

ΑΤΕΙ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ –
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ ΜΠΑΧΜΟΥΤΩΒ ΦΙΛΙΠΠ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΖΑΓΚΑΡΕΤΟΣ

ΕΤΟΣ 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το οδικό δίκτυο αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των καθημερινών μετακινήσεων και ταυτόχρονα είναι μια υποδομή με μεγάλο κόστος τόσο κατασκευαστικό όσο και περιβαλλοντικό, η οποία αρχίζει να επιδεινώνεται αμέσως μετά την κατασκευή της εξαιτίας των φορτίων κυκλοφορίας που δέχεται, των περιβαλλοντικών συνθηκών και ενδεχόμενων αστοχιών.

Στην αρχή της παρούσας εργασίας αναφέρονται οι έννοιες των ασφαλικών μιγμάτων καθώς και του ασφαλικού σκυροδέματος. Στη συνέχεια αναφέρονται οι φθορές και αστοχίες των οδοστρωμάτων, οι οποίες χωρίζονται σε 4 κύριες κατηγορίες: 1) Ρηγματώσεις 2) Παραμορφώσεις της επιφάνειας των οδοστρωμάτων 3) Αποσύνθεση 4) Λεία επιφάνεια οδοστρωμάτων.

Αναφέρεται ο βαθμός σοβαρότητας της, ο οποίος χωρίζεται σε 3 μέρη: 1) Χαμηλό 2) Μέσο 3) Υψηλό.

Στην συνέχεια περιγράφεται η παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλικών μιγμάτων, τα βασικά στάδια ανάπτυξης της και τις μορφές της παραμένουσας επιφανειακής παραμόρφωσης.

Όσον αφορά την αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλικών μιγμάτων σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, αυτή εξαρτάται από τους κάτωθι παράγοντες: α) τα αδρανή υλικά και ειδικότερα την κοκκομετρική καμπύλη του μίγματος των αδρανών, τη γωνιότητα αυτών και το ποσοστό της παιπάλης στο μίγμα, και β) τον τύπο, τις ιδιότητες και το υψηλό ποσοστό της ασφάλτου. Κατά τη διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας αναφέρονται οι εργαστηριακοί τρόποι μέτρησης της παραμένουσας επιφανειακής παραμόρφωσης - τροχοαυλάκωσης. Επίσης παρουσιάζονται δοκιμές τροχοαυλάκωσης με κανονικό ασφαλτόμιγμα και ασφαλτόμιγμα τροποποιημένη άσφαλτο.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας περιγράφονται τα Συστήματα Διαχείρισης Οδοστρωμάτων, αναλύεται η δομή και τα δεδομένα που καταχωρούνται στη βάση δεδομένων ενός ΣΔΟ.

Οι τελευταίοι παράμετροι που αναλύονται είναι τα μοντέλα πρόβλεψης και οι δείκτες ευκάμπτων οδοστρωμάτων, οι οποίοι προβλέπουν και αξιολογούν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το οδόστρωμα από δομικής και λειτουργικής πλευράς, και βάσει των οποίων μπορούν να εκτιμηθούν οι ανάγκες συντήρησης του οδοστρώματος.

ABSTRACT

Roads networks, are an integral part of daily trips simultaneously is an infrastructure with large construction costs, which also pollute the environment. This infrastructure, begins wearing immediately after its construction, because of daily use, or environmental conditions or even due to structural failures.

The start of this study, referred to concepts such as, asphalt mixtures and asphalt concrete.

Then refers to the types of wear and failures to road surface, into four categories:

- 1) Cracking
- 2) Surface distortion,
- 3) Corruption - decay,
- 4) Surface shining.

Also, mentioned the degree of damage severity of the pavement graduated in three levels:

- 1) Low severity
- 2) Medium severity
- 3) High severity.

The third part describes the permanent deformation of asphalt mixtures, the basic stages of deterioration and types of surface deformation.

The factors of permanent deformation, according to the international references are as follows:

A) Aggregates, and in particular the grading curve of the mixture of materials, the geometric shape and proportion of filler materials. B) The type and amount percentage of asphalt.

In the fourth part, referred to investigate the international references, which shows how measuring residual surface distortion – deformations as wheel tracking – routing.

Also includes References are made to wheel tracking tests at regular asphalt blends or mixtures containing modified asphalt.

In the last chapter, describes Pavement Management System, analyzed the structure and data inserted in the database of PMS.

The last parameters that analyzed are the prediction models and the index flexible pavements, which provide and evaluate the situation in which the pavement is located from structural and functional part, and under which they can to estimate the pavement maintenance needs.

Πίνακας περιεχομένων

ΓΕΝΙΚΑ.....	6
Ασφαλτικά μίγματα	7
Ασφαλτικό σκυρόδεμα.....	8
1. ΦΘΟΡΕΣ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	10
1.1. Γενικά.....	10
1.2. Φθορές οδοστρωμάτων	10
1.3. Ρηγματώσεις(cracking)	13
1.3.1. Ρωγμές τύπου αλιγάτορα (alligator cracks).....	13
1.3.2. Ρωγμές στα άκρα του οδοστρώματος (edge cracks)	14
1.3.3. Ρωγμές μεταξύ των λωρίδων διάστρωσης ή διαπλάτυσης (lane and widening cracks)	15
1.3.4. Ρωγμές από ανάκλαση (reflection cracks)	16
1.3.5. Παραβολικές ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων (slippage cracks)	18
1.3.6. Ρωγμές συρρίκνωσης (shrinkage cracks)	19
1.3.7. Ρωγμές στην τροχιά των τροχών (wheel path cracks / block cracks).....	20
1.3.8. Ελικοειδείς ρωγμές	22
1.4. Παραμορφώσεις (στρεβλώσεις) της επιφάνειας (surface distortion)	22
1.4.1. Αυλακώσεις στις τροχιές των τροχών (channel or ruts).....	22
1.4.2. Κυματώσεις – ρυτιδώσεις (wave – corrugations)	24
1.4.3. Τοπικές καθιζήσεις - Κοιλώματα (local depressions)	25
1.4.4. Τοπικές διογκώσεις (local upheaval).....	25
1.4.5. Τοπικές καθιζήσεις σε τομές οδοστρώματος (utility cut depressions)	26
1.5. Αποσύνθεση (disintegration).....	26
1.5.1. Αποκόλληση αδρανών (ravelling).....	26
1.5.2. Λακκούβες (potholes).....	28
1.5.3. Αποφλοιώσεις (peeling)	29
1.5.4. Διάβρωση (stripping).....	30
1.6. Λεία επιφάνεια οδοστρώματος.....	30
1.6.1. Λείανση αδρανών – ολισθηρότητα (polished aggregate).....	30
1.6.2. Ανάδυση ασφάλτου (asphalt bleeding or flushing)	31
1.7. Πρόωρη αστοχία των οδοστρωμάτων.....	32
1.8. Αστοχία στην κατασκευή	34

1.9.	Ακαταλληλότητα των υλικών	36
1.10.	Αστοχία στη συντήρηση	37
2.	ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	38
2.1.	Γενικά.....	38
2.2.	Παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλτικών μιγμάτων	39
2.3.	Βασικά στάδια ανάπτυξης παραμενουσών παραμορφώσεων	41
2.4.	Μορφές της παραμένουσας (επιφανειακής) παραμόρφωσης	42
2.4.1.	Τροχοαυλάκωση.....	42
2.4.2.	Έλλειψη ομαλότητας.....	44
2.5.	Παράγοντες επίδρασης στην παραμένουσα παραμόρφωση	45
2.6.	Επίδραση των αδρανών υλικών στην παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων	49
2.7.	Επίδραση της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση	50
2.8.	Επίδραση της γωνιότητας των αδρανών στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση	59
2.9.	Επίδραση της παιάλης στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση	61
2.10.	Επίδραση της ασφάλτου στην παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων	64
2.11.	Επίδραση του υψηλού ποσοστού της ασφάλτου	64
2.12.	Επίδραση των ιδιοτήτων της ασφάλτου	66
2.13.	Επίδραση του ποσοστού των κενών αέρος στην παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων	69
2.14.	Επιπτώσεις της παραμένουσας παραμόρφωσης.....	71
2.15.	Ανάγκη πρόβλεψης και μέτρησης της παραμένουσας παραμόρφωσης	71
3.	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ	73
3.1.	Έλεγχοι τροχοαυλάκωσης	73
4.	ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ.....	82
4.1.	Δοκιμή τροχοαυλάκωσης ασφαλτομιγμάτων με κοινή άσφαλτο και βαθμό συμπίκνωσης στο 97% και 100% της πυκνότητας του βέλτιστου ποσοστού	82
4.2.	Δοκιμή τροχοαυλάκωσης ασφαλτικών μιγμάτων με κοινή άσφαλτο και βαθμό συμπίκνωσης στο 97% της πυκνότητας του εκάστοτε ποσοστού.....	83
4.3.	Δοκιμή τροχοαυλάκωσης σε ασφαλτόμιγμα με τροποποιημένη άσφαλτο και βαθμό συμπίκνωσης 97% της πυκνότητας του εκάστοτε ποσοστού.....	84
4.4.	Αποδοχή και σύγκριση αποτελεσμάτων.....	85
5.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	86

5.1.	Οφέλη των ΣΔΟ	92
5.2.	Μοντέλα πρόβλεψης της κατάστασης οδοστρωμάτων.....	93
5.3.	Είδη μοντέλων πρόβλεψης	94
5.3.1.	Ντετερμινιστικά μοντέλα	94
5.3.2.	Πιθανοτικά μοντέλα	94
5.3.3.	Υποκειμενικά μοντέλα	94
5.3.4.	Μοντέλα «ευφρών» μεθοδολογιών	95
5.3.5.	Εμπειρικά μοντέλα	95
5.3.6.	Μηχανιστικά μοντέλα	95
5.3.7.	Εμπειρικά –Μηχανιστικά μοντέλα	95
5.4.	Σκοπός των μοντέλων πρόβλεψης	96
5.5.	Δείκτες Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων	98
5.6.	Δείκτες Κατάστασης Οδοστρώματος.....	98
5.6.1.	Δείκτης Εκδήλωσης Φθορών (Distress Manifestation Index, DMI).....	100
5.6.2.	Διεθνής Δείκτης Επιπεδότητας IRI (International Roughness Index).....	101
5.6.3.	Δείκτης Κατάστασης Οδοστρώματος (Pavement Condition Index, PCI).....	102
5.6.4.	Δείκτης Παρούσας Λειτουργικότητας (Present Serviceability Index, PSI).....	104
5.6.5.	Δείκτης Άνεσης Οδήγησης (Riding Comfort Index, RCI).....	105
5.6.6.	Δείκτης Επιπεδότητας Οδοστρώματος για εκτίμηση Κόστους Οδήγησης (Roughness Index for Driving Expenditure, RIDE)	105
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	106
	Ελληνική Βιβλιογραφία.....	107
	Ξένη βιβλιογραφία	108

ΓΕΝΙΚΑ

Οι θεμελιώδεις μηχανικές ιδιότητες των υλικών είναι τα απαραίτητα δεδομένα για τη διαστασιολόγηση οποιασδήποτε κατασκευής. Ως θεμελιώδεις μηχανικές ιδιότητες μπορούν να χαρακτηρισθούν το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε εφελκυσμό και η αντοχή σε διάτμηση. Ως μηχανική συμπεριφορά μπορεί να χαρακτηριστεί η αντοχή τους σε κόπωση και σε παραμένουσα παραμόρφωση. Κάτι αντίστοιχο υπάρχει και στην αναλυτική προσέγγιση διαστασιολόγησης των ευκάμπτων οδοστρωμάτων. Η βασική διαφορά με τις άλλες κατασκευές, π.χ. από οπλισμένο σκυρόδεμα ή από χάλυβα, είναι ότι ένα ασφαλτόμιγμα δε συμπεριφέρεται ως ελαστικό, αλλά ως ιξωδοελαστικό υλικό λόγω της παρουσίας της ασφάλτου.

Τα άλλα δομικά υλικά όπως τα συμπακνωμένα αδρανή, τα σταθεροποιημένα αδρανή υλικά ή έδαφος με συνδετικό υλικό διάφορο της ασφάλτου καθώς και το έδαφος μπορούν να χαρακτηρισθούν ως υλικά με ελαστική συμπεριφορά. Στην αναλυτική διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων, και όσον αφορά στα ασφαλτομίγματα, οι θεμελιώδεις ιδιότητες καθορίζονται από τη σχέση φορτίου-παραμόρφωσης ή τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης και εκφράζονται με το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.

Η μηχανική συμπεριφορά καθορίζεται από την αντίσταση σε εφελκυστική αντοχή και την αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση. Η πρώτη εκφράζεται με σχέση ανηγμένης παραμόρφωσης και αριθμό φορτίσεων, γνωστή ως εξίσωση κόπωσης. Και η δεύτερη εκφράζεται με σχέση ανηγμένης παραμόρφωσης και αριθμό φορτίσεων, μόνο που στην περίπτωση αυτή η ανηγμένη παραμόρφωση προέρχεται από επιβολή θλιπτικού φορτίου.

Όλες οι παραπάνω παράμετροι (ιδιότητες και συμπεριφορά) καθορίζονται στο εργαστήριο από ελέγχους προσομοιάζοντας, όσο αυτό είναι δυνατόν, τις πραγματικές συνθήκες στο έργο, δηλαδή, θερμοκρασία, χρόνο φόρτισης, εντατικές καταστάσεις, συμπύκνωση ασφαλτομίγματος κλπ. Ειδικότερα, για την εκτίμηση της αντοχής του ασφαλτομίγματος σε παραμένουσα παραμόρφωση εκτελείται επιπροσθέτως και ένας έλεγχος (δοκιμή) ο οποίος όμως θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως έλεγχος αποτίμησης της 'σχεδόν' πραγματικής κατάστασης. Ο έλεγχος αυτός είναι γνωστός ως έλεγχος τροχοαυλάκωσης (wheel-tracking test).

Ασφαλτικά μίγματα

Με την ονομασία ασφαλτόμιγμα εννοούμε το υλικό κατασκευής των επιφανειακών στρώσεων μιας οδού, το οποίο παρασκευάζεται με την ανάμιξη αδρανών υλικών και με κάποιο ασφαλτικό συνδετικό. Σαν ασφαλτικό συνδετικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθαρή άσφαλτος, ασφαλτικό διάλυμα ή ακόμα και ασφαλτικό γαλάκτωμα. Τα διάφορα είδη των ασφαλτικών μιγμάτων δίνουν την δυνατότητα να κατασκευάσουμε στρώσεις που ανήκουν στην κατηγορία των εύκαμπτων ή ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Είναι άξιο προσοχής, ότι όλες οι χώρες με μεγάλη ανάπτυξη κυκλοφορίας και με μεγάλο ρυθμό κατασκευής οδών, χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο τον τύπο των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Στην κατασκευή των ευκάμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ασφαλτομιγμάτων, ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου. Έτσι διασφαλίζεται η βέλτιστη αξιοποίηση του υλικού. Η δυνατότητα χρησιμοποίησης πλέον του ενός ασφαλτομίγματος προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλης ποιότητας και διαβάθμισης αδρανών, κατάλληλου τύπου ασφάλτου, κατάλληλου μηχανολογικού και μηχανικού εξοπλισμού, τεχνογνωσίας των εμπλεκόμενων (μελετητών και κατασκευαστών) και σαφών και άρτιων προδιαγραφών.

Βεβαίως, από όλους τους τύπους των ασφαλτομιγμάτων που υπάρχουν κάθε χώρα χρησιμοποιεί αυτούς που εξυπηρετούν καλύτερα τις ανάγκες της σε συνδυασμό με τις κλιματολογικές της συνθήκες.

Στην Ελλάδα από τη δεκαετία του 60, με την εμφάνιση των συγκροτημάτων παραγωγής θερμών ασφαλτομιγμάτων, χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα αποκλειστικά και μόνο ένας τύπος θερμού ασφαλτομίγματος, αυτός του ασφαλτικού σκυροδέματος.

Θερμό ασφαλτόμιγμα ορίζεται το μίγμα ασφάλτου και μίγματος αδρανών που παράγεται εν θερμώ σε μόνιμη εγκατάσταση. Αναλόγως της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών καθώς και του μέγιστου κόκκου αυτών, χρησιμοποιείται σε διαφόρων τύπων ασφαλτικά έργα.

Τα ασφαλτομίγματα θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα:

- Να ανθίσταται στην παραμένουσα παραμόρφωση.
- Να ανθίσταται στη ρηγμάτωση από κόπωση.
- Να συνεισφέρουν στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος.
- Να είναι αδιαπέρατα από νερό για να προστατεύουν τις υποκείμενες στρώσεις.
- Να παρουσιάζουν καλή εργασιμότητα κατά τη διάστρωση και να συμπυκνώνονται με τα διαθέσιμα μηχανήματα.
- Να συντηρούνται εύκολα.

- Να έχουν κατά το δυνατόν μικρό κόστος.

Επιπροσθέτως, τα ασφαλτομίγματα για τάπητες κυκλοφορίας θα πρέπει:

- Να ανθίστανται στη λειαντική δράση των ελαστικών και στην καταστροφική επίδραση των καιρικών συνθηκών του περιβάλλοντος, παρέχοντας καλή και μακράς διάρκειας ζωής αντιολοσθηρή επιφάνεια.
- Να παρέχουν ομαλή επιφάνεια για άνετη και ασφαλή οδήγηση.
- Να παρέχουν επιφάνεια ώστε ο δημιουργούμενος θόρυβος από τους τροχούς των οχημάτων να είναι ανεκτός.
- Να παρέχουν επιφάνεια που να απαιτεί όσο το δυνατόν λιγότερη συντήρηση.

Οι παραπάνω απαιτήσεις αποδεικνύουν την αναγκαιότητα σωστού σχεδιασμού και σύνθεσης των ασφαλτομιγμάτων με παράλληλη χρήση όλων των διαθέσιμων υλικών και τεχνολογιών για τη διασφάλιση της καλής συμπεριφοράς αυτών και κατ' επέκταση του οδοστρώματος. (Νικολαΐδης 1996)

Ασφαλτικό σκυρόδεμα

Το ασφαλτικό σκυρόδεμα αρχικά αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ για να καλύψει την ανάγκη ύπαρξης ενός ασφαλτομίγματος σκληρού και ανθεκτικού στα βαριά φορτία των οχημάτων και των αεροσκαφών. Ο τύπος αυτός είναι ο περισσότερο γνωστός τύπος ασφαλτομίγματος και χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις χώρες του κόσμου. Πολλές χώρες χρησιμοποιούν αυτούσιες τις κοκκομετρικές καμπύλες που προτείνονται από τις αμερικανικές προδιαγραφές, ενώ ορισμένες όπως, η Γερμανία, η Γαλλία κ.α., τις έχουν ελαφρώς τροποποιήσει ώστε να έχουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα κάτω από τις ιδιάζουσες κυκλοφοριακές και κλιματολογικές συνθήκες.

Το ασφαλτικό σκυρόδεμα αποτελείται από καλώς διαβαθμισμένα χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα αδρανή και φίλλερ σε τέτοια αναλογία που να λαμβάνεται μίγμα πυκνής και συνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η αντοχή και η ευστάθεια του μίγματος αυτού απορρέει κατά κύριο λόγο από τη σύμπλεξη των αδρανών και λιγότερο από τη δυσκαμψία του ασφαλτοκονιάματος.

Τα ασφαλτικά σκυροδέματα χρησιμοποιούνται σε όλες τις ασφαλτικές εργασίες, δηλαδή για τάπητα κυκλοφορίας, συνδετική στρώση, ισοπεδωτική στρώση και ασφαλτική βάση.

Οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις χαρακτηρίζονται από τη μέγιστη διάσταση των αδρανών του μίγματος.

Η ασφαλτος που χρησιμοποιείται είναι συνήθως 40/50 έως και 180/200 mm, αναλόγως των κλιματολογικών συνθηκών και του κυκλοφοριακού φόρτου.

Στην Ελλάδα λόγω των κλιματολογικών συνθηκών, συνιστάται όπως χρησιμοποιείται ασφαλτος τύπων 40/50 ή 60/70 ή 80/100 mm. Η ασφαλτος μπορεί να είναι κοινή πετρελαϊκή ασφαλτος ή τροποποιημένη ασφαλτος.

Η περιεκτικότητα της ασφάλτου στο ασφαλτικό σκυρόδεμα κυμαίνεται συνήθως από 4,5% έως 7% των κατά βάρος του μίγματος, αναλόγως της κοκκομετρικής καμπύλης των χρησιμοποιημένων αδρανών. Η βέλτιστη περιεκτικότητα της ασφάλτου καθορίζεται από τη μεθοδολογία σύνθεσης κατά Marshall. Για το λόγο αυτό τα μίγματα αυτά σε ορισμένες χώρες καλούνται και μίγματα Marshall.

Το ασφαλτικό σκυρόδεμα κλειστού τύπου είναι ο μόνος τύπος ασφαλτομίγματος που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα για την κατασκευή ταπήτων κυκλοφορίας ή συνδετικών στρώσεων ή ισοπεδωτικών στρώσεων. Το ασφαλτικό σκυρόδεμα προδιαγράφεται από τις Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΤΠ) Α-265. Οι προδιαγραφές αυτές βασίζονται στις παλιές Αμερικανικές προδιαγραφές της δεκαετίας του 60 οι οποίες έκτοτε, στην Ελλάδα, δεν έχουν αναθεωρηθεί.

Για τις ασφαλτικές βάσεις, οι Ελληνικές προδιαγραφές προτείνουν τη χρήση άλλων κοκκομετρικών καμπυλών, οι οποίες προδιαγράφονται από τις ΠΤΠ Α-260.

Οι νεώτερες Αμερικανικές προδιαγραφές για ασφαλτικά σκυροδέματα, μετανομασθέντα σε ασφαλτικά μίγματα οδοστρωσίας πυκνής διαβάθμισης, σε σύγκριση με τις Ελληνικές προδιαγραφές, όσον αφορά τις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις, παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές. Οι διαφορές αυτές συνίστανται κυρίως στο ότι τα όρια των νεώτερων προδιαγραφών έχουν μετατοπιστεί, γενικότερα, προς τη χονδρόκοκη περιοχή, το μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό παιπάλης στο μίγμα έχει μειωθεί κατά 2% και δεν υπάρχει τόσο μεγάλο εύρος οριακών τιμών στην περιοχή των χονδρόκοκκων αδρανών. Επίσης, δεν υπάρχει ο διαχωρισμός και η διαφοροποίηση σε μίγματα για συνδετικές ή ισοπεδωτικές στρώσεις, και συνεπώς το πολυπληθές των μιγμάτων, που μόνο σύγχυση μπορεί να προκαλέσει, μεταξύ των μελετητών και των παραγωγών ασφατομιγμάτων. Επίσης, δεν προτείνονται όρια ποσοστού ασφάλτου στο μίγμα, όπως στις Ελληνικές προδιαγραφές, δεδομένου ότι αυτά καθορίζονται εργαστηριακά με τη μέθοδο Marshall ή οποιαδήποτε άλλη μεθοδολογία ήθελε να χρησιμοποιηθεί. (Νικολαΐδης 1996)

1. ΦΘΟΡΕΣ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

1.1. Γενικά

Φθορές ονομάζουμε τις βλάβες και λειτουργικές ατέλειες που εμφανίζονται στην επιφάνεια του οδοστρώματος, χωρίς να καθιστούν απαγορευτική τη διέλευση οχημάτων, αλλά επηρεάζοντας την ασφάλεια και άνεση κίνησης στην οδό.

Τα οδοστρώματα δεν παραμένουν αναλλοίωτα στον χρόνο. Καθημερινά πολλοί παράγοντες συμβάλλουν στην φθορά και επιδρούν στη συμπεριφορά τους. Πρωταρχικός παράγοντας της συνεχούς καταπόνησής τους αποτελεί ο κυκλοφοριακός φόρτος, καθώς και η ορθότητα της μελέτης διαστασιολόγησής τους, διότι ένα οδόστρωμα που έχει σχεδιαστεί για μικρότερα κυκλοφοριακά φορτία, θα εμφανίσει γρήγορα πολύ έντονες φθορές. Επιπλέον, οι συνθήκες του περιβάλλοντος, χημικής ή φυσικής προέλευσης, επιβαρύνουν την συμπεριφορά των οδοστρωμάτων. Τέλος, σημαντικά επιδρούν και παράγοντες που σχετίζονται με την κατασκευή τους, όπως η ποιότητα κατασκευής και η καταλληλότητα των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Για όλους αυτούς τους λόγους, η κατάσταση των οδοστρωμάτων συνεχώς μεταβάλλεται με φθίνουσα πορεία από την αρχική τους «πρότυπη» κατάσταση.

1.2. Φθορές οδοστρωμάτων

Τα οδοστρώματα, ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες σύμφωνα με την ελαστικότητά τους (εύκαμπτα και δύσκαμπτα). Επομένως, οι φθορές που αναφέρονται σε αυτά κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το είδος του οδοστρώματος, καθώς κάθε κατηγορία παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ως προς τις καταπονήσεις που εμφανίζει εξαιτίας των διαφορετικών της χαρακτηριστικών. Στην παρούσα εργασία θα αναφερθούν μόνο οι φθορές των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Οι επιμέρους φθορές των βασικών κατηγοριών μπορούν να ομαδοποιηθούν ανάλογα με την προέλευσή τους και ανάλογα με τη γεωμετρία τους για τα εύκαμπτα οδοστρώματα.

Κατηγοριοποίηση φθορών εύκαμπτων οδοστρώματων ανάλογα με την προέλευση

Είδος φθοράς	Κατηγορία
Ρηγματώσεις	Τύπου αλιγάτορα (alligator cracks)
	Στα άκρα του οδοστρώματος (edge cracks)
	Μεταξύ των λωρίδων διάστρωσης ή διαπλάτυνσης (lane and widening cracks)
	Από ανάκλαση (reflection cracks)
	Από ολίσθηση ταπήτων (slippage cracks)
	Συρρίκνωσης (shrinkage cracks)
	Στην τροχιά των τροχών (wheel path cracks)
	Ελικοειδείς
Παραμορφώσεις	Αυλακώσεις στις τροχιές των τροχών (channel or ruts)
	Κυματώσεις - ρυτιδώσεις (corrugations, wave)
	Τοπικές διογκώσεις (local upheaval)
	Τοπικές καθιζήσεις σε τομές οδοστρώματος (utility cut depressions)
Αποσύνθεση	Αποκόλληση αδρανών (ravelling)
	Λακκούβες (potholes)
	Αποφλοιώσεις (peeling)
	Διάβρωση (stripping)
Λεία επιφάνεια οδοστρώματος	Λείανση αδρανών – ολισθηρότητα (polished aggregate)
	Ανάδυση ασφάλτου – Εξίδρωση (asphalt bleeding or flushing)

(Νικολαΐδης 2002, Μουρατίδης 2006)

Κατηγοριοποίηση φθορών εύκαμπτων οδοστρωμάτων ανάλογα με την γεωμετρία τους

Είδος φθοράς	Κατηγορία
Ρηγματώσεις	Τύπου αλιγάτορα (alligator cracks)
	Διαμήκεις (longitudinal cracks)
	Εγκάρσιες (transverse cracks)
	Παραβολικές (slippage cracks)
	Πολυγώνου (block cracks)
Παραμορφώσεις	Αυλακώσεις στις τροχιές των τροχών (channel or ruts)
	Κοιλώματα (depressions)
	Διογκώσεις (bumps)
	Επωθήσεις (shoving)
	Κυματώσεις - ρυτιδώσεις (corrugations, wave)
Επιφανειακές αλλοιώσεις	Λακκούβες (potholes)
	Αποφλοιώσεις (peeling)
	Αποκόλληση αδρανών (ravelling)
	Ανάδυση ασφάλτου – Εξίδρωση (asphalt bleeding or flushing)
	Διάβρωση (stripping)

(Νικολαΐδης, 2002, Μουρατίδης 2006)

1.3. Ρηγματώσεις(cracking)

1.3.1.Ρωγμές τύπου αλιγάτορα (alligator cracks)

«Οι ρωγμές τύπου αλιγάτορα είναι διακλαδιζόμενες και αλληλοσυνδεόμενες ρωγμές που σχηματίζουν πολυγωνικά κομμάτια (μπλοκ) όμοια με αυτά του δέρματος του αλιγάτορα. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα κομμάτια αυτά δίνουν τη εντύπωση ότι είναι σχεδόν έτοιμα να αποκολληθούν» (Νικολαΐδης, 2002). Αρχικά εμφανίζεται μια διαμήκης ρωγμή στη τροχιά των τροχών, η οποία με την επιπλέον καταπόνηση κατά την πάροδο του χρόνου εξελίσσεται στην ανωτέρω μορφή.

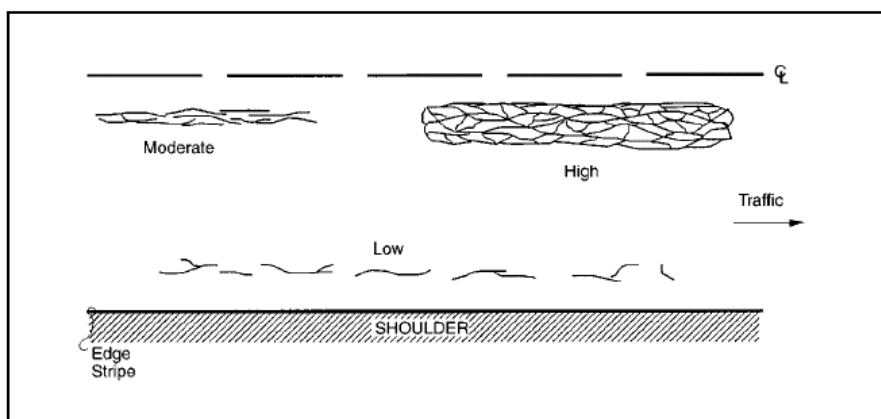
Οι ρωγμές αυτές εμφανίζονται εξαιτίας του μεγάλου βέλους κάμψης που αναπτύσσεται στις ασφαλτικές στρώσεις του οδοστρώματος, όταν με τη διαβροχή ή την εποχιακή αύξηση της υγρασίας στις υποκείμενες στρώσεις (υπέδαφος ή/και υπόβαση/βάση) μειώνεται η φέρουσα ικανότητά τους (Νικολαΐδης, 2002). Ακόμη, «η εμφάνισή τους συνδέεται με την υποδιαστασιολόγηση των στρώσεων κυκλοφορίας και οδοστρωσίας, καθώς και με φαινόμενα παγοπληξίας». Όταν το φαινόμενο εμφανίζεται σε εκτεταμένη επιφάνεια, σηματοδοτεί την λήξη του χρόνου ζωής της οδού (Μουρατίδης, 2006).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: μια περιοχή ρωγμών χωρίς η με λίγες συνεχόμενες ρωγμές, οι ρωγμές δεν έχουν θρυμματιστεί η να έχει δημιουργηθεί αποφλοΐωση.

Μέσο: μια περιοχή ρωγμών αρχίζουν σχηματίζουν ένα πλέγμα, στις παρυφές της ρηγματωμένης περιοχής το οδόστρωμα πιθανόν να παρουσιάζει σημεία αποφλοΐωσης.

Υψηλό: το οδόστρωμα παρουσιάζει πλέον ένα καλοσχηματισμένο μοτίβο ρωγμών με ιδιαίτερα εμφανή σημεία αποφλοΐωσης. Κομμάτια του οδοστρώματος έχουν πλήρως αποκολληθεί και ενδεχομένως φύγει εντελώς από τη θέση τους. (Book: Distress identification manual 2003)



Εικόνα 1.1 Book: Distress identification manual 2003



Εικόνα 1.2 Ρωγμές τύπου αλιγάτορα (www.prestige-sealcoating.com)

1.3.2. Ρωγμές στα άκρα του οδοστρώματος (edge cracks)

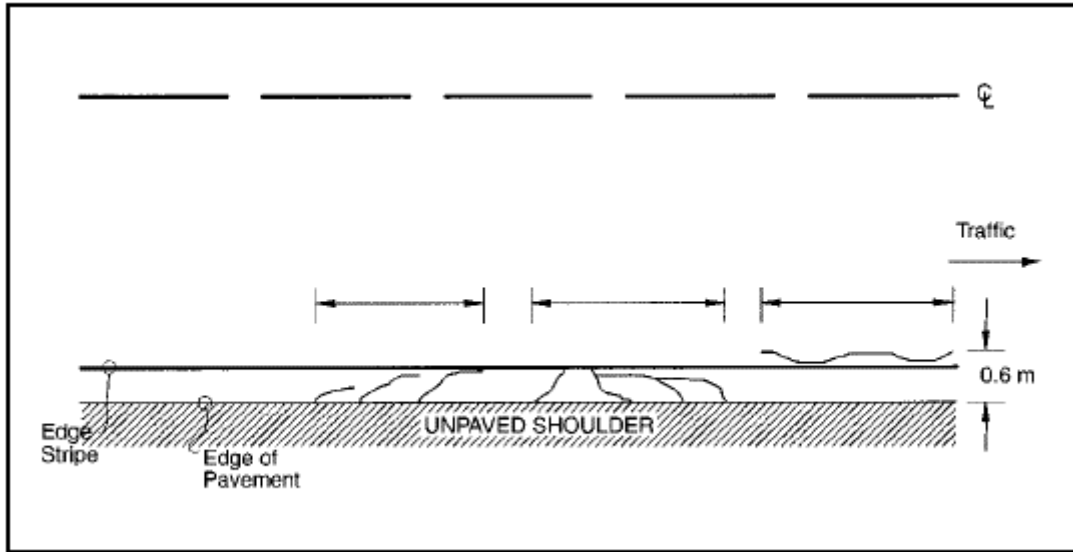
«Οι ρωγμές αυτές είναι συνήθως επιμήκεις και παρατηρούνται περίπου 30 – 50 cm από τα άκρα του οδοστρώματος με ή χωρίς εγκάρσιες διακλαδώσεις» προς το έρεισμα (Νικολαΐδης, 2002). Η έλλειψη πλευρικής υποστήριξης του οδοστρώματος στα σημεία αυτά, καθώς και η υποχώρηση των υποκείμενων στρώσεων εξαιτίας «της κακής συμπίκνωσης, της κακής αποστράγγισης, της δράσης του παγετού, της συρρίκνωσης λόγω ξηρασίας του εδάφους ή του μικρού πάχους των ασφαλτικών στρώσεων» προκαλούν την εμφάνιση του φαινομένου (Νικολαΐδης, 2002).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: ρωγμές χωρίς διάσπαση ή απώλεια υλικού.

Μέσο: ρωγμές με μερική διάσπαση και απώλεια υλικού για πάνω από 10% του μήκους του επηρεαζόμενου τμήματος του οδοστρώματος.

Υψηλό: ρωγμές με σημαντική διάσπαση και απώλεια υλικού για πάνω από 10% του μήκους του επηρεαζόμενου τμήματος του οδοστρώματος. (Book: Distress identification manual 2003)



Εικόνα 1.3 Book: Distress identification manual 2003



Εικόνα 1.4 Ρωγμές στα άκρα του οδοστρώματος (www.asphaltinstitute.org)

1.3.3. Ρωγμές μεταξύ των λωρίδων διάστρωσης ή διαπλάτυνσης (lane and widening cracks)

«Οι ρωγμές αυτές εμφανίζονται μεταξύ των λωρίδων διάστρωσης ή της διαπλάτυνσης και είναι πάντοτε διαμήκεις, εκτός από τις περιπτώσεις της διακοπής των εργασιών» (Νικολαΐδης, 2002). Αποδίδονται σε κατασκευαστικές κακοτεχνίες, όπως είναι η διάστρωση τάπητα με μικρότερη ποσότητα ασφαλτομίγματος στη ραφή, η ανεπαρκής ή κακή συγκόλληση της κάθετης επιφάνειας της προηγούμενης λωρίδας διάστρωσης και η μείωση της θερμοκρασίας του μίγματος κατά την εκτέλεση των εργασιών. Όταν η ρωγμή

εμφανίζεται πάνω στο σημείο που πραγματοποιήθηκε διαπλάτυνση της οδού, τότε πιθανόν να οφείλεται στην κακή συμπίκνωση των υποκείμενων νέων στρώσεων. Στις περιπτώσεις αυτές, όμως, πιθανόν να εμφανιστεί και άλλης μορφής αστοχία, κυρίως καθίζηση (Νικολαΐδης, 2002).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: οι ρωγμές δεν εμφανίζουν καθόλου ή παρουσιάζουν πολύ μικρά σημάδια αποφλοιώσεως στις άκρες τους και το εύρος τους είναι μικρότερο από 0,6 cm. Ρωγμές που έχουν επισκευασθεί και το άνοιγμα που είχαν πριν από την επισκευή δεν είναι ορατό θα πρέπει ταξινομούνται στις ρωγμές χαμηλού βαθμού σοβαρότητας.

Μεσαίο: οι ρωγμές δεν εμφανίζουν καθόλου ή παρουσιάζουν μικρά σημάδια αποφλοιώσεως αλλά το εύρος τους είναι μεγαλύτερο από 0,6 cm. Γύρω από την κύρια ρωγμή ή στα σημεία τομής κύριων ρωγμών πιθανόν να υπάρχουν άλλες, τυχαία κατανεμημένες ρωγμές με χαμηλό βαθμό σοβαρότητας.

Υψηλό: στα τμήματα που υπάρχουν ρωγμές το οδόστρωμα είναι θρυμματισμένο. Γύρω από την κύρια ρωγμή ή στα σημεία τομής κύριων ρωγμών πιθανόν να υπάρχουν κι άλλες διάσπαρτες ρωγμές. Κατά μήκος της κύριας ρωγμής κομμάτια του οδοστρώματος έχουν αποκολληθεί από το οδόστρωμα. (Book: Distress identification manual 2003)

Εικόνα 1.5 Google



Χαμηλή

Μέση

Υψηλή

1.3.4. Ρωγμές από ανάκλαση (reflection cracks)

Πρόκειται για ρωγμές διαφόρων μορφών και κατευθύνσεων, οι οποίες εμφανίζονται σε πρόσθετες ασφαλτικές στρώσεις (overlays) που κατασκευάστηκαν για την αποκατάσταση των σοβαρών φθορών του οδοστρώματος. Η μορφή των ρωγμών ακολουθεί τη μορφή των παλιών ρωγμών της επισκευασθείσας επιφάνειας. Οι ρωγμές ανάκλασης συνήθως «παρουσιάζονται σε ασφαλτικές στρώσεις πάνω σε δύσκαμπτα οδοστρώματα ή οδοστρώματα από βάση με ισχύρο σκυρόδεμα ή ακόμη σε επιστρώσεις που έγιναν πάνω από παλιά εγκιβωτισμένα ερείσματα ή διαπλάτυνσεις» (Νικολαΐδης, 2002).

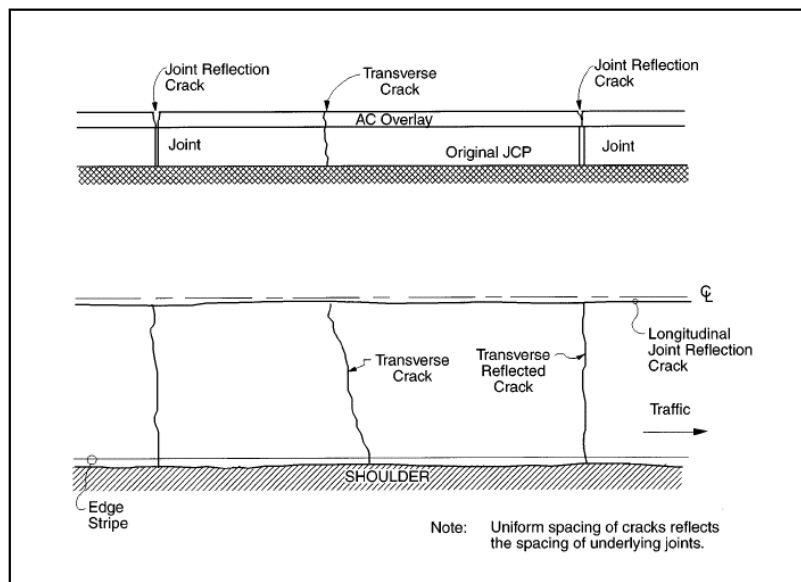
Οι ρωγμές αυτές δημιουργούνται εξαιτίας των μετακινήσεων του υπεδάφους ή της διόγκωσης και της συρρίκνωσης του (ύπαρξης αργιλικών υλικών και υγρασία) ή της κάθετης μετακίνησης των ανεξάρτητων ρηγματωμένων κομματιών της παλαιάς επιφάνειας, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τις κάθετες και οριζόντιες μετακινήσεις του υποκείμενου οδοστρώματος (Νικολαΐδης, 2002).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: ρωγμές πλάτους 2-6 mm με μικρή ή καθόλου θραύση.

Μέσο: ρωγμές πλάτους 10-13 mm με μέση θραύση.

Υψηλό: ρωγμές ελαχίστου πλάτους 13 mm με σοβαρή θραύση. (Book: Distress identification manual 2003)



Εικόνα 1.6 Book: Distress identification manual 2003



Εικόνα 1.7 Ρωγμές από ανάκλαση (www.pavementinteractive.org)

1.3.5. Παραβολικές ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων (slippage cracks)

Η μορφή των ρωγμών αυτών έχει σχήμα μισοφέγγαρου (Νικολαΐδης, 2002) κατά τη διεύθυνση κυκλοφορίας (Μουρατίδης, 2006). «Οι ρωγμές αυτές οφείλονται σε ολίσθηση του τάπητα κυκλοφορίας επί της υποκείμενης στρώσης λόγω κακής συνοχής» (Νικολαΐδης, 2002) και ισχυρών εφαπτομενικών φορτίων σε ζώνες πεδήσεως και μεγάλων κατά μήκος κλίσεων (Μουρατίδης, 2006). Η ολίσθηση του τάπητα μπορεί να οφείλεται στην απουσία συγκολλητικής επάλειψης ή στην ανεπαρκή και κακή συγκολλητική επάλειψη, την ύπαρξη χωμάτων, λαδιών αυτοκινήτου ή ύδατος. Πιο σπάνια, οι ρωγμές αυτές μπορεί να οφείλονται στη μεγάλη περιεκτικότητα του ασφαλτομίγματος σε λεπτόκοκκα αδρανή ή ακόμη στην κακή συμπίκνωση της υπερκείμενης στρώσης (Νικολαΐδης, 2002).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: άνοιγμα ρωγμής έως 1 cm.

Μέσο: άνοιγμα ρωγμής 1-2 cm.

Υψηλό: άνοιγμα ρωγμής μεγαλύτερο των 2,5 cm και έναρξη απόσπασης τεμαχιδίων από το οδόστρωμα. (Book: Distress identification manual 2003)



Εικόνα 1.8 Ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων (www.asphaltinstitute.org)

1.3.6. Ρωγμές συρρίκνωσης (shrinkage cracks)

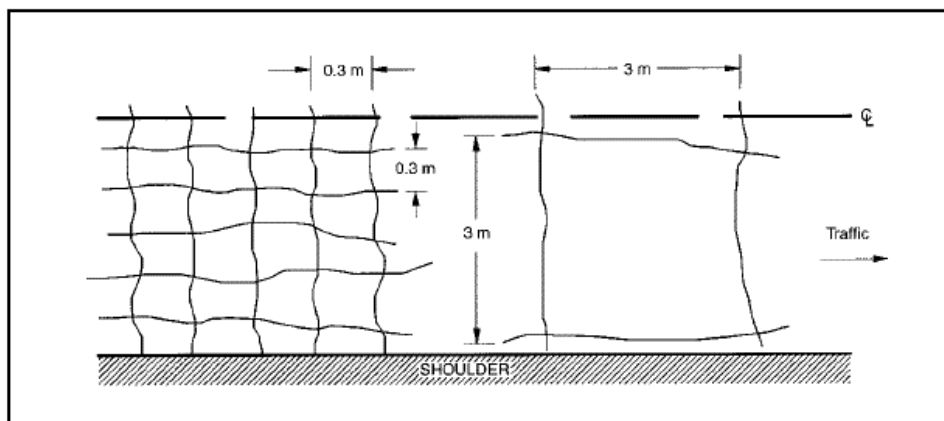
«Οι ρωγμές συρρίκνωσης είναι συνήθως ακανόνιστης μορφής, διακλαδιζόμενες και ως ένα βαθμό συνδεδεμένες μεταξύ τους, σχηματίζοντας μεγάλα πολυγωνικά μπλοκ με οξείες γωνίες και οφείλονται στη συρρίκνωση του ασφαλτομίγματος ή των υλικών της βάσης ή/και της υπόβασης». Το ασφαλτόμιγμα μπορεί να συρρικνωθεί όταν έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα αδρανή και φίλλερ και υψηλό ποσοστό σκληρής ασφάλτου, καθώς και όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι μικρός (Νικολαΐδης, 2002).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: συνήθως μόνο εγκάρσιες ρωγμές, πλάτους 2 mm, χωρίς σημάδια θραύσης. Η απόσταση των παράλληλων ρωγμών κυμαίνεται μεταξύ 3-6 m.

Μέσο: ρωγμές πλάτους περίπου 6 mm που σχηματίζουν ορθογώνια εμβαδού 1 m² ή μεγαλύτερου, με θραύσεις ή χωρίς θραύσεις. Η απόσταση των παράλληλων ρωγμών κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 6 m.

Υψηλό: ρωγμές πλάτους τουλάχιστον 13 mm, με θραύσεις, που σχηματίζουν ορθογώνια εμβαδού 0,2-1 m². Η απόσταση των παράλληλων ρωγμών κυμαίνεται μεταξύ 30-60 cm. (Book: Distress identification manual 2003)



Εικόνα 1.9 Book: Distress identification manual 2003



Εικόνα 1.10 Ρωγμές συρρίκνωσης (www.nachi.org)

1.3.7. Ρωγμές στην τροχιά των τροχών (wheel path cracks / block cracks)

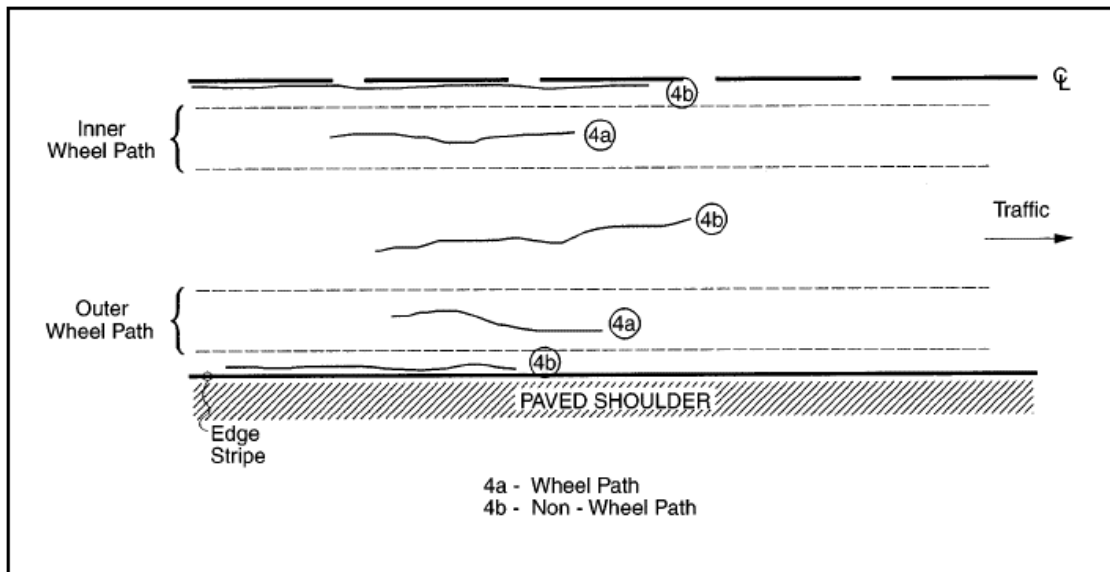
«Είναι ρωγμές που εμφανίζονται στις τροχαυλακώσεις και είναι πάντοτε διαμήκεις». Τα αίτια εμφάνισής τους είναι είτε η κόπωση των ασφαλτομιγμάτων είτε η τοπική θραύση του οδοστρώματος λόγω της μειωμένης φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους σε συνδυασμό με τα μεγάλα αξονικά φορτία και το μειωμένο (υποδιαστασιολογούμενο) πάχος των ασφαλτικών στρώσεων και της βάσεως του οδοστρώματος (Νικολαΐδης, 2002).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Μικρό: οι ρωγμές δεν εμφανίζουν καθόλου ή παρουσιάζουν πολύ μικρά σημάδια αποφλοίωσης στις άκρες τους και το εύρος τους είναι μικρότερο από 0,6 cm. Ρωγμές που έχουν επισκευασθεί και το άνοιγμα που είχαν πριν από την επισκευή δεν είναι ορατό, θα πρέπει ταξινομούνται ως ρωγμές χαμηλού βαθμού σοβαρότητας.

Μέσο: οι ρωγμές δεν εμφανίζουν καθόλου ή παρουσιάζουν μικρά σημάδια αποφλοίωσης αλλά το εύρος τους είναι μεγαλύτερο από 0,6 cm. Γύρω από την κύρια ρωγμή ή στα σημεία τομής κύριων ρωγμών πιθανόν να υπάρχουν άλλες, τυχαία κατανεμημένες ρωγμές με χαμηλό βαθμό σοβαρότητας.

Υψηλό: στα τμήματα που υπάρχουν ρωγμές το οδόστρωμα είναι θρυμματισμένο. Γύρω από την κύρια ρωγμή ή στα σημεία τομής κύριων ρωγμών πιθανόν να υπάρχουν κι άλλες διάσπαρτες ρωγμές. Κατά μήκος της κύριας ρωγμής κομμάτια του οδοστρώματος έχουν αποκολληθεί από το οδόστρωμα. Με την πάροδο του χρόνου τέτοιου είδους ρωγμές εξελίσσονται σε ρωγμές τύπου αλιγάτορα. (Book: Distress identification manual 2003)



Εικόνα 1.11 Book: Distress identification manual 2003



Εικόνα 1.12 Ρωγμές στην τροχιά των τροχών (www.roadscience.net)

1.3.8. Ελικοειδείς ρωγμές

«Είναι οι ρωγμές που εμφανίζονται με ελικοειδή, μη διακλαδιζόμενη μορφή κατά μήκος του οδοστρώματος και όχι σε συγκεκριμένη θέση. Η εμφάνιση των ρωγμών αυτών οφείλεται συνήθως στη δράση του παγετού και στην κόπωση του οδοστρώματος» (Νικολαΐδης, 2002). Μπορεί να οφείλεται, όμως, και στα φυσικά χαρακτηριστικά των αδρανών και του κονιάματος, τη γεωγραφική θέση της προέλευσής τους και το μέγιστο μέγεθος των αδρανών. Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: άνοιγμα ρωγμής έως 1 cm.

Μέσο: άνοιγμα ρωγμής 1-2 cm (απλή ή πολλαπλή ρηγμάτωση).

Υψηλό: άνοιγμα ρωγμής μεγαλύτερο των 2 cm και έναρξη απόσπασης τεμαχιδίων από το οδόστρωμα.

1.4. Παραμορφώσεις (στρεβλώσεις) της επιφάνειας (surface distortion)

Οι παραμορφώσεις αναφέρονται στην μη επιπεδότητα ενός οδοστρώματος. Οι βλάβες αυτές επιδρούν τόσο στην ασφάλεια όσο και στην άνεση κατά την οδήγηση και μπορεί να οφείλονται στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά ή τη χαμηλή ευστάθεια των ασφαλτομιγμάτων, στην κακή συμπύκνωση των στρώσεων και στην καθίζηση του υπεδάφους (Νικολαΐδης, 2002).

1.4.1. Αυλακώσεις στις τροχιές των τροχών (channel or ruts)

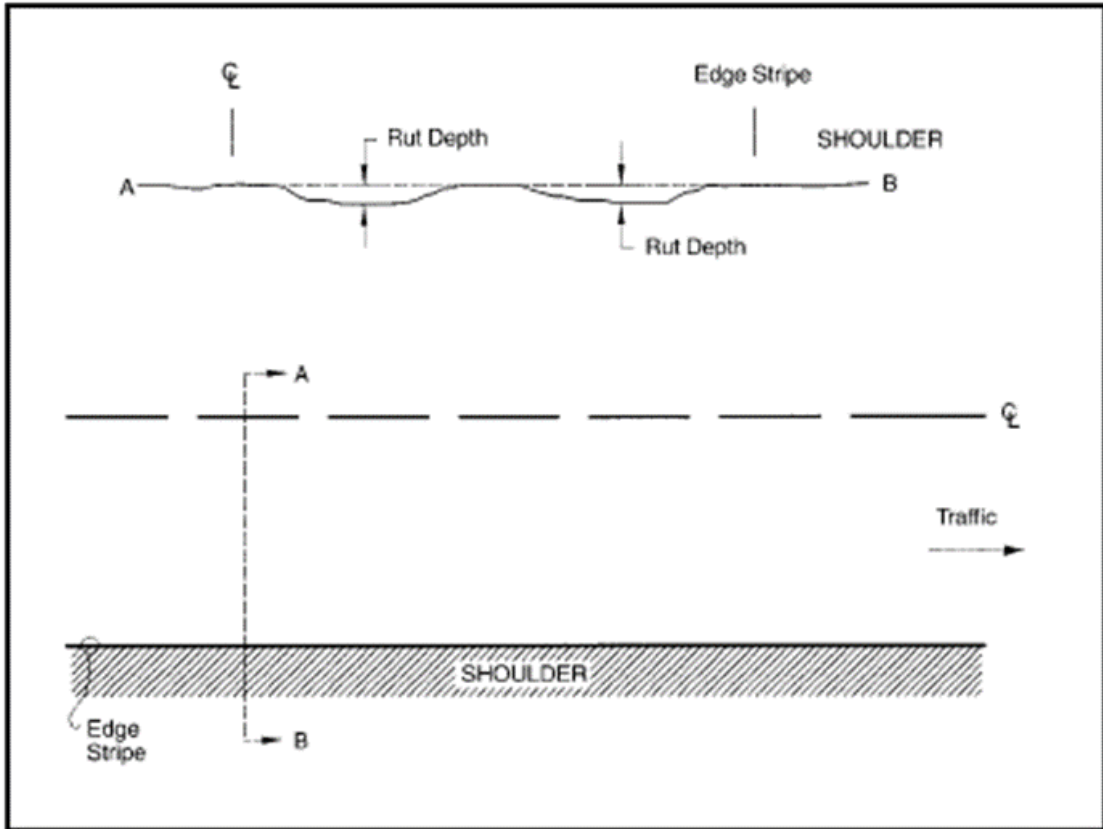
«Οι αυλακώσεις αυτές είναι καναλοποιημένες καθιζήσεις κατά μήκος της τροχιάς των τροχών». Ονομάζονται και τροχαυλακώσεις. Η καθίζηση συμβαίνει σταδιακά, φτάνοντας στο μέγιστο βάθος της στο κέντρο της τροχιάς των τροχών. Οφείλεται στην παραμένουσα παραμόρφωση του ασφαλτομίγματος, στην καθίζηση των στρώσεων λόγω κακής συμπύκνωσης και στην πλευρική μετακίνηση ή συμπίεση μιας ή περισσότερων στρώσεων κάτω από την επίδραση των αξονικών φορτίων, συνήθως βαριάς κυκλοφορίας (Νικολαΐδης, 2002).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: βάθος αυλάκωσης 6-13 mm.

Μέσο: βάθος αυλάκωσης 13-25 mm.

Υψηλό: βάθος αυλάκωσης μεγαλύτερο από 25 mm. (Book: Distress identification manual 2003)



Εικόνα 1.13 Book: Distress identification manual 2003



Εικόνα 1.14 Τροχαυλακώσεις (www.pavementinteractive.org)

1.4.2. Κυματώσεις – ρυτιδώσεις (wave – corrugations)

«Οι κυματώσεις, ή ρυτιδώσεις ή πτυχώσεις, είναι μια μορφή πλαστικής μετακίνησης που έχει ως αποτέλεσμα την τοπική διόγκωση της επιφάνειας υπό μορφή κυματώσεων (Νικολαΐδης, 2002) πυκνής διάταξης κατά την εγκάρσια έννοια της οδού (Μουρατίδης, 2006). Οι παραμορφώσεις αυτές όταν έχουν αραιή και ακανόνιστη διάταξη ονομάζονται κυματώσεις (wave) (Μουρατίδης, 2006), ενώ όταν η πλαστική μετακίνηση είναι τοπική, ονομάζεται επώθηση (shoving)» (Νικολαΐδης, 2002). Οι ρυτιδώσεις ή απωθήσεις εμφανίζονται σε σημεία της οδού που αναπτύσσονται υψηλές διατμητικές τάσεις (περιοχές φρεναρίσματος, ανωφέρειες και κατωφέρειες) και δεν συνοδεύονται από ρηγματώσεις (Νικολαΐδης, 2002). Τα αίτια εμφάνισή τους είναι η χαμηλή ευστάθεια του ασφαλτομίγματος και η πλαστική παραμόρφωσή του. Η χαμηλή ευστάθεια αποδίδεται συνήθως στο υψηλό ποσοστό ασφάλτου, στη χρήση ασφάλτου με χαμηλό ιξώδες (μαλακή άσφαλτος με διεισδυτικότητα μεγαλύτερη των 100 pen), στο υψηλό ποσοστό άμμου έναντι χονδρόκοκκων αδρανών, στη χρήση φυσικών (μη θραυστών και στρογγυλεμένων) αδρανών, στην ύπαρξη κενών στο μίγμα μικρότερα της ελάχιστης τιμής και στη μη πλήρη εξάτμιση των διαλυτών των διαλυμάτων (Νικολαΐδης, 2002).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: μέγιστο βάθος έως 5 cm. Καλός έλεγχος του οχήματος και ελαφρά αίσθηση μεγάλου κατακόρυφου τινάγματος.

Μέσο: βάθος από 5-10 cm. Μέτριος έλεγχος οχήματος και αξιοσημείωτη αίσθηση κατακόρυφου τινάγματος.

Υψηλό: βάθος μεγαλύτερο των 10 cm, που έχει σαν αποτέλεσμα κακό έλεγχο του οχήματος και έντονη αίσθηση μεγάλου κατακόρυφου τινάγματος. (Book: Distress identification manual 2003)



Εικόνα 1.15 Ρυτιδώσεις οδοστρώματος (www.tour-beijing.com)

1.4.3. Τοπικές καθιζήσεις - Κοιλώματα (local depressions)

Είναι τοπικές βυθίσεις της στάθμης της οδού με περιορισμένη έκταση (Μουρατίδης, 2006). Το βύθισμα που δημιουργείται κατακρατεί νερό και αποτελεί αιτία επιταχυνόμενης καταστροφής του οδοστρώματος, αλλά και κίνδυνος για τους χρήστες της οδού, λόγω ολισθηρότητας, πάγου κ.τ.λ. Οφείλονται στην μηχανική ανεπάρκεια των στρώσεων που οδηγεί σε τοπική καθίζηση καθώς η κυκλοφορία είναι βαρύτερη της προβλεφθείσας ή στην ελαττωματική κατασκευή του οδοστρώματος, η οποία αναφέρεται σε κακές συνθήκες αποστράγγισης ή έλλειψη εγκιβωτισμού (Νικολαΐδης, 2002).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: μέγιστο βάθος έως 5 cm. Ο έλεγχος του οχήματος γίνεται ικανοποιητικά, με ελαφρά αίσθηση κατακόρυφου τινάγματος.

Μέσο: βάθος από 5-10 cm. Μέτριος έλεγχος οχήματος και αξιοσημείωτη αίσθηση κατακόρυφου τινάγματος.

Υψηλό: βάθος μεγαλύτερο των 10 cm, που έχει σαν αποτέλεσμα κακό έλεγχο του οχήματος και έντονη αίσθηση μεγάλου κατακόρυφου τινάγματος. (Book: Distress identification manual 2003)

1.4.4. Τοπικές διογκώσεις (local upheaval)

«Οι διογκώσεις (bumps) του οδοστρώματος είναι οι τοπικές προς τα πάνω μετακινήσεις του οδοστρώματος» (Μουρατίδης, 2006) «που χαρακτηρίζονται από διακλαδιζόμενες ρηγματώσεις» (Νικολαΐδης, 2002). «Οφείλονται σε τοπική διόγκωση του υπεδάφους, της υπόβασης ή της βάσης και σπανίως των ασφαλικών στρώσεων. Η συνηθέστερη αιτία που προκαλεί τη διόγκωση είναι η διαστολή του εγκλωβισμένου νερού κατά την διάρκεια του χειμώνα λόγω παγετού», χωρίς να αποκλείεται και η επίδραση της υγρασίας σε διογκούμενα εδαφικά υλικά (Νικολαΐδης, 2002). Επιπλέον, μπορεί να οφείλονται στις υψηλές θερμοκρασίες και στον ερπυσμό, καθώς συχνά εμφανίζονται σε ζώνες πεδήσεως όπου ασκούν.

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: μέγιστο ύψος έως 5 cm. Καλός έλεγχος του οχήματος και ελαφρά αίσθηση κατακόρυφου τινάγματος.

Μέσο: ύψος 5-10 cm. Μέτριος έλεγχος οχήματος και αξιοσημείωτη αίσθηση κατακόρυφου τινάγματος.

Υψηλό: ύψος μεγαλύτερο των 10 cm, που έχει σαν αποτέλεσμα κακό έλεγχο του οχήματος και έντονη αίσθηση μεγάλου κατακόρυφου τινάγματος, μεγάλα εφαπτομενικά φορτία (Μουρατίδης, 2006).



Εικόνα 1.16 Τοπικές διογκώσεις (www.asphaltinstitute.org)

1.4.5. Τοπικές καθιζήσεις σε τομές οδοστρώματος (utility cut depressions)

Πρόκειται για καθιζήσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του οδοστρώματος λόγω της τομής ενός τμήματος του οδοστρώματος για την εγκατάσταση δικτύων κοινής ωφέλειας ή την επισκευή φθοράς (Technical Manual, 1992). «Οφείλονται στην κακή συμπίκνωση των υλικών επίχωσης των εγκαρσίων τομών, που ανοίγονται κυρίως από οργανισμούς κοινής ωφέλειας ή ιδιώτες» (Νικολαΐδης, 2002).

1.5. Αποσύνθεση (disintegration)

Αυτή η μορφή της αστοχίας των οδοστρωμάτων επιδρά στην επιδείνωση της δομικής τους κατάστασης. Το οδόστρωμα υφίσταται αποσύνθεση όταν θρυμματίζεται σε μικρά ασύνδετα κομμάτια. Σε αυτή την περίπτωση, αν δεν συντηρηθεί άμεσα, απαιτείται η αποκατάσταση της ασφαλτικής του στρώσης (Νικολαΐδης, 2002).

1.5.1. Αποκόλληση αδρανών (ravelling)

Πρόκειται για την μορφή της αποσύνθεσης του οδοστρώματος (weathering) κατά την οποία αρχικά το συνδετικό υλικό οξειδώνεται και έπειτα τα αδρανή αποκολλώνται προοδευτικά από την επιφάνεια (ravelling) (Μουρατίδης, 2006). «Η απογύμνωση της επιφάνειας, που ονομάζεται και «ψώρασμα», αρχίζει συνήθως από τα άκρα του οδοστρώματος προς το κέντρο και αρχικά αποκολλώνται τα λεπτόκοκκα υλικά και έπειτα τα χονδρόκοκκα. Όταν ξεκινά το φαινόμενο, η επιφάνεια αποκτά σχετική τραχύτητα. Κατόπιν, εμφανίζονται μικρές

«φωλιές», οι οποίες αρχίζουν να πυκνώνουν και να μεγαλώνουν δημιουργώντας λακκούβες» (Νικολαΐδης, 2002).

Τα αίτια που οδηγούν στην αποκόλληση των αδρανών είναι η χαμηλή περιεκτικότητα του μίγματος σε άσφαλτο, η χρήση μη καθαρών αδρανών, η κατασκευή του τάπητα σε χαμηλές θερμοκρασίες ή με βροχή, η υπερθέρμανση της ασφάλτου, η χρήση αδρανών που έχουν την τάση να αποσυντίθενται και η μη επαρκής συμπύκνωση (για τα ψυχρά ασφαλτομίγματα) (Νικολαΐδης, 2002).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: τα σκύρα και/ή η συνδετική ύλη της ασφάλτου μόλις αρχίζει να φθείρεται. Το οδόστρωμα αρχίζει να δείχνει σημάδια γήρανσης και τράχυνσης.

Μέσο: τα σκύρα και/ή η συνδετική ύλη της ασφάλτου έχει φαγωθεί και η υφή της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι αρκετά τραχιά και λακουβωτή. Πιθανόν κάποια κομμάτια του οδοστρώματος να είναι σχεδόν αποκολλημένα και μέρος του λεπτόκοκκου υλικού να βγαίνει στην επιφάνεια του οδοστρώματος.

Υψηλό: τα σκύρα και/ή η συνδετική ύλη της ασφάλτου έχει φαγωθεί σε μεγάλο βαθμό και η υφή της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι βαθιά λακουβωμένη και πολύ τραχιά. Το λεπτόκοκκο υλικό έχει φύγει από το οδόστρωμα και τα λακκάκια έχουν μέγεθος που φθάνει το μισό του μεγέθους των σκύρων διάστρωσης. (Book: Distress identification manual 2003)



Εικόνα 1.17 Αποκόλληση αδρανών (www.asphaltinstitute.org)

1.5.2. Λακκούβες (potholes)

Οι λακκούβες είναι οπές διάφορων μεγεθών και μορφής λεκανών μέσα στο οδόστρωμα. Μια λακκούβα προκαλείται από την παρουσία νερού στην υποκείμενη εδαφική στρώση και τα φορτία κυκλοφορίας που διέρχονται από την πληγείσα περιοχή. Η εισαγωγή νερού στις υποκείμενες στρώσεις αποδυναμώνει την υποστήριξη του εδάφους, ενώ ταυτόχρονα ο κυκλοφοριακός φόρτος δημιουργεί κόπωση και τελικά θραύση στην κακώς υποστηριζόμενη επιφανειακή ασφαλτική στρώση στην περιοχή αυτή. Η συνεχιζόμενη δράση της κυκλοφορίας εκτινάσσει τόσο την ασφαλτο όσο και το υποκείμενο εδαφικό υλικό με αποτέλεσμα τη δημιουργία οπής στο οδόστρωμα.

Όμως, όπως προαναφέρθηκε, λακκούβες μπορούν να δημιουργηθούν και μετά από επιδείνωση της αποκόλλησης των αδρανών από την επιφάνεια του οδοστρώματος.

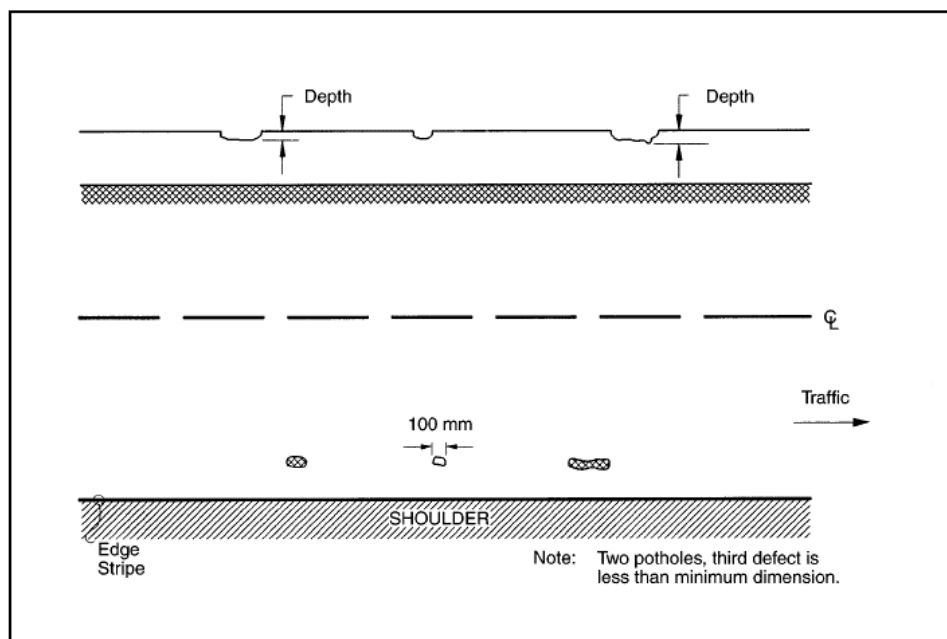
Οφείλονται στις αδυναμίες του ασφαλτομίγματος ή της δομής του οδοστρώματος. Αυτές μπορεί να είναι: η έλλειψη συνδετικού υλικού στο ασφαλτόμιγμα, το μειωμένο πάχος του τάπητα κυκλοφορίας, μια τοπική αστοχία κατά την κατασκευή των στρώσεων, κυρίως της βάσης, και η κακή τοπική αποστράγγιση της οδού (Νικολαΐδης, 2002).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: άνοιγμα λακκούβας μικρότερο των 8 cm και βάθος όχι μεγαλύτερο από 5 cm.

Μέσο: άνοιγμα λακκούβας 8-30 cm και βάθος από 5 cm μέχρι 10 cm.

Υψηλό: άνοιγμα λακκούβας μεγαλύτερο από 30 cm και βάθος μεγαλύτερο 10 cm. (Book: Distress identification manual 2003)



Εικόνα 1.18 Book: Distress identification manual 2003



Εικόνα 1.19 Λακκούβα (www.asphaltinstitute.org)

1.5.3. Αποφλοιώσεις (peeling)

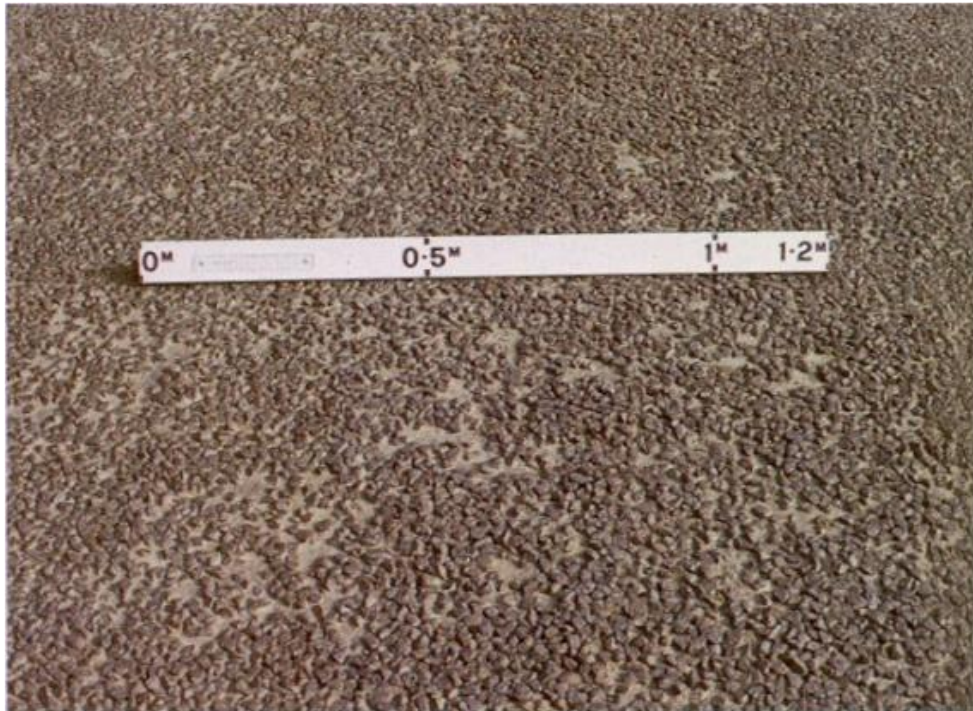
«Αποφλοιώσεις είναι τοπικές ή εκτεταμένες ζώνες όπου ο επιφανειακός τάπητας κυκλοφορίας έχει αποκολληθεί και αποσπαστεί από την υποκείμενη ασφαλτική στρώση». Το φαινόμενο οφείλεται στην κακή συγκόλληση των στρώσεων σε συνδυασμό με τις ισχυρές τάσεις στην διεπιφάνεια των ανωτέρω στρώσεων (Μουρατίδης, 2006).



Εικόνα 1.20 Αποφλοιώση οδοστρώματος (www.mrpothole.com)

1.5.4. Διάβρωση (stripping)

Διάβρωση παρατηρείται σε ένα οδοστρώμα «όταν εμφανίζονται σκύρα στην επιφάνεια κυκλοφορίας του λόγω απόσπασης και καταστροφής του συνδετικού υλικού». Τα αίτια της είναι η κακή κοκκομετρική διαβάθμιση και η ανεπαρκής πρόσφυση του συνδετικού επί των αδρανών (Μουρατίδης, 2006).



Εικόνα 1.21 Διάβρωση οδοστρώματος (www.lgam.info)

1.6. Λεία επιφάνεια οδοστρώματος

Η λεία επιφάνεια του οδοστρώματος είναι ένας τύπος φθοράς που επιδρά στην ασφάλεια και την εξυπηρέτηση των χρηστών και όχι στην δομική κατάστασή του. Είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ολισθηρότητα και κατ' επέκταση με τα τροχαία ατυχήματα, γι' αυτό θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην αναγνώριση και την άμεση αποκατάσταση της αντιολισθηρής ικανότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος (Νικολαΐδης, 2002).

1.6.1. Λείανση αδρανών – ολισθηρότητα (polished aggregate)

Πρόκειται για φθορά των αδρανών λόγω της κυκλοφορίας, με αποτέλεσμα η επιφάνεια του οδοστρώματος να γίνεται λεία και ολισθηρή. Οφείλεται στη χρήση ακατάλληλων σκληρών αδρανών (ασβεστολιθικών υλικών) (Νικολαΐδης, 2002). Επίσης, μπορεί να συμβαίνει λόγω της βύθισης των χονδρόκοκκων αδρανών στο ασφαλτόμιγμα υπό την επίδραση της κυκλοφορίας, αλλά και της κακής εκτίμησης της αντοχής τους.

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: λείανση αδρανών σε ποσοστό 10-25 % της επιφάνειας του τμήματος.

Μέσο: λείανση αδρανών σε ποσοστό 25-50 % της επιφάνειας του τμήματος.

Υψηλό: λείανση αδρανών σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50 % της επιφάνειας του τμήματος.



Εικόνα 1.22 Book: Distress identification manual 2003

1.6.2. Ανάδυση ασφάλτου (asphalt bleeding or flushing)

«Ανάδυση είναι το φαινόμενο της κάθετης μετακίνησης της ασφάλτου μέσα στο ασφαλτόμιγμα και η εμφάνισή της στην επιφάνεια του οδοστρώματος, δημιουργώντας έναν ασφαλτικό υμένα που υπερκαλύπτει τα αδρανή» (Νικολαΐδης, 2002). Παρατηρείται σαν μια μεμβράνη ασφαλτικού υλικού στην επιφάνεια του οδοστρώματος, η οποία συχνά εμφανίζει μια γυαλιστερή, σαν καθρέφτη, επιφάνεια που μπορεί να γίνεται κολλώδης (Pavement Interactive, 2011).

Η ανάδυση της ασφάλτου εμφανίζεται κατά τους θερινούς μήνες, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Οφείλεται στην ύπαρξη περίσσειας ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα ή στον ψεκάσμο πλέον της απαιτούμενης ποσότητας συγκολλητικής ή προεπάλειψης (μόνο σε τάπητες πάχους 40 – 50 mm). Επιπλέον, μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη ασφαλτικών διαλυτών που μεταφέρουν την άσφαλο στην επιφάνεια και στην βαριά κυκλοφορία που επιφέρει πρόσθετη συμπίεση στα ασφαλτομίγματα που είναι πλούσια σε άσφαλο (Pavement Interactive, 2011).

Επίπεδα σοβαρότητας:

Χαμηλό: μικρές ποσότητες σκύρων της επιφάνειας έχουν καλυφθεί από υπερβολική ποσότητα ασφάλτου αλλά η κατάσταση βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο.

Μέσο: σημαντικά τμήματα των επιφανειών σκύρων καλύπτονται με πλεονάζουσες ποσότητες ασφάλτου. Ωστόσο, σε μεγάλα τμήματα του οδοστρώματος επιφανειακά σκύρα είναι ορατά, ακόμα και στις περιοχές με εκχείλιση της ασφάλτου.

Υψηλό: τα επιφανειακά σκύρα καλύπτονται, στο μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας, με πλεονάζουσες ποσότητες ασφάλτου. Η επιφάνεια δείχνει να είναι υγρή ενώ σε ζεστό καιρό γίνεται κολλώδης. (Book: Distress identification manual 2003)



Εικόνα 1.23 Ανάδυση ασφάλτου λόγω υπερβολικής ποσότητας ασφάλτου (www.pavementinteractive.org)

1.7. Πρόωρη αστοχία των οδοστρωμάτων

Τα οδοστρώματα μπορούν να αστοχήσουν πρόωρα εξαιτίας πολλών παραγόντων, οι τέσσερις βασικοί λόγοι που μπορεί να οφείλεται η αστοχία τους είναι (Orr, 2006):

- Ο σχεδιασμός.
- Η κατασκευή.
- Η ακαταλληλότητα των υλικών.
- Η συντήρηση.

Γενικά, όταν ένας δρόμος ή μία οδός αστοχήσει, η αστοχία μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, αλλά συνήθως ένας από τους τέσσερις είναι ο πιο κρίσιμος (Orr, 2006).

Οι περισσότεροι δρόμοι δεν είναι ειδικά σχεδιασμένοι. Η χάραξή τους έχει υλοποιηθεί πάνω σε προγενέστερους δρόμους και μονοπάτια και εξελίχθηκε σε σύγχρονα οδοστρώματα. Αυτό δεν σημαίνει ότι πρέπει να έχουν πλήρως αναπτυγμένο τον τεχνικό σχεδιασμό για την αποκατάσταση κάθε οδικού δικτύου. Στην πραγματικότητα, οι περισσότεροι δρόμοι λειτουργούν μια χαρά. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλά ζητήματα που πρέπει να εξεταστούν (Orr, 2006).

Για παράδειγμα, σε δρόμους με χαμηλό κυκλοφοριακό όγκο, η σημαντικότερη πρόκληση του σχεδιασμού αφορά τον καιρό και τις συνθήκες αποστράγγισης. Αν η αποστράγγιση έχει υλοποιηθεί σωστά και ο δρόμος έχει κατασκευαστεί τηρώντας τις ελάχιστες προδιαγραφές για το πάχος και την ποιότητα του οδοστρώματος, θα πρέπει να αντέξει ικανοποιητικά. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλές αποτυχίες εξαιτίας του σχεδιασμού, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν στους ακόλουθους παράγοντες (Orr, 2006):

- Υποδιαστασιολόγηση. Ένας δρόμος που δεν μπορεί να αντέξει τα φορτία για τα οποία έχει σχεδιαστεί είναι υποδιαστασιολογημένος. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται σε μια αστοχία των προβλεπόμενων συνθηκών, όπως η αύξηση στην κυκλοφορία φορτηγών. Για παράδειγμα, θα πρέπει να σχεδιαστούν νέοι δρόμοι όταν αλλάζει η χρήση γης κάποιων περιοχών σε βιομηχανική και εμπορική λόγω της βαριάς κυκλοφορίας που θα εξυπηρετούν.
- Αποτυχία στην πρόβλεψη των μελλοντικών συνθηκών. Ακόμη και αν ο δρόμος έχει κατασκευαστεί σύμφωνα με προδιαγραφές ποιότητας, μπορεί να υπάρχει πρόωρη αστοχία, εάν υπάρχουν συνθήκες που έχουν αγνοηθεί κατά το σχεδιασμό. Η έλλειψη καλής αποστράγγισης οδηγεί σε πιο συχνές πρόωρες βλάβες. Σε αρκετές περιπτώσεις, το πρόβλημα αυτό δεν αποτελεί ένα πρόβλημα λόγω κατασκευής ή υλικών. Γι' αυτό τον λόγο όταν πριν από την παράδοση και την χρήση του έργου γίνεται η επιθεώρησή του, πρέπει να αξιολογείται η ποιότητα της αποστράγγισής του.
- Αλλαγές μετά την κατασκευή. Μόλις κατασκευαστεί ένα τμήμα του οδοστρώματος, είναι πιθανό μέρος της εκτρεπόμενης κυκλοφορίας να χρησιμοποιεί το νέο δρόμο. Αν δεν έχει προβλεφθεί αυτός ο αυξημένος κυκλοφοριακός φόρτος, ο δρόμος μπορεί να αστοχήσει πολύ σύντομα. Η κατάσταση επιβαρύνεται περισσότερο αν παρουσιαστεί επιπλέον κίνηση βαρέων οχημάτων την άνοιξη, την περίοδο που οι φακοί του πάγου δίνουν αυξημένη υγρασία στο οδόστρωμα.

Κάποια παραδείγματα αστοχίας εξαιτίας του σχεδιασμού είναι τα εξής (Orr, 2006):

- Πάρα πολύ λεπτή ασφαλική επικάλυψη για τα φορτία κυκλοφορίας (Πάρα πολύ παχιά, επίσης, δεν είναι επιθυμητή, καθώς αποτελεί σπατάλη χρημάτων).

- Η αποτυχία πρόβλεψης μιας διόγκωσης στο οδόστρωμα.
- Η σφράγιση με ασφαλτικές επαλείψεις ενός οδοστρώματος με σοβαρές ρηγματώσεις και βλάβες.
- Η κακή επιλογή και ανεπαρκής εκτέλεση της μεθόδου σφράγισης των ρωγμών του οδοστρώματος.
- Η χρήση σταθεροποιητή από ασφαλτικό σκυρόδεμα (asphalt cement), όταν η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα αδρανή (fines) είναι υπερβολικά υψηλή (πάνω από περίπου 12%).

1.8. Αστοχία στην κατασκευή

Ακριβώς όπως ο σχεδιασμός, έτσι και η κακή ποιότητα κατασκευής μπορεί να οδηγήσει έναν δρόμο σε πρόωρη αστοχία. Πολλές κατασκευαστικές αστοχίες δεν εμφανίζονται ως ελαττώματα για πολλά χρόνια, γι' αυτό είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η αιτία της αστοχίας. Είτε η κατασκευή γίνεται με ίδια μέσα (in-house) είτε με σύμβαση, είναι σημαντικό να γίνει σωστά (Orr, 2006).

Η εκπαίδευση του εργατικού δυναμικού για τις περιπτώσεις αυτεπιστασίας, αλλά και του επιβλέποντα για τις περιπτώσεις ανάθεσης της κατασκευής του έργου αποτελούν σημαντικά ζητήματα για την εξασφάλιση της ποιοτικής ολοκλήρωσής του (Orr, 2006).

Η κατασκευή μπορεί να είναι το πιο δύσκολο βήμα, επειδή υπάρχουν τόσα πολλά πρακτικά θέματα και προβλήματα για τα οποία πρέπει να δοθεί κατάλληλη απάντηση. Η βασική εκπαίδευση σε συνδυασμό με την πρακτική άσκηση, καθώς και η παράλληλη απόκτηση εμπειρικής γνώσης, συμβάλλουν ικανοποιητικά στην ορθή εκτέλεση των εργασιών. Ωστόσο, οι πολύπλοκες και εξειδικευμένες εργασίες εξακολουθούν να ενέχουν δυσκολίες και προβληματισμούς και να εγκυμονούν κινδύνους για ενδεχόμενες κατασκευαστικές αποτυχίες (Orr, 2006).

Οι παράγοντες, οι οποίοι ευθύνονται για αυτές τις αστοχίες περιγράφονται παρακάτω (Orr, 2006).

- Κακή ποιότητα κατασκευής. Ένα έργο με άριστη μελέτη εάν δεν υλοποιηθεί σωστά, δεν μπορεί να έχει διάρκεια. Συνηθισμένο πρόβλημα αποτελεί η αστοχία της συμπύκνωσης της επιχωμάτωσης σε λεπτά στρώματα. Μπορεί η κατασκευή να είναι γρηγορότερη αν γίνει σε χοντρά στρώματα, όμως η επανάληψη των εργασιών για την διόρθωση του προβλήματος μετά την ενδεχόμενη καθίζηση δεν είναι μια καλή

εναλλακτική λύση. Η αντιμετώπιση των ζητημάτων κατασκευής παρέχεται μέσω της κατάρτισης.

- Χρήση ακατάλληλου εξοπλισμού. Η χρήση του λάθους εργαλείου για τη συντήρηση του οδοστρώματος μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία. Ένας οδοστρωτήρας με ελαστικό κύλινδρο πρέπει να χρησιμοποιείται σε οδοστρώματα για ασφαλική επάλειψη. Ένας μεταλλικός κύλινδρος οδοστρωτήρα υπερβολικού βάρους μπορεί να συντρίψει και να θραύσει τα αδρανή. Η παράλειψη της χρήσης ενός εργαλείου του εξοπλισμού μπορεί, επίσης, να προκαλέσει προβλήματα. Για παράδειγμα, αν τα αδρανή μιας στρώσης βάσης παραμείνουν χωρίς συμπίκνωση επειδή κανένας οδοστρωτήρας δεν είναι διαθέσιμος, είναι μια κακή λύση.
- Η εσφαλμένη χρήση του εξοπλισμού. Ακόμα και αν υπάρχουν τα σωστά εργαλεία του εξοπλισμού, είναι σημαντικό να τα χρησιμοποιηθούν σωστά. Χρησιμοποιώντας ένα συμπίεστη για το «σβήσιμο» των ρωγμών μπορεί να εισέλθει νερό στις ρωγμές. Είναι σημαντική η γνώση της καταλληλότητας των εργαλείων του εξοπλισμού, καθώς και η χρήση τους.
- Η αποτυχία ακολουθίας των σχεδίων. Για τη συντήρηση του οδοστρώματος δεν απαιτούνται σχέδια μηχανικού, αλλά αρκεί ως ένα πολύτιμο εργαλείο η καταγραφή των βημάτων και η διατήρηση ενός πλάνου. Παραδείγματα αυτών των καλών σχεδιασμών περιλαμβάνουν χαράξεις, παρακάμψεις, υλικά, βήματα κατασκευής, και σχέδια σε περίπτωση κακών καιρικών συνθηκών. Χωρίς σχέδιο δεν υπάρχει η γνώση του λάθους.
- Η έλλειψη της εκπαίδευσης. Πολύ σημαντικό στοιχείο της σωστής εκτέλεσης των εργασιών είναι η γνώση του τρόπου υλοποίησής τους. Γι' αυτό τον λόγο αξίζει η επένδυση στην παροχή κατάρτισης για όλους τους εργαζομένους. Μπορεί να συμβαίνει κατά τη διάρκεια της εργασίας, με συνομιλίες στα διαλείμματα, με ωριαία εκπαίδευση σε συναντήσεις της εκάστοτε ένωσης, ή με ημερήσια κατάρτιση από κάποιο πρόγραμμα ή προμηθευτή.
- Επιλογή λανθασμένης εποχής του χρόνου ή κακές καιρικές συνθήκες. Οι καιρικές συνθήκες δεν μπορούν να ελεγχθούν, ωστόσο είναι δυνατόν να αποδοθούν ευθύνες για τον χειρισμό τους. Μια επιφανειακή συντήρηση που τοποθετείται τον Οκτώβριο, δεν είναι πιθανό να λειτουργήσει όπως μία που τοποθετείται τον Ιούλιο. Από την άλλη πλευρά, αν έβρεχε κατά τη διάρκεια της κατασκευής τον Ιούλιο, δεν είναι πιθανό να έγινε πολύ καλά και τότε. Η γνώση των περιορισμών της κάθε επισκευής είναι μείζονος σημασίας.

Ενδεικτικά παραδείγματα της αποτυχίας στην κατασκευή αποτελούν:

- Η αποτυχία συμπίκνωσης της τοπικής εξυγίανσης με ψυχρό ασφαλικό μίγμα που περιέχει ανακυκλωμένα κομμάτια ελαστικών.
- Η αποτυχία να τοποθετηθούν τα αδρανή σε ασφαλικές επαλείψεις (chip seal) πριν τη διάσπαση των ασφαλικών γαλακτωμάτων.
- Η χρήση ενός συμπιεστή αέρα χωρίς διαχωριστή ελαίου/νερού για τον καθαρισμό των ρωγμών (μπορεί να εισαχθεί νερό και να προκληθεί απώλεια των συνδέσμων).
- Η διάστρωση πάνω σε μια βάση που δεν είναι κατάλληλα προετοιμασμένη.
- Η υλοποίηση εργασιών με ασφαλικά γαλακτώματα μετά τα τέλη Οκτωβρίου (ή σε οποιαδήποτε κρύα ημέρα).

1.9. Ακαταλληλότητα των υλικών

Η χρήση του λάθους υλικού στο σωστό μέρος ή του σωστού υλικού σε λάθος θέση μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία. Μερικές φορές τα προβλήματα είναι προφανή, ενώ άλλες φορές δεν δείχνουν να σχετίζονται με την επιλογή του υλικού.

Οι σημαντικότεροι λόγοι στους οποίους μπορεί να αποδοθεί μια αποτυχία λόγω των υλικών είναι (Orr, 2006):

- Λάθος υλικό. Το λάθος υλικό οδηγεί σε πρόωρη αστοχία. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση βρώμικου χαλικιού στη βάση. Η χρήση του λιγότερο δαπανηρού υλικού μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγαλύτερα έξοδα στην μέλλον. Γι' αυτό είναι απαραίτητη η κατανόηση των περιορισμών του συγκεκριμένου προϊόντος πριν τη χρήση.
- Το υλικό δεν πληροί τις προδιαγραφές. Κατά την επιλογή των υλικών, είναι απαραίτητη η πιστοποίηση ότι πληρούν τις προδιαγραφές. Προτείνεται ο δειγματοληπτικός έλεγχος των προϊόντων στο εργοτάξιο. Όμως, δεν είναι πάντα δυνατή η λήψη δείγματος μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής.
- Λανθασμένη τοποθέτηση του υλικού. Εάν το υλικό έχει τοποθετηθεί εσφαλμένα, μπορεί να προκαλέσει πρόωρη αστοχία. Θα μπορούσε να είναι είτε κατασκευαστικό πρόβλημα είτε πρόβλημα λόγω του υλικού. Μερικές φορές, το πρόβλημα είναι η αποτυχία της τοποθέτησης ενός στοιχείου χρησιμοποιώντας μια νεότερη τεχνική.
- Ασυμβατότητα με άλλα υλικά. Το κόστος της ασυμβατότητας των συστατικών παρατίθεται σχεδόν κάθε φορά που αποτυγχάνει ένα οδόστρωμα με ασφαλική επάλειψη (chip seal), αν και στην πραγματικότητα, αυτό δεν συμβαίνει σχεδόν ποτέ. Πολύ συνηθισμένη είναι η χρήση σκονισμένων αδρανών που δεν συγκρατούν τα

ασφαλτικά γαλακτώματα. Όταν παρουσιαστεί αυτό το πρόβλημα, οι συνέπειες μπορεί να είναι δραματικές.

Κάποια παραδείγματα των αποτυχιών λόγω των υλικών είναι (Orr, 2006):

- Η εφαρμογή ασφαλτικής επάλειψης (chip seal) πάνω στην επιφάνεια ασφαλτικής βάσης μετά από απόλληση του ασφαλτοτάπητα χωρίς να προηγηθεί διάστρωση τάπητα.
- Η χρήση ασφαλτικού γαλακτώματος για την πλήρωση ρηγματώσεων, καθώς σε ρηγματώσεις με διάκενο 2-3 mm απαιτείται η εφαρμογή ασφαλτικής μαστίχης (άσφαλτος με λεπτόκοκκα αδρανή), ενώ σε περισσότερο εκτεταμένες ρηγματώσεις απαιτείται ανακατασκευή της επιφάνειας του οδοστρώματος.
- Η χρήση ψυχρού ασφαλτομίγματος σε περίπτωση τακτικής επισκευής (μπάλωμα) με εσφαλμένη τεχνική.
- Η χρήση σκονισμένων ή υγρών αδρανών σε εργασίες συντήρησης της επιφάνειας.

1.10. Αστοχία στη συντήρηση

Το πρόβλημα της συντήρησης παρουσιάζεται στο ότι δεν είναι αρκετή. Πρόκειται για ένα ζήτημα προϋπολογισμού, προγραμματισμού και επικοινωνίας, που μερικές φορές είναι πολύ δύσκολο να ξεπεραστεί. Μόλις αποφασιστεί η εκτέλεση μιας συντήρησης είναι σημαντική η υπενθύμιση ότι όλες οι τεχνικές συντήρησης έχουν σχεδιαστεί για να ταιριάζουν με συγκεκριμένες συνθήκες και πρέπει να κατασκευάζονται κατάλληλα χρησιμοποιώντας τα σωστά υλικά. Η πρόωρη αστοχία της συντήρησης οδοστρώματος είναι συνήθως μια αποτυχία του σχεδιασμού, της κατασκευής, ή των υλικών (Orr, 2006).

- Σχεδιασμός. Το πρώτο βήμα στον σχεδιασμό είναι η επιλογή της σωστής επισκευής για την επιδιόρθωση του προβλήματος. Σε πάρα πολλές περιπτώσεις, η επιλογή της επισκευής γίνεται με μη-τεχνικούς λόγους. Επιπλέον, πολλές συντηρήσεις γίνονται χωρίς σχεδιασμό. Γνωρίζοντας τι χρειάζεται να γίνει μπορεί να υλοποιηθεί η σωστή επισκευή, γεγονός που αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα βήματα στο σχεδιασμό της συντήρησης του οδοστρώματος.
- Κατασκευή. Μετά την επιλογή της τεχνικής συντήρησης, απαιτείται η σωστή κατασκευή της. Η αποτυχία της σωστής υλοποίησης της επισκευής συντήρησης είναι μια σημαντική αιτία για την πρόωρη αστοχία του οδοστρώματος.
- Υλικό. Η χρήση του σωστού υλικού είναι κρίσιμης σημασίας. Μπορεί να κοστίζει λιγότερο η αγορά ενός φθηνότερου χαλικοιού, η επιδιόρθωση, ή το γαλάκτωμα, αλλά είναι τεράστιο το κόστος αντικατάστασης εάν αποτύχει πρόωρα.

2. ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

2.1. Γενικά

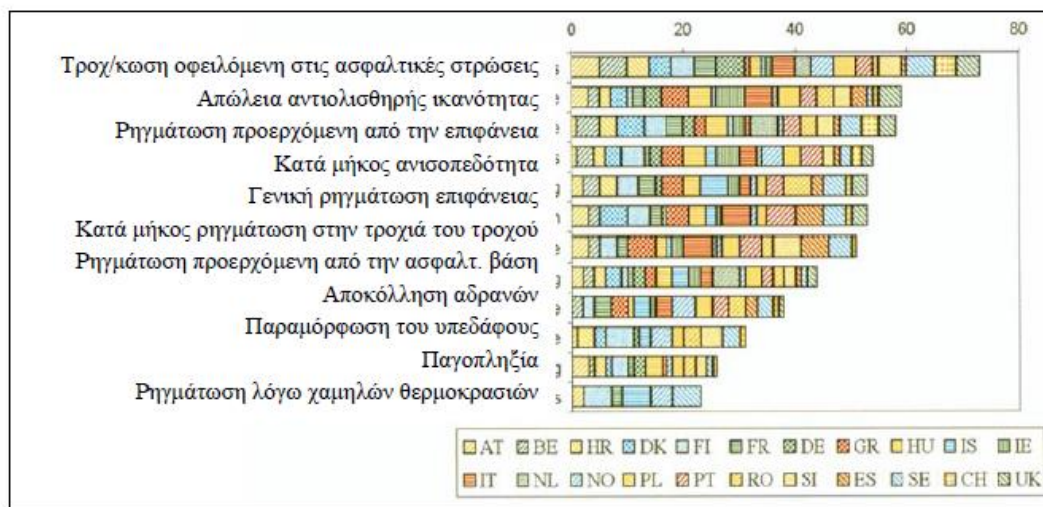
Η παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων απασχόλησε εντονότατα τους ερευνητές στις αρχές της δεκαετίας του 60 όταν, λόγω της ραγδαίας αύξησης του κυκλοφοριακού φόρτου, άρχισαν να εμφανίζονται πρόωρες επιφανειακές παραμορφώσεις υπό τη μορφή τροχοαυλάκωσης. Η κύρια αιτία ήταν η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου και κατ' επέκταση του ασφαλτομίγματος. Γενικά η ενδογενής ιξωδοελαστική συμπεριφορά των ασφαλτικών μιγμάτων προϋποθέτει ότι η επερχόμενη παραμόρφωση υπό την επιβολή σταθερής τάσης σ για χρόνο φόρτισης t δεν ανακτάται πλήρως μετά την απομάκρυνση της τάσης. Ανακτάται μόνο ένα μέρος της παραμένουσας παραμόρφωσης λόγω της ιξώδους συμπεριφοράς των ασφαλτικών μιγμάτων. Αθροιζόμενη, η απειροελάχιστη παραμένουσα παραμόρφωση που προκύπτει μετά από κάθε φόρτιση, προκαλεί με την πάροδο του χρόνου την επιφανειακή παραμόρφωση του οδοστρώματος, η οποία εμφανίζεται με τη μορφή τροχοαυλάκωσης.

Το φαινόμενο εξακολουθεί να υπάρχει και μάλιστα εξαιτίας της συνεχούς αύξησης του κυκλοφοριακού φόρτου, της αύξησης της πίεσης των ελαστικών των οχημάτων και της παρουσίας όλο και περισσότερων υπέρβαρων οχημάτων, καθώς και της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας παγκοσμίως, γίνεται όλο και πιο έντονο. Χαρακτηριστικά αναφέρονται δυο γενικευμένες έρευνες που έγιναν στις ΗΠΑ και την Ευρώπη. Η πρώτη είναι η έρευνα που έκαναν οι Brown και Cross στις Ηνωμένες Πολιτείες σχετικά με τις αιτίες της τροχοαυλάκωσης και η δεύτερη η έρευνα στα πλαίσια του προγράμματος COST 333 σχετικά με τις αιτίες καταπόνησης των Ευρωπαϊκών δρόμων.

Η έρευνα των Brown και Cross ξεκίνησε το 1987 και ολοκληρώθηκε το 1992.

Συμπεριλάμβανε οδοστρώματα που είχαν εμφανίσει τροχοαυλάκωση από όλες περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών, ενώ λάμβανε υπόψη διαφορετικές κλιματικές ζώνες και αδρανή υλικά διαφορετικής γωνιότητας και διαφορετικών πηγών προέλευσης. Η έρευνα περιλάμβανε συλλογή πυρήνων από όλες τις θέσεις που εξετάστηκαν, έτσι ώστε κάθε φορά να ελεγχθούν τα υλικά του υπό εξέταση οδοστρώματος, να μετρηθεί το βάθος τροχοαυλάκωσης, καθώς και τα πάχη των επιμέρους στρώσεων. Τα κύριο συμπέρασμα της έρευνας αυτής ήταν ότι στο μεγαλύτερο ποσοστό των υπό εξέταση δειγμάτων, η τροχοαυλάκωση προέκυπτε στα 75-100 χιλιοστά από την ανώτερη επιφάνεια των ασφαλτικών στρώσεων.

Στην Ευρώπη, υπό την αιγίδα του προγράμματος COST 333 διεξήχθη μια έρευνα με στόχο να καθορίσει την πιο κοινή αιτία καταπόνησης των οδοστρωμάτων. Κατά την έρευνα αυτή ζητήθηκε από τις Ευρωπαϊκές χώρες να αποτιμήσουν τις πιο κοινές μορφές καταπόνησης των οδών τους χρησιμοποιώντας μια κλίμακα από 0 έως 5, όπου 0 σήμαινε ότι δεν παρατηρήθηκε η συγκεκριμένη μορφή καταπόνηση και 5 ότι η συγκεκριμένη μορφή καταπόνησης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Στο σχήμα φαίνεται καθαρά ότι η τροχοαυλάκωση που οφείλεται, στην παραμένουσα παραμόρφωση του ασφαλτομίγματος είναι η πιο κοινή καταπόνηση που παρατηρείται στα οδοστρώματα της Ευρώπης.

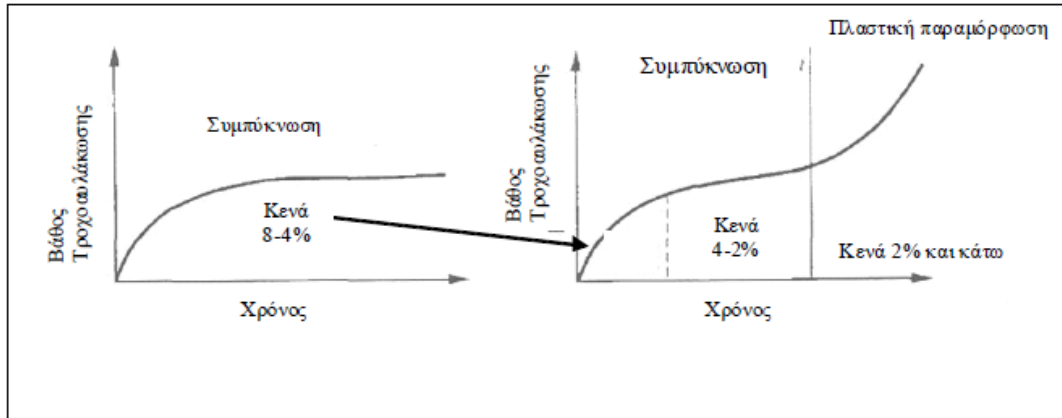


Εικόνα 2.1 Αποτίμηση καταπονήσεων των οδοστρωμάτων στην Ευρώπη

Σημειώνεται εδώ ότι το φαινόμενο της τροχοαυλάκωσης πέραν της εξάρτησης του από τα ασφαλτικά μίγματα και των υλικών που το αποτελούν, μπορεί να προκύψει στα εύκαμπτα οδοστρώματα και από άλλες αιτίες. Αυτές μπορεί να είναι, η μη καλή συμπύκνωση όλων (ασφαλτικών και ασύνδετων) των στρώσεων του οδοστρώματος και η καθίζηση του υπεδάφους. Οι αιτίες αυτές οφείλονται σε σχεδιαστικό ή/και κατασκευαστικό λάθος.

2.2. Παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλτικών μιγμάτων

Τα ασφαλτικά μίγματα αποτελούνται από άσφαλτο αδρανή και κενά αέρος. Πολλοί είναι οι παράγοντες που συνδέονται με τα τρία παραπάνω στοιχεία και επηρεάζουν την αντίσταση των ασφαλτικών μιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση. Ο τρόπος με τον οποίο τα ασφαλτομίγματα τύπου ασφαλτικού σκυροδέματος παραμορφώνονται κάτω από την επίδραση της κυκλοφορίας παρουσιάστηκε από τους (Parker and Brown 1992) και απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.2 Ανάπτυξη της τροχοαυλάκωσης στα ασφαλτικά μίγματα

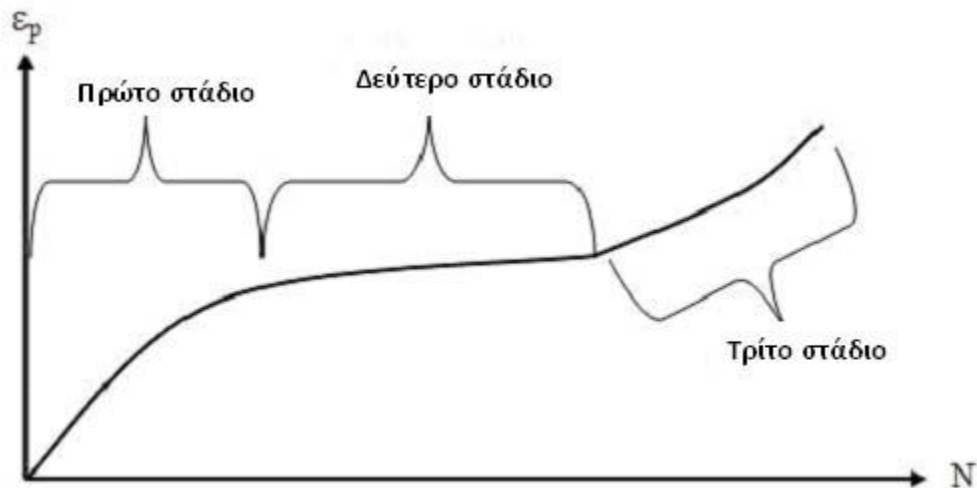
Στην πρώτη φάση οι επαναλαμβανόμενες φορτίσεις λόγω κυκλοφορίας προκαλούν συμπίκνωση και μείωση των κενών του μίγματος (τα κενά υπολογίζονται περίπου 8% κατά την ολοκλήρωση της κατασκευής της οδού). Σε σωστά σχεδιασμένα ασφαλτικά μίγματα η μείωση αυτή των κενών σταθεροποιείται περίπου στο 4 % και η συμπίκνωση σταματά η συνεχίζεται με πολύ χαμηλό ρυθμό.

Όταν τα κενά αέρος του μίγματος γίνουν περίπου 4% για σωστά σχεδιασμένα μίγματα η αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση είναι βέλτιστη. Στη φάση αυτή, αποτελεί κρίσιμο σημείο η ύπαρξη ενός σκελετού αδρανών που να μπορεί να αντισταθεί σε περαιτέρω συμπίκνωση. Επίσης στη συγκεκριμένη φάση το ποσοστό της ασφάλτου αποτελεί κύρια παράμετρο. Υπερβολικό ποσοστό ασφάλτου μειώνει τις επαφές μεταξύ των κόκκων των αδρανών αποδυναμώνοντας έτσι το σκελετό των αδρανών και οδηγεί σε περαιτέρω συμπίκνωση.

Σε ασφαλτικά μίγματα που παρουσιάζουν μεγάλη τροχοαυλάκωση, η συμπίκνωση που αναφέρθηκε συνεχίζεται και μια δεύτερη φάση ξεκινά. Όταν τα μίγμα αποκτήσει περίπου 2% κενά, παρουσιάζει μεγάλη αστάθεια και η πλαστική παραμόρφωση (plastic flow) αρχίζει να αναπτύσσεται. Στη φάση αυτή η διατμητική αντοχή του ασφαλτικού μίγματος είναι μικρή. Επίσης κατά το στάδιο αυτό, η τροχοαυλάκωση αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς και η ανύψωση των πλευρικών επιφανειών στη τροχιά του τροχού (upheaval) ξεκινά να αναπτύσσεται. Στα επόμενα θα αναλυθεί η επίδραση των παραπάνω επιμέρους στοιχείων που συνθέτουν ένα ασφαλτικό μίγμα, στην αντίσταση αυτού σε παραμένουσα παραμόρφωση.

2.3. Βασικά στάδια ανάπτυξης παραμένουσών παραμορφώσεων

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



Εικόνα 2.3 Zhou και Scullion (2002)

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.

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 (επιφανειακής) 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).

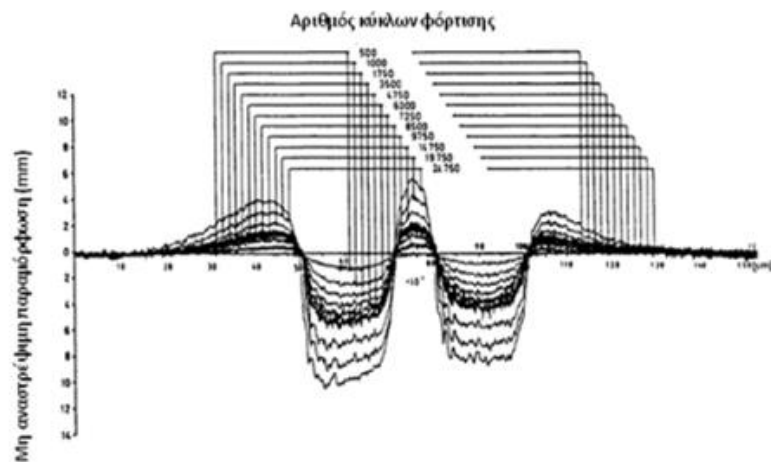
Η τροχοαυλάκωση αναπτύσσεται σταδιακά υπό την επίδραση των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων και συνήθως αποτυπώνεται με τη μορφή παραμορφώσεων κατά μήκος των ιχνών των τροχών, συνοδευόμενη από μικρές ανακατατάξεις στα άκρα. Οι δύο αιτίες που συμβάλλουν στη δημιουργία των τροχοαυλακώσεων είναι η συμπίκνωση 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 AASHTO 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 συμπίκνωση (δηλαδή η μείωση του όγκου και κατ' επέκταση αύξηση της πυκνότητας) να έχει δευτερεύοντα ρόλο. Το διάγραμμα της παρακάτω εικόνας, 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).



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



Εικόνα 2.4 Τροχοαυλάκωση λόγω αδύναμων ασφαλτικών στρώσεων (Garba, 2002)

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



Εικόνα 2.5 Συσσώρευση νερού στο ίχνος τροχού (Dawson and Kolisoja, 2004)

Η εμφάνιση της τροχοαυλακώσης 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 , (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).

2.5. 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 ασφάλτος. 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 υπερσχύει έναντι της ελαστικής, κυρίως, συμπεριφοράς των συμπυκνωμένων 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):

$$S_m = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right)_{T,t}$$

Όπου:

σ : η επιβαλλόμενη τάση

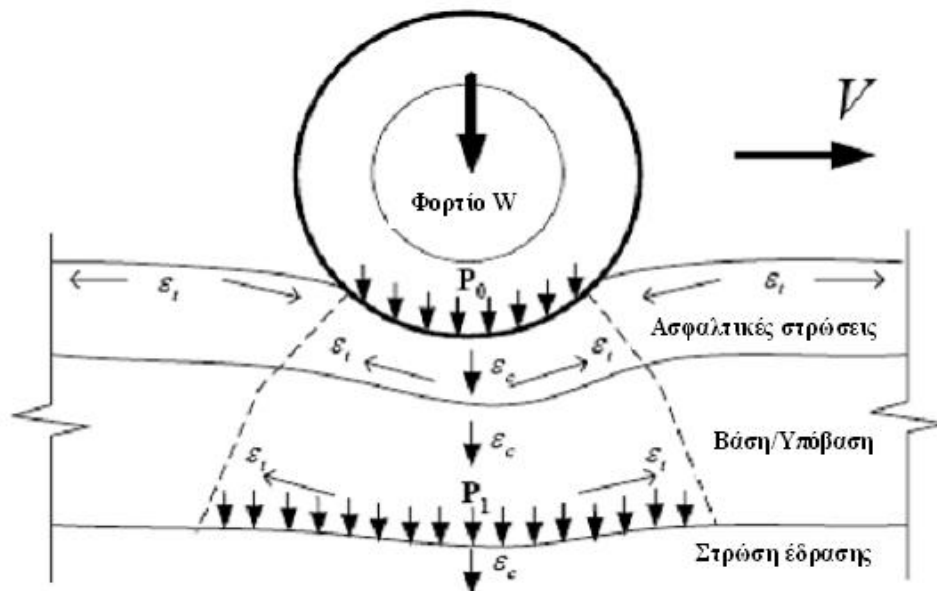
ε : η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση

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).

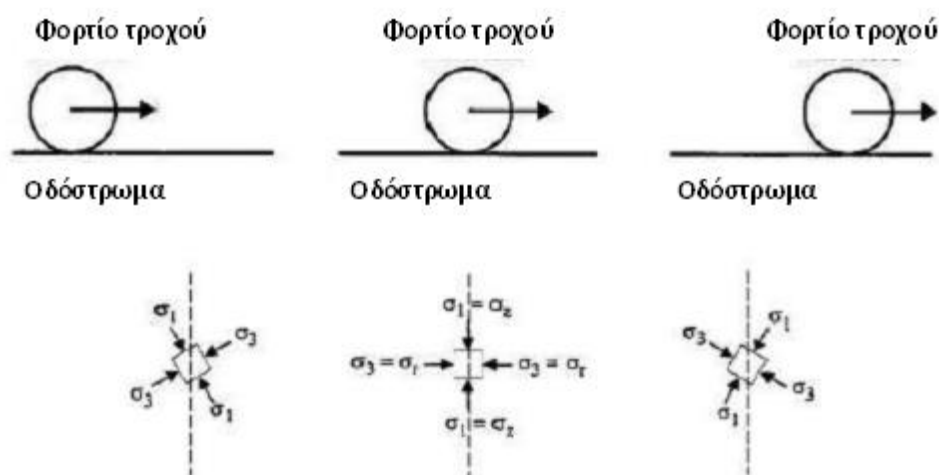
Επιπρόσθετα, οι στρώσεις ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, δηλαδή οι ασφαλικές στρώσεις, οι βάση-υπόβαση και η στρώση έδρασης χαρακτηρίζονται από το μέτρο ελαστικότητας E , τον λόγο Poisson ν και το μέτρο διάτμησης G , ποσότητες οι οποίες αποτυπώνουν τη συμπεριφορά των υλικών κάθε στρώσης. Επιπλέον ο καθορισμός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

Η καταπόνηση που υφίστανται τα ασφατικά 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. 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. 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

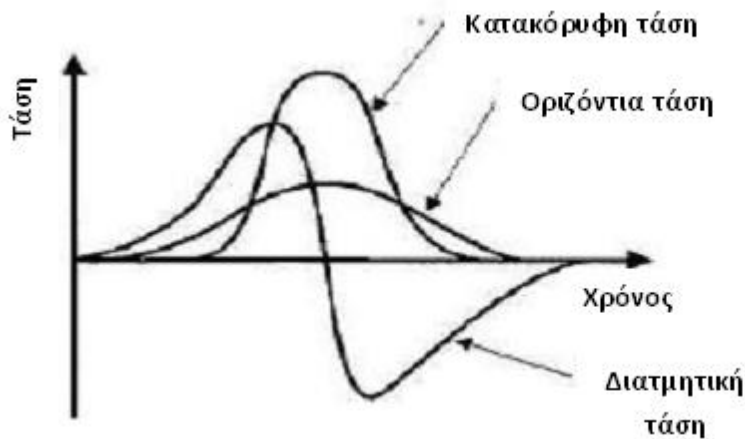
παίζει η πίεση, το είδος των ελαστικών (π.χ. τα ελαστικά με καρφιά φθείρουν το ασφαλτικό υλικό) και η εγκάρσια θέση των τροχών. Συνεπώς η κυκλοφορία των οχημάτων προκαλεί φθορές στο οδόστρωμα και τελικά υποβαθμίζει τη λειτουργικότητά του (Λοΐζος, 1990 και 2008).



Εικόνα 2.6 Συμπεριφορά ενός οδοστρώματος έναντι της επιβολής φορτίου τροχού (CHEN et al., 2009)



Εικόνα 2.7 Τάσεις που αναπτύσσονται κάτω από το φορτίο ενός τροχού κατά την κατεύθυνση της κυκλοφορίας- Περιστροφή των κύριων τάσεων (Acikgoz and Rauf, 2010)



Εικόνα 2.8 Τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα τυχαίο σημείο κατά τη διάρκεια της διελεύσεως φορτίου (Acikgoz and Rauf, 2010)

Το διάγραμμα της εικόνας 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 προσήμου (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 ασφαλτικής στρώσης λόγω των επαναλαμβανόμενων φορτίων κυκλοφορίας, η αρχή της δημιουργίας της παρατηρείται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων όπου έχουμε τις μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις .

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.

2.6. Επίδραση των αδρανών υλικών στην παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλικών μιγμάτων

Τα αδρανή υλικά αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό ενός ασφαλικού μίγματος και είναι υπεύθυνα για την αντοχή και τη ανθεκτικότητα του μίγματος. Οι φυσικές ιδιότητες των αδρανών επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Η παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλικών μιγμάτων μπορεί να προκύψει από χαμηλή διατμητική αντοχή, συγκρινόμενη με την συνεχόμενη τάση στην οποία υποβάλλεται το μίγμα. Η διατμητική αντοχή των συνεκτικών υλικών συμπεριλαμβανομένων των ασφαλικών μιγμάτων, εκφράζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\tau = c + \sigma * \tan(\varphi)$$

Όπου:

τ = Διατμητική αντοχή

c = Συνοχή

σ = Ορθή τάση (Normal stress)

φ = Γωνία εσωτερικής τριβής

Για να έχει κανείς μια εικόνα το πώς τα αδρανή επηρεάζουν τη διατμητική αντοχή των ασφαλικών μιγμάτων θα πρέπει να δει τη συμβολή των παραγόντων c και φ στην παραπάνω

εξίσωση. Για δεδομένο επίπεδο τάσης, θερμοκρασίας και ρυθμού φόρτισης η διατμητική αντοχή εξαρτάται από τη συνοχή c και την γωνία εσωτερικής τριβής ϕ . Η συνοχή c επηρεάζεται από το ιξώδες της ασφάλτου και το ποσοστό των λεπτόκοκκων αδρανών. Η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ εξαρτάται από το σκελετό των αδρανών. Υψηλές τιμές του ϕ μπορούν να επιτευχθούν, όταν τα αδρανή είναι τραχιές υφής, γωνιώδη και καλά διαβαθμισμένα. Πετυχαίνοντας τα παραπάνω, δημιουργείται ένας ισχυρός μηχανικά σκελετός αδρανών στο ασφαλτικό μίγμα, ο οποίος παρέχει αντίσταση σε διατμητική τάση. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ποσοστό της ασφάλτου επηρεάζει επίσης τη γωνία τριβής ϕ , γιατί αλλάζει τον βαθμό μηχανικής αλληλοσύνδεσης μεταξύ των κόκκων των αδρανών. Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό της ασφάλτου στο μίγμα τόσο περισσότερο χώρο καταλαμβάνει η άσφαλτος και απομακρύνει τους κόκκους των αδρανών μεταξύ τους.

Το πρόγραμμα SHRP (Strategic Highway Research Program) διαχώρισε τις ιδιότητες των αδρανών σε δυο κατηγορίες: της συναινετικές (consensus) και τις ιδιότητες της πηγής προέλευσης. Οι συναινετικές ιδιότητες περιλαμβάνουν την κοκκομετρική καμπύλη, τη γωνιότητα των χονδρόκοκκων αδρανών, τη γωνιότητα των λεπτόκοκκων αδρανών, τους επίμηκες και πλακοειδείς κόκκους και το ποσοστό της παιπάλης. Οι ιδιότητες της πηγής προέλευσης περιλαμβάνουν τη σκληρότητα-ανθεκτικότητα, την καθαρότητα και τα επιβλαβή υλικά. Όλες αυτές οι ιδιότητες επηρεάζουν τη συμπεριφορά του οδοστρώματος, αλλά η διεθνής βιβλιογραφία έχει ξεχωρίσει την 1) κοκκομετρική καμπύλη 2) τη γωνιότητα των αδρανών 3) το ποσοστό της παιπάλης σαν τις ιδιότητες οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων.

2.7. Επίδραση της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση

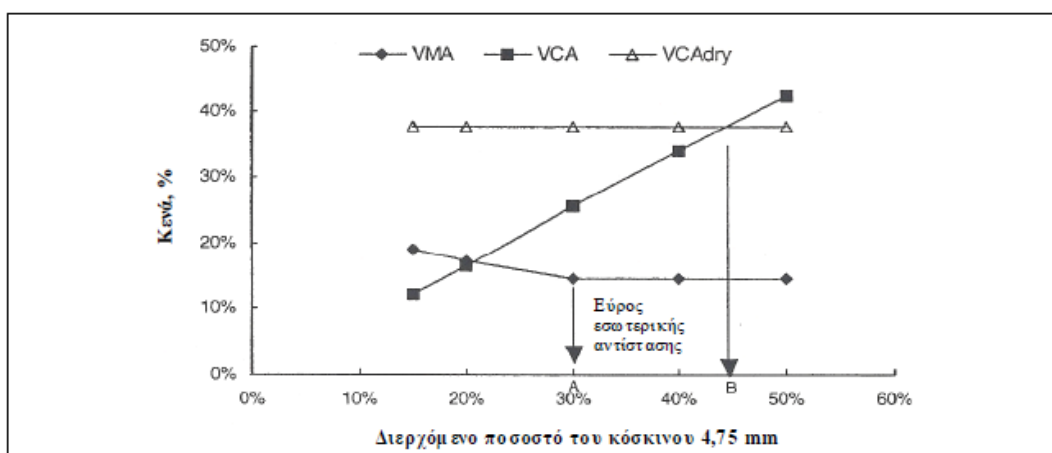
Η κοκκομετρική καμπύλη των αδρανών ενός ασφαλτικού μίγματος αναφέρεται στην κατανομή των κόκκων των αδρανών, όπως αυτή προκύπτει μετά από κοσκίνισμα σε συγκεκριμένα, ανά ασφαλτικό μίγμα κόσκινα.

Η κοκκομετρική καμπύλη συνδέεται άμεσα με τα κενά στο σκελετό των αδρανών (VMA) του ασφαλτικού μίγματος. Θα πρέπει λοιπόν να εξασφαλίζει ικανοποιητικά κενά στο σκελετό των αδρανών έτσι ώστε να δημιουργούνται ισχυροί δεσμοί μεταξύ των κόκκων αλλά και να εξασφαλίζονται αρκετά κενά αέρος στο μίγμα, ανάλογα με το ποσοστό ασφάλτου.

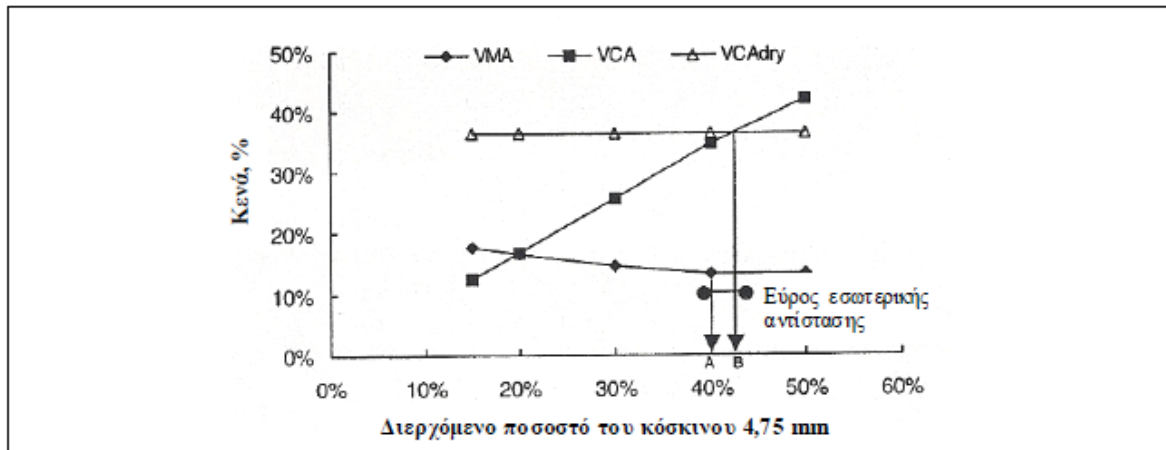
Οι Chen και Liao (2002) ξεκινώντας από την έννοια VMA εισήγαγαν τις έννοιες VCA (Κενά στο σκελετό των χονδρόκοκκων αδρανών) και VCA_{dry} (Κενά στο σκελετό των χονδρόκοκκων αδρανών σε ξηρή κατάσταση) και συνδύασαν την αντίσταση σε

παραμένουσα παραμόρφωση μιγμάτων ονομαστικού κόκκου 9,5 mm και 19 mm, με το ποσοστό των αδρανών του μίγματος διερχόμενων του 4,75 mm κοσκίνου. Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, οι ερευνητές βρήκαν ότι η εσωτερική αντίσταση του 9,5 mm μίγματος παρουσιάζεται σε μια περιοχή, που το ποσοστό των αδρανών του μίγματος διερχόμενων από το 4,75 mm κόσκινο, κυμαίνεται από 30 - 45%. Το αντίστοιχο εύρος για το 19 mm μίγμα είναι 40 - 42%. Από τα παραπάνω συμπεραίνουν ότι καθώς μικραίνει ο ονομαστικός κόκκος το εύρος της εσωτερικής αντίστασης του μίγματος αυξάνεται. Επίσης για το 19 mm μίγμα σε έλεγχο τροχοαυλάκωσης, όντως η καμπύλη με 40% αδρανή διερχόμενα του 4,75 έχει την καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με καμπύλες 30% και 50%. Αυτό φαίνεται στο δεύτερο σχήμα.

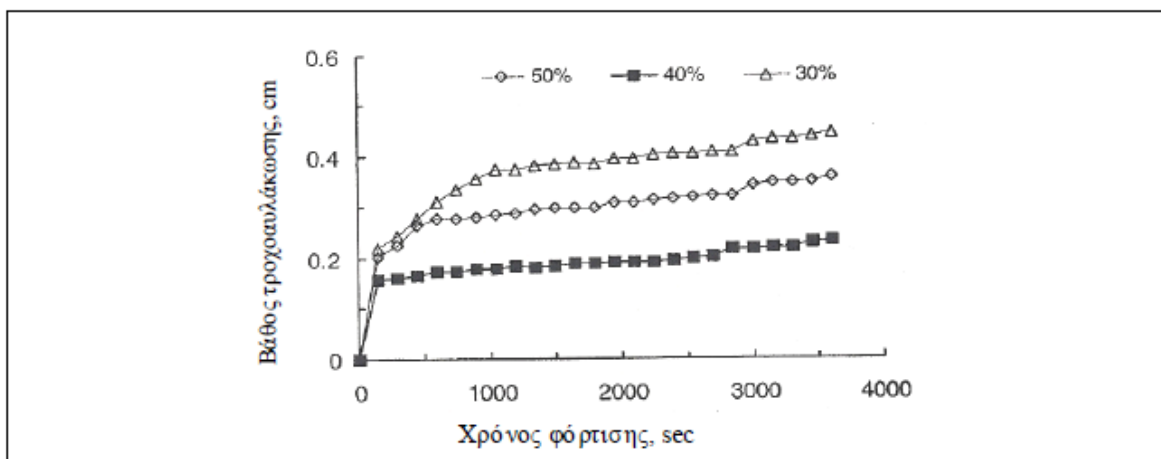
Άλλα μέτρα εκτίμησης της κοκκομετρικής καμπύλης, τα οποία σχετίζονται άμεσα με την αντίσταση του μίγματος σε παραμένουσα παραμόρφωση είναι η απόσταση της κοκκομετρικής καμπύλης από την καμπύλη μέγιστης πυκνότητας του Fuller καθώς και η απόκλιση της, από την κρίσιμη περιοχή που θεσπίστηκε από το Asphalt Institute.



Διάγραμμα 2.1 Επιρροή των κενών μίγματος 9,5 mm στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση



Διάγραμμα 2.2 Επιρροή των κενών μίγματος 19 mm στην αντίσταση σε παραμένονσα παραμόρφωση



Διάγραμμα 2.3 Επίδραση του διερχόμενου ποσοστού του 4,75 mm κόσκινου, στην αντίσταση σε παραμένονσα παραμόρφωση

Η καμπύλη μέγιστης πυκνότητας είναι αυτή, στην οποία οι κόκκοι των αδρανών προσαρμόζονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να δίνουν την πυκνότερη διάταξη, δηλαδή μίγμα με τη μέγιστη δυνατή να επιτευχθεί πυκνότητα και το ελάχιστο δυνατό VMA.

Χαρακτηριστικά διαγράμματα των καμπυλών Fuller εκφραζόμενες και με τις δυο εξισώσεις δίνονται στα παρακάτω.

$$p = 100\left(\frac{d}{D}\right)^{0.5}$$

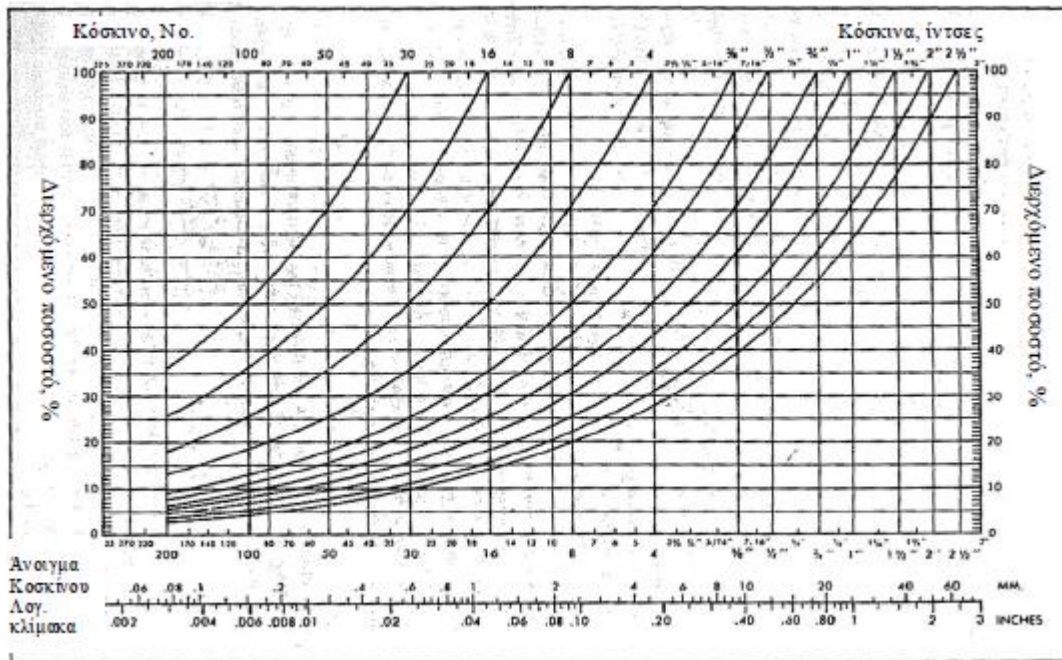
$$p = 100\left(\frac{d}{D}\right)^{0.45}$$

Όπου:

p = Αθροιστικό διερχόμενο ποσοστό από συγκεκριμένο κόσκινο

c = Μέγεθος οπής κόσκινου

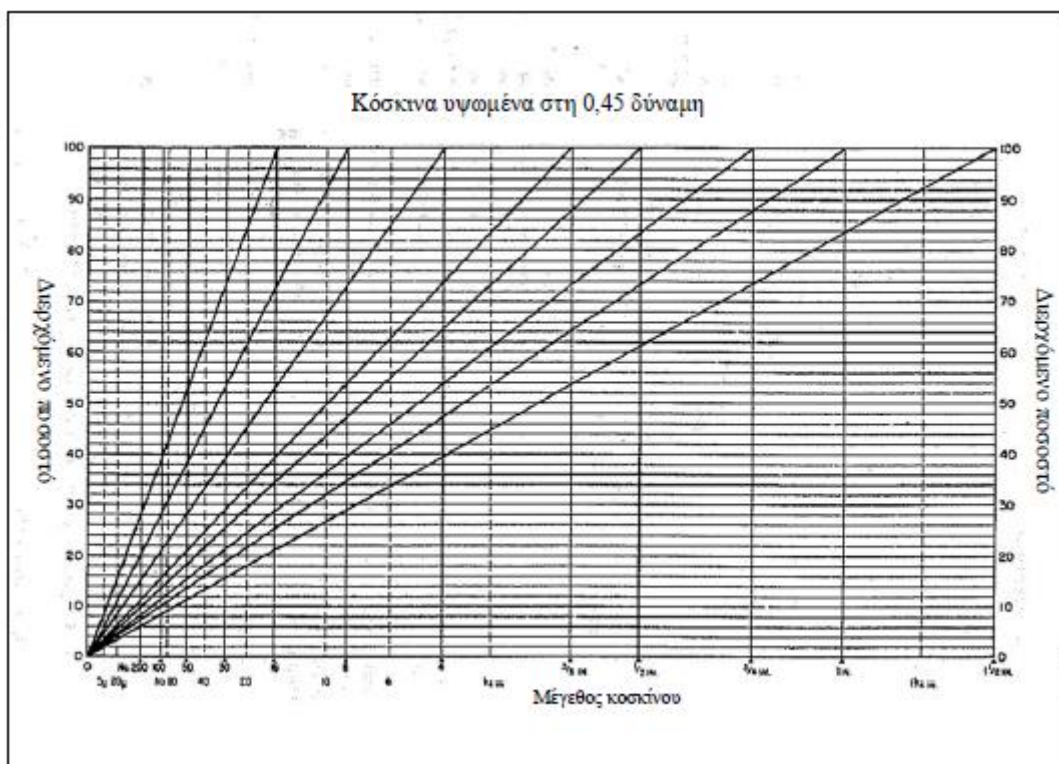
σ = Μέγεθος οπής μεγαλύτερου κόσκινου της κοκκομετρικής καμπύλης



Διάγραμμα 2.4 Διάγραμμα απεικόνισης καμπυλών Fuller

Ασφαλτομίγματα με τέτοια κοκκομετρική καμπύλη συμπυκνώνονται πολύ εύκολα, αλλά τείνουν σε μια πολύ πυκνή διάταξη κόκκων, με αποτέλεσμα το ποσοστό κενών να είναι το χαμηλότερο δυνατό που μπορεί να επιτευχθεί.

Μικρό ποσοστό κενών στο ασφαλτόμιγμα, σε κάποια χρονική στιγμή, αφού το οδόστρωμα δοθεί στην κυκλοφορία, προκαλεί αστάθεια του ασφαλτομίγματος λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης η ανάδυση της ασφάλτου, από την επανά-διάταξη των κόκκων με την πρόσθετη συμπύκνωση από την κυκλοφορία. Αυτό στο οδόστρωμα εκδηλώνεται ως τροχοαυλάκωση. Ειδικότερα οι Cross και Brown έδειξαν ότι το ποσοστό κενών κάτω από 3% αυξάνει ραγδαία την πιθανότητα πρόωρης τροχοαυλάκωσης.



Διάγραμμα 2.5 Διάγραμμα απεικόνισης καμπυλών Fuller με κόσκινα υψωμένα στη 0,45 δύναμη

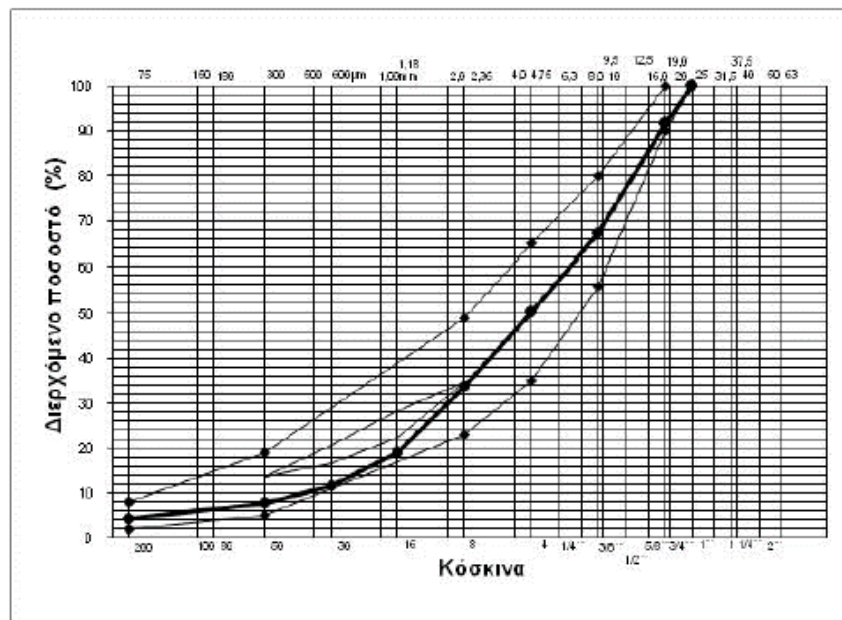
Επίσης ασφαλτομίγματα με κοκκομετρική καμπύλη κοντά στην καμπύλη μέγιστης πυκνότητας είναι υπερευαίσθητα στην πλαστική (παραμένουσα) παραμόρφωση από πιθανή έστω και μικρή, αύξηση της περιεκτικότητας της ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα.

Επιπρόσθετα, για το ίδιο ποσοστό ασφάλτου, ασφαλτομίγματα με κοκκομετρική καμπύλη κοντά στην καμπύλη μέγιστης πυκνότητας είναι υπερευαίσθητα στην πλαστική παραμόρφωση από πιθανή αλλαγή τις σκληρότητας της ασφάλτου.

Η άλλη παράμετρος, η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κοκκομετρικής καμπύλης σε σχέση με την αντίσταση του μίγματος σε παραμένουσα παραμόρφωση, είναι η κρίσιμη περιοχή η αλλιώς απαγορευμένη ζώνη. Κρίσιμη περιοχή είναι η περιοχή αυτή, από την οποία συνίσταται να μη διέρχεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του μίγματος από αυτή. Τέτοια μίγματα εκτιμάται ότι έχουν επιπροσθέτως μειωμένη αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση, κατά τη διάρκεια απόδοσης του οδοστρώματος στην κυκλοφορία. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται χαρακτηριστικά η κρίσιμη περιοχή και τα όρια της κοκκομετρικής καμπύλης ενός ασφαλτικού σκυροδέματος με μέγιστο ονομαστικό κόκκο 20 mm (ΑΣ 20).

Η κρίσιμη περιοχή καθιερώθηκε κατά τις πρώτες οδηγίες του Superpave, ώστε να περιορίσει ποσοστό των στρογγυλευμένων κόκκων φυσικής άμμου, στα μίγματα του Superpave η οποία

και αποτελούσε την αιτία για μίγματα ασταθή, τα οποία παρουσίαζαν πρόωρη τροχοαυλάκωση. Αναλυτικότερα οι κύριοι στόχοι της χρήσης της κρίσιμης περιοχής ήταν δυο. Ο πρώτος ήταν να κρατήσει τις κοκκομετρικές καμπύλες μακριά από τη γραμμή της μέγιστης πυκνότητας. Οι λόγοι για τους οποίους αυτό ήταν απαραίτητο, αναλύθηκαν στις παραπάνω παραγράφους. Ο δεύτερος λόγος ήταν ότι στις ΗΠΑ είχε παρατηρηθεί η χρήση ασφαλικών μιγμάτων, τα οποία παρουσίαζαν εξαιρετική ευαισθησία κατά τη διάστρωση και συμπύκνωση τους. Τα μίγματα αυτά, είχαν υψηλό ποσοστό φυσικής άμμου και οι κοκκομετρικές τους καμπύλες παρουσίαζαν μια κύρτωση μεταξύ των κοσκίων No 30 και No 100 (0,60-0,15 mm) Αυτές οι κυρτωμένες κοκκομετρικές καμπύλες διέρχονταν από την κρίσιμη περιοχή.



Διάγραμμα 2.6 Κρίσιμη περιοχή και όρια για ΑΣ 20

Παρότι το Asphalt Institute ακόμη και σήμερα, συνιστά να μην διέρχονται οι κοκκομετρικές καμπύλες των ασφαλικών μιγμάτων από την κρίσιμη περιοχή ισχυρές αντιρρήσεις προβάλλονται από διάφορους ερευνητές. Η αντιπαράθεση ξεκίνησε όταν η κρίσιμη περιοχή και γενικότερα τα κριτήρια του Superpave υιοθετήθηκαν από δυο μεγάλους οργανισμούς ΗΠΑ. Την Federal Highway Administration (FHWA) και την American of State Highway Transportation Officials (AASHTO). Οι κυριότερες έρευνες, οι οποίες επικεντρώθηκαν στο να αποδείξουν η όχι την αξιοπιστία της κρίσιμης περιοχής, δίνονται συνοπτικά παρακάτω:

Με σκοπό να καθοριστεί η χρησιμότητα της κρίσιμης περιοχής μια ευρεία έρευνα ξεκίνησε, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο National Center of Asphalt Technology (NCAT) στο πανεπιστήμιο του Auburn και τα αποτελέσματα της δημοσιεύθηκαν στο NSHRP Report 464. Ο κύριος στόχος της έρευνας αυτής ήταν να καθορίσει τις συνθήκες κάτω από τις οποίες η κρίσιμη περιοχή θεωρείται απαραίτητη ως κριτήριο, όταν τα ασφαλτικά μίγματα πληρούν όλες τις άλλες απαιτήσεις κατά Superpave. Τα συμπεράσματα της έρευνας ήταν ότι τα ασφαλτικά μίγματα με κοκκομετρικές καμπύλες, οι οποίες διέρχονταν της κρίσιμης περιοχής, είχαν συμπεριφορά παρόμοια η καλύτερη από ασφαλτικά μίγματα με κοκκομετρικές καμπύλες έξω από την κρίσιμη περιοχή, με την προϋπόθεση ότι πληρούνται όλα τα άλλα κριτήρια του Superpave. Οι κοκκομετρικές καμπύλες που ελέγχθηκαν είχαν μέγιστο ονομαστικό κόκκο αδρανών 3/8 in (9,5 mm) και 3/4 in (19mm). Το τελικό συμπέρασμα ήταν ότι η κρίσιμη περιοχή, για τις κοκκομετρικές καμπύλες με μέγιστο ονομαστικό κόκκο 3/8 in και 3/4 in, η κρίσιμη περιοχή αποτελεί μια περιττή απαίτηση.

Οι Kandhal και Mallick (2001) διεξήγαγαν μια έρευνα για να ελέγξουν την επίδραση της κοκκομετρικής καμπύλης, του σχήματος και της υφής των αδρανών στην παραμένουσα παραμόρφωση κλειστού τύπου ασφαλτικών μιγμάτων. Ασφαλτικά μίγματα με διαφορετικά αδρανή (αμμοχαλικώδη, ασβεστολιθικά και γρανιτικά) και διαφορετικές καμπύλες (διερχόμενες πάνω κάτω και μέσα από την κρίσιμη περιοχή) αξιολογήθηκαν με δυο συσκευές μέτρησης της παραμένουσας παραμόρφωσης, το Asphalt Pavement Analyzer και (APA) Superpave Shear tester (SST). Η πρώτη είναι μια συσκευή ελέγχου με το APA, προέκυψε ότι τα ασφαλτικά μίγματα με κοκκομετρικές καμπύλες διερχόμενες κάτω από την κρίσιμη περιοχή, με γρανιτικά και ασβεστολιθικά αδρανή ήταν πιο επιρρεπή σε τροχοαυλάκωση από αυτά με κοκκομετρικές καμπύλες, με τα ίδια αδρανή, διερχόμενες μέσα και πάνω από την κρίσιμη περιοχή. Ασφαλτικά μίγματα με κοκκομετρικές καμπύλες διερχόμενες κάτω από την κρίσιμη περιοχή και με αμμοχαλικώδη αδρανή, στις περισσότερες περιπτώσεις, επέδειξαν το χαμηλότερο ποσοστό τροχοαυλάκωσης. Από τα αποτελέσματα με τη χρήση του SST δε βρέθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ασφαλτικών μιγμάτων με γρανιτικά αδρανή και κοκκομετρικές καμπύλες διερχόμενες πάνω, μέσα η κάτω από την κρίσιμη περιοχή. Αντίθετα ασφαλτικά μίγματα με ασβεστολιθικά αδρανή παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή που παρουσίασαν με τη χρήση του APA, με τα μίγματα με κοκκομετρικές καμπύλες διερχόμενες κάτω από την κρίσιμη περιοχή να έχουν την υψηλότερη μέγιστη παραμόρφωση.

Ο Hand et al (2001) αξιολογήσαν την επίδραση της κοκκομετρικής καμπύλης και του μέγιστου ονομαστικού κόκκου στην παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλικών μιγμάτων. Εικοσιένα μίγματα υποβλήθηκαν σε τριαξονικές δοκιμές και σε ελέγχους τροχοαυλάκωσης. Κατέληξαν ότι ο μέγιστος ονομαστικός κόκκος των αδρανών δεν επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά των ασφαλικών μιγμάτων. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων έδειξαν ότι ασφατικά μίγματα με κοκκομετρικές καμπύλες διερχόμενες πάνω και μέσα από την κρίσιμη περιοχή επέδειξαν μεγαλύτερη αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση από αυτά με κοκκομετρικές καμπύλες διερχόμενες κάτω από την κρίσιμη περιοχή.

Ο Hand και Erps (2001) έκαναν μια σύνοψη της έρευνας που είχε γίνει μέχρι τότε αναφορικά με την επίδραση της κοκκομετρικής καμπύλης σε σχέση με την κρίσιμη περιοχή, στη συμπεριφορά των ασφαλικών μιγμάτων. Έλαβαν υπόψη τους δεκατρία άρθρα και εκθέσεις έρευνας σχετικά με την επίδραση της κοκκομετρικής καμπύλης σε σχέση με την κρίσιμη περιοχή, τα οποία χρησιμοποιούσαν διάφορους ελέγχους της συμπεριφοράς των ασφαλικών μιγμάτων, όπως έλεγχοι σε στατικό και δυναμικό ερπυσμό, τριαξονικές δοκιμές, ελέγχους τροχοαυλάκωσης και ελέγχους κόπωσης. Ένα γενικό συμπέρασμα της σύνοψης ότι ασφατικά μίγματα με λεπτόκοκκες κοκκομετρικές καμπύλες (διερχόμενες πάνω και μέσα από την κρίσιμη περιοχή) συνήθως παρουσίαζαν καλύτερη συμπεριφορά, από ασφατικά μίγματα με κοκκομετρικές καμπύλες διερχόμενες κάτω από την κρίσιμη περιοχή. Παρ' όλα αυτά καταλήγουν ότι ικανοποιητική συμπεριφορά παρουσίαζαν ασφατικά μίγματα με εύρος κοκκομετρικών καμπυλών πάνω έως κάτω της κρίσιμης περιοχής, δηλώνοντας ότι δεν υπάρχει σχέση μεταξύ της θέσης της κοκκομετρικής καμπύλης, ως προς την κρίσιμη περιοχή, με τη συμπεριφορά των ασφαλικών μιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση η κόπωση.

Ο Chowdhury et al (2001) εκτέλεσαν μια ευρεία έρευνα για τη σχέση της κρίσιμης περιοχής με την αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλικών μιγμάτων.

Χρησιμοποίησαν διαφορετικούς τύπους αδρανών (θραυστά γρανιτικά, θραυστά ασβεστολιθικά, θραυστό αμμοχάλικο ποταμού και ένα μίγμα από θραυστό αμμοχάλικο ποταμού και φυσικής άμμου) και διαφορετικές κοκκομετρικές καμπύλες (διερχόμενες κάτω μέσα και πάνω από την κρίσιμη περιοχή). Για την αξιολόγηση των μιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση χρησιμοποιήθηκαν πολλοί και διαφορετικοί έλεγχοι ερπυσμού και τροχοαυλάκωσης. Η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει σχέση μεταξύ της παραμένουσας παραμόρφωσης και της διέλευσης η μη της κοκκομετρικής καμπύλης από την κρίσιμη περιοχή. Προτάθηκε δε η εξάλειψη της κρίσιμης περιοχής από τις προδιαγραφές των ασφαλικών μιγμάτων.

Ο Nukunya et al (2002) αξιολόγησαν την κρίσιμη περιοχή σαν κριτήριο στο σχεδιασμό των ασφαλικών μιγμάτων χρησιμοποιώντας γωνιώδη και μη γωνιώδη αδρανή και κατέληξαν ότι ασφατικά μίγματα με κοκκομετρικές καμπύλες, διερχόμενες κάτω από την κρίσιμη περιοχή δεν έχουν μεγάλη αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση, εξαιτίας του υψηλού ποσοστού ασφάλτου που απαιτούν και το οποίο δημιουργεί πρόβλημα στην επίτευξη του ελάχιστου VMA. Οι Khandal και Cooley (2002) συνέκριναν ασφατικά μίγματα κατά Superpave με χονδρόκοκκες (διερχόμενες κάτω από την κρίσιμη περιοχή) και λεπτόκοκκες (διερχόμενες πάνω από την κρίσιμη περιοχή) κοκκομετρικές καμπύλες ως προς την αντίσταση τους σε παραμένουσα παραμόρφωση. Βάσει των αποτελεσμάτων δεν υπήρχε σημαντική διαφορά στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση μεταξύ των ασφαλικών μιγμάτων που εξετάστηκαν.

Ο Sebaaly et al (2004) ανέλυσαν εργαστηριακά αποτελέσματα από δείγματα ασφαλικών μιγμάτων που ελήφθησαν από τομείς ελέγχου σε οδούς της πολιτείας της Νεβάδα. Οι τομείς ελέγχου περιλάμβαναν διάφορους τύπους ασφαλικών μιγμάτων και τυπικούς κυκλοφοριακούς φόρτους και κλιματολογικές συνθήκες της Νεβάδα. Η απόδοση των μιγμάτων στο πεδίο παρακολούθηθηκε ως και 5 χρόνια μετά τη διάστρωση. Το συμπέρασμα τους, αναφορικά με τις κοκκομετρικές καμπύλες, ήταν ότι τα μίγματα με κοκκομετρικές καμπύλες διερχόμενες μέσα από την κρίσιμη περιοχή είχαν καλύτερη συμπεριφορά από μίγματα με χονδρόκοκκες καμπύλες (κάτω από την κρίσιμη περιοχή). Επίσης κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα μίγματα με κοκκομετρικές καμπύλες διερχόμενες μέσα από την κρίσιμη περιοχή είχαν υψηλότερο μέτρο δυσκαμψίας από μίγματα, των ίδιων υλικών με καμπύλες διερχόμενες κάτω από την κρίσιμη περιοχή.

Ο Zhang et al (2004) ερεύνησαν τις συνέπειες της κρίσιμης περιοχής στη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση. Στην έρευνα τους χρησιμοποίησαν κοκκομετρικές καμπύλες διερχόμενες πάνω, μέσα και κάτω από την κρίσιμη περιοχή. Εκτελώντας δοκιμές τροχοαυλάκωσης κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα ασφατικά μίγματα με κοκκομετρικές καμπύλες που παραβίαζαν την κρίσιμη περιοχή είχαν παρόμοια η και καλύτερη συμπεριφορά από αυτά με κοκκομετρικές καμπύλες εκτός κρίσιμης περιοχής (πάνω η κάτω από αυτήν). Παράλληλα διαπίστωσαν ότι η συμπεριφορά σε παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλικών μιγμάτων με κοκκομετρικές καμπύλες κάτω από την κρίσιμη περιοχή ήταν πιο ευαίσθητη σε αλλαγές των ιδιοτήτων των αδρανών, από ότι αυτή των μιγμάτων με κοκκομετρικές καμπύλες διερχόμενες μέσα η πάνω από την κρίσιμη περιοχή.

Τέλος ο Kim (2006) έκανε μια έρευνα για τον οργανισμό Nebraska Department of Roads σχετικά με τη χρησιμότητα της κρίσιμης περιοχής και τη σχέση της με την αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλτομιγμάτων που χρησιμοποιούταν κυρίως σε δρόμους μικρού κυκλοφοριακού φόρτου. Κατέληξε ότι τα ασφαλτικά μίγματα με λεπτόκοκκες καμπύλες είχαν συμπεριφορά όμοια η και καλύτερη από μίγματα με χονδρόκοκκες καμπύλες και συνεπώς η κρίσιμη περιοχή δεν θα έπρεπε να είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την συμπεριφορά των μιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση.

2.8. Επίδραση της γωνιότητας των αδρανών στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση

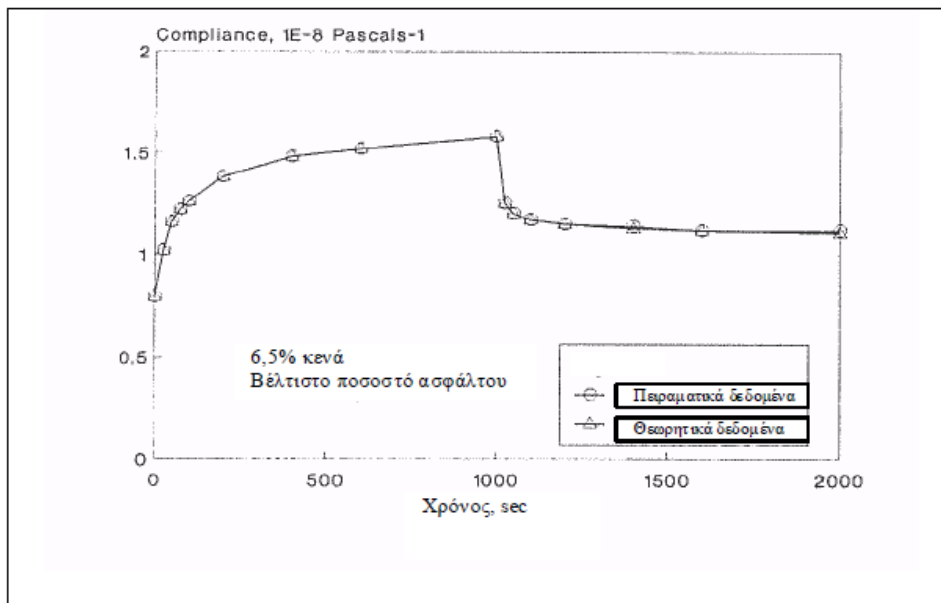
Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να αξιολογήσουν την επίδραση της γωνιότητας των αδρανών στην αντίσταση των ασφαλτικών μιγμάτων σε παραμόρφωση. Οι περισσότεροι συμφωνούν ότι η επίδραση της γωνιότητας των αδρανών είναι σημαντική. Από πολλούς δίνεται έμφαση στη γωνιότητα των λεπτοκόκκων αδρανών (ουσιαστικά μιλάνε για το κλάσμα της άμμου) σαν ένα σημαντικό παράγοντα επίδρασης στην παραμένουσα παραμόρφωση.

Ο Perdomo et al (1992) ερευνητές ερευνώντας την επίδραση της μορφής και του σχήματος των κόκκων στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση χρησιμοποίησαν αρχικά κοκκομετρικές καμπύλες με στρόγγυλους και λείους κόκκους άμμου για ασφαλτομίγματα που εξετάστηκαν ως προς την αντίστασή τους σε παραμένουσα παραμόρφωση. Σε δεύτερο στάδιο, αντικατέστησαν τους κόκκους αυτούς με τραχείς, γωνιώδεις και πορώδεις κόκκους άμμου, κρατώντας τα υπόλοιπα αδρανή και τη συνολική κοκκομετρική καμπύλη αμετάβλητα. Στη συνέχεια εξέτασαν τα ασφαλτικά μίγματα με τους γωνιώδεις κόκκους σε αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση. Τα εργαστηριακά τους αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ασφαλτικά μίγματα με 40% άμμο με στρόγγυλους κόκκους είχαν σημαντικά μικρότερη αντίστασή σε παραμένουσα παραμόρφωση. Τα παρακάτω 2 σχήματα δείχνουν τα αποτελέσματα της έρευνας.

Ο Kobayashi et al (1997) διεξήγαγαν μια εκτεταμένη έρευνα για την επίδραση του σχήματος των λεπτοκόκκων αδρανών στη συμπεριφορά των ασφαλτικών μιγμάτων. Το συμπέρασμα της έρευνας ήταν ότι η χρήση γωνιωδών λεπτοκόκκων αδρανών μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αντίσταση των ασφαλτικών μιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση.

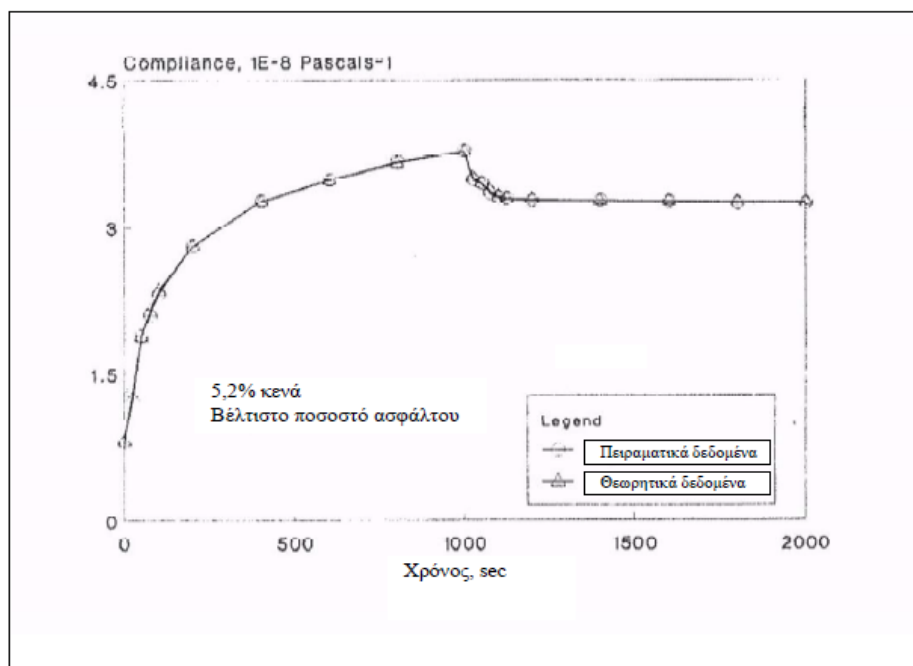
Ο Kim et al (1992) εξετάζοντας την επίδραση του τύπου (γωνιότητα) των αδρανών και της κοκκομετρικής καμπύλης στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση του ασφαλτικού σκυροδέματος και συμπεράναν ότι η γωνιότητα των αδρανών έχει σημαντική επίδραση σε

αυτή, υποδεικνύοντας μάλιστα καλύτερη συμπεριφορά από ασφαλτικά σκυροδέματα με αδρανή με τραχείς επιφάνειες και γωνιώδες σχήμα.



Διάγραμμα 2.7 Γραμμική απεικόνιση μιας τυπικής συμπεριφοράς σε ερπυσμό και αποφόρτιση ασφαλτικών μιγμάτων με 0% φυσική άμμο σε υψηλό ποσοστό κενών

Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και ο Toral et al (2005) επισημαίνοντας όμως ότι παράγοντες όπως η ορυκτολογική σύσταση των αδρανών και ο τρόπος θραύσης αυτών θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον καθορισμό της γωνιότητας των αδρανών. Επίσης τονίζουν ότι η συγκεκριμένη ιδιότητα θα πρέπει να ελέγχεται σε τακτικά χρονικά διαστήματα.



Διάγραμμα 2.8 Γραμμική απεικόνιση μιας τυπικής συμπεριφοράς σε ερυσμό και αποφόρτιση ασφαλτικών μιγμάτων με 40% φυσική άμμο σε υψηλό ποσοστό κενών

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η γωνιότητα των αδρανών αποτελεί μια σημαντική παράμετρο σχετικά με την αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων. Όπως προαναφέρθηκε, η διατμητική αντοχή των ασφαλτικών μιγμάτων εξαρτάται σημαντικά από ένα ισχυρό μηχανικά σκελετό αδρανών καθώς και από την τριβή που αναπτύσσεται στα σημεία της επαφής μεταξύ των κόκκων. Προφανώς η γωνιότητα των αδρανών παίζει ένα σημαντικό ρόλο στη δημιουργία ενός ισχυρού σκελετού αδρανών. Παρόλα αυτά η γωνιότητα των αδρανών αποτελεί μόνο ένα παράγοντα, από αυτούς που επηρεάζουν την αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων. Η χρήση μόνο γωνιωδών μπορεί να αποτελεί αναγκαία για μίγματα με υψηλή αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση αλλά σίγουρα, από μόνη της, δεν είναι ικανή.

2.9. Επίδραση της παιπάλης στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση

Ως παιπάλη χαρακτηρίζεται το υλικό διερχόμενο του κόσκινου No 200 (0,0075 mm) η του κοσκίνου 0,063 mm. Η παιπάλη προστίθεται στα ασφαλτικά μίγματα για παροχή μεγαλύτερης ευστάθειας. Δυο θεωρίες έχουν αναπτυχθεί σχετικά με το πώς επιδρά η παιπάλη στην ευστάθεια του ασφαλτομίγματος. Σύμφωνα με την πρώτη, η παιπάλη γεμίζει τα κενά μεταξύ των κόκκων των αδρανών, αυξάνοντας έτσι την πυκνότητα και την αντοχή του

ασφαλτομίγματος. Η δεύτερη θεωρία υποστηρίζει ότι η παιπάλη γίνεται μέρος του συνδετικού υλικού, με αποτέλεσμα να θεωρούμε συνδετικό υλικό παιπάλης-ασφάλτου. Οι κόκκοι της παιπάλης απορροφούν άσφαλο η συστατικά της ασφάλτου, αυξάνοντας έτσι το ιξώδες του ασφάλτου και κατά συνέπεια την αντοχή του μίγματος.

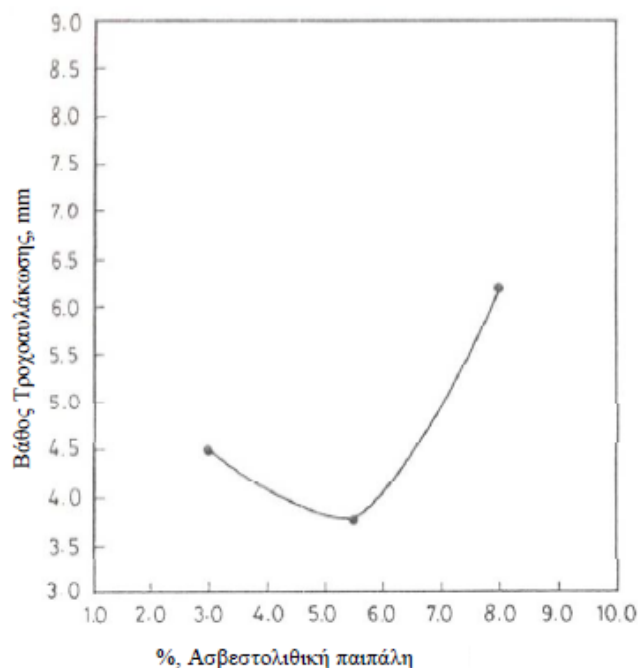
Σε υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες η συμπεριφορά των ασφαλτικών μιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση φτάνει σε κρίσιμο επίπεδο, απαιτείται το υψηλότερο δυνατόν ιξώδες του συνδετικού παιπάλης-ασφάλτου έτσι ώστε το μίγμα να είναι ισχυρό σε αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση. Η προθήκη παιπάλης στο μίγμα σε σταθερή θερμοκρασία αυξάνει το ιξώδες της ασφάλτου και κατ' επέκταση του ασφαλτικού μίγματος. Παρόλα αυτά υπάρχει ένα όριο στην προσθήκη παιπάλης στο μίγμα καθώς μεγάλο ποσοστό παιπάλης απαιτεί μεγαλύτερο ποσοστό ασφάλτου με συνέπεια να δημιουργούνται προβλήματα που σχετίζονται με υπερβολικό ποσοστό ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα.

Αρκετοί ερευνητές έδειξαν ότι διαφορετικά ποσοστά παιπάλης αυξάνουν με διαφορετικό τρόπο το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου (σκληραίνουν την άσφαλο). Παρατήρησαν αλλαγές στην εισδυτικότητα, στο ιξώδες, στην ολκιμότητα και στο σημείο μάλθωσης, οι οποίες έδειχναν σκλήρυνση της ασφάλτου μετά την προσθήκη παιπάλης είναι: 1) ο λόγος μεταξύ κινηματικού ιξώδους του συνδετικού υλικού ασφάλτου-παιπάλης προς το κινηματικό ιξώδες της ασφάλτου και 2) η αύξηση του σημείου μάλθωσης.

Ο Anderson et al (1992) μελέτησαν τις ρεολογικές ιδιότητες του συνδετικού υλικού παιπάλης ασφάλτου σε σχέση με την συμπεριφορά των ασφαλτικών μιγμάτων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 4 τύποι ασφάλτου κατά SHRP και 2 τύποι παιπάλης (ασβεστίτη και χαλαζία). Παρατήρησαν ότι η σκλήρυνση του συνδετικού υλικού λόγω της παρουσίας παιπάλης εξαρτάται από τον τύπο της ασφάλτου. Το γενικό συμπέρασμα ήταν ότι η παιπάλη μπορεί να βελτιώσει την αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση ενός ασφαλτικού μίγματος, εφόσον αυξάνει το μέτρο δυσκαμψίας του συνδετικού υλικού και το φαινόμενο αυτό καθορίζεται από τη σχέση ασφάλτου παιπάλης. Παρόλα αυτά οι συγγραφείς δεν προσδιόρισαν αν το φαινόμενο σχετίζεται και από την ποσότητα της παιπάλης στο μίγμα.

Ο Al-Suhaibani et al (1992) μελέτησαν την επίδραση του τύπου της παιπάλης στις ιδιότητες των ασφαλτικών σκυροδεμάτων. Τρεις τύποι παιπάλης χρησιμοποιήθηκαν: 1) ασβεστολιθική, 2) υδράσβεστου και τσιμέντου. Η επίδραση του τύπου και του ποσοστού της παιπάλης στην παραμένουσα παραμόρφωση του ασφαλτικού σκυροδέματος αξιολογήθηκε με τη δοκιμή της τροχοαυλάκωσης. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τη σχέση βάθους τροχοαυλάκωσης μετά από 10.000 κύκλους φόρτισης με το ποσοστό της ασβεστολιθικής παιπάλης. Τα συμπεράσματα της έρευνας ήταν τα εξής:

- Η παραμένουσα παραμόρφωση του ασφαλτικού σκυροδέματος εξαρτάται σε υψηλό βαθμό, από το σημείο μάλθωσης του συνδετικού υλικού ασφάλτου παιπάλης, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από τον τύπο και την ποσότητα της παιπάλης.
- Η παραμένουσα παραμόρφωση του ασφαλτικού σκυροδέματος εξαρτάται σε υψηλό βαθμό από την ποσότητα της υδράσβεστου αλλά όχι του τσιμέντου.
- Ασφαλτικά σκυροδέματα με ασβεστολιθική παιπάλη παρουσιάζουν μικρότερη παραμένουσα παραμόρφωση από ασφαλτικά σκυροδέματα με τσιμέντο ή υδράσβεστο.



Διάγραμμα 2.9 Επίδραση της ασβεστολιθικής παιπάλης στο βάθος τροχοαλάκωσης

Ο Kandhal et al (2002) χρησιμοποιώντας κοινή άσφαλτο έξι διαφορετικά αδρανή καθώς και τις παιπάλες αυτών, σε διαφορετικές αναλογίες δημιούργησαν δώδεκα ασφαλτικά μίγματα, τα οποία και αξιολόγησαν σε αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση. Ένα από τα κύρια συμπεράσματα της έρευνας τους ήταν ότι όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το υλικό που διέρχεται από το κόσκινο No 200 τόσο πιο πολύ τροποποιεί την άσφαλτο και σκληραίνει το ασφαλτικό μίγμα. Από τα παραπάνω γίνεται φανερή η επίδραση της παιπάλης στην παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων. Παρόλα αυτά, άλλες ιδιότητες του μίγματος όπως η εργασιμότητα η ευαισθησία σε ρηγμάτωση και η ευαισθησία του μίγματος παρουσία υγρασίας είναι αυτές που θα καθορίσουν την ποσότητα και τον τύπο της παιπάλης που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε ασφαλτικό μίγμα.

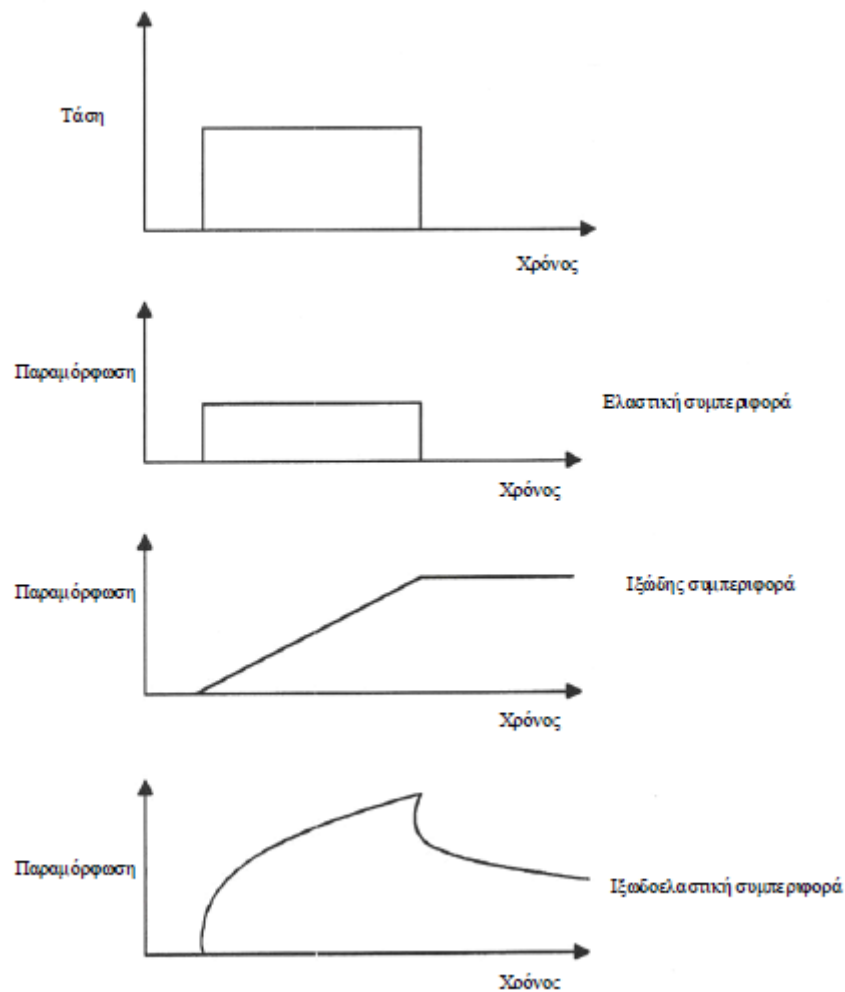
2.10. Επίδραση της ασφάλτου στην παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων

Εκτός από τα αδρανή, η άσφαλτος είναι το άλλο βασικό συστατικό ενός ασφαλτικού μίγματος. Η άσφαλτος είναι ένα ιξωδοελαστικό υλικό, η αντίσταση του οποίου σε παραμόρφωση εξαρτάται από το χρόνο φόρτισης και τη θερμοκρασία. Ένα ιξωδοελαστικό υλικό συνδυάζει την ελαστική συμπεριφορά, κατά την οποία το υλικό ανακτά πλήρως την αρχική του κατάσταση μετά την απομάκρυνση του επιβαλλόμενου φορτίου και την ιξώδη συμπεριφορά, κατά την οποία το υλικό παραμορφώνεται συνεχώς κάτω από την επιβολή φορτίου. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η απόκριση, σε επιβολή φορτίου, ενός ελαστικού, ενός ιξώδους και ενός ιξωδοελαστικού υλικού.

Η επίδραση της ασφάλτου μπορεί να αναλυθεί στην επίδραση του υψηλού ποσοστού της ασφάλτου και στην επίδραση των ιδιοτήτων της ασφάλτου.

2.11. Επίδραση του υψηλού ποσοστού της ασφάλτου

Το ποσοστό της ασφάλτου αποτελεί ένα κύριο παράγοντα στο σχεδιασμό των ασφαλτικών μιγμάτων. Η ποσότητα της ασφάλτου στο μίγμα επηρεάζει την ανθεκτικότητα και την απόδοση του ασφαλτικού μίγματος. Το μεγαλύτερο ποσοστό της διεθνούς έρευνας, σχετικά με την επίδραση της ασφάλτου στην παραμένουσα παραμόρφωση του ασφαλτομίγματος επικεντρώνεται στις ιδιότητες της ασφάλτου και λιγότερο στο ποσοστό αυτής στο ασφαλτόμιγμα. Σε κάθε περίπτωση, οι ερευνητικές προσπάθειες που εξέτασαν την επίδραση του υψηλού ποσοστού της ασφάλτου έδειξαν τη σημαντική συμβολή του στην παραμένουσα παραμόρφωση του ασφαλτομίγματος.



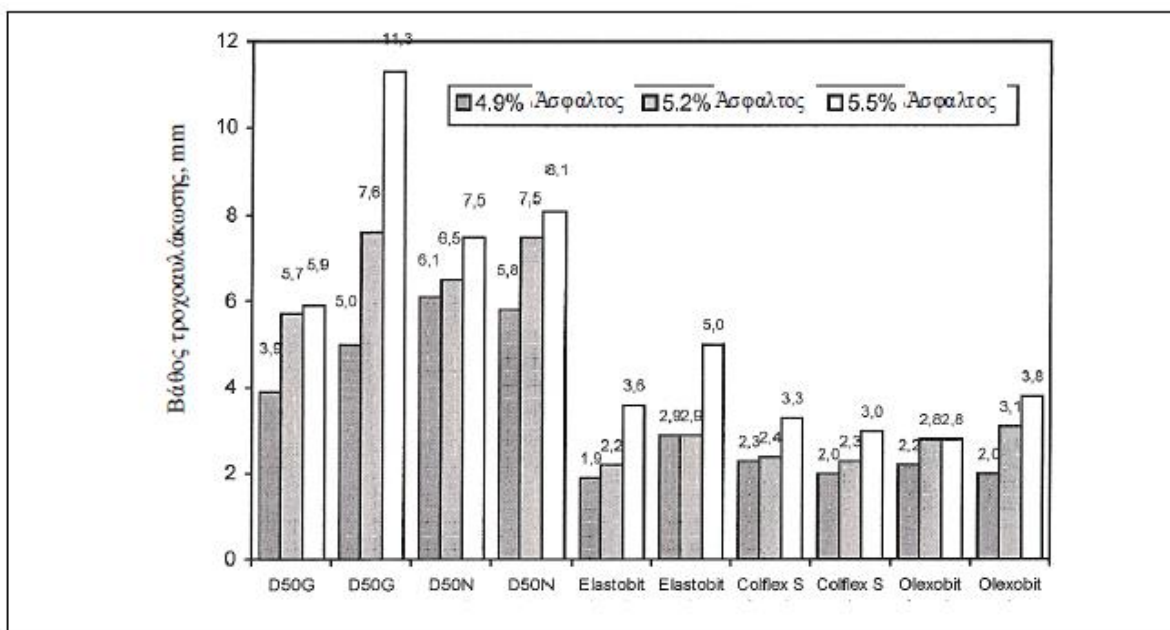
Εικόνα 2.9 Ιδανικές αποκρίσεις ενός ελαστικού, ενός ιξώδους και ενός ιξωδοελαστικού υλικού

Ο Brown (1993) στην έρευνα που έκανε για τη μηχανική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων SMA στις ΗΠΑ εξηγεί την αιτία της παραμόρφωσης των μιγμάτων παρουσία υψηλού ποσοστού ασφάλτου. Όταν λοιπόν η ποσότητα της ασφάλτου είναι υψηλή η ασφαλτος προκειμένου να καταλάβει το διατιθέμενο χώρο μέσα στο μίγμα καταλαμβάνει το χώρο μεταξύ αδρανών απομακρύνοντας τα μεταξύ τους και οδηγώντας τα στην απώλεια της επαφής κόκκου με κόκκο. Έτσι αποδυναμώνεται ο σκελετός των αδρανών και το μίγμα αποκτά ευαισθησία σε διάτμηση. Στο ίδιο αποτέλεσμα καταλήγουν ο Bogdanski et al (2002). Ερευνώντας τις μηχανικές ιδιότητες των ασφαλτικών μιγμάτων που χρησιμοποιούνται στην Πολωνία έδειξαν την καταλυτική επίδραση του υψηλού ποσοστού της ασφάλτου στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση. Χαρακτηριστικό είναι το παρακάτω σχήμα στο οποίο τα μίγματα με το υψηλότερο ποσοστό ασφάλτου εμφανίζουν και τη μεγαλύτερη τροχοαυλάκωσης.

Ο Gardette et al (2008) χρησιμοποιώντας 4 διαφορετικούς ελέγχους εξέτασαν τη συμπεριφορά ενός τυπικού ασφαλτομίγματος για ασφαλική βάση, σύμφωνα με τις Πορτογαλικές προδιαγραφές, σε τρία διαφορετικά ποσοστά ασφάλτου. Όλοι οι έλεγχοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι υψηλότερα ποσοστά ασφάλτου αντιστοιχούν σε υψηλότερους ρυθμούς παραμόρφωσης.

2.12. Επίδραση των ιδιοτήτων της ασφάλτου

Η επίδραση των ιδιοτήτων της ασφάλτου στην παραμένουσα παραμόρφωση του ασφαλτομίγματος αναφέρεται κυρίως στην ιξωδοελαστική συμπεριφορά αυτής και γενικότερα στη συμπεριφορά του ιξωδοελαστικού υλικού κάτω από φόρτιση.



Διάγραμμα 2.10 Μεταβολή του βάθους τροχουαλάκωσης σε σχέση με το ποσοστό ασφάλτου

Όπως προαναφέρθηκε, η παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλικών μιγμάτων είναι οι αθροισόμενες, απειροελάχιστες παραμένουσες παραμορφώσεις που προκύπτουν μετά από κάθε φόρτιση του ασφαλτομίγματος. Κάθε φορά που ένα φορτίο εφαρμόζεται, μια συγκεκριμένη ποσότητα έργου δαπανάται για την παραμόρφωση του ασφαλικού μίγματος. Μέρος του έργου αυτού ανακτάται κατά την ελαστική απόκριση του μίγματος ενώ, το υπόλοιπο έργο απόλλεται σε παραμένουσα παραμόρφωση και θερμότητα. Για να ελαχιστοποιηθεί η παραμένουσα παραμόρφωση, θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί το απολεσθέν έργο. Για ένα ιξωδοελαστικό υλικό το απολεσθέν έργο (W_C) σε κάθε κύκλο φόρτισης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$W_C = \pi * \sigma * \epsilon * \sin\delta$$

Όπου σ και ε είναι η τάση και η παραμόρφωση αντίστοιχα. Δεδομένου ότι η παραμένουσα παραμόρφωση των επιφανειακών στρώσεων θεωρείται σαν ένα κυκλικό φαινόμενο ελεγχόμενης τάσης (σ_0), η εξίσωση μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$W_c = \pi * \sigma_0 * \varepsilon * \sin\delta$$

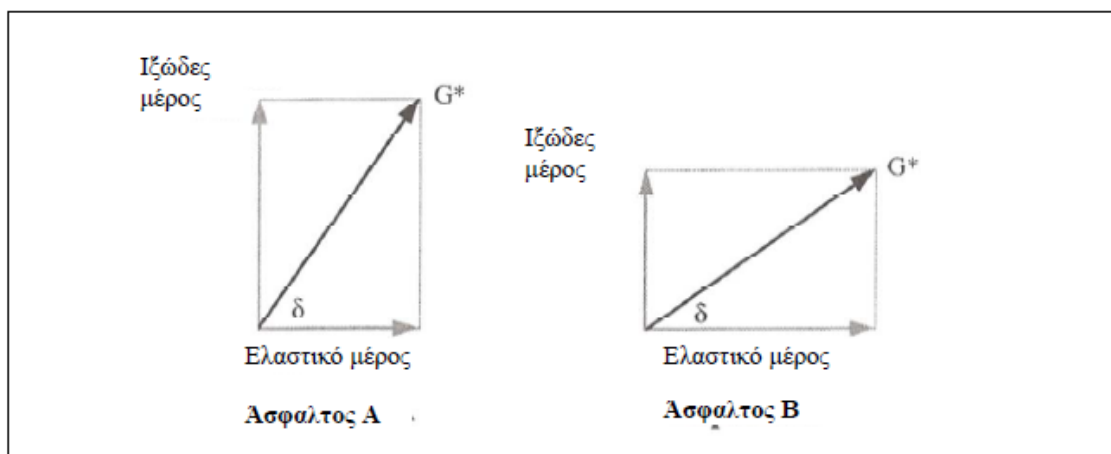
Και

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{G^*}$$

Οπότε

$$W_c = \pi\sigma_0^2 \left[\frac{1}{G^* \sin\delta} \right]$$

Επομένως, σύμφωνα με την τελευταία εξίσωση το απολεσθέν έργο σε κάθε κύκλο φόρτισης είναι αντιστρόφως ανάλογο του όρου $G^*/\sin\delta$, ο οποίος όπως αναφέρθηκε αποτελεί την παράμετρο που επιλέχθηκε από το πρόγραμμα SHRP, σαν μέτρο αντίστασης του ασφαλτομίγματος σε παραμόρφωση. Η παράμετρος αυτή συνδυάζει τη συνολική αντίσταση σε παραμόρφωση, η οποία και αποδίδεται με το G^* και τη σχετική μη ελαστικότητα της ασφάλτου, η οποία αποδίδεται με το $\sin\delta$. Το πώς με τα δυο αυτά στοιχεία υποδεικνύουν την παραμορφωσιμότητα μιας ασφάλτου από άλλη γίνεται φανερό από το παρακάτω παράδειγμα: Έστω δύο άσφαλτοι του παρακάτω σχήματος, που έχουν το ίδιο G^* , αλλά διαφορετικές γωνίες φάσης. Η άσφαλτος Α έχει μικρότερο ελαστικό (ανακτιήσιμο) μέρος από την άσφαλτο Β, ενώ η Β έχει μικρότερο ιξώδες (μη ανακτιήσιμο) μέρος από την Α. Αν το ίδιο φορτίο ασκηθεί και στις δυο ασφάλτους η άσφαλτος Α θα επιδείξει μεγαλύτερη μη ανακτιήσιμη παραμόρφωση από την Β.

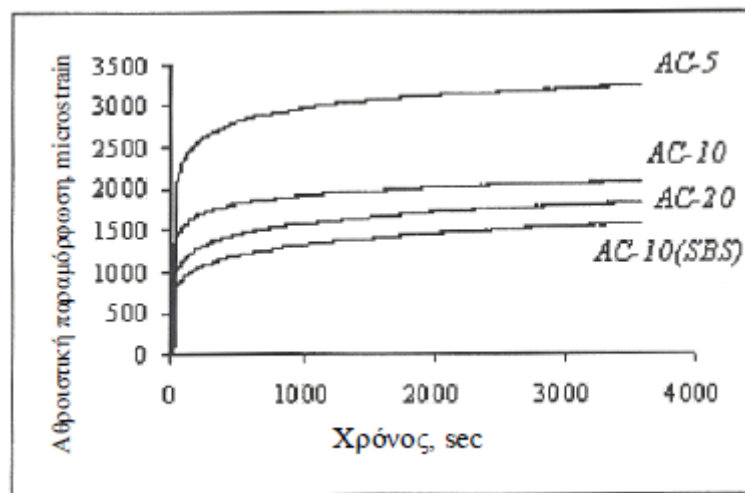


Εικόνα 2.10 Παραμορφωσιμότητα ασφάλτων με διαφορετικές γωνίες φάσης δ

Ένας από τους τρόπους που βελτιώνονται οι ιδιότητες της ασφάλτου και άρα μεγαλώνει το ελαστικό μέρος αυτής σε σχέση με το ιξώδες, είναι η χρήση τροποποιητών και ιδιαίτερα πολυμερικών ενώσεων.

Ο Airey et al (2004) έδειξε την ανώτερη συμπεριφορά των τροποποιημένων ασφάλτων σε σχέση με τις κοινές ασφάλτους. Επίσης έδειξε ότι κατά μέσο όρο, τα μίγματα με SBS τροποποιημένη ασφαλτο είχαν καλύτερη συμπεριφορά από αυτές που προαναφέρθηκαν με EVA. Επισημάναν ακόμη, ότι το να προσθέτει κανείς πολυμερή στην ασφαλτο δεν αποτελεί αυτόματη εγγύηση καλύτερης μηχανικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Η μορφολογία της φάσης ασφαλτος/πολυμερές (διασπορά του πολυμερούς στην ασφαλτο) και η διασφάλιση ενός τελικού συνεχούς μέσου έχουν σημαντικές συνέπειες στη συμπεριφορά του συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος σε παραμένουσα παραμόρφωση και κόπωση.

Οι Kok και Kuloglou (2007) έδειξαν επίσης την ευμενή επίδραση της τροποποιημένης ασφάλτου στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων. Χαρακτηριστικό είναι το παρακάτω σχήμα στο οποίο διακρίνεται η σχέση των μιγμάτων με τροποποιημένη ασφαλτο με αυτά με κοινή ασφαλτο ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση.



Διάγραμμα 2.11 Παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλτικών μιγμάτων με διαφορετικούς τύπους ασφάλτου

Ο Tayfur et al (2007) χρησιμοποιώντας 4 διαφορετικούς τροποποιητές για την ασφαλτο έδειξαν ότι ο τύπος του τροποποιητή της ασφάλτου επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά του ασφαλτικού μίγματος σε παραμένουσα παραμόρφωση. Σημειώνεται εδώ ότι από τους

τέσσερεις τροποποιητές που χρησιμοποίησαν, τα μίγματα με SBS είχαν την καλύτερη συμπεριφορά.

Την επίδραση του τύπου της ασφάλτου έδειξαν ο Corte et al (1994). Χρησιμοποίησαν μια κοινή 50/70 ασφάλτο και τρεις ασφάλτους που χρησιμοποίησαν για τη δημιουργία μιγμάτων με υψηλή αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση. Αυτές ήταν (1) η ασφάλτος MG (Multigrade) της Shel, η οποία εκτός από την αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση διατηρεί καλή συμπεριφορά και σε χαμηλές θερμοκρασίες, (2) μια σκληρή ασφάλτος που χρησιμοποιείται σε υψηλού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτικά μίγματα (EME) και (3) μια τροποποιημένη με SBS ασφάλτος (3,8% τροποποιητή στην ασφάλτο). Χαρακτηριστική είναι η εικόνα όσον αφορά την αποδοχή των μιγμάτων με τις 4 τύπους ασφάλτου. Σε όλες τις περιπτώσεις το μίγμα με τη σκληρή 10/20 ασφάλτο έχει την καλύτερη συμπεριφορά. Η εισδυντικότητα και η μάλθωση των τεσσάρων ασφάλτων είναι αυτή που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

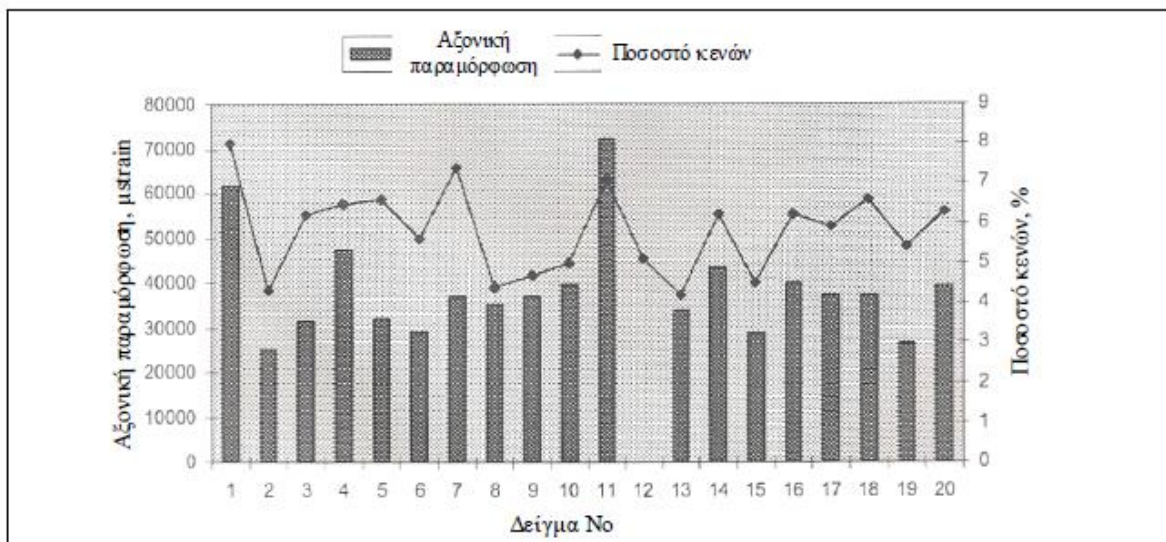
Πίνακας 2.1

Ιδιότητα	Άσφαλτος 50/70	Shell Multigrade	Άσφαλτος 10/20	Τροποποιημένη ασφάλτος με SBS
Pen (25 °C)	63	52	15,5	55,5
RBT (°C)	50,5	60,5	70,5	58,5

2.13. Επίδραση του ποσοστού των κενών αέρος στην παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων

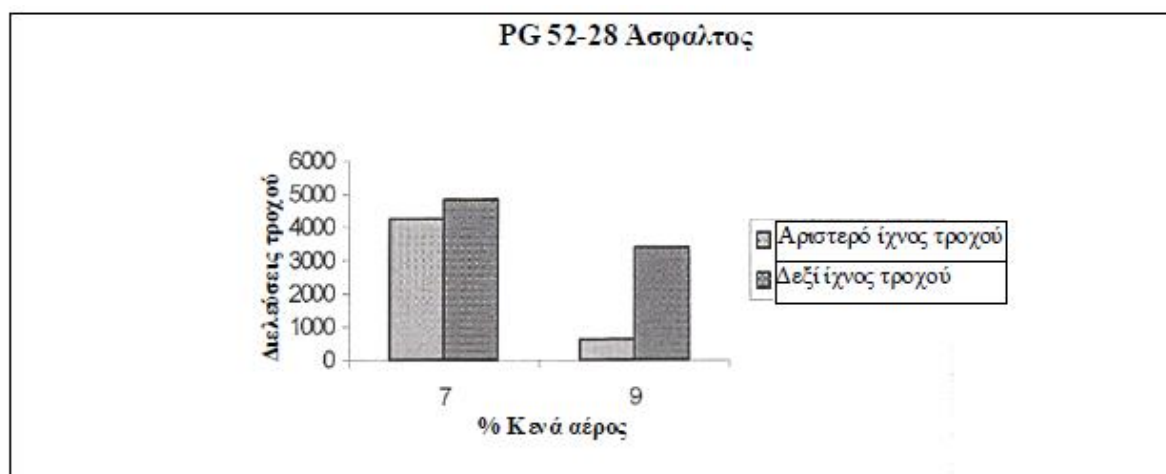
Το ποσοστό των κενών στο ασφαλτικό μίγμα επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά αυτών. Είναι γνωστό ότι χαμηλό ποσοστό κενών οδηγεί σε τροχοαυλάκωση λόγω παραμένουσας παραμόρφωσης, ενώ το υψηλό ποσοστό κενών οδηγεί σε μίγματα με μεγάλη διαπερατότητα σε νερό και αέρα, με αποτέλεσμα την αστοχία του μίγματος λόγω υγρασίας, οξείδωσης, αποκόλλησης αδρανών και τελικά ρηγμάτωση. Τα κενά στο ασφαλτικό μίγμα εξαρτώνται από το ποσοστό της ασφάλτου, τη συμπύκνωση κατά την κατασκευή του οδοστρώματος και την πρόσθετη συμπύκνωση μετά την κατασκευή λόγω κυκλοφορίας.

Ο Lefrald et al (1998-2004) διερευνώντας τη συμπεριφορά ασφαλτικών μιγμάτων που ελήφθησαν από το πεδίο, έδειξαν την επιρροή που έχει το ποσοστό των κενών του ασφαλτομίγματος στην παραμένουσα παραμόρφωση. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, υψηλότερο ποσοστό κενών έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλότερη παραμόρφωση των ασφαλτικών μιγμάτων.



Διάγραμμα 2.12 Μεταβολή της παραμένουσας παραμόρφωσης ασφαλτικών μιγμάτων με το ποσοστό κενών

Ο Gogula et al (2003) έδειξαν ότι τα ασφαλτικά μίγματα με 7% κενά συμπεριφέρθηκαν καλύτερα, όσον αφορά την παραμένουσα παραμόρφωση, σε σχέση με μίγματα με 9% κενά. Χαρακτηριστικό είναι το παρακάτω σχήμα στο οποίο δίνονται οι διελεύσεις που χρειάζονται για τα δυο μίγματα για να αποκτήσουν βάθος τροχοαυλάκωσης ίσο με 20mm.



Διάγραμμα 2.13 Παραμένουσα παραμόρφωση 20 mm για μίγματα με 7% και 9% κενά

Τέλος οι Garba και Horvli (2002) δημιουργώντας έναν δείκτη τροχοαυλάκωσης έδειξαν ότι τροχοαυλάκωση μπορεί να προκύψει τόσο σε υψηλά, όσο και σε χαμηλά ποσοστά κενών. Επισημαίνουν μάλιστα ότι υπάρχει ένα βέλτιστο ποσοστό κενών στο οποίο η αντίσταση σε παραμόρφωση γίνεται μέγιστη.

2.14. Επιπτώσεις της παραμένουσας παραμόρφωσης

Η μόνιμη παραμόρφωση ενός οδοστρώματος υποβαθμίζει το επίπεδο της λειτουργικότητας του και επιδρά αρνητικά στην ασφάλεια και την άνεση των χρηστών μιας 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 παραμένουσας παραμόρφωσης. Ιδιαίτερα, στην περίπτωση εκτεταμένων φθορών υπάρχει κίνδυνος απώλειας ελέγχου του οχήματος που ενδεχομένως να αποβεί μοιραία 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 παραμένουσας παραμόρφωσης 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).

2.15. 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 (ΣΔΟ).

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 ιδιαίτερος χρονοβόρα και δεν παρέχει πληροφορία σε όλο το μήκος της οδού. Η ανάπτυξη, ωστόσο, εξελιγμένων συστημάτων προφιλόμετρησης δίνουν τη δυνατότητα ταχείας, απρόσκοπτης και συνεχούς καταγραφής ενδεχόμενων παραμενουσών 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.

3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Πολλοί και διαφορετικοί είναι οι έλεγχοι που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της παραμένουσας παραμόρφωσης των ασφαλτικών μιγμάτων. Στην πλειοψηφία τους οι έλεγχοι αυτοί διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

1. Τους ελέγχους παραμένουσας παραμόρφωσης που το τελικό αποτέλεσμα είναι μια παραμόρφωση.
2. Τους ελέγχους τροχοαυλάκωσης, στους οποίους το τελικό αποτέλεσμα είναι το βάθος τροχοαυλάκωσης.

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί μόνο ο έλεγχος τροχοαυλάκωσης.

3.1. Έλεγχοι τροχοαυλάκωσης

Οι έλεγχοι τροχοαυλάκωσης αναπτύχθηκαν με σκοπό την αξιολόγηση των ασφαλτικών μιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση κάτω από συνθήκες περισσότερο κοντά στις συνθήκες που αναπτύσσονται στο πεδίο. Διάφορες συσκευές έχουν αναπτυχθεί ανά την υφήλιο και χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση του ελέγχου. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- Η συσκευή τροχοαυλάκωσης του Αμβούργου (Hamburg wheel tracking device).
- Η συσκευή τροχοαυλάκωσης που αναπτύχθηκε στη Georgia των ΗΠΑ (Georgia Loaded Wheel Tester).
- Η συσκευή Asphalt Pavement Analyzer (APA) που σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως στις ΗΠΑ.
- Η Γαλλική συσκευή τροχοαυλάκωσης (French Rutting Tester).
- Η Βρετανική συσκευή τροχοαυλάκωσης μικρού μεγέθους.
- Οι συσκευές τροχοαυλάκωσης που προβλέπονται από τις Ευρωπαϊκές προδιαγραφές.

Όλες οι παραπάνω συσκευές στηρίζονται στην ίδια αρχή, τη διέλευση ενός τροχού που εφαρμόζει συγκεκριμένο βάρος φορτίο σε ασφαλτικό μίγμα, περιορισμένο σε μήτρες συγκεκριμένων διατάσεων.

Η συσκευή τροχοαυλάκωσης του Αμβούργου αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε εκτενώς στο Αμβούργο της Γερμανίας. Σκοπός δημιουργίας της συσκευής ήταν η εκτίμηση της συμπεριφοράς των ασφαλτικών μιγμάτων σε τροχοαυλάκωση αλλά και της ευαισθησίας τους στο νερό. Για το σκοπό αυτό, τα δοκίμια κατά το έλεγχο βρίσκονται εντός υδάτινου περιβάλλοντος σε σταθερή θερμοκρασία. Η συσκευή απεικονίζεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 3.1 Η συσκευή τροχοαλάκωσης του Αμβούργου

Η συσκευή τροχοαλάκωσης που αναπτύχθηκε στη Georgia των ΗΠΑ (GLWT) και φαίνεται στη παρακάτω φωτογραφία, επήλθε από μετατροπή μιας συσκευής η οποία αρχικά κατασκευάστηκε από τον C.R. Benedict της εταιρείας Benedict Slurry Seals Inc και χρησιμοποιούνταν για τον έλεγχο μιγμάτων Slurry Seal. Ο κύριος σκοπός ανάπτυξης της συσκευής GLWT ήταν η εκτέλεση δοκιμών τροχοαλάκωσης και ευρύτερα ο έλεγχος ποιότητας των ασφαλτικών μιγμάτων που παράγονταν στο πεδίο.



Εικόνα 3.2 Η συσκευή τροχοαλάκωσης Georgia

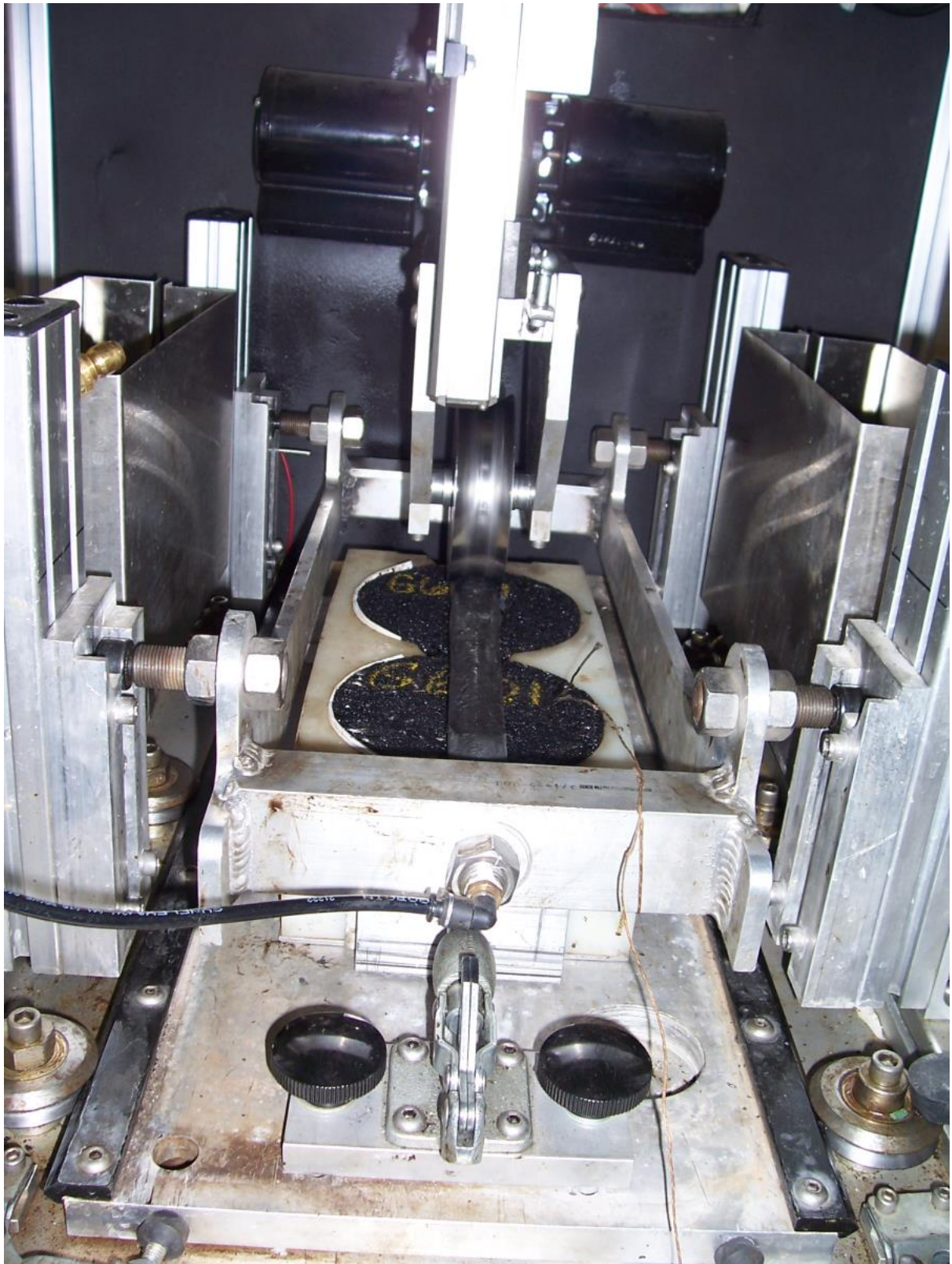


Εικόνα 3.3 Η συσκευή τροχοαλάκωσης Georgia

Η συσκευή Asphalt Pavement Analyzer προήλθε από μετατροπή της συσκευής GLWT και κατασκευάστηκε το 1986 από την Pavement Technology Inc. Σκοπός της κατασκευής της ήταν η εκτίμηση της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος σε κόπωση και τροχοαλάκωση, αλλά και της ευαισθησίας του παρουσία ύδατος. Το τελευταίο επιτυγχάνεται με τη δυνατότητα που παρέχει η συσκευή να ελέγχονται δείγματα βυθιζόμενα σε νερό σταθερής θερμοκρασίας η παρακάτω φωτογραφία απεικονίζει την APA.



Εικόνα 3.4 Η συσκευή Asphalt Pavement Analyzer



Εικόνα 3.5 Η συσκευή Asphalt Pavement Analyzer

Η Γαλλική συσκευή τροχοαλάκωσης (French Rutting Tester) χρησιμοποιείται στη Γαλλία για πάνω από 20 έτη για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ασφαλτικών μιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση, υπό μορφή τροχοαλάκωσης, η συσκευή απεικονίζεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 3.6 French Rutting Tester



Εικόνα 3.7 French Rutting Tester

Πίνακας 3.1 Τυπικές συνθήκες ελέγχου για συσκευές τροχοαυλάκωσης

Συσκευή	Αμβούργου	Georgia	APA	Γαλλική	EN 12697-22 B
Θερμοκρασία Ελέγχου °C	50	40	5 έως 8	60	45 Έως 60
Περιβάλλον ελέγχου	Νερό	Αέρας	Αέρας η Νερό	Αέρας	Αέρας
Μέγεθος δοκιμίου Μήκος, Πλάτος, Ύψος, mm	320x260x80	300x125x75	300x125x75	500x180x100	320x260x100
Τύπος τροχού	Μεταλλικός	Από αλουμίνιο συνδεδεμένος με σωλήνα επιβολής πίεσης (700 kPa)	Από αλουμίνιο συνδεδεμένος με σωλήνα επιβολής πίεσης (700 kPa)	Λαστιχοφόρος με αέρα (500 kPa)	Ελαστικός σκληρότητας 80 IRHD
Μέγεθος τροχού Διάμετρος/Πάχος	203.5 mm /47 mm	Διάμετρος σωλήνα 29mm	Διάμετρος σωλήνα 29mm	400 mm / 90 mm	200 mm / 50 mm
Φορτίο επιβολής N	Έως 697	Έως 700	Έως 1200	Έως 5000	Έως 700
Μέγιστος αριθμός Κυκλικών φορτίσεων Κατά τον έλεγχο (κυκλική φόρτιση = 2 διελεύσεις τροχού)	20000	8000	8000	30000	10000

Η Βρετανική συσκευή τροχοαυλάκωσης περιγράφεται από την προδιαγραφή BS 598-110.

Πρόκειται για μικρού μεγέθους συσκευή με λαστιχοφόρο τροχό, με εξωτερική διάμετρο 200 έως 205 mm και πάχος 50 ± 1 mm. Απαιτούνται έξι δοκίμια τα οποία διατηρούνται στη θερμοκρασία ελέγχου από 4 έως 16 ώρες. Κατά τον έλεγχο επιβάλλεται φορτίο 520 kN και η συχνότητα διέλευσης του τροχού είναι $21,0 \pm 2$ κύκλοι / λεπτό, (1 κύκλος = 2 διελεύσεις τροχού). Το τελικό αποτέλεσμα του ελέγχου εκφράζεται σε βάθος τροχοαυλάκωσης εκφραζόμενο σε χιλιοστά (mm) και ρυθμοί τροχοαυλάκωσης εκφραζόμενο σε χιλιοστά / ώρα (mm/hr).

Οι ευρωπαϊκές προδιαγραφές ορίζουν ουσιαστικά πέντε μεθόδους εκτίμησης της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων σε τροχοαυλάκωση και απαιτούν τριών ειδών συσκευές. Χρησιμοποιούνται λοιπόν, μέθοδοι εκτίμησης της τροχοαυλάκωσης με:

- Πολύ μεγάλου μεγέθους συσκευές με περιβάλλον ελέγχου τον αέρα.
- Μεγάλου μεγέθους συσκευές με περιβάλλον ελέγχου τον αέρα.
- Μικρού μεγέθους συσκευές με περιβάλλον ελέγχου τον αέρα.
- Μικρού μεγέθους συσκευές με περιβάλλον ελέγχου το νερό.

Κατά τον έλεγχο με πολύ μεγάλου μεγέθους συσκευές με περιβάλλον ελέγχου τον αέρα, δυο δοκίμια συντηρούνται σε θερμοκρασία ελέγχου για 16 ± 2 ώρες. Κατά τον έλεγχο ένας λαστιχοφόρος τροχός με φορτίο 10 kN διέρχεται των δοκιμίων με συχνότητα 24 κύκλους ανά λεπτό (cycles/min), όπου ένας κύκλος ισούται με δύο διελεύσεις. Η παραμόρφωση του μίγματος μετράται κατά τη διεύθυνση τριών εγκάρσιων διευθύνσεων, αρχικά και σε διάφορες ενδιάμεσες θέσεις έως και τους 30000 κύκλους. Ο έλεγχος τελειώνει όταν ο απαιτούμενος αριθμός κύκλων φόρτισης επιτευχθεί η το βάθος τροχοαυλάκωσης των 20 mm προσεγγιστεί. Το μέσο βάθος τροχοαυλάκωσης και το ποσοστιαίο βάθος τροχοαυλάκωσης δίνονται σαν αποτέλεσμα της δοκιμής, (ποσοστιαίο βάθος τροχοαυλάκωσης = τελικό βάθος τροχοαυλάκωσης / πάχος δοκιμίου).

Κατά τον έλεγχο με μεγάλου μεγέθους συσκευές με περιβάλλον ελέγχου τον αέρα, απαιτούνται δυο δοκίμια τα οποία προφορτίζονται για 1000 κύκλους φόρτισης στα 600 kPa και σε θερμοκρασία 20 ± 5 °C. Μετά το πέρας του διαστήματος αυτού, τα δοκίμια διατηρούνται στη θερμοκρασία ελέγχου για 14 ± 2 ώρες, πριν την έναρξη του ελέγχου. Κατά τον έλεγχο, η παραμόρφωση μετράται σε διάφορες στιγμές περιλαμβανομένων των 1000, 3000 και 10000 κύκλων σε 15 σημεία. Η ποσοστιαία παραμόρφωση είναι το τελικό αποτέλεσμα του ελέγχου εκφραζόμενη με το λόγο της μέσης παραμόρφωσης των 15 σημείων (μετά το πέρας των κύκλων φόρτισης) προς το πάχος του δοκιμίου.

Όταν ο έλεγχος γίνεται με μικρού μεγέθους συσκευές με περιβάλλον ελέγχου τον αέρα και ακολουθείται η διαδικασία ελέγχου A, απαιτούνται έξι δοκίμια, τα οποία συντηρούνται στη θερμοκρασία ελέγχου από 4 έως 24 ώρες. Ο έλεγχος απαιτεί 1000 κύκλους φόρτισης υπό τροχό πάχους 50 mm, ο οποίος επιβάλλει φορτίο 700 N. Οι πρώτοι πέντε κύκλοι χρησιμοποιούνται σαν προφόρτιση. Σαν αποτέλεσμα του ελέγχου δίνονται ο ρυθμός τροχοαυλάκωσης και το ποσοστιαίο βάθος τροχοαυλάκωσης. Ο ρυθμός τροχοαυλάκωσης υπολογίζεται από το μέσο όρο των ρυθμών τροχοαυλάκωσης των έξι δοκιμίων. Για κάθε από αυτά υπολογίζεται στο τελευταίο 1/3 της διάρκειας του ελέγχου και εκφράζεται σε $\mu\text{m} / \text{κύκλος φόρτισης}$ ($\mu\text{m} / \text{cycle}$). Το ποσοστιαίο βάθος τροχοαυλάκωσης είναι ο μέσος όρος των

ποσοστιαίων βαθών τροχοαυλάκωσης των έξι δοκιμίων και για καθένα από αυτά εκφράζεται σαν το ποσοστό του βάθους τροχοαυλάκωσης σε σχέση με το πάχος του δοκιμίου.

Όσον αφορά την περίπτωση στην οποία ο έλεγχος γίνεται με μικρού μεγέθους συσκευές με περιβάλλον ελέγχου τον αέρα και ακολουθείται η διαδικασία Β, απαιτούνται δυο δοκίμια τα οποία συντηρούνται στη θερμοκρασία ελέγχου για όχι λιγότερο από 1 ώρα πριν την έναρξη του ελέγχου. Ο έλεγχος απαιτεί 10000 κύκλους φόρτισης υπό τροχό πάχους 50 mm, ο οποίος επιβάλλει φορτίο 700 N. Οι πρώτοι πέντε κύκλοι χρησιμοποιούνται σαν προφόρτιση. Η παραμόρφωση μετράται 6 η 7 φορές την πρώτη ώρα και κάθε 500 κύκλους μετά το πέρας αυτής. Σαν αποτέλεσμα του ελέγχου δίνονται ο ρυθμός τροχοαυλάκωσης και το ποσοστιαίο βάθος τροχοαυλάκωσης. Ο ρυθμός τροχοαυλάκωσης υπολογίζεται από το μέσο όρο των ρυθμών τροχοαυλάκωσης των δυο δοκιμίων και εκφράζεται σε χιλιοστά ανά 1000 κύκλους φόρτισης ($\text{mm}/10^3 \text{ cycles}$). Το ποσοστιαίο βάθος τροχοαυλάκωσης είναι ο μέσος όρος των ποσοστιαίων βαθών τροχοαυλάκωσης των δυο δοκιμίων και για καθένα από αυτά εκφράζεται σαν το ποσοστό του βάθους τροχοαυλάκωσης σε σχέση με το πάχος του δοκιμίου.



Εικόνα 3.8 Μικρού μεγέθους συσκευή τροχοαυλάκωσης

4. ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ

Οι δοκιμές τροχοαυλάκωσης εκτελέστηκαν από τον Ευάγγελο Δ. Μάνθου (2009) στα πλαίσια τη διδακτορικής διατριβής, σύμφωνα με το πρότυπο EN 12697-22 διαδικασία Β, με περιβάλλον ελέγχου τον αέρα.

4.1. Δοκιμή τροχοαυλάκωσης ασφαλτομιγμάτων με κοινή ασφαλτο και βαθμό συμπίκνωσης στο 97% και 100% της πυκνότητας του βέλτιστου ποσοστού

Όπως προαναφέρθηκε η δοκιμή τροχοαυλάκωσης στα μίγματα με κοινή ασφαλτο και ασβεστολιθικά αδρανή έγινε σε ασφαλτόμιγμα που παρήχθησαν σε δυο ποσοστό ασφάλτου 4,35% κατά βάρος μίγματος και 5,25% κατά βάρος μίγματος. Τα δοκίμια με 4,35% και 5,25% ποσοστό ασφάλτου παρασκευάστηκαν σε δυο βαθμούς συμπίκνωσης 97% και 100% της πυκνότητας του ασφαλτομίγματος με βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου. Οι θερμοκρασίες ελέγχου ήταν 45⁰C και 60⁰C σε όλες τις περιπτώσεις.

Με τις παραπάνω συμπεκνώσεις τα χαρακτηριστικά τωνασφαλτομιγμάτων διαμορφώνονται ως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες ασφαλτομιγμάτων

Ασφαλτικό μίγμα	Βαθμός συμπίκνωσης	Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)	Κενά (%)	VMA (%)	VFA (%)
ΑΣ 20-4,35	97%	2286	8,0	17,0	52,9
ΑΣ 20-5,25		2337	4,7	25,9	70,5
ΑΣ 20-4,35	100%	2360	5,1	14,3	64,8
ΑΣ 20-5,25		2379	3,0	14,4	79,3

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών τροχοαυλάκωσης για τα παραπάνω ποσοστά ασφάλτου συναρτήσει των χαρακτηριστικών μεγεθών ρυθμός τροχοαυλάκωσης και βάθος τροχοαυλάκωσης, δίνονται στον παρακάτω πίνακα, οι τιμές του πίνακα είναι ο μέσος όρος 2 πλακούντων.

Πίνακας 4.2 Μέσος ρυθμός τροχοαλάκωσης και μέσο βάθος τροχοαλάκωσης κατά EN 12697-22 B

Ασφαλτικό μίγμα	Βαθμός συμπίκνωσης	Ρυθμός τροχοαλάκωσης mm/10 ³ cycles		Βάθος τροχοαλάκωσης mm		Ποσοστιαίο Βάθος τροχοαλάκωσης	
		45 ⁰ C	60 ⁰ C	45 ⁰ C	60 ⁰ C	45 ⁰ C	60 ⁰ C
ΑΣ 20-4,35	97%	0,3	0,5	3,3	7,3	5,4	12,1
ΑΣ 20-5,25		0,4	0,7	3,6	9,4	5,9	15,6
ΑΣ 20-4,35	100%	0,1	0,3	2,6	6,7	4,4	11,1
ΑΣ 20-5,25		0,1	0,4	2,9	8,3	4,8	13,9

4.2. Δοκιμή τροχοαλάκωσης ασφαλτικών μιγμάτων με κοινή άσφαλτο και βαθμό συμπίκνωσης στο 97% της πυκνότητας του εκάστοτε ποσοστού.

Όπως προαναφέρθηκε η δοκιμή τροχοαλάκωσης στα μίγματα με κοινή άσφαλτο έγινε και σε ασφαλτομίγματα που παρασκευάστηκαν στο 97% της πυκνότητας του 4,35% κατά βάρος μίγματος και του 5,25% κατά βάρος μίγματος. Τα μίγματα αυτά θα αναφέρονται από δω και στο εξής σαν ΑΣ 20-4,35_{4,35} και ΑΣ 20-5,25_{5,25}. Η θερμοκρασία ελέγχου ήταν 45⁰C.

Με την παραπάνω συμπίκνωση τα χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων διαμορφώνονται ως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικές ιδιότητες ασφαλτομιγμάτων με 50/70 στο 97% του εκάστοτε ποσοστού

Ασφαλτικό μίγμα	Βαθμός συμπίκνωσης	Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)	Κενά (%)	VMA (%)	VFA (%)
ΑΣ 20-4,35 _{4,35}	97%	2283	7,8	14,2	65,0
ΑΣ 20-5,25 _{5,25}		2311	6,1	14,3	78,0

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών τροχοαλάκωσης για τα παραπάνω ποσοστά ασφάλτου συναρτήσκει των χαρακτηριστικών μεγεθών ρυθμός τροχοαλάκωσης και βάθος τροχοαλάκωσης δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.4 Μέσος ρυθμός τροχοαλάκωσης και μέσο βάθος τροχοαλάκωσης κατά EN 12697-22 B

Ασφαλτικό μίγμα	Βαθμός συμπίκνωσης	Ρυθμός τροχοαλάκωσης:	Βάθος τροχοαλάκωσης:	Ποσοστιαίο βάθος τροχοαλάκωσης %
		mm/10 ³ cycles	mm 45 ⁰ C	
ΑΣ 20-4,35 _{4,35}	97%	0,2	5,5	9,2
ΑΣ 20-5,25 _{5,25}		0,3	6,1	10,2

4.3. Δοκιμή τροχοαλάκωσης σε ασφαλτόμιγμα με τροποποιημένη άσφαλτο και βαθμό συμπίκνωσης 97% της πυκνότητας του εκάστοτε ποσοστού

Όπως και στα ασφαλτομίγματα με κοινή άσφαλτο έτσι και στα ασφαλτομίγματα με τροποποιημένη άσφαλτο εξετάστηκε η επίδραση του ποσοστού της ασφάλτου σε τροχοαλάκωση όταν τα μίγματα συμπυκνώθηκαν με βαθμό συμπίκνωσης της πυκνότητας του 4,30% και του 5,20% κατά βάρος μίγματος. Τα μίγματα θα αναφέρονται από δω και στο εξής σαν ΑΣ 20-4,30_{m4,30} και ΑΣ-20-5,20_{m5,20}. Η θερμοκρασία ελέγχου ήταν 45⁰C.

Με την παραπάνω συμπίκνωση τα χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων διαμορφώνονται ως φαίνονται στον κατακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.5 Χαρακτηριστικές ιδιότητες ασφαλτομιγμάτων με 25-55/70 στο 97% του εκάστοτε ποσοστού

Ασφαλτικό μίγμα	Βαθμός συμπίκνωσης	Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)	Κενά (%)	VMA (%)	VFA (%)
ΑΣ 20-4,30 _{m4,30}	97%	2278	8.0	14.7	64.0
ΑΣ 20-5,20 _{m5,20}		2312	6.0	14,1	80.0

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών τροχοαλάκωσης για τα παραπάνω ποσοστά ασφάλτου συναρτήσει των χαρακτηριστικών μεγεθών ρυθμός τροχοαλάκωσης δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.6 Μέσος ρυθμός τροχοαυλάκωσης και μέσο βάθος τροχοαυλάκωσης κατά EN 12697-22 B

Ασφαλτικό μίγμα	Βαθμός συμπίκνωσης	Ρυθμός τροχοαυλάκωσης:	Βάθος τροχοαυλάκωσης:	Ποσοστιαίο βάθος τροχοαυλάκωσης %
		mm/10 ³ cycles	mm	
			45 ⁰ C	
ΑΣ 20-4,30 _{m4,30}	97%	0,1	2,5	4,2
ΑΣ 20-5,20 _{m5,20}		0,1	2,8	4,7

4.4. Αποδοχή και σύγκριση αποτελεσμάτων

Μέχρι σήμερα οι μόνες οριακές τιμές που έχουν προταθεί για την αποδοχή η μη ενός ασφαλτικού σκυροδέματος είναι αυτές που έχουν προταθεί από το Highway Agency. Οι οριακές αυτές τιμές συναρτήσει της θέσης καταπόνησης της οδού δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.7 Οριακές απατήσεις χαρακτηριστικών ιδιοτήτων τροχοαυλάκωσης

Ταξινόμηση	Θερμοκρασία ελέγχου	Απατήσεις όταν η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με την BS 598-110	
Αριθμός περιγραφής θέσης	°C	Μέγιστος ρυθμός τροχοαυλάκωσης (mm/h)	Μέγιστο βάθος τροχοαυλάκωσης mm
Μέτριας ως υψηλής καταπόνησης θέσεις που απαιτούν υψηλή αντίσταση σε τροχοαυλάκωση	45	2	4
Πολύ υψηλής καταπόνησης θέσεις που απαιτούν πολύ υψηλή αντίσταση σε τροχοαυλάκωση	60	5	7-
Άλλες θέσεις	Καμία απαίτηση	-	-

Οριακές τιμές για αποδοχή η μη ενός ασφαλτικού σκυροδέματος βάσει των αποτελεσμάτων που προκύπτουν κατά EN 12697-22 δεν έχουν προταθεί μέχρι σήμερα από τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές. Συνεπώς η αποδοχή ή η απόρριψη των μιγμάτων που εξετάστηκαν μπορεί να κριθεί με τις οριακές τιμές του παραπάνω πίνακα.

5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Χωρίς ακόμα να έχει διατυπωθεί ένας διεθνώς αποδεκτός ορισμός της διαχείρισης οδοστρωμάτων, κοινά αποδίδεται ως «η αποτελεσματική και αποδοτική διαχείριση των δραστηριοτήτων που εμπλέκονται στο να διατηρούν τα οδοστρώματα σε ανεκτή κατάσταση με το λιγότερο δυνατό κόστος». Κατά τον AASHTO (1993), ως Σύστημα Διαχείρισης Οδοστρώματος ορίζεται: «το σύνολο των εργαλείων ή μεθόδων τα οποία βοηθούν αυτούς που λαμβάνουν αποφάσεις στο να βρουν βέλτιστη στρατηγική για παροχή, αξιολόγηση και διατήρηση οδοστρωμάτων σε λειτουργική κατάσταση για κάποια περίοδο χρόνου». Στις δραστηριότητες αυτές συμπεριλαμβάνονται η παρακολούθηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος, η έρευνα, η συντήρηση, η αποκατάσταση / ενίσχυση και η ανακατασκευή του οδοστρώματος.

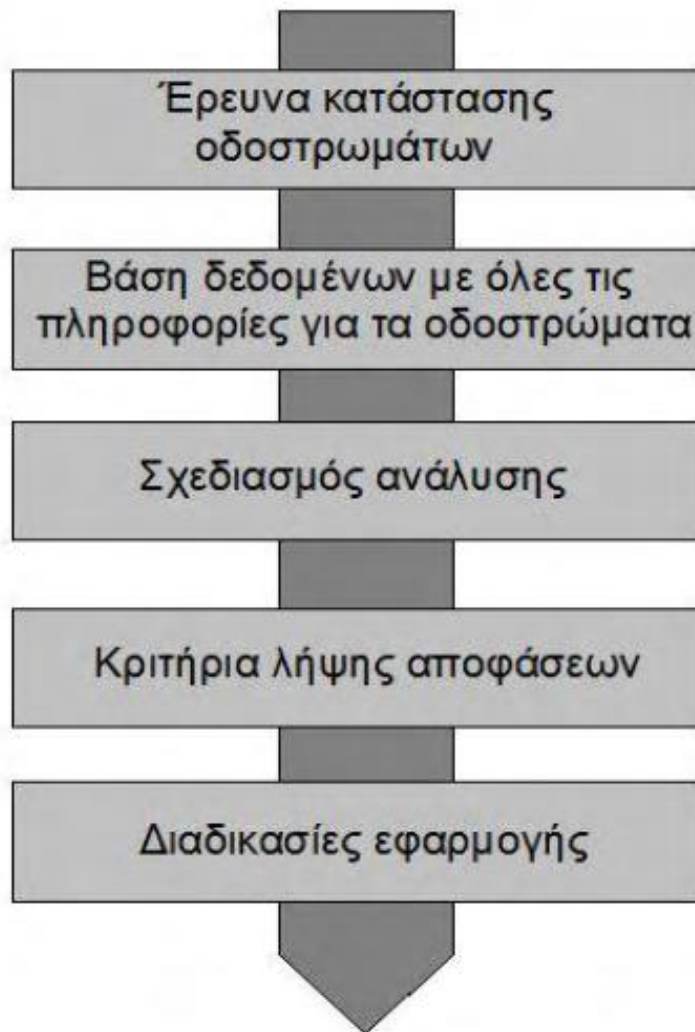
Ένα Σύστημα Διαχείρισης Οδοστρωμάτων (Σ.Δ.Ο.) συνίσταται στη θεμελίωση και καταγραφή των διαδικασιών, οι οποίες με συστηματικό και συντονισμένο τρόπο χειρίζονται τις δραστηριότητες που αφορούν στη συντήρηση των οδοστρωμάτων. Οι δραστηριότητες αυτές περιλαμβάνουν την εκτέλεση των κατάλληλων εργασιών, στο ενδεδειγμένο τμήμα, με χρήση των απαιτούμενων υλικών, σύμφωνα με τις σχεδιαστικές και κατασκευαστικές οδηγίες με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Τα ΣΔΟ μπορούν να εφαρμοστούν σε δύο επίπεδα: σε επίπεδο δικτύου καλύπτοντας ολόκληρο το οδικό δίκτυο μίας χώρας ή ενός νομού για παράδειγμα ή μπορούν να εφαρμοστούν σε επίπεδο έργου καλύπτοντας ένα ή περισσότερα τμήματα του δικτύου.

Τα συστήματα διαχείρισης αρχικά σχεδιάστηκαν στα μέσα της δεκαετίας του '70 ως αποτέλεσμα σημαντικών εργασιών σε οδοστρώματα στις ΗΠΑ και στον Καναδά. Τα αρχικά συστήματα διαχείρισης εστιάζονταν στο επίπεδο του έργου, στο συντονισμό βελτιώσεων στο σχεδιασμό, την αποκατάσταση, τη συντήρηση και τη συμπεριφορά του μοντέλου του οδοστρώματος. Στα μέσα της δεκαετίας του '70, τα Συστήματα Διαχείρισης Οδοστρωμάτων επεκτάθηκαν σε πρωτογενή χρήση σε επίπεδο δικτύου και συμμετείχαν στο σχεδιασμό, τον προγραμματισμό και την κατανομή πόρων για όλο το δίκτυο οδοστρωμάτων.

Συνοπτικά, τα συστατικά ενός Συστήματος Διαχείρισης Οδοστρωμάτων είναι τα εξής:

- Έρευνες κατάστασης οδοστρωμάτων: περιλαμβάνουν μετρήσεις και συλλογή δεδομένων συνήθως πεδίου ή σε εργαστήριο, καθώς και από συσσώρευση της γνώσης των ειδικών. Τα στοιχεία που συνήθως συλλέγονται είναι τα κατασκευαστικά, λειτουργικά, κυκλοφοριακά και η ανάλυση κόστους/ωφελειών.
- Βάση δεδομένων με όλες τις πληροφορίες για τα οδοστρώματα: περιλαμβάνει και διαμορφώνει τα απαραίτητα στοιχεία για τα οδοστρώματα ώστε να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα.
- Σχεδιασμός ανάλυσης: περιλαμβάνει τους αλγόριθμους 1) βελτιστοποίησης κόστους/ωφελειών των εναλλακτικών τεχνικών συντήρησης για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα ή 2) πρόβλεψης των μεταβολών κατάστασης του οδοστρώματος με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για να μεταφραστούν τα δεδομένα σε έναν κατανοητό και χρησιμοποιήσιμο τρόπο.
- Κριτήρια λήψης αποφάσεων: περιλαμβάνουν τους κανόνες, τις περισσότερες φορές περίπλοκης φύσης, που αναπτύσσονται για να βοηθήσουν τη διαχείριση να πάρει τις σωστές αποφάσεις για τη συντήρηση ή ανακατασκευή του δικτύου.
- Διαδικασίες εφαρμογής: περιλαμβάνουν τις μεθόδους για την εφαρμογή αποφάσεων διαχείρισης στα τμήματα του δικτύου ή τα εναλλακτικά σχέδια μετά από επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας.

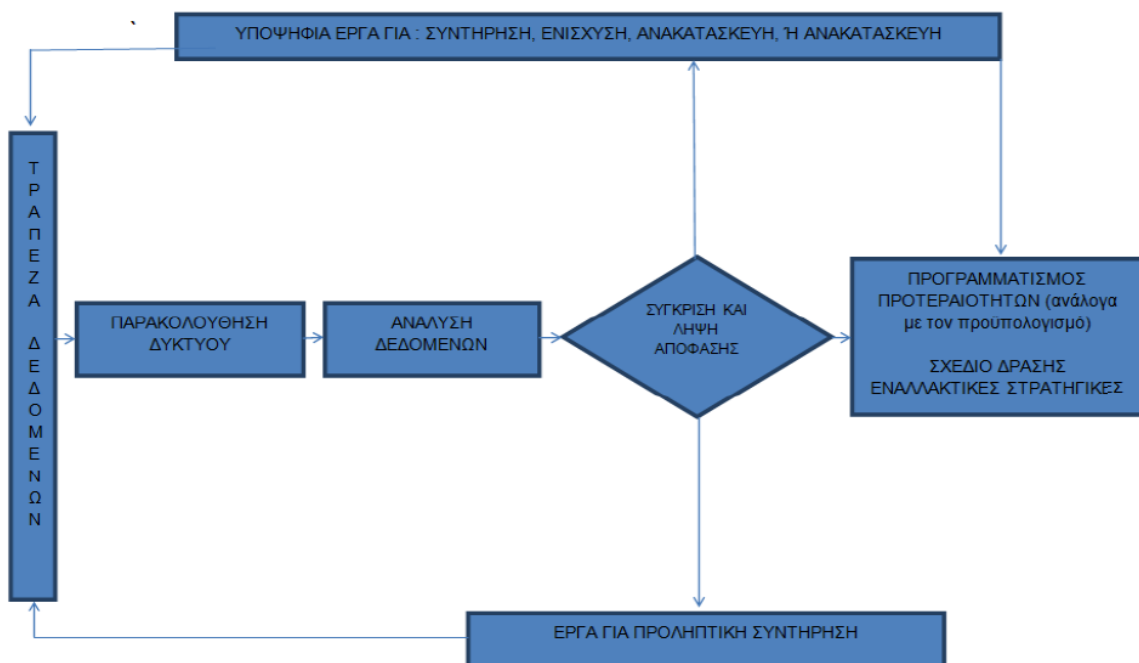


Εικόνα 5.1 Συστατικά ενός Συστήματος Διαχείρισης Οδοστρωμάτων. Λουκέρη Ε. (2004)

Σε επίπεδο δικτύου ένα ΣΔΟ παρέχει γενικές συμπερασματικές πληροφορίες για όλο το δίκτυο και πραγματεύεται τα ακόλουθα:

- Το μέγεθος του δικτύου, την παρούσα κατάσταση του οδοστρώματος, την έκταση των φθορών καθώς και το ιστορικό των φθορών και των επεμβάσεων.
- Τα κυκλοφοριακά στοιχεία του οδοστρώματος όπως χρόνοι διαδρομής και τροχαία ατυχήματα.
- Τις ετήσιες προϋπολογιζόμενες δαπάνες συντήρησης και τους διαθέσιμους πόρους.

- Την τακτική λήψης αποφάσεων και τη βέλτιστη κατανομή πόρων στα έργα συντήρησης.
- Την στρατηγική της ποιότητας της οδικής υποδομής: επίπεδα ελέγχου και επέμβασης.
- Τον εντοπισμό τμημάτων με ομοειδή χαρακτηριστικά.
- Τον καθορισμό των χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων που πρέπει να μετρούνται, τις μεθόδους μέτρησης, τον απαιτούμενο εξοπλισμό και την προβλεπόμενη συχνότητα μετρήσεων.
- Τις προβλέψεις για μελλοντικές ανάγκες και το κόστος των επεμβάσεων.

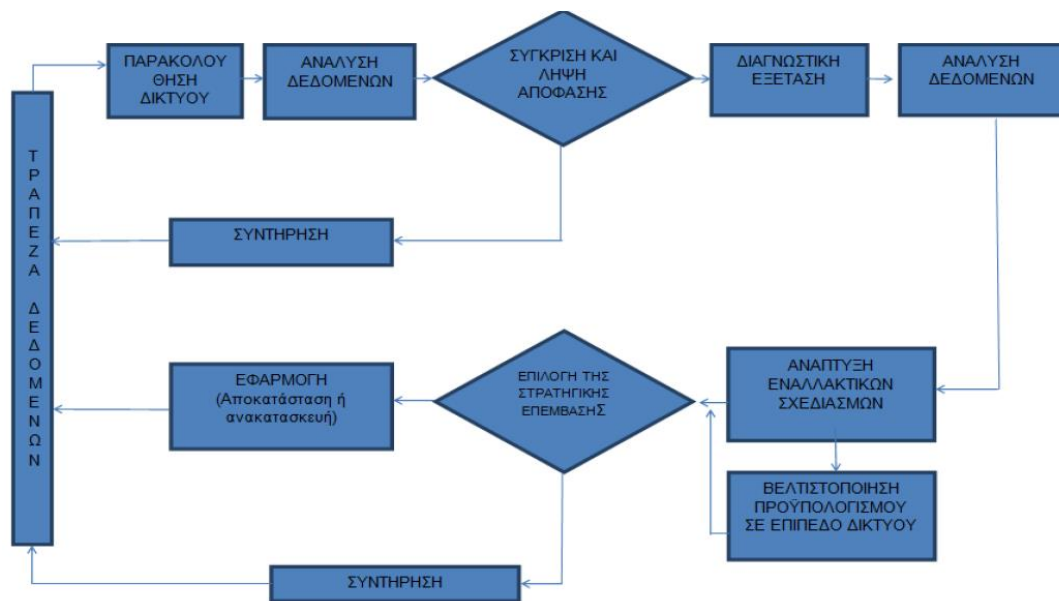


Εικόνα 5.2 Διαχείριση οδοστρωμάτων σε επίπεδο δικτύου (Νικολαΐδης, 1996)

Σε επίπεδο έργου το ΣΔΟ ασχολείται με τις τεχνικές λεπτομέρειες σε τμήματα του οδικού δικτύου, οι οποίες έχουν να κάνουν με:

- Τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος που έχουν να κάνουν με το υπέδαφος, το κόστος και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής, τις κλιματολογικές συνθήκες.

- Τον κυκλοφοριακό φόρτο, τις ταχύτητες των οχημάτων συναρτήσει των εμφανιζόμενων φθορών και του χρόνου.
- Το κόστος χρήσης της υποδομής, όπου λαμβάνεται υπόψη το κόστος των χρόνων διαδρομής, το κόστος των ατυχημάτων, το κόστος κίνησης, καθυστερήσεις λόγω συντήρησης κλπ.
- Τον καθορισμό προτεραιοτήτων μεταξύ βλαβών και τμημάτων του οδοστρώματος και το είδος της επέμβασης: συντήρηση, αποκατάσταση ή ενίσχυση, ανακατασκευή.
- Τη συνεχή ανατροφοδότηση με τα τρέχοντα στοιχεία είδους και θέσης φθορών και επισκευών.
- Τη δημιουργία των μοντέλων πρόβλεψης φθορών, τις απαιτήσεις συντήρησης που προκύπτουν από τα μοντέλα αυτά και τα επίπεδα ανεκτής ποιότητας.
- Τη στιγμή και το είδος της επέμβασης με βάση τη μεγιστοποίηση του οφέλους προς το κόστος.
- Τα εναλλακτικά σενάρια συντήρησης για συνδυασμούς βλαβών.



Εικόνα 5.3 Διαχείριση οδοστρωμάτων σε επίπεδο έργου (Νικολαΐδης, 1996)

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, τα δεδομένα που προκύπτουν και χρίζουν επεξεργασίας είναι πολλά και ετερόκλητα. Για το λόγο αυτό η εφαρμογή ενός ΣΔΟ απαιτεί τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Για την επεξεργασία των συλλεγόμενων στοιχείων δημιουργείται αρχικά μία βάση δεδομένων με καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης του οδοστρώματος, η οποία ενημερώνεται συνεχώς με τις εμφανιζόμενες φθορές, το χρόνο

εμφάνισής τους, τον τρόπο και τη στιγμή της αντιμετώπισής τους. Με κατάλληλες μεθόδους ανάλυσης επιδιώκεται η δημιουργία μοντέλου πρόβλεψης των φθορών, ενώ με εφαρμογή παραμέτρων βελτιστοποίησης επιλέγεται η τελική στιγμή και η αποτελεσματικότερη παρέμβαση με στόχο την παράταση του κύκλου ζωής του οδοστρώματος.

Τα δεδομένα που καταχωρούνται στη βάση δεδομένων διακρίνονται σε:

- Γενικά δεδομένα: κωδικός και κατηγορία οδού, θέση οδού, σύνδεση με υπάρχον γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών, κλιματολογικές συνθήκες.
- Κατασκευαστικά δεδομένα: γεωμετρικά και εδαφολογικά δεδομένα, ιστορικό κατασκευής, τύπος και πάχος οδοστρώματος, χαρακτηριστικά υλικών βάσης, υπόβασης και θεμελίωσης και χαρακτηριστικά αποχέτευσης / αποστράγγισης.
- Δεδομένα λειτουργικής κατάστασης οδοστρώματος: ιστορικό κατάστασης οδοστρώματος, διαμήκης επιπεδότητα (τροχοαυλακώσεις), εγκάρσια επιπεδότητα (ομαλότητα), ολισθηρότητα, επιφανειακή υφή, στεγανότητα, φέρουσα ικανότητα, επιφανειακές φθορές οδοστρώματος όπως αποσυνθέσεις, αυλακώσεις, καθιζήσεις, ρυτιδώσεις, διογκώσεις, εμφάνιση λάκκων.
- Δεδομένα κυκλοφορίας: κυκλοφοριακός φόρτος, σύνθεση οχημάτων, μέσος χρόνος διαδρομής, καθυστερήσεις, ατυχήματα.
- Δεδομένα ανάλυσης κόστους / οφέλους: κόστη συντήρησης, αποκατάστασης, ανακατασκευής, χρόνου διαδρομής, λειτουργίας οχήματος και κοινωνικό κόστος λόγω ατυχημάτων, θορύβου, και ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Από τα δεδομένα αυτά κάποια πρέπει να συλλεχθούν μία φορά στην αρχή ή μετά από σημαντικές παρεμβάσεις στο οδόστρωμα – π.χ. γεωμετρικά χαρακτηριστικά οδού, είδος και πάχος οδοστρώματος – ενώ κάποια άλλα πρέπει να συλλέγονται τακτικά και αφορούν σε παραμέτρους που μεταβάλλονται με το χρόνο – π.χ. φθορά οδοστρώματος, κυκλοφοριακός φόρτος κλπ.

Η συλλογή των δεδομένων κατά κανόνα γίνεται με μηχανικά μέσα – καταγραφικά, μετρήσεις, δοκιμές – ενώ κάποια δεδομένα προκύπτουν με υποκειμενικές τεχνικές. Όλα τα παραπάνω δεδομένα αποθηκεύονται στην τράπεζα πληροφοριών και αναλύονται με σκοπό τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης φθορών. Αν και η δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης

είναι χρονοβόρα και πολύπλοκη διαδικασία, καθώς περιλαμβάνει όχι μόνο την εξέλιξη μίας παραμέτρου και το βαθμό σοβαρότητάς της με την πάροδο του χρόνου αλλά και την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών μορφών φθορών, εντούτοις όλες οι προσπάθειες που έχουν γίνει έχουν βασιστεί στην εξής αρχή: όλες οι φθορές χαρακτηρίζονται από τα σημεία ελέγχου και επέμβασης. Το σημείο ελέγχου είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία η φθορά γίνεται ορατή και χρίζει αντιμετώπισης ενώ το σημείο επέμβασης είναι η χρονική στιγμή, κατά την οποία επιβάλλεται άμεση επιδιόρθωση της φθοράς.

5.1. Οφέλη των ΣΔΟ

Ο αντικειμενικός σκοπός από τη λειτουργία ενός ΣΔΟ γενικότερα, είναι :

- Τα οικονομικά οφέλη.
- Τα τεχνικά οφέλη.
- Τα οργανωτικά ή διαχειριστικά οφέλη. (Νικολαΐδης, 1996)

Οικονομικά οφέλη: Ένα Σύστημα Διαχείρισης Οδοστρωμάτων πρέπει να προβλέπει στη μεγιστοποίηση των καθαρών οικονομικών ωφελειών σε σχέση με τους οικονομικούς περιορισμούς που επιβάλλονται. Αυτό επιτυγχάνεται με :

- Την κατάλληλη διαχείριση του διαθέσιμου κεφαλαίου σε σχέση με το ύψος της εκάστοτε χρηματοδότησης.
- Τον προγραμματισμό των έργων βελτίωσης σύμφωνα με το διαθέσιμο κεφάλαιο.
- Τον καθορισμό των επιδράσεων των διάφορων εναλλακτικών τρόπων συντήρησης-βελτίωσης του δικτύου στο κόστος του ιδιοκτήτη και στο κόστος του χρήστη.
- Τον καθορισμό της επίδρασης στο κόστος του χρήστη της ενδεχόμενης καλής ή κακής ποιότητας κατασκευής.
- Την αντικειμενική επιλογή - αξιολόγηση της προσφορότερης εναλλακτικής λύσης, βασισμένη καθαρά στη σύγκριση του κόστους και του οφέλους. (Νικολαΐδης, 1996)

Τεχνικά οφέλη : κατά τη διαχείριση οδοστρωμάτων θα πρέπει να υπάρχουν τεχνικά οφέλη, για να επιτευχθεί αυτό ένα ΣΔΟ θα πρέπει:

- Να αναμορφώνεται από την εμπειρία του παρελθόντος και τις τεχνολογικές εξελίξεις του παρόντος, βελτιώνοντας τις τεχνικές συντήρησης και κατασκευής και αποφεύγοντας τα ίδια λάθη.

- Να επιλέγει την καταλληλότερη μέθοδο συντήρησης - βελτίωσης.
- Να εμπεριέχει αξιόπιστα μοντέλα πρόβλεψης της συμπεριφοράς του οδοστρώματος και αξιόπιστα μοντέλα εκτίμησης του κόστους - οφέλους.
- Να δημιουργεί ή να εμπεριέχει κριτήρια με ουσιαστική σημασία που βοηθούν στη λήψη των αποφάσεων, όπως: επιθυμητό επίπεδο κατάστασης οδοστρώματος, επίπεδο προειδοποίησης και επίπεδο επέμβασης. (Νικολαΐδης, 1996)

Οργανωτικά οφέλη : κατά τη διαχείριση οδοστρωμάτων θα πρέπει να υπάρχουν και οργανωτικά οφέλη, για να επιτευχθεί αυτό ένα ΣΔΟ θα πρέπει:

- Να είναι σε θέση να καθορίζει ορθολογιστικά την κατάσταση του οδοστρώματος σε εθνικό επίπεδο.
- Να χρησιμοποιεί την πλέον αποτελεσματική και αποδοτική μεθοδολογία συστηματικής παρακολούθησης της κατάστασης του οδοστρώματος.
- Να προβλέπει τα επακόλουθα που θα προκύψουν από διαφορετικά μεγέθη χρηματοδότησης.
- Να παρέχει μια αντικειμενική βάση για πολιτικές αποφάσεις. (Νικολαΐδης, 1996)

5.2. Μοντέλα πρόβλεψης της κατάστασης οδοστρωμάτων

Με την πάροδο του χρόνου η κατάσταση των οδοστρωμάτων, λόγω των φορτίων κυκλοφορίας και των μεταβολών του περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία), επιδεινώνεται μέχρις ότου, εντός μίας χρονικής περιόδου, να καθίσταται αναγκαία η συντήρησή του. Μοντέλο επιδείνωσης οδοστρώματος ή μοντέλο πρόβλεψης της συμπεριφοράς του, είναι μία μαθηματική περιγραφή, που χρησιμοποιείται για να προβλέψει τη μελλοντική επιδείνωσή του και η οποία βασίζεται σε στοιχεία της υφιστάμενης κατάστασης του οδοστρώματος, σε παράγοντες επιδείνωσης και στις επιπτώσεις της συντήρησης (OECD, 1987).

Η σημασία μίας ακριβούς πρόβλεψης είναι μεγάλη καθώς επηρεάζει πολλά από τα στοιχεία του συστήματος διαχείρισης οδοστρωμάτων. Τα μοντέλα πρόβλεψης είναι αναπόσπαστα στοιχεία για πολλές διαδικασίες λήψης αποφάσεων καθώς είναι χρήσιμα για τις απαντήσεις του τι, που και πότε θα πραγματοποιηθεί μία εργασία συντήρησης. Δηλαδή, τα μοντέλα πρόβλεψης βοηθούν να καθοριστεί ο τύπος της συντήρησης, το ποσοστό του οδικού δικτύου που χρειάζεται συντήρηση και η χρονική στιγμή της συντήρησης (Παναγοπούλου Μ.Ι., 2011).

5.3. Είδη μοντέλων πρόβλεψης

Τα μοντέλα πρόβλεψης μπορούν να διακριθούν σε 4 κατηγορίες τα ντετερμινιστικά, τα πιθανοτικά, τα υποκειμενικά και τα μοντέλα «ευφών» μεθοδολογιών. Μία άλλη συνήθης κατηγοριοποίησή τους είναι σε εμπειρικά, μηχανιστικά και εμπειρικά - μηχανιστικά.

5.3.1. Ντετερμινιστικά μοντέλα

Τα ντετερμινιστικά μοντέλα εξάγουν μία συγκεκριμένη τιμή για τις παραμέτρους συμπεριφοράς του οδοστρώματος με τη χρήση μαθηματικής συνάρτησης. Οι μορφές τους μπορεί να είναι γραμμικές ή μη γραμμικές εξισώσεις και συνήθως εξάγονται με τη χρήση στατιστικών αναλύσεων των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών (Λουκέρη Ε.Δ., 2004).

5.3.2. Πιθανοτικά μοντέλα

Στα πιθανοτικά μοντέλα, η μελλοντική κατάσταση του οδοστρώματος είναι τυχαία εξαρτημένη μεταβλητή και η τιμή της τελευταίας καθορίζεται από μία συνάρτηση πιθανότητας. Προβλέπουν μία κατανομή για τη ζωή του οδοστρώματος, για το επίπεδο καταπόνησής του αλλά και για άλλες μετρήσεις της κατάστασής του. Περιλαμβάνουν τα μοντέλα Markov, Survivor curves και Semi-Markov (Λουκέρη Ε.Δ., 2004).

5.3.3. Υποκειμενικά μοντέλα

Τα μοντέλα αυτά προκύπτουν από την τυποποίηση της εμπειρίας των ειδικών όσον αφορά στη διαδικασία φθοράς των οδοστρωμάτων. Είναι μοντέλα που αναπτύσσονται σε περιπτώσεις έλλειψης στατιστικών δεδομένων σαν ύστατη λύση ανάγκης. Τα μοντέλα αυτά όμως δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις ενός συστήματος διαχείρισης οδοστρωμάτων παρά μόνο ως βάση ανάπτυξης πιο προηγμένων μοντέλων έμπειρα από συλλογή δεδομένων από το οδικό δίκτυο (Λουκέρη Ε.Δ., 2004).

5.3.4. Μοντέλα «ευφυών» μεθοδολογιών

Τα μοντέλα «ευφυών» μεθοδολογιών αποτελούν ένα νέο τομέα εφαρμογών στην πρόβλεψη φθορών οδοστρωμάτων. Χαρακτηριστικά μοντέλα σε αυτή την κατηγορία είναι ο γενετικός αλγόριθμος και το μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Λουκέρη Ε.Δ., 2004).

5.3.5. Εμπειρικά μοντέλα

Στα πρότυπα αυτά η εξαρτημένη μεταβλητή είναι κάποιος δείκτης της συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Βασίζονται σε παρατηρήσεις ή μετρήσεις των χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων. Χρησιμοποιούνται υποκειμενικοί δείκτες κατάστασης των οδοστρωμάτων όπως ποιότητα κύλισης, εξυπηρετικότητα καθώς και στατιστικοί δείκτες. Αυτοί οι δείκτες συμπεριφοράς του οδοστρώματος συσχετίζονται με μία ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές όπως δομική αντοχή, φορτία κυκλοφορίας και περιβαλλοντικές συνθήκες (Παπαγεωργίου Γ.Π, 2010).

5.3.6. Μηχανιστικά μοντέλα

Τα πρότυπα αυτά βασίζονται στη συμπεριφορά των υλικών κατασκευής κάτω από τη συνδυασμένη επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας και του περιβάλλοντος. Τα μοντέλα των υλικών που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα είναι απλοποιημένα και αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά τους μόνο κάτω από περιορισμένες συνθήκες. Αν και έχουν γίνει πολλές προσπάθειες προς αυτήν την κατεύθυνση δεν έχει αναπτυχθεί ένα εμπειριστατωμένο και αξιόπιστο μηχανιστικό μοντέλο, και λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας επιδείνωσης των οδοστρωμάτων, αυτή η προσέγγιση φαίνεται προς το παρόν δύσκολη (Παπαγεωργίου Γ.Π, 2010).

5.3.7. Εμπειρικά –Μηχανιστικά μοντέλα

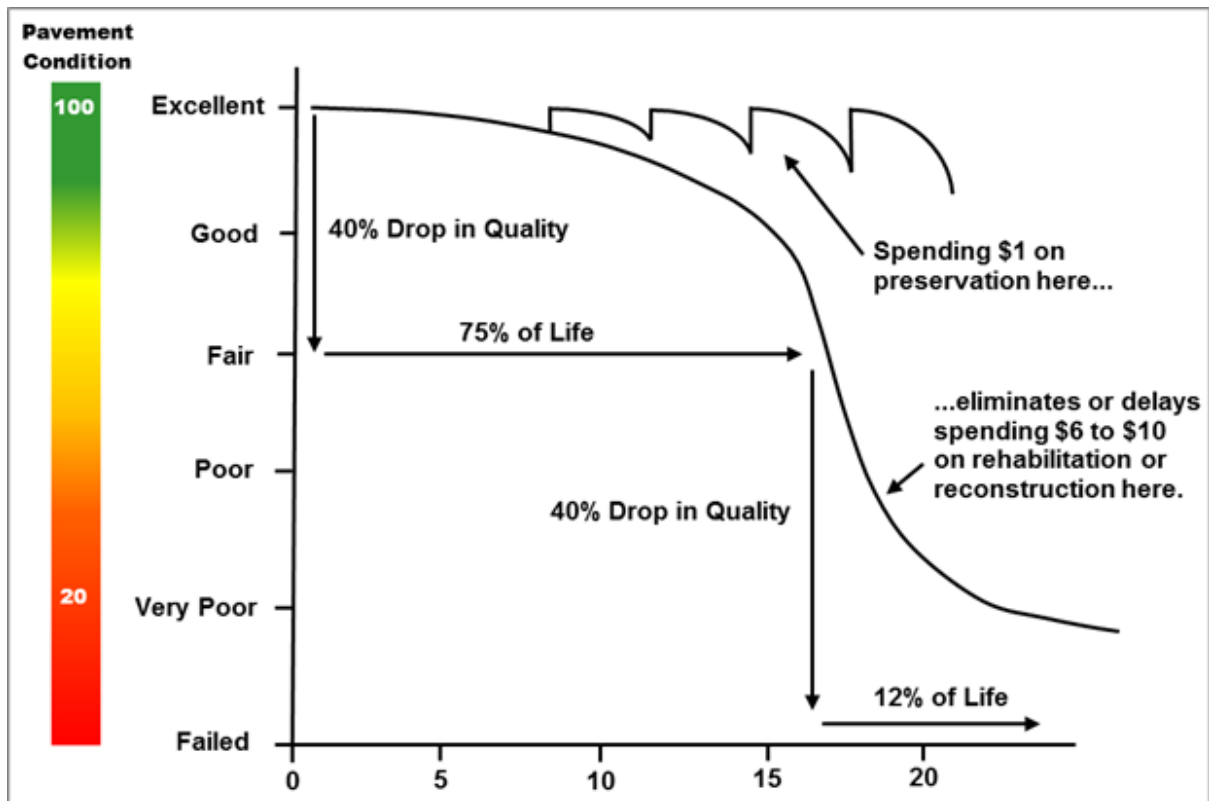
Στα πρότυπα αυτά η επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών βασίζεται σε εκτιμήσεις της κατάστασης των οδοστρωμάτων και οι συντελεστές των παραμέτρων των μοντέλων βαθμονομούνται με τη χρήση εμπειρικών στοιχείων και διαδικασιών στατιστικής εκτίμησης. Αυτή η προσέγγιση δημιουργίας μοντέλων είναι η μόνη εφικτή σε περιπτώσεις που η μηχανιστική ανάλυση είναι αδύνατη διότι, είτε η ακριβής φυσική διαδικασία της επιδείνωσης του οδοστρώματος δεν είναι πλήρως κατανοητή είτε είναι πάρα πολύ σύνθετη. Τα εμπειρικά μηχανιστικά μοντέλα απαιτούν τη γνώση ενός μικρού αριθμού μεταβλητών οι οποίες μετρούνται συνήθως κατά τις επισκοπήσεις της κατάστασης του

οδοστρώματος ή είναι διαθέσιμες από τα στοιχεία συντήρησης, τις κυκλοφοριακές μετρήσεις και τα στοιχεία της κατασκευής του (Παπαγεωργίου Γ.Π, 2010).

5.4. Σκοπός των μοντέλων πρόβλεψης

Τις περισσότερες φορές και με απλές τεχνικές παρατηρήσεις τα επίπεδα ελέγχου και επέμβασης μίας φθοράς μπορούν να γίνουν αντιληπτά. Σκοπός όμως των μοντέλων πρόβλεψης είναι η έκταση της φθοράς συναρτήσει της χρονικής στιγμής, ώστε στη συνέχεια να βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες συντήρησης με συνεκτίμηση κατάλληλων στρατηγικών και ιεράρχηση των αναγκών, όταν οι διαθέσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι.

Ανάλογα με το βαθμό σοβαρότητας της φθοράς γίνεται ταξινόμηση των τμημάτων του οδικού δικτύου ως προς την ανάγκη συντήρησης και επιλέγεται αν πρέπει να ληφθούν μέτρα επέμβασης ή όχι. Το κόστος των εργασιών συντήρησης στο νέο οδόστρωμα προφανώς είναι μηδενικό και αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Παρεμβάσεις στο σημείο ελέγχου απαιτούν μικρότερο κεφάλαιο, ενώ όσο περνά ο χρόνος και πλησιάζει το σημείο παρέμβασης το κόστος αυξάνεται. Εφόσον παρέλθει το σημείο παρέμβασης το κόστος αυξάνεται πλέον με ραγδαίους ρυθμούς, καθώς η έκταση της φθοράς αυξάνεται εκθετικά. Με βάση τα παραπάνω επιδιώκεται καταρχάς ο βέλτιστος χωρικός και χρονικός προγραμματισμός. Επιδιώκεται οι όμοιες εργασίες διαφορετικών τμημάτων ή οι ετερόκλητες εργασίες ενός τμήματος να ομαδοποιούνται για λόγους οικονομίας. Κάποιες φορές η προτεραιότητα παρακάμπτεται ακριβώς για χάρη της ομαδοποίησης, οπότε πέραν των άμεσων από άποψη ασφάλειας κυρίως παρεμβάσεων που δεν μπορούν να αναβληθούν, για τις υπόλοιπες εργασίες γίνεται και εκτίμηση του κόστους αναβολής και του κόστους μελλοντικής επέμβασης, οπότε η φθορά θα έχει επεκταθεί. Το είδος της παρέμβασης που επιλέγεται είναι αυτό που αποδίδει το μέγιστο λόγο απόδοσης προς κόστος.



Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα συσχέτισης κατάστασης - χρόνου ζωής του οδοστρώματος και του κόστους συντήρησής του. (<http://www.thruway.ny.gov/oursystem/img/capitalprogram/pavement-condition.png>)

Τα αποτελέσματα των αποφάσεων, το είδος των παρεμβάσεων και η στιγμή της πραγματοποίησής τους καταγράφονται εκ νέου στη βάση δεδομένων, δημιουργώντας το ιστορικό, με βάση το οποίο θα επαναξιολογηθούν πιθανά μελλοντικά σενάρια παρέμβασης. Η διαδικασία αυτή της ανατροφοδότησης των στοιχείων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επιβεβαίωση και βελτίωση του συστήματος, γιατί δίνει τη δυνατότητα να συγκριθούν τα πραγματικά δεδομένα με αυτά που προκύπτουν από τα μοντέλα πρόβλεψης. Έτσι μπορεί να επιτευχθεί σύγκριση του πραγματικού κόστους με το αρχικά αναμενόμενο από την ανάλυση και την αρχική πρόβλεψη αλλά και να συγκριθούν τα αποτελέσματα παρατήρησης της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων με αυτή που αναμένεται από τα μοντέλα πρόβλεψης.

5.5. Δείκτες Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων

Η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος το οποίο περιλαμβάνει όλους τους δείκτες εύκαμπτων οδοστρωμάτων θεωρείται εξαιρετικά δύσκολη καθώς οι δείκτες επηρεάζονται από τις ιδιαιτερότητες της κάθε χώρας, την οργάνωση, την συντήρηση των οδοστρωμάτων, οι κλιματολογικές συνθήκες κ.α. (Πέρρου, 2014)

5.6. Δείκτες Κατάστασης Οδοστρώματος

Η αξιολόγηση της κατάστασης του οδοστρώματος για λόγους διαχείρισης της συντήρησης, αλλά και γενικότερων αποφάσεων κατασκευής οδών μπορεί να γίνει αποτελεσματικά με τη χρήση αριθμητικών δεικτών που αποδίδουν μια ποσοτική αποτίμηση των χαρακτηριστικών της κατάστασης του οδοστρώματος. Η διαχείριση οδοστρωμάτων βασίζεται στον καθορισμό δεικτών κατάστασης οδοστρωμάτων, οι οποίοι εκφράζουν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το κάθε οδόστρωμα από δομικής και λειτουργικής πλευράς, και βάσει των οποίων μπορούν να εκτιμηθούν οι ανάγκες της συντήρησης τα επόμενα χρόνια. Στα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων χρησιμοποιούνται δύο είδη δεικτών, οι μεμονωμένοι δείκτες κατάστασης που δείχνουν τις μεταβολές μιας συγκεκριμένης φθοράς και οι σύνθετοι δείκτες που δείχνουν τις μεταβολές της γενικής κατάστασης (συνάθροιση όλων των φθορών) οδοστρώματος συναρτήσει των παραγόντων επιρροής. Οι δείκτες κατάστασης εισάγονται στα δεδομένα λειτουργικής κατάστασης οδοστρώματος και χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις επιπτώσεις των παραγόντων επιρροής στη συμπεριφορά τμημάτων οδοστρώματος και βοηθούν:

1. Στον καθορισμό του χρόνου παρεμβάσεων της συντήρησης σε οποιοδήποτε τμήμα οδού με τη χρήση μεμονωμένων δεικτών κατάστασης.
2. Στην επιλογή συγκεκριμένων τεχνικών συντήρησης με τη χρήση μεμονωμένων δεικτών, αφού προσφέρουν πιο λεπτομερείς και ακριβείς προβλέψεις κόστους στο πρόγραμμα ανάλυσης των συστημάτων διαχείρισης.
3. Αντίθετα, στην επίβλεψη της συνολικής κατάστασης του δικτύου χρησιμοποιούνται οι σύνθετοι δείκτες κατάστασης. Οι δείκτες κατάστασης μπορούν να έχουν οποιαδήποτε κλίμακα τιμών, η πιο συνήθης είναι από 0 έως 5, ή από 0 έως 10 ή από 0 έως 100, με 0 την καλύτερη ή χειρότερη κατάσταση. Παρακάτω θα περιγραφθούν μερικοί δείκτες φθοράς που αναφέρονται συχνά στη βιβλιογραφία και οι σχέσεις που συνδέουν τους δείκτες μεταξύ τους. (Ι. Παναγοπούλου, 2011)

Οι κυριότεροι δείκτες κατάστασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων κωδικοποιούνται ως ακολούθως:

Δείκτης	Distress Manifestation Index (DMI)
Μέτρηση	Συνολική αξιολόγηση της επιφανειακής κατάστασης του οδοστρώματος
Εύρος τιμών	0 – 248
Βέλτιστη κατάσταση	248
Χείριστη κατάσταση	0

Δείκτης	International Roughness Index (IRI)
Μέτρηση	Αξιολόγηση της ποιότητας κύλισης του οδοστρώματος με βάση την ομαλότητα του
Εύρος τιμών	0 – 20 (για επιστρωμένα οδοστρώματα)
Βέλτιστη κατάσταση	0
Χείριστη κατάσταση	20

Δείκτης	Pavement Condition Index (PCI)
Μέτρηση	Συνολική αξιολόγηση της δομικής και λειτουργικής κατάστασης του οδοστρώματος
Εύρος τιμών	0 – 100
Βέλτιστη κατάσταση	100
Χείριστη κατάσταση	0

Δείκτης	Present Serviceability Index (PSI)
Μέτρηση	Αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης του οδοστρώματος σε σχέση με την ποιότητα οδήγησης
Εύρος τιμών	0 – 5
Βέλτιστη κατάσταση	5
Χείριστη κατάσταση	0

Δείκτης	Riding Comfort Index (RCI)
Μέτρηση	Αξιολόγηση της ποιότητας κύλισης του οδοστρώματος με βάση την άνεση μετακίνησης των χρηστών
Εύρος τιμών	0 – 10
Βέλτιστη κατάσταση	10
Χείριστη κατάσταση	0

Δείκτης	Roughness Index for Driving Expenditure (RIDE)
Μέτρηση	Εκτίμηση της επιπεδότητας του οδοστρώματος για συσχέτιση με το κόστος λειτουργίας οχήματος
Εύρος τιμών	150 – 1500 (περίπου)
Βέλτιστη κατάσταση	150
Χείριστη κατάσταση	1500

5.6.1. Δείκτης Εκδήλωσης Φθορών (Distress Manifestation Index, DMI)

Ο Δείκτης Εκδήλωσης Φθορών DMI περιγράφει την κατάσταση του οδοστρώματος δίνοντας ένα μέτρο της έκτασης και της σοβαρότητας κάθε τύπου φθορά. Για την εξαγωγή του δείκτη

αυτού, σε κάθε φθορά i αντιστοιχεί συντελεστής βάρους C_i ανάλογα με την επίδραση της φθοράς στην υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος. Επιπλέον, καθορίζονται 5 επίπεδα έκτασης, ανάλογα με το ποσοστό της επιφάνειας που παρουσιάζει την εν λόγω φθορά, τα οποία περιγράφονται με το συντελεστή έκτασης D_i . Ανάλογοι συντελεστές S_i ορίζονται για τη σοβαρότητα της φθοράς που διακρίνεται επίσης σε 5 στάδια από ασήμαντη έως πολύ σοβαρή σοβαρότητα. Ο Δείκτης Εκδήλωσης Φθορών, που προκύπτει από καταγραφή n τύπων φθορών υπολογίζεται από την σχέση:

$$DMI = \sum_{i=1}^n C_i * (S_i + D_i)$$

Οι τιμές του Δείκτη Εκδήλωσης Φθορών κυμαίνονται μεταξύ 0 και 248, όπου η τιμή 0 αντιστοιχεί σε οδόστρωμα χωρίς φθορές. Η κλίμακα τιμών εκφράζει το επίπεδο λειτουργικότητας και υποδεικνύει το είδος των απαιτούμενων εργασιών συντήρησης που πρέπει να υλοποιηθούν στο εξεταζόμενο τμήμα ανάλογα με την τιμή του δείκτη.

Σε άλλη μελέτη (Ningyuan et al 2000), ο δείκτης DMI ορίζεται διαφορετικά ως εξής:

$$DMI = 10x \frac{DMI_{Max} - \sum_{i=1}^n C_i * (S_i + D_i)}{DMI_{Max}}$$

Όπου

C_i : συντελεστής βαρύτητας ανάλογα με την επίδραση της φθοράς i στην υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος (τιμές μεταξύ 0,5 και 3,0)

D_i : συντελεστής έκτασης της φθοράς i (τιμές μεταξύ 0,5 και 4,0)

S_i : συντελεστής σοβαρότητας της φθοράς i (τιμές μεταξύ 0,5 και 4,0)

DMI_{Max} : Η μέγιστη θεωρητική τιμή του δείκτη (η τιμή αυτή, με τους συντελεστές βαρύτητας που προτείνονται στην παραπάνω αναφορά, είναι 208).

5.6.2. Διεθνής Δείκτης Επιπεδότητας IRI (International Roughness Index)

Ο δείκτης καθορίστηκε μετά από μαθηματική προσομοίωση ενός τροχού με ελατήρια γνωστών μηχανικών χαρακτηριστικών και βάρους ίσου με ένα τυπικό άξονα επιβατικού οχήματος, ο οποίος κινείται πάνω σε επιφάνειες με διαφορετικό βαθμό ομαλότητας με ταχύτητα 80 km/h. Ο δείκτης IRI λαμβάνει τιμές από 0 έως 20 μονάδες ενώ η διαβάθμιση του είναι όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα (Sayers and Karamihias, 1997).

IRI, m/km	Επιπεδότητα
0	Απόλυτη
$0 < \text{IRI} < 6$	Ανεκτή (επιφανειακές ατέλειες)
$6 < \text{IRI} < 12$	Κακή (συχνές βυθίσεις μικρού βάθους και ορισμένες μεγάλες)
$12 < \text{IRI} < 20$	Πολύ κακή (μεγάλες βυθίσεις και διάβρωση της επιφάνειας)

Ο δείκτης IRI έχει συσχετιστεί με τις μετρήσεις που προκύπτουν από τα πλέον διαδεδομένα όργανα μέτρησης επιπεδότητας και έχουν εξαχθεί συγκεκριμένες σχέσεις που δομήθηκαν με βάση πληθώρα παρατηρήσεων. Για μετρήσεις με το Βρετανικό Bump Integrator:

$\text{IRI} = 0.0032 (\text{BIr}32) 0.89$, m/km με απόκλιση $\pm 0,31$ (IRI) 0.5

όπου BIr32= το αποτέλεσμα της μέτρησης με Bump Integrator (BI) για ταχύτητα μέτρησης 32 km/h.

Για μετρήσεις με το Γαλλικό προφιλόμετρο APL-71:

$\text{IRI} = \text{CP}2.5/16$, m/km με απόκλιση $\pm 0,27$ (IRI) 0.5

όπου CP2.5= συντελεστής του προφιλόμετρου (CP) σε μήκος αναφοράς 2,5 m.

5.6.3. Δείκτης Κατάστασης Οδοστρώματος (Pavement Condition Index, PCI)

Ο Δείκτης Κατάστασης Οδοστρώματος παρέχει τη δυνατότητα για την εκτίμηση της κατάστασης του οδοστρώματος βασιζόμενος στις φθορές που παρατηρούνται στην επιφάνεια του και έχει υιοθετηθεί από τα πρότυπα της ASTM για την αξιολόγηση της κατάστασης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Παρέχει μια υποκειμενική βάση για τον προσδιορισμό των αναγκών συντήρησης και εκτίμησης προτεραιοτήτων. Ο δείκτης δεν μετρά τη δομική ανεπάρκεια του οδοστρώματος ούτε παρέχει άμεση εκτίμηση της επιπεδότητας ή της ολίσθησης. Ο δείκτης λαμβάνει υπόψη 16 είδη φθορών για εύκαμπτα οδοστρώματα και η τιμή του κυμαίνεται από 0 (απαράδεκτη κατάσταση) έως 100 (άριστη κατάσταση). Η εξαγωγή του Δείκτη Κατάστασης Οδοστρώματος γίνεται με συγκεκριμένο μαθηματικό αλγόριθμο με βάση το ποσοστό της έκτασης και το επίπεδο σοβαρότητας κάθε φθοράς καθώς και συντελεστών βαρύτητας για κάθε τύπο και επίπεδο σοβαρότητας φθοράς (ASTM, 1997, Shahin, 1994)

Φθορές εύκαμπτων οδοστρωμάτων που λαμβάνονται υπόψη στο δείκτη κατάστασης οδοστρώματος PCI:

1. Ρωγμές αλιγάτορα (Alligator cracking)
2. Ανάδυση ασφάλτου (Bleeding)
3. Ρωγμές πολυγωνικού τύπου (Block cracking)
4. Κυματώσεις (Corrugations)
5. Καθιζήσεις (Depressions)
6. Καύση ή ενανθράκωση του ασφαλτικού υλικού (Jet – Blast erosion)
7. Ρωγμές ανάκλασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων που εδράζονται σε δύσκαμπτα οδοστρώματα (Joint Reflection Cracking)
8. Διαμήκειες και εγκάρσιες ρωγμές (Longitudinal and Transverse Cracking)
9. Φθορά της επιφάνειας του οδοστρώματος λόγω ρίψης καυσίμων, ελαίων ή άλλων διαλυτών (Oil Spillage)
10. Μπαλώματα από φθορές και μπαλώματα σε τομές οδοστρώματος από οργανισμούς κοινής ωφέλειας (Patching and Utility Cut Patching)
11. Λείανση αδρανών (Polished Aggregate)
12. Αποκόλληση αδρανών (Raveling and Weathering)
13. Αυλακώσεις (Rutting)
14. Τοπικές μετακινήσεις του ασφαλτοτάπητα (Shoving)
15. Ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων (Slippage Cracking)
16. Τοπική διόγκωση (Swell)

5.6.4. Δείκτης Παρούσας Λειτουργικότητας (Present Serviceability Index, PSI)

Ο Δείκτης Παρούσας Λειτουργικότητας PSI συνδέει την λειτουργική κατάσταση του οδοστρώματος με την ποιότητα οδήγησης. Πρόκειται για το αποτέλεσμα της εμπειρίας που προέκυψε στα πλαίσια του οδικού πειράματος AASHTO και βασίζεται σε αντικειμενικές μετρήσεις ορισμένων φυσικών παραμέτρων της επιφάνειας του οδοστρώματος όπως η διακύμανση της εγκάρσιας κλίσης, οι ρηγματώσεις (ποσοστό ρηγματωμένης επιφάνειας), το βάθος αυλακώσεων και το ποσοστό επιφάνειας με τοπικές επισκευές. Ο δείκτης λαμβάνει τιμές από 0 (απαράδεκτη ποιότητα οδήγησης) έως 5 (άριστη ποιότητα οδήγησης). Στις ΗΠΑ, η τιμή του PSI για νέα οδοστρώματα πρέπει να έχει τιμή μεταξύ 4,2 έως 4,7, ανάλογα με την ποιότητα κατασκευής. Η τιμή του δείκτη μειώνεται σταδιακά με το χρόνο. Η τιμή 2,5 συνήθως θεωρείται ως επίπεδο προειδοποίησης για αποκατάσταση του οδοστρώματος. Όταν ο δείκτης έχει τιμή μικρότερη του 2,0, το οδόστρωμα θεωρείται ότι βρίσκεται σε κακή κατάσταση και απαιτείται άμεση αποκατάστασή του. Ο δείκτης PSI μπορεί να υπολογιστεί για εύκαμπτα οδοστρώματα από την παρακάτω σχέση (Carey & Irick, 1960):

$$PSI=5,03 - 1,91 \log(1+SV) - 1,38 RD2 - 0,01 (C+P)0,5$$

Όπου

SV: μέση τιμή διακύμανσης της εγκάρσιας κλίσης και στα δύο ίχνη των τροχών

RD: μέσο βάθος αυλάκωσης (σε in) μετρούμενο και στα δύο ίχνη των τροχών με ράβδο μήκους 4 ft

C: ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας (μήκος ρωγμών σε ft/1000 ft²)

P: ποσοστό των μπαλωμάτων (ft²/1000 ft²)

Η επιπεδότητα, η οποία εκφράζεται από την μέση τιμή της κλίσης (SV), συμβάλλει πολύ ουσιαστικά στη τιμή του PSI (περίπου κατά 95%), ενώ μόνο το 5% συνδέεται με την επιρροή άλλων παραγόντων όπως οι επιφανειακές φθορές. Ιδιαίτερα ασθενής είναι για παράδειγμα η συμβολή των αυλακώσεων όπως προέκυψε από συσχέτιση του δείκτη παρούσας λειτουργικότητας με επί τόπου παρατηρήσεις σε δρόμους.

5.6.5. Δείκτης Άνεσης Οδήγησης (Riding Comfort Index, RCI)

Ο Δείκτης Άνεσης Οδήγησης RCI, παλιότερα γνωστός ως Βαθμολόγηση Παρούσας Εξυπηρετικότητας PPR (Present Performance Rating), προέκυψε από την βαθμολόγηση της ποιότητας οδήγησης που έγινε εμπειρικά από ομάδα ειδικών για οδοστρώματα διαφόρων καταστάσεων με εξαγωγή του μέσου όρου των βαθμολογιών. Αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '50 και τις αρχές της δεκαετίας του '60 στον Καναδά (Haas et al., 1994). Ο δείκτης RCI προτάθηκε με σκοπό να περιγράψει την συνολική κατάσταση του οδοστρώματος, κατέληξε ωστόσο να αποτελεί μέτρο της επιπεδότητας του οδοστρώματος.

5.6.6. Δείκτης Επιπεδότητας Οδοστρώματος για εκτίμηση Κόστους Οδήγησης (Roughness Index for Driving Expenditure, RIDE)

Ο δείκτης αυτός προτάθηκε από τους Papagiannakis and Delwar (1999) με στόχο τη συσχέτιση του κόστους λειτουργίας οχήματος με την κατάσταση της οδού από άποψη επιπεδότητας. Ο δείκτης μετρά την κατακόρυφη επιτάχυνση ενός οχήματος λόγω των ανωμαλιών του οδοστρώματος με βάση ανάλυση συχνοτήτων του προφίλ της οδού. Ο δείκτης μπορεί να μετρηθεί με τη χρήση κατάλληλου επιταχυνσιόμετρου που στερεώνεται στο κινούμενο όχημα. Ο δείκτης μετράται σε mm/sec^2 και λαμβάνει τιμές μεταξύ 150 (περίπου) για οδόστρωμα χωρίς ανωμαλίες και 1500 (περίπου) για οδόστρωμα με σημαντικές ανωμαλίες.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι φθορές των οδοστρωμάτων παίζουν σημαντικό ρόλο στη ποιότητα στη λειτουργική και δομική κατάσταση των, καθώς οι παράγοντες όπως, η καταπόνηση, ο κυκλοφοριακός φόρτος, η μελέτη διαστασιολόγησης και συνθήκες περιβάλλοντος μεταβάλλουν την κατάσταση των οδοστρωμάτων με φθίνουσα πορεία από την αρχική τους κατάσταση.

Η παραμένουσα παραμόρφωση -τροχουλάκωση των ασφαλικών μιγμάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι έχουν σχέση με τα συστατικά στοιχεία του ασφαλικού μίγματος. Επίσης πολλαπλές είναι οι συσκευές που εκτιμούν την παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλικών μιγμάτων. Ένα ζήτημα που απασχολεί ήδη και σίγουρα θα απασχολήσει στο μέλλον τους ερευνητές είναι αν τα αποτελέσματα των καινούργιων μεθόδων και μηχανήματων θα είναι συμβατά με αυτά των παλαιότερων.

Επίσης τα Συστήματα Διαχείρισης Οδοστρωμάτων τα οποία με τακτική ανανέωση των δεδομένων (κατασκευαστικά δεδομένα, δεδομένα λειτουργικής κατάστασης οδοστρώματος, δεδομένα κυκλοφορίας, δεδομένα ανάλυσης κόστους / οφέλους), μπορεί να βρεθεί η κατάλληλη χρονική περίοδος επέμβασης της συντήρησης του οδοστρώματος έτσι ώστε να επιτευχθεί το ελάχιστο δυνατό κόστος συντήρησης.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Νικολαΐδης, Αθ. (1996). «Οδοποιία, Οδοστρώματα– Υλικά, Έλεγχος Ποιότητας»
2. https://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/5949/tsaimouch_pavement.pdf?sequence=3
3. <http://ikee.lib.auth.gr/record/111037/files/GRI-2009-2315.pdf>
4. Λοΐζος, Α., 2008. Οδοστρώματα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
5. <http://invenio.lib.auth.gr/record/135981/files/GRI-2015-13923.pdf?version=1>
6. <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CIV1532/3.1%20%CE%A6%CE%B8%CE%BF%CF%81%CE%AD%CF%82%20%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%83%CF%84%CF%81%CF%89%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD.pdf>
7. Νικολαΐδης, Αθ. (2002). «Οδοποιία, Οδοστρώματα – Υλικά, Έλεγχος Ποιότητας», 2η έκδοση.
8. Θεοδωρακόπουλος Δ., Μπούσιας Ε., Γιαννόπουλος Π. (2003). «Τεχνική της κατασκευής – Τόμος Α: Ανάλυση και σχεδιασμός κατασκευών»
9. Κοκκάλης Α., Ιωαννίδη, Α., Παρδάλη, Ε. (2002). «Δομή μίας σύγχρονης μεθόδου συντήρησης διαχείρισης οδοστρωμάτων – Το πρόγραμμα RIMMES»
10. Λουκέρη Ε.Δ. (2004), "Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης φθορών εύκαμπτων οδοστρωμάτων με τη χρήση ασαφών συστημάτων", Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
11. Παπαγεωργίου Γ.Π. (2010), "Βελτιστοποίηση αναβάθμισης και συντήρησης οδικού δικτύου μέσω αξιολόγησης λειτουργικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος
12. Παναγοπούλου Μ.Ι. (2011), "Σύστημα Οικονομικής και Περιβαλλοντικής Διαχείρισης Οδοστρωμάτων με χρήση γενετικών αλγορίθμων", Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα

Ξένη βιβλιογραφία

1. Sousa, J.B., Craus, J. and Monismith, C.L., 1991. Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete. Washington, University of California.
2. 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.
3. 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.
4. Uge, P., and van de Loo, P.J., 1974. Permanent Deformation of Asphalt Mixes, Koninklijke/Shell- Laboratorium, Amsterdam, November 1974.
5. Garba R., 2002. Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures, Thesis (Dr.Ing), Norwegian University of Science and Technology.
6. Ullidtz, P., 1998. Modelling Flexible Pavement Response and Performance. 1st edition, Polyteknisk Forlang.
7. 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.
8. Sayers, M.W. and Karamihas S.M., 1998. The little book of profiling, University of Michigan.
9. S.A. Cross, E.R. Brown, Selection of aggregate properies to minimize rutting of heavy duty pavements, Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture
10. Performance, ASTM STP 1147, Richard C. Meiniger, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1992.
11. 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.
12. Acikgoz, O. and Rauf,R., 2010. Analysis of Parameters Affecting Permanent Deformation in Road Pavement. Master Thesis, Chalmers University of Technology.

13. P.S Kandhal, R.B. Mallick, Effect of mix gradation on rutting potential of dense-graded asphalt mixtures, Transportation Research Record 1767.
14. A. J., Hand, A. L. Epps. Impact of Gradation Relative to Superpave Restricted Zone on Hot-Mix Asphalt Performance, Transportation Research Record 1767, pp. 158-166,TRB,National Research Council, Washington, D.C., 2001.
15. A. T Chowdhury, J. D. C. Grau, J. W. Button, and D. N. Little. Effect of Gradation on Permanent Deformation of Superpave Hot-Mix Asphalt. Presented at 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2001a.
16. Nukunya, B., R. Roque, M. Tia, and Y. A. Metha, Effect of Aggregate Structure on Rutting Potential of Dense-Graded Asphalt Mixtures, Transportation Research Record 1789, pp. 136- 145,TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2002.
17. P.S Kandhal, L.A. Cooley, Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using loaded wheel tester, National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 02-08,2002.
18. P. E., Sebaaly, A. J. T. Hand, W. M. McNamara, D. Weitzel, J. A. Epps, Filed and Laboratory Performance of Superpave Mixtures in Nevada, Transportation Research Record 1891, pp. 76-84, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2004.
19. Zhang, J., L. A. Cooley, Jr., G. Hurley, F. Parker. "Effect of Superpave Defined Restricted Zone on Hot-Mix Asphalt Performance." Transportation Research Record 1891, pp. 103- 111,TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2004.
20. Y.R Kim,. N Kim,. and N.P. Khosla, Effect of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete, Effect of Aggregate and Mineral fillers on Asphalt Mixture performance, ASTM, STP 1147, 1992.
21. D. Perdomo, J.W Button, and R.L. Lytton, A new approach for prediction of permanent deformation, Effect of Aggregate and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, ASTM, STP 1147,1992.
22. M. Kobayashi, K. Hokari, and K. Kubo, Effect of fine aggregate shapes on characteristics of asphalt mixtures, Mechanical Tests for Bituminous Materials, Proceedings of the fifth international RILEM symposium MTBM, Lyon, France, 1997.
23. Y.R Kim,. N Kim,. and N.P. Khosla, Effect of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete, Effect of Aggregate and Mineral fillers on Asphalt Mixture performance, ASTM, STP 1147, 1992.

24. A. Topal, B. Sengoz, Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 19, pp155-163, 2005.
25. A. Al-Suhaibani, J. Al-Mudaiheem, Al-fozen, F Effect of filler type and content on properties of asphalt concrete mixes, *Effect of Aggregate and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*, ASTM, STP 1147,1992.
26. B. Bogdanski, M. Slowik., Physical and mechanical properties of asphalt mixtures used in Poland in comparison to European regulations, *3rd International Conference, Bituminous mixtures and Pavements*, pp 625-632, Thessaloniki, 2002.
27. D. Gardete, L.P. Santos, J. Pais, Permanent deformation characterization of bituminous mixtures: Laboratorial tests, *Road Materials and Pavement Design*. vol 9, n° 3, pp. 537-547, 2008.
28. G. Airey, Fundamental binder and practical mixture evaluation of polymer modified bituminous materials, *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp 137-151, 2004.
29. S. Tayfur, H. Ozen, A. Aksoy, Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers, *Construction and building Materials*, Vol. 21, pp 328-337,2007.
30. B.O. Lurfald, J. Aurstad, L.J. BaklØkk, Functional testing of asphalt mixes on field Samples.
31. A. Gogula, M. Hossain, J. Boyer, S. Romanoschi, Effect of PG binder grade and source on performance of Superpave Mixtures under Humburg Wheel Tester, *Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, Iowa, 2003.
32. R. Garba, I. Horvli, Simplified testing method for evaluation of asphalt mixtures for their susceptibility to permanent deformation..
33. 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.
34. TRB AFD80, 2011. Committee of Strength and Deformation Characteristics of Pavement Sections, 90th Annual Meeting of Transportation Research Boards, Washington, DC.

35. Book: Distress identification manual 2003
36. Sayers, M. W. and Karamihas, S.M (1997). "The Little Book of Profiling, Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles." University of Michigan Transportation Research Institute,
37. Shahin, M. Y. (1998). "Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots." 3rd Printing, Kluwer Academic Publishers, MA
38. ASTM (1997 β). "Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures." ASTM D 3515-96, Vol. 04, section 04.03, PA.
39. Carey, W.N.Jr. and Irick, P.E. (1960). "The Pavement Serviceability-Performance Concept." Highway Research Board Bulletin, No. 250, 40-58.
40. Haas, R., Hudson, W. R. and Zaniewski, J. (1994). "Modern Pavement Management." Krieger Publishing Company, Malabar, FL.
41. Papagiannakis A.T. and Delwar M. (1999). "Methodology to improve pavement investment decisions", Final report to National Cooperative Highway Research Program for Study 1-33, Transportation Research Board, Washington, D.C.