, μπορούν να υιοθετηθούν οι τιμές των παραμέτρων της παραμένουσας παραμόρφωσης που τους αναλογούν. Έτσι, στη συγκεκριμένη περίπτωση οι παράμετροι αυτές δεν αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος έναντι των μόνιμων παραμορφώσεων.



Εικόνα 6.3: Συνολική παραμένουσα παραμόρφωση ενός οδοστρώματος ανάλογα με τον τύπο του ασφαλτικού υλικού α)για τα κοκκώδη υλικά κατηγορίας 1 και β)για τα κοκκώδη υλικά κατηγορίας 2



Εικόνα 6.4: Συνολική παραμένουσα παραμόρφωση ενός οδοστρώματος ανάλογα με την κατηγορία των υλικών της βάσης/υπόβασης α)για τα υλικά HMA διαβάθμισης Α, β) HMA διαβάθμισης Β, γ)HMA διαβάθμισης C, δ)HMA διαβάθμισης D, ε) τα τροποποιημένα HMA και στ)τα υλικά που είναι ανθεκτικά στην παραμένουσα παραμόρφωση

Στα διαγράμματα της Εικόνας 6.4 απεικονίζεται η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση κάθε κατηγορίας ασφαλτικού υλικού για τις δύο κατηγορίες των

υλικών της βάσης/υπόβασης. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει πως τα κοκκώδη υλικά της κατηγορίας 1 αντιστοιχούν σε μικρότερη συνολική παραμένουσα παραμόρφωση για ένα οδόστρωμα συγκριτικά με τα κοκκώδη υλικά της κατηγορίας 2. Έτσι ο συνδυασμός των ιδιοτήτων των υλικών και των παραμέτρων α και μ επιδρά στο μέγεθος της μόνιμης παραμόρφωσης.

Παρατηρούμε γενικά πως οι παράμετροι α και μ επιδρούν σημαντικά στην παραμένουσα παραμόρφωση. Ο προσδιορισμός των τιμών των παραμέτρων αυτών, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής, ωστόσο, αποτελεί μία δύσκολη διαδικασία. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην έλλειψη εργαστηριακού εξοπλισμού και στην απουσία των κατάλληλων συνθηκών που απαιτούνται για τη διεξαγωγή των πειραμάτων καθορισμού των παραμέτρων (βλ. κεφάλαιο 4.8 Προσδιορισμός των παραμέτρων α και μ της παραμένουσας παραμόρφωσης του υλικού κάθε στρώσης). Η αδυναμία αυτή, πραγματοποίησης εργαστηριακών δοκιμών οδηγεί στην αξιοποίηση των τιμών των παραμέτρων, όπως αυτές προσδιορίζονται από τη βιβλιογραφία. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι προτεινόμενες τιμές, θα γίνει πρώτα η αντιστοίχιση των υλικών του ασφαλτομίγματος, της βάσης/υπόβασης και της στρώσης έδρασης με τα αντίστοιχα του προτύπου.

6.6.2 Προσδιορισμός των α και μ

Όπως έχει ήδη επισημανθεί οι παράμετροι α και μ της παραμένουσας παραμόρφωσης επιδρούν καθοριστικά στην πρόβλεψή της. Το πρότυπο VESYS περιλαμβάνει ορισμένες κατηγορίες υλικών στις οποίες αντιστοιχούν συγκεκριμένες τιμές των α και μ . Μέσω της αντιστοίχισης των υλικών που χρησιμοποιούνται στο εξεταζόμενο οδόστρωμα, είναι δυνατή η αξιοποίηση των προτεινόμενων τιμών των παραμέτρων.

Έτσι, όσον αφορά στις ασφαλικές στρώσεις, χρησιμοποιήθηκαν τροποποιημένα ασφατικά υλικά, τα οποία αντιστοιχούν σε $\alpha=0.89$ και $\mu=0.30$. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται πως έγινε η παραδοχή μίας ασφαλικής στρώσης, της στρώσης κυκλοφορίας με την τροποποιημένη άσφαλτο. Προκειμένου, λοιπόν, να χρησιμοποιηθούν οι τιμές αυτές των παραμέτρων, για την ορθή αντιστοίχιση των υλικών, έγινε διερεύνηση των χαρακτηριστικών των ασφαλτομιγμάτων. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών, το μέτρο ελαστικότητας, οι ογκομετρικές αναλογίες ασφάλτου και αδρανών και τα κενά αέρος. Επιπρόσθετα, η σύγκριση πραγματοποιήθηκε και μεταξύ των στοιχείων που σχετίζονται με το ιξώδες, τη μάλθωση, το βαθμό διείδυσης και άλλων χαρακτηριστικών της ασφάλτου. Τα χαρακτηριστικά των ασφαλικών στρώσεων περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.1

Οι τιμές των α και μ της παραμένουσας παραμόρφωσης για τη στρώση της βάσης/υπόβασης είναι 0.90 και 0.20 αντίστοιχα. Η επιλογή αυτή στηρίχτηκε στην κοκκομετρική διαβάθμιση και το μέτρο ελαστικότητας των υλικών. Αντίστοιχα με τα υλικά των ασφαλτικών στρώσεων, τα χαρακτηριστικά της βάσης/υπόβασης περιγράφονται επίσης στο κεφάλαιο 5.1.

Τέλος, η στρώση έδρασης του πειραματικού οδοστρώματος αφορά σε βραχώδες έδαφος με τιμές $\alpha=0.90$ και $\mu=0.20$.

Επισημαίνεται, πως στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε η παραδοχή των σταθερών τιμών των παραμέτρων α και μ για κάθε στρώση κατά μήκος του πειραματικού οδοστρώματος.

Η αξιοποίηση των τιμών των παραμέτρων α και μ της παραμένουσας παραμόρφωσης στηρίχτηκε, λοιπόν, στη βιβλιογραφική αναφορά. Ο Πίνακας 6.4 περιέχει τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στο ιξωδοελαστικό πρότυπο, βασίζεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση και αξιοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των παραμέτρων.

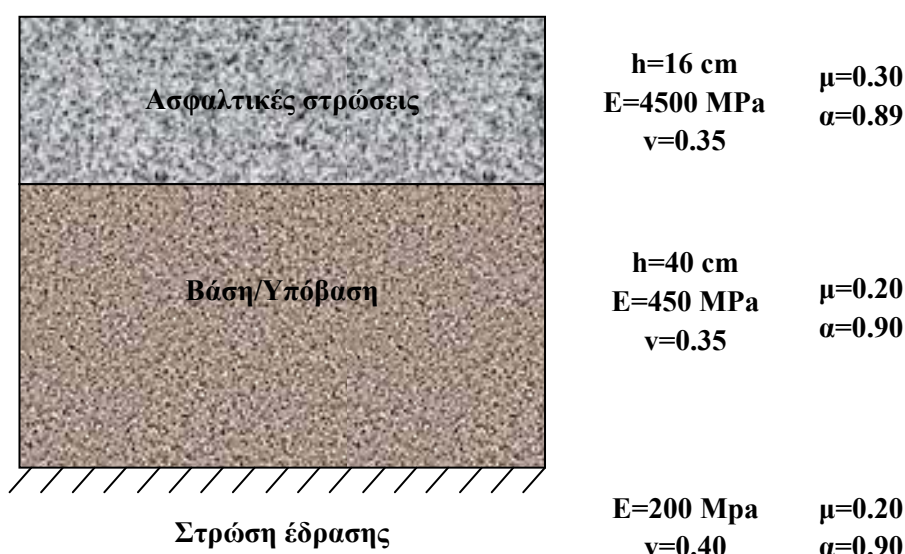
7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

7.1 Προβλεπόμενες παραμένουσες παραμορφώσεις

Για την πρόβλεψη της παραμόρφωσης κατά μήκος του υπό διερεύνηση οδοστρώματος έγιναν δύο θεωρήσεις. Η πρώτη θεωρήση αφορά στα στοιχεία σχεδιασμού για την κατασκευή του οδοστρώματος, όπως αυτά καθορίστηκαν βάσει των προδιαγραφών των υλικών και των σχετικών εργαστηριακών αποτελεσμάτων. Η δεύτερη θεωρήση βασίζεται στα στοιχεία που προέκυψαν από επί τόπου μετρήσεις με χρήση NDTs και από την κατάλληλη επεξεργασία και ανάλυσή τους. Επιπρόσθετα, για τους υπολογισμούς τόσο με τα στοιχεία σχεδιασμού, όσο και με τα επί τόπου στοιχεία, έγινε παραδοχή μίας ασφαλτικής στρώσης για το πειραματικό οδόστρωμα. Η στρώση αυτή είναι εκείνη που περιέχει την τροποποιημένη ασφαλτο και επιλέχθηκε καθώς πρόκειται για τη στρώση κυκλοφορίας.

7.1.1 Προβλεπόμενες παραμένουσες παραμορφώσεις βάσει της διατομής σχεδιασμού

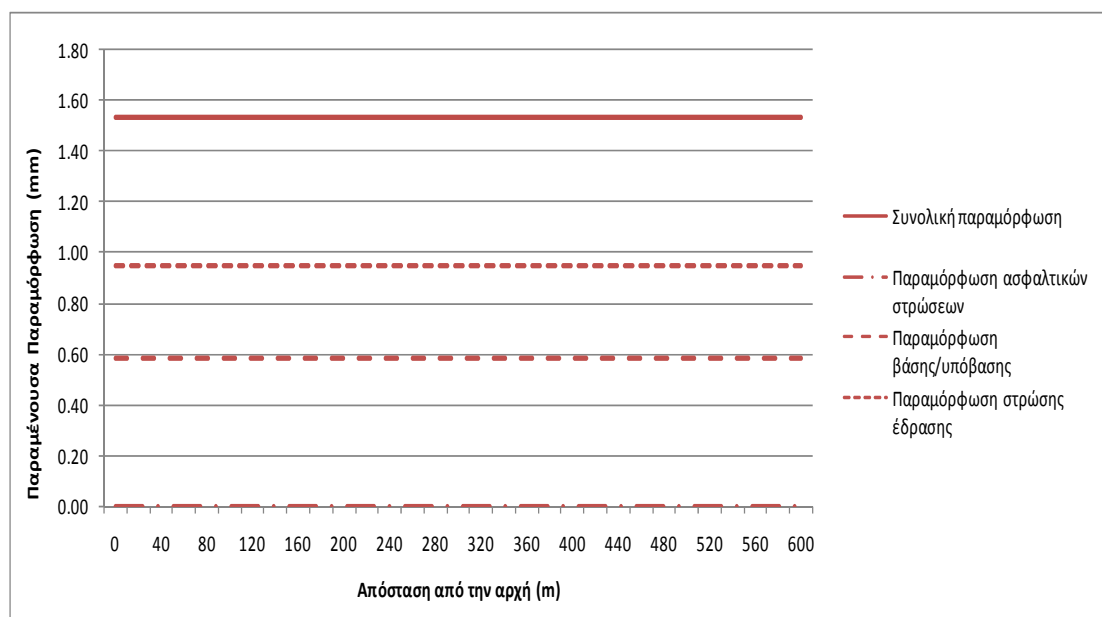
Τα στοιχεία σχεδιασμού για την κατασκευή φαίνονται στην Εικόνα 7.1. Η Εικόνα 7.1 αντιστοιχεί στο σκαρίφημα της διατομής σχεδιασμού και περιέχει τα στοιχεία των επί μέρους στρώσεων (το πάχος h , το μέτρο ελαστικότητας E και το λόγο του Poisson ν). Βάσει των δεδομένων αυτών προκύπτουν οι παραμένουσες παραμορφώσεις του Πίνακα 7.1. Στον πίνακα φαίνονται η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση της διατομής σχεδιασμού, καθώς επίσης και η παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών στρώσεων, της βάσης/υπόβασης και της στρώσης έδρασης έπειτα από 12 μήνες κυκλοφορίας των οχημάτων.



Εικόνα 7.1: Διατομή σχεδιασμού

Πίνακας 7.1: Προβλεπόμενες παραμένουσες παραμορφώσεις του οδοστρώματος για τη διατομή σχεδιασμού

Συνολική Παραμένουσα Παραμόρφωση (mm)	Παραμένουσα Παραμόρφωση ασφαλτικών στρώσεων (mm)	Παραμένουσα Παραμόρφωση βάσης/υπόβασης (mm)	Παραμένουσα Παραμόρφωση στρώσης έδρασης (mm)
1.53	0.00	0.58	0.95



Εικόνα 7.2: Παραμένουσα παραμόρφωση κατά μήκος του υπό διερεύνηση οδοστρώματος για τα στοιχεία σχεδιασμού

Κατά μήκος του συνολικού τμήματος του εξεταζόμενου οδοστρώματος των 600 μέτρων η παραμένουσα παραμόρφωση διατηρείται σταθερή. Αυτό υποδηλώνει πως λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της διατομής σχεδιασμού, το οδόστρωμα παραμορφώνεται το ίδιο κατά μήκος.

7.1.2 Προβλεπόμενες παραμένουσες παραμορφώσεις βάσει επί τόπου στοιχείων

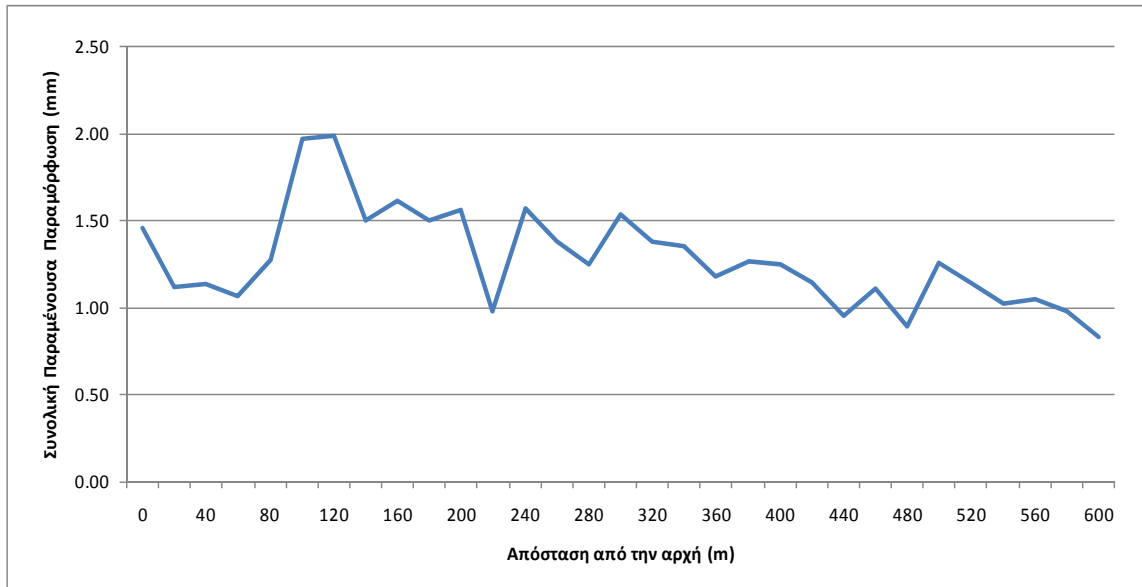
Στον Πίνακα 7.2 εμπεριέχονται οι προβλέψεις της παραμένουσας παραμόρφωσης σύμφωνα με τα στοιχεία που προέκυψαν από το οδικό πείραμα. Συγκεκριμένα, σε κάθε θέση αντιστοιχεί μία προβλεπόμενη συνολική μόνιμη παραμόρφωση και τρεις επιμέρους προβλεπόμενες παραμορφώσεις, μία για την κάθε επιμέρους στρώση του οδοστρώματος. Το πρότυπο VESYS παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της συνολικής παραμένουσας παραμόρφωσης, αλλά και την αντίστοιχη κάθε στρώσης, για κάθε θέση του πειραματικού οδοστρώματος.

Προκειμένου να αποδοθεί μία εκτίμηση της ομαλότητας του οδοστρώματος, οι παραμένουσες παραμορφώσεις που προβλέφθηκαν διατάσσονται κατά μήκος του πειραματικού οδοστρώματος και αποτυπώνονται στα διαγράμματα των Εικόνων 7.3, 7.4, 7.5 και 7.6. Τα διαγράμματα αυτά απεικονίζουν τόσο τις κατά μήκος συνολικές παραμορφώσεις, όσο και τις κατά μήκος παραμορφώσεις των επιμέρους στρώσεων.

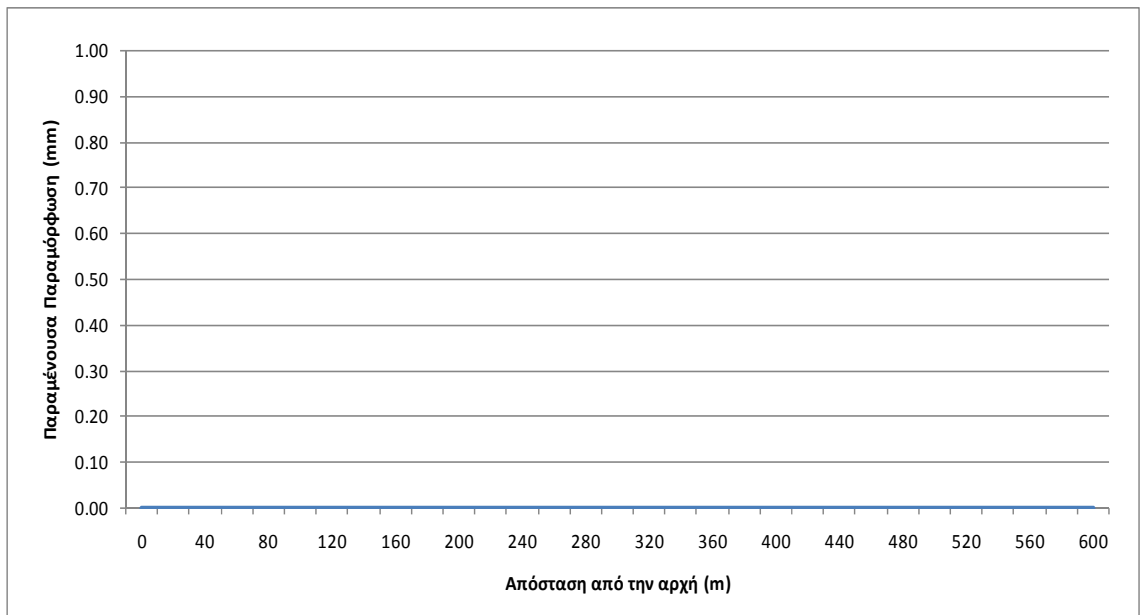
Βάσει του πίνακα και των διαγραμμάτων παρατηρείται πως σε όλες τις θέσεις του εξεταζόμενου οδοστρώματος η παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών στρώσεων είναι μηδενική. Αυτό υποδηλώνει πως, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η χρήση τροποποιημένης ασφάλτου καθιστά ισχυρές τις ασφαλτικές στρώσεις, με αποτέλεσμα το οδόστρωμα να μην παραμορφώνεται επιφανειακά. Έτσι, οι στρώσεις της βάσης/υπόβασης και της έδρασης είναι αυτές που συμβάλλουν στη δημιουργία της μόνιμης παραμόρφωσης στο οδόστρωμα. Επιπλέον, επισημαίνεται πως, όσον αφορά τις συγκεκριμένες προβλέψεις, κρίσιμη είναι η επίδραση της στρώσης έδρασης στην εμφάνιση των παραμορφώσεων, καθώς οι μόνιμες παραμορφώσεις που προβλέπονται για αυτήν είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της βάσης/υπόβασης. Επίσης, τα διαγράμματα των Εικόνων 7.3 και 7.6 έχουν περίπου την ίδια μορφή, γεγονός που ενισχύει την παρατήρηση πως η στρώση έδρασης συμβάλλει σημαντικά στη δημιουργία παραμόρφωσης στην προκειμένη περίπτωση.

Πίνακας 7.2: Προβλεπόμενες παραμένουσες παραμορφώσεις για κάθε θέση

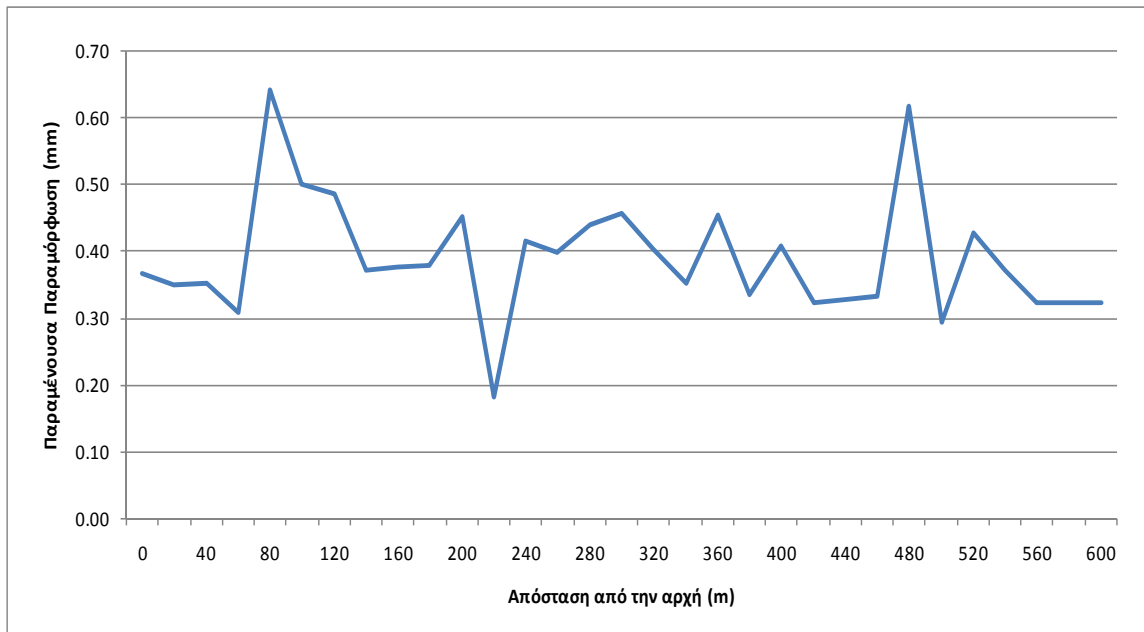
A/A	Θέση (m)	Συνολική Παραμένουσα Παραμόρφωση (mm)	Παραμένουσα Παραμόρφωση ασφαλτικών στρώσεων (mm)	Παραμένουσα Παραμόρφωση βάσης/υπόβασης (mm)	Παραμένουσα Παραμόρφωση στρώσης έδρασης (mm)
1	0	1.46	0.00	0.37	1.09
2	20	1.12	0.00	0.35	0.77
3	40	1.13	0.00	0.35	0.78
4	60	1.06	0.00	0.31	0.75
5	80	1.27	0.00	0.64	0.63
6	100	1.97	0.00	0.50	1.47
7	120	1.99	0.00	0.49	1.50
8	140	1.50	0.00	0.37	1.13
9	160	1.61	0.00	0.38	1.23
10	180	1.50	0.00	0.38	1.12
11	200	1.56	0.00	0.45	1.11
12	220	0.98	0.00	0.18	0.80
13	240	1.57	0.00	0.42	1.15
14	260	1.37	0.00	0.40	0.97
15	280	1.24	0.00	0.44	0.80
16	300	1.54	0.00	0.46	1.08
17	320	1.38	0.00	0.40	0.97
18	340	1.35	0.00	0.35	1.00
19	360	1.17	0.00	0.45	0.72
20	380	1.26	0.00	0.33	0.93
21	400	1.25	0.00	0.41	0.84
22	420	1.15	0.00	0.32	0.82
23	440	0.95	0.00	0.33	0.62
24	460	1.10	0.00	0.33	0.77
25	480	0.89	0.00	0.62	0.27
26	500	1.25	0.00	0.29	0.96
27	520	1.14	0.00	0.43	0.72
28	540	1.02	0.00	0.37	0.65
29	560	1.05	0.00	0.32	0.73
30	580	0.98	0.00	0.32	0.65
31	600	0.83	0.00	0.32	0.50



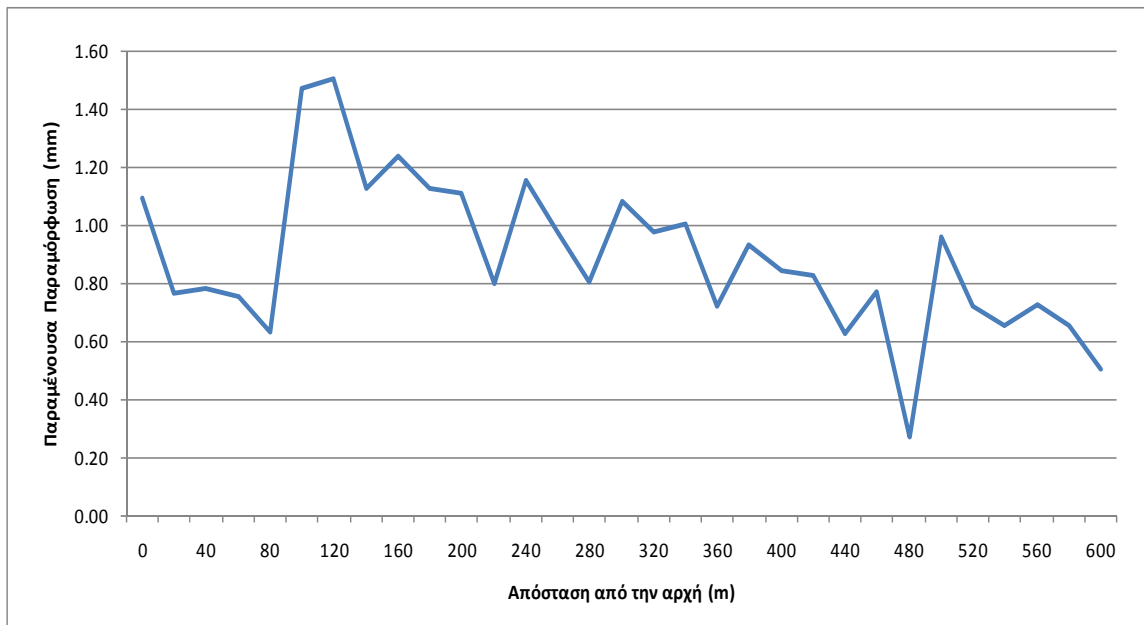
Εικόνα 7.3: Συνολική παραμένουσα παραμόρφωση κατά μήκος του πειραματικού οδοστρώματος



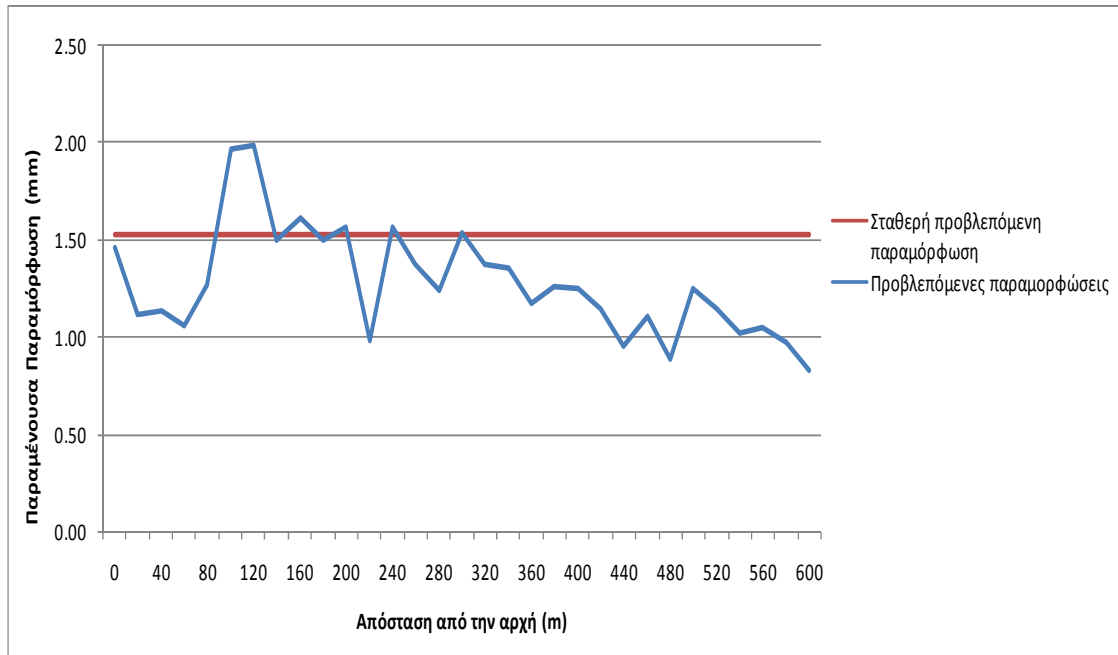
Εικόνα 7.4: Παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών στρώσεων κατά μήκος του πειραματικού οδοστρώματος



Εικόνα 7.5: Παραμένουσα παραμόρφωση της βάσης/υπόβασης κατά μήκος του πειραματικού οδοστρώματος



Εικόνα 7.6: Παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης έδρασης κατά μήκος του πειραματικού οδοστρώματος

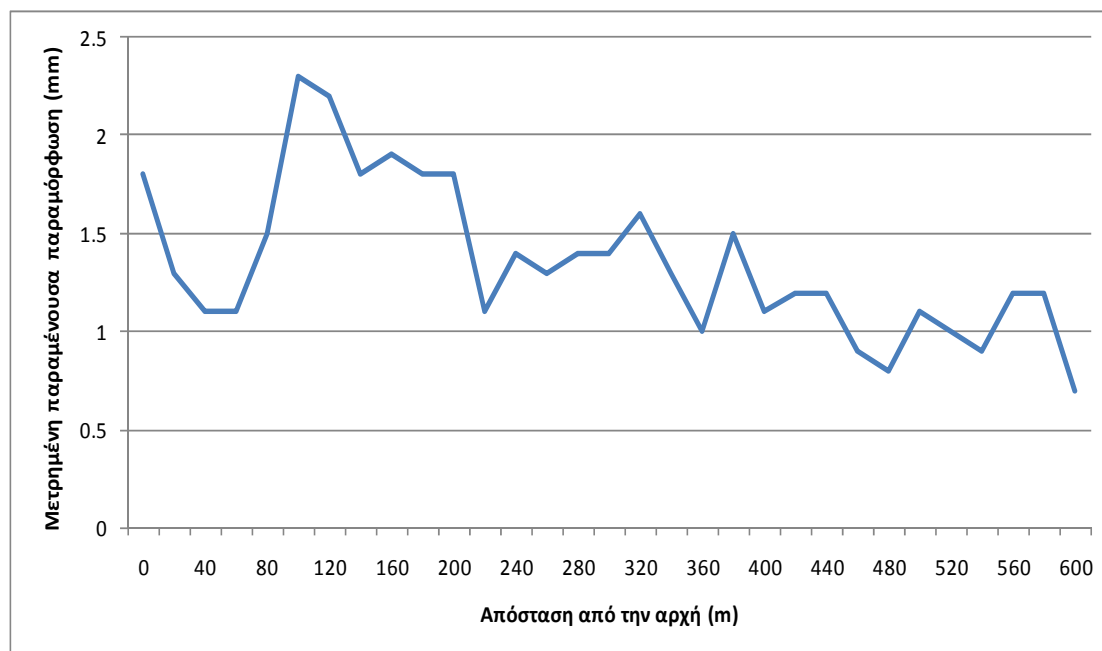


Εικόνα 7.7: Συγκριτικό διάγραμμα προβλεπόμενων συνολικών παραμενουσών παραμορφώσεων βάσει της διατομής σχεδιασμού και των επί τόπου στοιχείων

Επιπρόσθετα, οι προβλεπόμενες παραμορφώσεις κατά μήκος της επιφάνειας του οδοστρώματος υποδηλώνουν την έλλειψη ομαλότητας του εξεταζόμενου τμήματος. Η παραπάνω παρατήρηση έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των προβλέψεων για τη διατομή σχεδιασμού, καθώς στην τελευταία η προβλεπόμενη παραμόρφωση παραμένει σταθερή κατά μήκος του υπό διερεύνηση οδοστρώματος. Συνεπώς, η αξιοποίηση του προτύπου για τα στοιχεία σχεδιασμού έχει διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με τα επί τόπου στοιχεία. Μάλιστα, η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση της διατομής σχεδιασμού κατά μήκος του οδοστρώματος (διάγραμμα Εικόνας 7.7) δεν είναι αντιπροσωπευτική της πραγματικότητας, καθώς λόγω της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων των υλικών των στρώσεων κατά μήκος του οδοστρώματος, η συνολική μόνιμη παραμόρφωση θα μεταβάλλεται.

7.2 Μετρημένες παραμένουσες παραμορφώσεις

Οι τιμές της παραμένουσας παραμόρφωσης ανά θέση, όπως αυτές προέκυψαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν επί τόπου με laser ένα χρόνο μετά από τη συλλογή στοιχείων για την πρόβλεψη, φαίνονται στον Πίνακα 7.3. Επίσης, στο διάγραμμα της Εικόνας 7.8 αποτυπώνονται οι κατά μήκος μετρημένες συνολικές παραμορφώσεις για το υπό διερεύνηση οδόστρωμα.



Εικόνα 7.8: Μετρημένες παραμορφώσεις κατά μήκος του πειραματικού οδοστρώματος

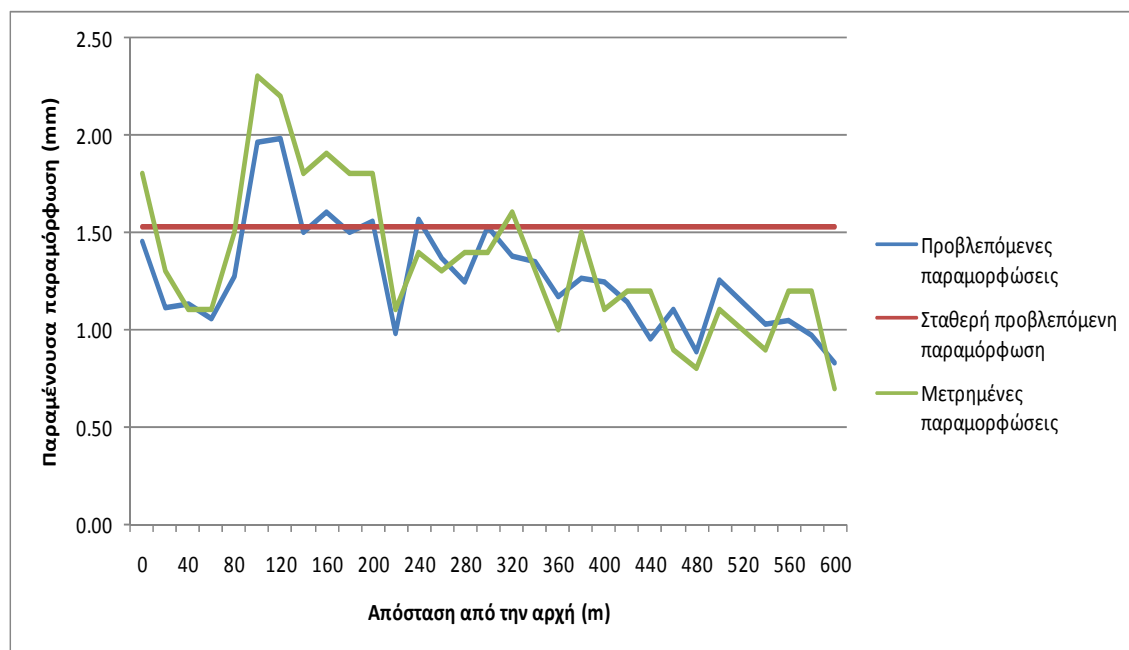
Πίνακας 7.3: Μετρημένες παραμορφώσεις ανά θέση του πειραματικού οδοστρώματος

A/A	Θέση (m)	Μετρημένη Παραμένουσα Παραμόρφωση (mm)
1	0	1.8
2	20	1.3
3	40	1.1
4	60	1.1
5	80	1.5
6	100	2.3
7	120	2.2
8	140	1.8
9	160	1.9
10	180	1.8
11	200	1.8
12	220	1.1
13	240	1.4
14	260	1.3
15	280	1.4
16	300	1.4
17	320	1.6
18	340	1.3
19	360	1
20	380	1.5
21	400	1.1
22	420	1.2
23	440	1.2
24	460	0.9
25	480	0.8
26	500	1.1
27	520	1
28	540	0.9
29	560	1.2
30	580	1.2
31	600	0.7

Όπως και στην περίπτωση των προβλεπόμενων συνολικών παραμορφώσεων βασιζόμενες στα επί τόπου στοιχεία, παρατηρείται και εδώ μία έλλειψη ομαλότητας του εξεταζόμενου οδοστρώματος. Προκειμένου, λοιπόν, να ελεγχθούν οι ομοιότητες και οι διαφορές των προβλεπόμενων και των μετρημένων παραμορφώσεων ακολουθεί μία σύγκριση των τιμών.

7.3 Σύγκριση προβλεπόμενων και μετρημένων τιμών

Το διάγραμμα της Εικόνας 7.9 περιέχει τις μετρημένες συνολικές παραμορφώσεις και τις αντίστοιχες προβλεπόμενες, τόσο για τα στοιχεία σχεδιασμού όσο και για τα επί τόπου στοιχεία. Πρόκειται για ένα διάγραμμα συγκριτικό κατά μήκος του υπό διερεύνηση οδοστρώματος.



Εικόνα 7.9: Μετρημένες και προβλεπόμενες τιμές της συνολικής παραμένουσας παραμόρφωσης κατά μήκος του πειραματικού οδοστρώματος

Με μία πρώτη ματιά, όσον αφορά στις παραμένουσες παραμορφώσεις που προέκυψαν από μετρήσεις και σε εκείνες που αντιστοιχούν στα επί τόπου στοιχεία, η μορφή των δύο διαγραμμάτων των συνολικών μόνιμων παραμορφώσεων είναι περίπου όμοια. Παρόλο που σε κάποιες θέσεις οι τιμές που προέκυψαν από το πρότυπο ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των μετρήσεων, γενικά, οι προβλεπόμενες τιμές προσεγγίζουν τις μετρημένες. Σε αντίθεση, όμως, με αυτά τα δύο διαγράμματα, η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση της διατομής σχεδιασμού παραμένει σταθερή κατά μήκος του εξεταζόμενου τμήματος. Συνεπώς, η πρόβλεψη με τα στοιχεία σχεδιασμού δεν είναι αντιπροσωπευτική της πραγματικότητας.

Εν συνεχεία, η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών για τα επί τόπου στοιχεία μπορούν να αξιοποιηθούν για την αξιολόγηση των προβλέψεων συγκριτικά με τις μετρήσεις (Πίνακας 7.4).

Πίνακας 7.4: Μέση τιμή, τυπική απόκλιση και συντελεστής μεταβλητότητας των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών της συνολικής παραμένουσας παραμόρφωσης

	Μετρημένη Παραμένουσα Παραμόρφωση	Προβλεπόμενη Παραμένουσα Παραμόρφωση
Μέση τιμή	1.35	1.28
Τυπική απόκλιση	0.39	0.28
Συντελεστής μεταβλητότητας	29.1%	22.2%

Ο συντελεστής μεταβλητότητας του Πίνακα 7.4 προκύπτει ως ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή. Στις μετρημένες τιμές παρατηρείται πως ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των προβλεπόμενων. Έτσι, υπάρχει μικρότερη ομοιογένεια των παραμορφώσεων κατά μήκος του πειραματικού οδοστρώματος σε σχέση με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες και μεγαλύτερη διακύμανση.

Πέραν όμως από τις παραπάνω παρατηρήσεις, πραγματοποιείται η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης για τη συσχέτιση των τιμών μέτρησης και πρόβλεψης. Οι προβλέψεις αφορούν στα στοιχεία που προέκυψαν από επί τόπου μετρήσεις, καθώς όπως προαναφέρθηκε τα αποτελέσματα για τη διατομή σχεδιασμού δεν είναι αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας.

Ο προσδιορισμός της ευθείας της γραμμικής παλινδρόμησης γίνεται βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$y = \alpha + \beta x \quad (7.1)$$

όπου:

α : η τεταγμένη του σημείου στο οποίο η ευθεία τέμνει τον άξονα yy

β : η κλίση της ευθείας

Οι συντελεστές α και β υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (7.2) και (7.3) αντίστοιχα:

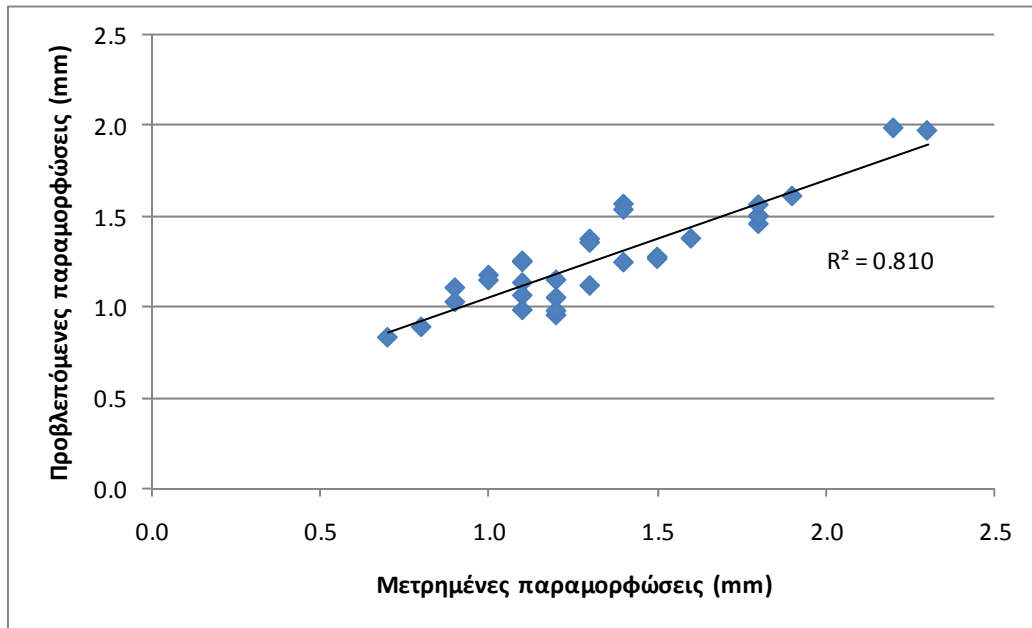
$$\beta = \frac{v \sum_{i=1}^v x_i y_i - (\sum_{i=1}^v x_i)(\sum_{i=1}^v y_i)}{v \sum_{i=1}^v x_i^2 - (\sum_{i=1}^v x_i)^2} \quad (7.2)$$

$$\alpha = \bar{y} - \beta \bar{x} \quad (7.3)$$

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R^2 δίνεται από τη σχέση:

$$R^2 = \frac{v \sum_{i=1}^v x_i y_i - (\sum_{i=1}^v x_i)(\sum_{i=1}^v y_i)}{\sqrt{v \sum_{i=1}^v x_i^2 - (\sum_{i=1}^v x_i)^2} * \sqrt{v \sum_{i=1}^v y_i^2 - (\sum_{i=1}^v y_i)^2}} \quad (7.4)$$

Στο διάγραμμα της Εικόνας 7.10 αποτυπώνεται η συσχέτιση των μετρημένων και των προβλεπόμενων συνολικών παραμενουσών παραμορφώσεων, η αντίστοιχη γραμμή τάσης και ο συντελεστής συσχέτισης. Ο τελευταίος ισούται με 0.810 γεγονός που φανερώνει μία καλή συσχέτιση των τιμών, αφού ο συντελεστής τείνει στη μονάδα.



Εικόνα 7.10: Γραμμική συσχέτιση μετρημένων και προβλεπόμενων συνολικών παραμενουσών παραμορφώσεων

Επιπρόσθετα, προκειμένου να ελεγχθεί περαιτέρω πόσο σημαντικές είναι οι διαφορές μεταξύ μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών των παραμορφώσεων πραγματοποιείται ο στατικός έλεγχος t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων (Washington et al., 2003). Αρχικά, διαμορφώνεται η μηδενική υπόθεση (H_0), κατά την οποία η διαφορά των μετρημένων και των προβλεπόμενων μόνιμων παραμορφώσεων (μ_d) είναι ίση με το μηδέν. Η εναλλακτική υπόθεση (H_1) θεωρεί πως η παραπάνω διαφορά είναι διάφορη του μηδενός.

H_0 : διαφορά των μετρημένων και των προβλεπόμενων παραμενουσών παραμορφώσεων $\mu_d = 0$

H_1 : διαφορά των μετρημένων και των προβλεπόμενων παραμενουσών παραμορφώσεων $\mu_d \neq 0$

Προκειμένου να υιοθετηθεί η μηδενική υπόθεση πρέπει η κρίσιμη τιμή t_{crit} να είναι μεγαλύτερη από τη στατιστική τιμή t_{stat} της δοκιμής, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$t_{crit} > t_{stat} \quad (7.5)$$

Ο στατικός έλεγχος γίνεται μέσω της σχέσης

$$t = \frac{\bar{X}_d - \mu_d}{s_d / \sqrt{n_d}} \quad (7.6)$$

όπου:

\bar{X}_d : η μέση τιμή των διαφορών για κάθε ζεύγος τιμών

s_d : η τυπική απόκλιση των διαφορών για κάθε ζεύγος τιμών

n_d : το μέγεθος των ζευγαρωτών παρατηρήσεων

Στην περίπτωση που η μηδενική υπόθεση είναι αληθής το δείγμα ακολουθεί την κατανομή t για $n-1$ βαθμούς ελευθερίας.

Για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 (5%) και 30 βαθμούς ελευθερίας η κρίσιμη τιμή είναι $t_{crit}=2.045$. Από τον έλεγχο προκύπτει πως η στατιστική τιμή ισούται με $t_{stat}=1.926$. Η σύγκριση των δύο τιμών έχει ως αποτέλεσμα η στατιστική τιμή να είναι μικρότερη από την κρίσιμη και κατά επέκταση η μηδενική υπόθεση γίνεται δεκτή. Συνεπώς, φαίνεται πως η πρόβλεψη παραμενουσών παραμορφώσεων με στοιχεία του οδικού πειράματος μπορεί να καταλήξει σε αξιόλογα αποτελέσματα.

Γενικώς, από τις συγκρίσεις φαίνεται πως υπάρχει μία σύγκλιση των μετρημένων και των προβλεπόμενων μόνιμων παραμορφώσεων για τα επί τόπου στοιχεία. Οι υφιστάμενες αποκλίσεις ενδέχεται να οφείλονται στο γεγονός ότι η μέτρηση των παραμορφώσεων εξαρτάται από πολλούς σταθμισμένους παράγοντες (όπως οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η ικανότητα του χειριστή του οργάνου μέτρησης, κλπ), οι οποίοι δεν αποτελούν αντικείμενο διερεύνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής. Τέλος, η πρόβλεψη με το πρότυπο ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς βασίστηκε σε παραδοχές (π.χ. υιοθέτηση των τιμών α και μ , παραδοχή μίας ασφαλικής στρώσης), με αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι προβλεπόμενες τιμές αναλόγως. Εν τούτοις, η συσχέτιση των τιμών είναι ενθαρρυντική για τη χρησιμοποίηση του προτύπου VESYS με στοιχεία που συλλέχθηκαν επί τόπου με μη καταστρεπτικές μεθόδους (NDTs), αντί των στοιχείων που προκύπτουν βάσει των προδιαγραφών και της μελέτης σχεδιασμού, στα πλαίσια ενός γενικότερου συστήματος προστασίας των οδοστρωμάτων.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά, αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η ανάπτυξη και η πρόβλεψη παραμενουσών παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση και τη διάδοση της μόνιμης παραμόρφωσης, έγινε αναφορά στις επιπτώσεις που προκύπτουν και επισημάνθηκε η ανάγκη πρόβλεψής της. Επιπλέον, βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αξιολογήθηκαν τα υφιστάμενα πρότυπα πρόβλεψης. Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώθηκε στο πρότυπο ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς VESYS για την πρόβλεψη παραμενουσών παραμορφώσεων. Η πρόβλεψη πραγματοποιήθηκε τόσο για τα στοιχεία που προκύπτουν από τη μελέτη σχεδιασμού, όσο και για στοιχεία που συλλέχθηκαν από επί τόπου μετρήσεις με μη καταστρεπτικές μεθόδους για το πειραματικό οδόστρωμα. Στη συνέχεια, έγινε έλεγχος των προβλεπόμενων και των αντίστοιχων μετρημένων τιμών παραμόρφωσης κατά μήκος του πειραματικού οδοστρώματος μετά τη διέλευση δεδομένου φόρτου κυκλοφορίας. Από τα αποτελέσματα της συγκριτικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε αλλά και γενικότερα από την πορεία της παρούσας έρευνας προέκυψαν τα ακόλουθα:

- Ο περιορισμός και ο σωστός χειρισμός των πιθανών προβλημάτων που προκαλούνται από την ανάπτυξη και τη διάδοση παραμενουσών παραμορφώσεων καθιστά επιτακτική την ανάγκη πρόβλεψης της μόνιμης παραμόρφωσης. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη μηχανικών προτύπων πρόβλεψης, στα οποία ωστόσο η διεθνής βιβλιογραφία που ανταποκρίνεται είναι περιορισμένη. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι υπάρχουν διάφορες απόψεις γύρω από τη Μηχανική και έτσι η ανάπτυξη προτύπων πρέπει να βασίζεται σε θεωρήσεις διεθνώς αποδεκτές. Παραδείγματα τέτοιων θεωρήσεων στις οποίες στηρίχτηκαν κάποια πρότυπα είναι η ελαστική, η ιξωδοελαστική και η σύνθετη (π.χ. ιξωδοπλαστική) ανάλυση. Λόγω της μη αντιπροσωπευτικότητας της πραγματικότητας της ελαστικής ανάλυσης και της πολυπλοκότητας των σύνθετων αναλύσεων, η θεώρηση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς αποτελεί καλή προσομοίωση για τη διερεύνηση των οδοστρώματων και την πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης.
- Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε πως το πρότυπο ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς VESYS αποτελεί ένα πρότυπο που μεταξύ των άλλων προσφέρει μία καλή προσέγγιση για την πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης. Λαμβάνει υπόψη του τις κλιματολογικές και κυκλοφοριακές συνθήκες, καθώς επίσης και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών των στρώσεων ενός οδοστρώματος.

Παρέχει, δηλαδή, τη δυνατότητα μίας ενδεδειγμένης διερεύνησης της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, καθώς συνυπολογίζει παράγοντες που καθορίζουν τη φέρουσα ικανότητά τους. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής έρευνας.

- Τα υφιστάμενα πρότυπα πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης, συνήθως, στηρίζονται σε δεδομένα της μελέτης σχεδιασμού και σε στοιχεία που προκύπτουν σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές. Εν τούτοις, η χρησιμοποίηση των στοιχείων κατασκευής στο πρότυπο ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς για το πειραματικό οδόστρωμα οδήγησε σε ανεπαρκή εκτίμηση της παραμένουσας παραμόρφωσης βάσει της σύγκρισης με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές.
- Αντίθετα, η αξιοποίηση στοιχείων από επί τόπου μετρήσεις με μη καταστρεπτικές μεθόδους για το ίδιο πειραματικό οδόστρωμα παρείχε μία εναλλακτική δυνατότητα πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, καθώς η θεώρηση των επί τόπου στοιχείων λαμβάνει υπόψη τις διαφοροποιήσεις των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών κατά μήκος του οδοστρώματος, τα αποτελέσματα της πρόβλεψης έδωσαν την κατά μήκος διακύμανση των τιμών των παραμορφώσεων. Έτσι, από τη συγκριτική αξιολόγηση των προβλεπόμενων και των μετρημένων τιμών της παραμένουσας παραμόρφωσης του πειραματικού οδοστρώματος διαπιστώθηκε ικανοποιητική σύγκλιση. Συνεπώς, ο συνδυασμός της ιξωδοελαστικής θεώρησης και της αξιοποίησης επί τόπου στοιχείων επιφέρει ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την πρόβλεψη των παραμορφώσεων. Συμπερασματικά, λοιπόν, η πρόβλεψη έχει αξία μετά το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός οδοστρώματος και μπορεί να παρέχει αξιόλογες πληροφορίες για ένα γενικότερο πλαίσιο διαχείρισης και συντήρησης των οδοστρωμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί πως η χρησιμοποίηση των τιμών των παραμέτρων a και μ της παραμένουσας παραμόρφωσης των υλικών βάσει βιβλιογραφικών αναφορών ενδέχεται να ευθύνεται εν μέρει για τις αποκλίσεις των προβλεπόμενων και των μετρημένων τιμών των παραμορφώσεων. Συνεπώς, για τον εμπλουτισμό της πρόβλεψης και την περαιτέρω διερεύνηση της μόνιμης παραμόρφωσης προτείνεται βαθμονόμηση των τιμών των παραμέτρων a και μ βάσει εργαστηριακών δοκιμών σε δείγματα υλικών από επί τόπου. Επιπρόσθετα, μπορεί να πραγματοποιηθεί επέκταση της πρόβλεψης περιλαμβάνοντας αύξηση του αριθμού πειραματικών οδοστρωμάτων, διαφοροποίηση της διατομής και των υλικών του οδοστρώματος, αύξηση του χρόνου

πρόβλεψης, κλπ. Έτσι, εν αναμονή της ανάπτυξης σύνθετων και προχωρημένων προτύπων για την πρόβλεψη παραμενουσών παραμορφώσεων, μπορεί να πραγματοποιηθεί μία ικανοποιητική εκτίμηση της εξέλιξής τους.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Acikgoz, O. and Rauf,R., 2010. *Analysis of Parameters Affecting Permanent Deformation in Road Pavement*. Master Thesis, Chalmers University of Technology.

Barber, E.S., 1957. *Calculation of Maximum Pavement Temperatures from Weather Reports*, Highway Research Bulletin, 168, Highway Research Board, 1-8.

Barksdale, R.D. and Leonards, G.A., 1967. Predicting Performance of Bituminous Surfaced Pavements, Proceedings, *Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 321-340.

Barksdale, R.D. and Miller, J.H. II, 1977. *Development of Equipment and Techniques for Evaluating Fatigue and Rutting Characteristics of Asphalt Concrete Mixes*, School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, SCEGIT-77-149.

Barksdale, R.D., 1972. Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials, Proceedings, *Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, London, 161-174.

Battiato, G., Ronco, F. and Verga, C., 1977. Moving Loads on a Viscoelastic Double Layer: Prediction of Recoverable and Permanent Deformations, Proceedings, *Fourth International Conference on tire Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 459-466.

Brown, S.F. and Bell, C.A., 1977. The Validity of Design Procedures for the Permanent Deformation of Asphalt Pavements, Proceedings, *Fourth International Conference on tire Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 467-482.

Brown, S.F. and Bell, C.A., 1977. The Validity of Design Procedures for the Permanent Deformation of Asphalt Pavements, Proceedings, *Fourth International Conference on tire Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 467-482.

Chen, J.S., Huang, C.C., and Chang, Y.J., 2009. *Mechanical Responses and Modeling of Rutting in Flexible Pavements*, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.7.

Claessen, A.I.M., Edwards, J.M., Sommer, P. and Uge, P., 1977. Asphalt Pavement Design - The Shell Method, Proceedings, *Fourth International Conference on tire Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 39-74.

Dawson, A. and Kolisoja, P., 2004. *Permanent Deformation*, Report on Task 2.1, University of Nottingham and Tampere University of Technology.

de Hilster, E. and van de Loo, P.J., 1977. *The Creep Test. Influence of Test Parameters*, Koninklijke/Shell- Laboratorium, Amsterdam.

Eisenmann, J., and Hilmer, A., 1987. Influence of Wheel Load and Inflation Pressure on the Rutting Effect at Asphalt-Pavements - Experiments and Theoretical Investigations, Proceedings, *Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 392-403.

Federal Highway Administration, 1978. *Predictive design procedures, VESYS users manual: An interim design method for flexible pavements using the VESYS structural subsystem*, Report No.FHWA-RD-77-154, Washington.

Freeme, C.R., 1973. *Technical Report Covering Tour of Duty to tire U.K. and U.S.A.*, Report R3/6/73, NIRR, Republic of South Africa.

Garba R., 2002. *Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures*, Thesis (Dr.Ing), Norwegian University of Science and Technology.

Goacolou, H., 1987. Calculations of the Rutting of Structures - Castor Program Method for Prediction of Permanent Deformations in Asphaltic Structures, Proceedings, *Sixth International Conference on tire Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 191-199.

Goktepe, A.B., Agar, E., Lav, A.H., 2005. Advances in backcalculating the mechanical properties of flexible pavements, *Elsevier*, 421-431.

Highways Agency, 2006. *Design manual for roads and bridges*, Traffic assessment, Vol.7, Sec.2, Part 1, London.

Hills, J.F., 1973. The Creep of Asphalt Concrete Mixes, *Journal of The Institute of Petroleum*, November 1973.

Hofstra, A., and Klomp, A.J.G., 1972. *Permanent Deformation of Flexible Pavements Under Simulated Road Traffic Conditions*, Proceedings, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, London, 613-621.

Huschek, S., 1977. Evaluation of Rutting Due to Viscous Flow in Asphalt Pavements, Proceedings, *Fourth International Conference on tire Structutral Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 497-508.

Kenis, W.J., 1977. Predictive Design Procedures - A Design Method for Flexible Pavements Using the VESYS Structural Subsystem, Proceedings, *Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 101-130.

Kenis, W.J., Sherwood, J.A. and McMahon, T.F., 1982. Verification and Application of the VESYS Structural Subsystem, Proceedings, *Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Delft, The Netherlands, 333-346.

Kirwan, R.W, Snaith, M.S. and Glynn, T.E., 1977. A Computer Based Subsystem for the Prediction of Permanent Deformation, Proceedings, *Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. II, Ann Arbor, 509-518.

Mahboub, K. and Little, D.N., 1988. *Improved Asphalt Concrete Design Procedure*, Research Report 474- 1F, Texas Transportation Institute.

Meyer, F.R.P. and Haas R.C.G., 1977. A Working Design Subsystem for Permanent Deformation in Asphalt Pavements, Proceedings, *Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 519-528.

Miller, J. and Bellinger, W., 2003. *Distress Identification Manual for The Long-Term Pavement Performance Program*, Fourth Revised Edition, U.S. Department of Transportation.

Monismith, C.L., Inkabi, K., Freeme, C.R. and McLean, D.B., 1977. A Subsystem to Predict Rutting in Asphalt Concrete Pavement Structures, Proceedings, *Fourth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 529-539.

Rakesh, N., Jain, A.K., Reddy, M.A. and Reddy, K.S., 2006. Artificial neural networks—genetic algorithm based model for backcalculation of pavement layer moduli, *International Journal of Pavement Engineering*, 7:3, 221-230.

Romain, J.E., 1972. Rut Depth Prediction in Asphalt Pavements, Proceedings, *Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, London, 205-210.

Sayers, M.W. and Karamihas S.M., 1998. *The little book of profiling*, University of Michigan

Shook, J.F., Finn, F.N., Witczak, M.W. and Monismith, C.L., 1982. Thickness Design of Asphalt Pavements- The Asphalt Institute Method, Proceedings, *Fifth International*

Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, Delft, The Netherlands, 17-44.

Sousa, J.B., Craus, J. and Monismith, C.L., 1991. *Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete*. Washington, University of California.

Southgate, H.F., Deen, R.C., Havens, J.H. and Drake, W.B. 1977. Kentucky Research: A Flexible Pavement Design and Management System, Proceedings, *Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. II, Ann Arbor, 269-297.

Thrower, E.N., 1977. Methods of Predicting Deformation in Road Pavements, Proceedings, *Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 540-554.

Thrower, E.N., Mortazavi, S. and Dongill, J.W., 1986. *Methods for Predicting Permanent Deformation in Flexible Pavements*, Contractor Report 38, Transport and Road Research Laboratory, Great Britain.

TRB AFD80, 2011. Committee of Strength and Deformation Characteristics of Pavement Sections, *90th Annual Meeting of Transportation Research Boards*, Washington, DC.

Uge, P., and van de Loo, P.J., 1974. *Permanent Deformation of Asphalt Mixes*, Koninklijke/Shell- Laboratorium, Amsterdam, November 1974.

Ullidtz, P., 1998. *Modelling Flexible Pavement Response and Performance*. 1st edition, Polyteknisk Forlang.

van de Loo, P.J., 1978. The Creep Test: A Key Tool in Asphalt Mix Evaluation and in Prediction of Rutting, Proceedings, *The Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 47, 522-557.

Washington, S.P., Karlaftis, M.G. and Mannering, F.L., 2003. *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*, Charpman &Hall/CRC.

Zhou, F. and Scullion, T., 2002. Discussion: Three Stages of Permanent Deformation Curve and Rutting Model, *The International Journal of Pavement Engineering*, 2002 Vol. 3 (4), 251–260.

Zhou, F. and Scullion, T., 2004. *Input parameters of enhanced VESYS5*, Report No. FHWA/TX-05/9-1502-01-4, Texas Transportation Institute.

Zhou, F. and Scullion, T., 2005. *Asphalt Pavement Performance Analysis Tool: TTI VESYS5W*, Report No. FHWA/TX-06/9-1502-01-5, Texas Transportation Institute.

Λοΐζος, Α., 1990. Μόνιμες παραμορφώσεις εύκαμπτων οδοστρωμάτων, Σεμινάριο, *Νεότερες εξελίξεις στην κατασκευή οδοστρωμάτων*, ΤΕΕ.

Λοΐζος, Α., 2008. *Οδοστρώματα*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ. και Ζάχος, Γ., 2005. Εκτίμηση παχών ασφαλτικών στρώσεων οδοστρώματος με χρήση γεωφυσικής μεθόδου, *2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας*, Βόλος

Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ. και Κανελλαΐδης, Γ., 2005. Ο Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας IRI σε σχέση με τους κυματισμούς της επιφάνειας των οδών , *2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας*, Βόλος