



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

Επιβλέποντες:

Α. ΛΟΪΖΟΣ & Μ. ΚΑΡΛΑΥΤΗΣ

**ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ
ΑΥΛΑΚΩΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ
ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ**

**Διπλωματική εργασία
ΚΥΡΙΑΖΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2006

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους επιβλέποντες την διπλωματική μου εργασία, μέλη ΔΕΠ του τομέα Μ.Σ.Υ., Αν. Καθηγητή κ. Ανδρέα Λοΐζο και Επικ. Καθηγητή κ. Ματθαίο Καρλαύτη για την πολύτιμη καθοδήγησή τους καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης εργασίας, καθώς και για τις γνώσεις που αποκόμισα κατά την διάρκεια της συνεργασίας μας.

Αθήνα, Ιούλιος 2006

Γεώργιος Κυριαζής

ΣΥΝΟΨΗ

Στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η δημιουργία προτύπων πρόβλεψης του βάθους αυλάκωσης κατά το στάδιο εξέλιξης της αστοχίας στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από εγκαταστάσεις Επιταχυνόμενης Φόρτισης, τα οποία ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων του ερευνητικού προγράμματος PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure), το οποίο πραγματοποιήθηκε με την συμμετοχή δεκαπέντε ευρωπαϊκών χωρών, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας μέσω του τομέα Μ.Σ.Υ. (Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής) του Ε.Μ.Π. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων περιέχει έναν αρκετά μεγάλο αριθμό στοιχείων, όπως κατασκευαστικά, ιστορικά, κλιματολογικά, κυκλοφοριακά και στοιχεία αστοχιών. Με τη βοήθεια ημι-παραμετρικών προτύπων χρονικής διάρκειας τύπου «hazard» επιχειρήθηκε η ανάπτυξη ενός πιθανοτικού προτύπου που να υπολογίζει το βάθος αυλάκωσης συναρτήσει ορισμένων ανεξαρτήτων μεταβλητών, που φαίνεται να προκαλούν την εξέλιξη του φαινομένου. Η ανάλυση έδειξε ότι η εξέλιξη του βάθους αυλάκωσης επηρεάζεται από τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες, τα πάχη των οδοστρωμάτων, τον τύπο κατασκευής του οδοστρώματος και το τυπικό αξονικό φορτίο.

ABSTRACT

The object of this thesis is the development of models predicting the rut depth during the distress propagation phase on the surface of flexible and semi-rigid pavements. To achieve this goal data from Accelerated Loading Testing facilities were used. The data were obtained from the database of the PARIS project (Performance Analysis of Road Infrastructure), which was carried out by fifteen participating European countries including Greece, which was represented by the Dept. of Transportation Planning and Engineering of the National Technical University of Athens. This specific database includes a vast number of data, such as construction, historical, climate, traffic and distress data. The modeling of rut propagation was done with the use of probabilistic semi-parametric duration «hazard» models which included the explanatory variables that seemed to cause rut propagation. The analysis showed that the rut depth is affected mostly from the climate conditions, the thickness of layers, the construction type of the pavement and the number of ESALs.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... 1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ..... 5

2.1.	Εισαγωγή.....	5
2.2.	Αναφορά σε Προηγούμενες Έρευνες.....	7
2.3.	Αναλυτική Παρουσίαση Ερευνών.....	12
2.3.1	Εισαγωγή.....	12
2.3.2	Έρευνες με Δοκιμές Επιταχυνόμενης φόρτισης (ALT).....	12
2.4	Συμπεράσματα.....	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΤΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PARIS.....21

3.1	Εισαγωγή.....	21
3.2	Στόχοι & Βήματα.....	23
3.3	Προέλευση των δεδομένων.....	26
3.4	Σύλλογή Δεδομένων.....	33
3.5	Κανονικοποίηση Δεδομένων.....	34
3.6	Η Βάση Δεδομένων.....	35
3.6.1	Εισαγωγή.....	35
3.6.2	Αναλυτική παρουσίαση Δεδομένων.....	36
3.7	Μεθοδολογία Ανάλυσης.....	40
3.8	Τρόπος Προσέγγισης της Προτυποποίησης Αστοχιών.....	43
3.8.1	Έναρξη Αστοχιών (distress initiation).....	43
3.8.2	Εξέλιξη Αστοχιών (distress propagation).....	45
3.9.	Συναρτησιακή Μορφή της Εξέλιξης Αστοχιών.....	45
3.10.	Πρότυπα Έναρξης Ρηγματώσεων (cracking initiation models).....	47
3.10.1	Εισαγωγή.....	47
3.10.2	Ρηγματώσεις στο ίχνος (wheel path cracking).....	48
3.10.2.1	Εύκαμπτα οδοστρώματα (flexible pavement).....	48
3.10.2.2	Ημιάκαμπτα οδοστρώματα (semi-rigid pavements).....	50
3.10.3	Εγκάρσια Ανακλαστική Ρηγμάτωση (transverse reflection cracking).....	52
3.10.4	Συμπεράσματα.....	52
3.11	Πρότυπα Εξέλιξης Αστοχιών (distress propagation models).....	54

3.11.1	Ρηγμάτωση.....	54
3.11.1.1	Ρηγμάτωση στο ίχνο.....	54
3.11.1.2	Εγκάρσια ανακλαστική ρηγμάτωση.....	57
3.11.1.3	Σχόλια.....	58
3.11.2	Αυλάκωση.....	59
3.11.2.1	Ανάλυση αυλάκωσης.....	59
3.11.2.2	Σχόλια.....	60
3.11.3	Ομαλότητα κατά μήκος.....	61
3.11.4	Αποκόλληση Ασφαλτικού Υλικού.....	63
3.12	Αξιολόγηση.....	65
3.12.1	Εισαγωγή.....	65
3.12.2	Έναρξη Αστοχιών.....	65
3.12.3	Εξέλιξη Αστοχιών.....	68
3.13	Εφαρμογή των Προτύπων.....	70
3.14	Συμπεράσματα.....	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....74

4.1	Βάση Δεδομένων.....	74
4.1.1	Εισαγωγή.....	74
4.1.2	Περιγραφή της βάσης Δεδομένων.....	74
4.1.3	Στατιστική Ανάλυση Βάσης Δεδομένων.....	77
4.2	Μεθοδολογία.....	89
4.2.1	Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας (Duration Models).....	89
4.2.2	Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας «Hazard».....	91
4.2.3	Ημι-παραμετρικά Πρότυπα.....	96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... 98

5.1.	Εισαγωγή Δεδομένων.....	98
5.1.1.	Γενικά.....	98
5.1.2.	Ανεξάρτητες Μεταβλητές.....	98
5.1.3.	Εξαρτημένη Μεταβλητή.....	100
5.2.	Στατιστική Επεξεργασία Δεδομένων.....	101

5.2.1.	Γενικά.....	101
5.2.2.	Ημι-παραμετρική μέθοδος.....	101
5.2.3.	Αποτελέσματα από τη Στατιστική Επεξεργασία.....	102
5.2.4.	Συμπεράσματα.....	108

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ..... 110

6.1	Γενικά.....	110
6.2	Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	111
6.3	Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα.....	113

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ..... 114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι οδικές μεταφορές αποτελούν ένα μεγάλο ποσοστό, άνω του 80% του συνόλου των μεταφορών στην Ευρώπη. Η διατήρηση καλής υποδομής στα οδικά δίκτυα είναι ουσιώδης για την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη της Ευρώπης. Ένας καλός δομικός σχεδιασμός περιλαμβάνει την συντήρηση και την σωστή διαχείριση των οδοστρωμάτων. Η συντήρηση οδοστρωμάτων εμπεριέχει κόστος που αφορά τόσο τον κατασκευαστή όσο και τον χρήστη του δρόμου. Για τον κατασκευαστή υπάρχει το κόστος σχεδιασμού και εφαρμογής των μεθόδων συντήρησης αλλά και το κόστος που υφίσταται λαμβάνοντας προφυλάξεις για τους εργάτες, ενώ για τον χρήστη το κόστος αναφέρεται στις καθυστερήσεις που υφίσταται και στους κινδύνους που διατρέχει σε περιόδους κατά τις οποίες εκτελούνται απαραίτητες εργασίες συντήρησης ή αποκατάστασης οδοστρωμάτων. Το κόστος από την συντήρηση οδοστρωμάτων είναι σημαντικό γι' αυτό είναι απαραίτητη σε ένα σχεδιασμό η χρήση συστημάτων διαχείρισης οδοστρωμάτων. Στα συστήματα αυτά, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο η μελέτη της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων κάτω από διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος και φορτίσεων. Έτσι, είναι αναγκαία η συλλογή πληροφοριών για την υπάρχουσα και μελλοντική κατάστασή τους. Οι πληροφορίες για την υπάρχουσα κατάσταση συλλέγονται με επιτόπου μετρήσεις στα υπό εξέταση οδικά τμήματα, ενώ για τις πληροφορίες ως προς την μελλοντική τους κατάσταση, γίνεται πρόβλεψη με χρήση των προτύπων πρόβλεψης αστοχιών. Αυτά παρέχουν την δυνατότητα στους υπεύθυνους διαχειριστές των έργων να γνωρίζουν την κατάσταση των οδοστρωμάτων σε συνάρτηση με τον χρόνο, τους παράγοντες που προκαλούν τις μελλοντικές αστοχίες και τα αποτελέσματα της αποκατάστασης, απαραίτητα στοιχεία στο σύνολό τους για την κατάστρωση σχεδίου διαχείρισης και αποκατάστασης του δικτύου.

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι τα πρότυπα πρόβλεψης έναρξης και εξέλιξης αστοχιών διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων, γι' αυτό είναι ήδη ευρεία η χρήση τους στα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων σε όλο τον κόσμο. Το πρότυπο πρόβλεψης έναρξης αστοχιών μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια τη χρονική στιγμή που θα αστοχήσει για πρώτη φορά το οδόστρωμα έχοντας ως αφετηρία το έτος κατασκευής, επιφανειακής

συντήρησης ή τελευταίας επίστρωσής του. Το πρότυπο πρόβλεψης εξέλιξης αστοχιών περιγράφει, για ένα οδόστρωμα που έχει ήδη αστοχήσει, το πώς η αστοχία αναπτύσσεται με την πάροδο του χρόνου τόσο ως προς την σοβαρότητα, όσο και την έκταση αυτής. Αν εκμεταλλευτεί σωστά αυτές τις πληροφορίες ο διαχειριστής του έργου, μπορεί να προγραμματίσει τον χρόνο συντήρησης ή αποκατάστασης του οδοστρώματος, εκτιμώντας ταυτόχρονα το ποσό των χρημάτων που θα απαιτηθούν και τον τρόπο με τον οποίο θα καταστεί το οδόστρωμα πάλι λειτουργικό, αν δηλαδή θα χρειαστεί απλώς συντήρηση ή πλήρη αποκατάσταση. Έτσι με την βοήθεια αυτών των προτύπων πρόβλεψης, ο διαχειριστής του έργου μπορεί να πραγματοποιήσει την ιδανικότερη διάθεση των οικονομικών του πόρων, να υπολογίσει την εναπομείνσα ζωή του δικτύου και να πραγματοποιήσει ανάλυση του κόστους ζωής του.

Τα παραπάνω πρότυπα μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν για την παροχή πληροφοριών και πρακτικών οδηγιών στο μελετητή, που αφορούν στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων. Έτσι, με βάση τις παραμέτρους σχεδιασμού του υπό κατασκευή οδοστρώματος και γνωρίζοντας τον κύκλο ζωής του έργου, μπορεί να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με το αν το οδόστρωμα θα αστοχήσει πριν ή μετά το χρόνο ζωής του έργου. Με αυτόν τον τρόπο, αν κριθεί απαραίτητο, οι παράμετροι του σχεδιασμού μπορούν να τροποποιηθούν ώστε το αποτέλεσμα να είναι το επιθυμητό.

Όπως αναφέρθηκε τα πρότυπα πρόβλεψης αστοχιών αποτελούν το πιο σημαντικό μέρος των συστημάτων διαχείρισης οδοστρωμάτων. Μη ακριβή πρότυπα μπορεί να κάνουν την επιλογή της καλύτερης στρατηγικής για την διατήρηση των οδοστρωμάτων πολύ δύσκολη. Αντιθέτως, σωστά διατυπωμένα πρότυπα βοηθούν ώστε να διασφαλιστεί ότι η ανάλυση του κόστους ζωής των οδοστρωμάτων θα συνεισφέρει σε ένα ιδανικό επενδυτικό πρόγραμμα.

Στην προσπάθεια δημιουργίας των προτύπων αυτών, το πρώτο βήμα είναι η συλλογή στοιχείων από οδοστρώματα τα οποία βρίσκονται σε λειτουργία (in service pavements). Αυτά τα στοιχεία αφορούν κλιματολογικά δεδομένα (θερμοκρασίες περιβάλλοντος, βροχοπτώσεις, υγρασία κ.λ.π.), κυκλοφοριακά δεδομένα (αριθμός ετήσιων διελεύσεων τυπικών αξόνων, ποσοστό φορτηγών κ.λ.π.), κατασκευαστικά δεδομένα (πάχη υπόβασης – βάσης – ασφαλικών κ.λ.π) και ιστορικά δεδομένα (έτος κατασκευής οδοστρωμάτων, χρονολογίες μετέπειτα συντηρήσεων ή αποκαταστάσεων

κ.λ.π.). Επίσης, γίνεται καταγραφή του είδους και του μεγέθους των ρωγμών που προϋπήρχαν ή εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια της μελέτης στα οδοστρώματα, καθώς και ό,τι άλλου κρίνεται ότι μπορεί να φανεί χρήσιμο στην μετέπειτα επεξεργασία. Έτσι, δημιουργείται μια βάση δεδομένων η οποία αφού υποστεί κατάλληλη επεξεργασία οδηγεί με ικανοποιητική ακρίβεια στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την συμπεριφορά των οδοστρωμάτων και σε ποιο βαθμό ο καθένας. Όλα τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την πιο πάνω μελέτη, μπορούν να βοηθήσουν το διαχειριστή ενός οδικού δικτύου να προβλέψει πιο σωστά τον τρόπο συντήρησής του.

Ο σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση των παραγόντων που επηρεάζουν το βάθος αυλάκωσης, και του μεγέθους επιρροής τους και ανάπτυξη προτύπων πρόβλεψης της εξέλιξης της αυλάκωσης στα εύκαμπτα και ημιιάκαμπτα οδοστρώματα με τη χρήση στατιστικής ανάλυσης υψηλών προδιαγραφών.

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στα κεφάλαια που ακολουθούν. Έτσι:

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται αναφορές από την διεθνή βιβλιογραφία οι οποίες είναι σχετικές με τα παραπάνω αντικείμενα και πιο συγκεκριμένα, με την εκπόνηση ερευνών ή εργασιών με σκοπό την δημιουργία προτύπων πρόβλεψης (κυρίως της εξέλιξης) των αστοχιών οδοστρωμάτων.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναλυτική παρουσίαση του προγράμματος PARIS και δίνεται έμφαση κυρίως στον σκοπό για τον οποίο πραγματοποιήθηκε και στα αποτελέσματα που τελικώς προέκυψαν.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται συνοπτικά η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην περαιτέρω επεξεργασία για την ποσοτική διερεύνηση του βάθους αυλάκωσης. Αναλύεται επίσης και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων της βάσης.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται ανάλυση της στατιστικής επεξεργασίας των στοιχείων της βάσης δεδομένων και των προτύπων που προέκυψαν, ενώ γίνεται και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στο Κεφάλαιο 6 διατυπώνονται τα τελικά συμπεράσματα και παρατίθενται σχετικές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Το προηγούμενο κεφάλαιο κατέδειξε την χρησιμότητα και αξία που έχουν για το μηχανικό τα πρότυπα πρόβλεψης αστοχιών για το σωστό σχεδιασμό όλων των ενεργειών που απαιτούνται, όταν το οδικό δίκτυο έχει φτάσει σε επίπεδο συντήρησης ή και αποκατάστασης. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία περιέχει ένα μεγάλο αριθμό ερευνών που σχετίζονται με την προτυποποίηση των κατασκευών, όπως είναι τα οδοστρώματα ή οι γέφυρες. Τα πρότυπα αυτά κατά κύριο λόγο συσχετίζουν ορισμένους δείκτες κατάστασης των κατασκευών με ανεξάρτητες μεταβλητές, όπως φορτία λόγω κυκλοφορίας, ηλικία και κλιματολογικούς παράγοντες. Τα βασικά μεγέθη της κατάστασης των κατασκευών είναι οι δείκτες αστοχίας, που κατηγοριοποιούνται ως δείκτες δομικής και λειτουργικής συμπεριφοράς. Δομική συμπεριφορά είναι η ικανότητα της κατασκευής να φέρει τα φορτία σχεδιασμού, ενώ η λειτουργική συμπεριφορά έχει να κάνει με τη λειτουργικότητα και ασφάλεια της κατασκευής. Οι αστοχίες μπορεί να οφείλονται στα φορτία, την υγρασία, τη θερμοκρασία, τις τυχόν κατασκευαστικές ατέλειες ή και συνδυασμό των παραπάνω.

Τα πρότυπα πρόβλεψης αστοχιών, που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία, χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: ντετερμινιστικά (deterministic)

μηχανιστικά (mechanistic)

μηχανιστικά-εμπειρικά (mechanistic-empirical)

πιθανοτικά (probabilistic).

Η θεωρία ανάπτυξης των πρώτων (deterministic), βασίζεται σε μια απλή διαδικασία που χρησιμοποιεί ιστορικά στοιχεία από προγενέστερες επιθεωρήσεις των οδοστρωμάτων. Τα οδοστρώματα εν συνεχεία ταξινομούνται σε τάξεις ή οικογένειες. Μία οικογένεια, είναι ένα γκρουπ οδοστρωμάτων με παρόμοια χαρακτηριστικά. Η καμπύλη αστοχίας κάθε τέτοιας οικογένειας δημιουργείται συγκρίνοντας τον αριθμό των ετών από την τελευταία αποκατάσταση, επανεπίστρωση ή την κατασκευή με τις αντίστοιχες τιμές της κατάστασης του οδοστρώματος. Μία σχέση μεταξύ αυτών των

δύο τιμών αποκαλύπτεται και παράγεται μία εξίσωση παλινδρόμησης (regression equation). Η εξίσωση αυτή μπορεί έπειτα να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει την αναμενόμενη κατάσταση του οδοστρώματος σε κάποιο μελλοντικό χρονικό διάστημα, δεδομένης της τωρινής του κατάστασης ή ηλικίας. Είναι επίσης πιθανό να υπολογίζεται ο συνολικός όγκος κυκλοφορίας στη θέση του χρόνου.

Ο δεύτερος τύπος προτύπων, τα μηχανιστικά (mechanistic), είναι τα πιο δύσκολα από όλους τους τύπους στο να τεθούν σε εφαρμογή. Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχουν πρότυπα πρόβλεψης για κάθε αστοχία χωριστά. Τα πρότυπα αυτά περιλαμβάνουν παράγοντες, όπως είναι ο όγκος κυκλοφορίας, οι κλιματολογικές συνθήκες και τα κατασκευαστικά στοιχεία, έτσι ώστε να δημιουργούνται διαφορετικές καμπύλες κύκλου ζωής για κάθε οδόστρωμα χωριστά.

Τα μηχανιστικά-εμπειρικά (mechanistic-empirical) πρότυπα, περιλαμβάνουν ένα θεωρητικό μηχανιστικό πρότυπο για τον υπολογισμό της απόκρισης του οδοστρώματος (τάσεις, κοπώσεις και υποχωρήσεις) και μια εμπειρική συνάρτηση που συσχετίζει την απόκριση με την απόδοση του οδοστρώματος (τραχύτητα, αυλακώσεις και ρηγματώσεις). Πρέπει να αναφερθεί ότι αυτή η μέθοδος προτείνεται για μελλοντική χρήση από τον οδηγό σχεδιασμού του AASHTO (American Association of Highway and Transportation Officials) του 2002.

Ο τελευταίος τύπος προτύπων, τα πιθανοτικά (probabilistic), χρησιμοποιούν οικογένειες, όπως και τα ντετερμινιστικά (deterministic), για να ομαδοποιήσουν οδοστρώματα με παρόμοια χαρακτηριστικά. Τα πρότυπα αυτά κατανέμουν τα ιστορικά στοιχεία σε ένα αριθμό κατηγοριών, ως προς την κατάσταση των οδοστρωμάτων. Έπειτα καθορίζουν την ποσοστιαία αλλαγή που πρέπει να υποστεί το κάθε οδόστρωμα για να μεταπηδήσει από τη μία κατηγορία στην άλλη.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια βρίσκεται σε εξέλιξη ή έχει ήδη ολοκληρωθεί ένας αρκετά μεγάλος αριθμός ερευνών σχετικά με το αντικείμενο της προτυποποίησης των αστοχιών οδοστρωμάτων από δεδομένα επιτόπου μετρήσεων (Real-Time Loading Testing RLT) και δεδομένα που συλλέγονται από εγκαταστάσεις επιταχυνόμενης φόρτισης οδοστρωμάτων (Accelerated Loading Testing ALT). Έτσι

κατέστη δυνατή η ανεύρεση παρόμοιων διερευνήσεων είτε από το διαδίκτυο, είτε από περιοδικά ή άλλα συγγράμματα και αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

2.2 Αναφορά σε Προηγούμενες Έρευνες

Οι πιο σημαντικές έρευνες που αποσκοπούσαν στην ανάπτυξη προτύπων έναρξης και εξέλιξης αστοχιών κατασκευών, καθώς και στην επαλήθευση αυτών παρουσιάζονται παρακάτω. Η αναφορά αυτών εντοπίζεται σε έρευνες που είχαν ως αντικείμενό τους την περιοχή αστοχιών οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων.

Τα πρότυπα του Συστήματος Σχεδιασμού Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων της πόλης Michigan (Michigan Flexible Pavement Design System, MFPDS) [1] προβλέπουν την έναρξη και την εξέλιξη ρηγματώσεων και αυλακώσεων. Κάθε πρότυπο, που αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη αστοχία, περιλαμβάνει έναν αριθμό από ανεξάρτητες μεταβλητές, όπως ηλικία, κυκλοφοριακός φόρτος, παράμετροι σχεδιασμού και κλιματολογικοί παράγοντες.

Το Δυναμικό Προσαρμοστικό Πρότυπο Φίλτρου (Dynamic Adaptive Filter Model) [2], το οποίο αναπτύχθηκε με τη χρήση στοιχείων από εν λειτουργία οδοστρώματα του δικτύου αυτοκινητοδρόμων της Florida, έχει τη δυνατότητα να προβλέπει τη μελλοντική συμπεριφορά των ρηγματώσεων με βάση ιστορικά στοιχεία αυτών. Και αυτό το πρότυπο, όπως και τα Νευρωνικά Δίκτυα (αναφέρεται παρακάτω), είναι μη γραμμικό και έχει τη δυνατότητα να ανταποκρίνεται άμεσα σε αλλαγές που τυχόν υφίσταται το οδόστρωμα και μάλιστα κατά τρόπον ώστε να βελτιώνεται η απόδοσή του με τη συνεχή επεξεργασία των χρονικών διακυμάνσεων της εξέλιξης των ρηγματώσεων. Επίσης και αυτό το πρότυπο κάνει μελλοντική πρόβλεψη βάσει των παρόντων και προγενέστερων συνθηκών.

Το Πρότυπο Λογιστικής Εξέλιξης (Logistic Growth Model) [3] είναι ένα πρότυπο εξέλιξης αστοχιών που βασίζεται στην ντετερμινιστική θεωρία (deterministic) και ο Kuo ήταν ο πρώτος που το εφάρμοσε στο οδικό δίκτυο του Michigan. Αρχικά το πρότυπο είχε αναπτυχθεί για την πρόβλεψη της αύξησης πληθυσμών στο πεδίο της βιολογίας. Η προσαρμογή του στα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων βασίζεται

σε ένα αυξανόμενο δείκτη αστοχίας (distress index), με διαφορετικές τιμές ζωής σχεδιασμού. Δηλαδή ο αρχικός δείκτης αστοχίας ενός ανακατασκευασμένου ή επανεπιστρωμένου οδοστρώματος ορίζεται ίσος με το μηδέν. Το πρότυπο έτσι περνάει από την τιμή μηδέν τη χρονική τιμή μηδέν (νέα κατασκευή). Για να αντικατοπτριστεί αυτή η οριακή κατάσταση στο πρότυπο, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$DI = \alpha \left[\frac{(\alpha + \beta)}{(\alpha + \beta e^{-\gamma t})} - 1 \right]$$

όπου:

DI = δείκτης αστοχίας

α = πιθανή έναρξη DI

β = περιορισμός DI

t = ηλικία (χρόνια)

γ = πρότυπο δείκτη αστοχίας = $-\left(\frac{1}{DSL}\right) \ln \left(\left[\frac{(\alpha + \beta)}{(\alpha + cDP)} \right] - 1 \right) \alpha / \beta$

DSL = ζωή σχεδιασμού

cDP = προκαθορισμένη τιμή του DI

Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο γίνεται η υπόθεση ότι ο ρυθμός ανάπτυξης τη χρονική στιγμή t είναι ανάλογος του αποτελέσματος της αστοχίας την ίδια χρονική στιγμή t και του μελλοντικού μεγέθους ανάπτυξης. Όσο ο χρόνος t αυξάνεται, ο DI πλησιάζει την τιμή 100. Ανεξάρτητα από την τιμή αυτών των παραμέτρων η καμπύλη έχει σιγμοειδή μορφή (S) και είναι συμμετρική γύρω από το σημείο αλλαγής κλίσης.

Τα Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Network Models) [4] είναι μη γραμμικά πρότυπα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή παρελθοντικών και μελλοντικών στοιχείων, που έχουν μια χρονική αλληλουχία μεταξύ τους, με συνέπεια να αποκαλύπτουν τις «κρυμμένες» σχέσεις που διέπουν τις χρονικές διακυμάνσεις των στοιχείων. Τα πρότυπα αυτά έχουν μελετηθεί τα τελευταία χρόνια ως εναλλακτικά των παραδοσιακών προτύπων πρόβλεψης αστοχιών (Μηχανιστικά –

Εμπειρικά Πρότυπα). Η έμπνευση για τη δημιουργία αυτών προήλθε από τη μελέτη της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου, ο οποίος μπορεί να «διδάσκεται» απ' ευθείας από παρελθοντικά δεδομένα. Δηλαδή, ομοίως με τον ανθρώπινο εγκέφαλο, αφού «εκπαιδευτεί» ένα πρότυπο Neural Network, μπορεί να διεξάγει σε ικανοποιητικό βαθμό εργασίες, όπως ταξινόμηση και ομαδοποίηση στοιχείων και πρόβλεψη μελλοντικών καταστάσεων. Έτσι, με την εφαρμογή ενός τέτοιου προτύπου, μπορεί να γίνει πρόβλεψη της εξέλιξης διαφόρων τύπων αστοχιών, όπως ρηγμάτωση, τραχύτητα, κόπωση του οδοστρώματος και αντίσταση στην ολίσθηση. Στα παραπάνω πρότυπα θεωρείται ως εξαρτημένη συν τω χρόνω μεταβλητή η συγκεκριμένη για το καθένα αστοχία, της οποίας την εξέλιξη θέλουμε να προβλέψουμε και συνεπώς η μελλοντική κατάσταση της εξαρτάται από τις παρούσες και προγενέστερες συνθήκες.

Τα Πρότυπα Σχεδιασμού Αυτοκινητοδρόμων (Highway and Design Models, HDM) [5] προβλέπουν την έναρξη και την εξέλιξη διαφόρων τύπων αστοχιών, όπως ρηγμάτωση, αυλάκωση, δημιουργία λακκουβών, αποκόλληση ασφαλτικού υλικού, ομαλότητα και τραχύτητα [6]. Κάθε πρότυπο που αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη αστοχία περιλαμβάνει έναν αριθμό από ανεξάρτητες μεταβλητές, όπως ηλικία, κυκλοφοριακός φόρτος, παράμετροι σχεδιασμού και κλιματολογικοί παράγοντες.

Η έρευνα της ομάδας ARE [5] είχε ως στόχο τη δημιουργία προτύπων πρόβλεψης αστοχιών και λειτουργικότητας οδοστρωμάτων σε συνάρτηση με διάφορες ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι τύποι αστοχιών που προτυποποιήθηκαν στη συγκεκριμένη έρευνα ήταν η ρηγμάτωση (cracking), η αποκόλληση ασφαλτικού υλικού (ravelling), η δημιουργία λακκουβών (potholes) και η ομαλότητα (roughness). Δύο διαφορετικές ομάδες προτύπων αναπτύχθηκαν για την έναρξη και εξέλιξη των αστοχιών. Για κάθε χρονική περίοδο και τύπο αστοχίας, τα πρότυπα αυτά προβλέπουν την αλλαγή στο βαθμό αστοχίας.

Η ομάδα RITM2 [5] επίσης ανέπτυξε διαφορετικά πρότυπα για την έναρξη και την εξέλιξη των ρηγματώσεων. Το πρότυπο έναρξης προβλέπει το συνολικό αριθμό ισοδύναμων απλών αξόνων πριν την έναρξη της ρηγμάτωσης, για ένα δεδομένο τροποποιημένο αριθμό δομικής αντοχής. Το πρότυπο εξέλιξης προβλέπει την αυξητική αλλαγή στην περιοχή των ρηγματώσεων, ως συνάρτηση του

τροποποιημένου αριθμού δομικής αντοχής και του αυξανόμενου κυκλοφοριακού φόρτου από την πιο πρόσφατη επανεπίστρωση.

Το Τμήμα Μεταφορών της Αριζόνα (Arizona Department of Transportation) [5] ανέπτυξε πρότυπα που κάνουν πιθανοτικές προβλέψεις σχετικά με τη μελλοντική κατάσταση των οδοστρωμάτων. Τα πρότυπα αυτά θεωρούν ότι η εξέλιξη της αστοχίας με το πέρασμα του χρόνου ακολουθεί τη Μαρκοβιανή διαδικασία. Η πιθανότητα μεταβίβασης από μία δεδομένη κατάσταση σε μία χειρότερη, από πλευράς έκτασης και σοβαρότητας των αστοχιών, εξαρτάται μόνον από τις τωρινές τιμές των μεταβλητών και είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες καταστάσεις που βρισκόταν το υπό μελέτη οδόστρωμα. Οι μεταβλητές που περιγράφουν την παρούσα κατάσταση ενός οδοστρώματος είναι η ομαλότητα, η ρηγμάτωση, η αλλαγή της ρηγμάτωσης τα προηγούμενα χρόνια και ο δείκτης της πρώτης ρηγμάτωσης.

Το πιθανοτικό πρότυπο EAROMAR [5] προβλέπει τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων καθώς και το κόστος για μετέπειτα συντήρηση ή αποκατάσταση. Το συγκεκριμένο πρότυπο διαφέρει από το πρότυπο της ομάδας ARE στο ότι η αστοχία προσδιορίζεται με προτυποποίηση της αλλαγής των ιδιοτήτων των υλικών που βρίσκονται υπό την επιφάνεια του οδοστρώματος (εξ αιτίας των φορτίων λόγω κυκλοφορίας και κατακρήμνισης) και όχι απλά προσδιορίζοντας την κατάσταση του οδοστρώματος συναρτήσει κάποιων ανεξάρτητων μεταβλητών.

Τα πρότυπα Queiroz-Geipot [5] διαθέτουν ξεχωριστές εξισώσεις που προβλέπουν έναρξη ρηγμάτωσης και το βαθμό εξέλιξης αυτής. Το πρότυπο έναρξης ρηγμάτωσης χρησιμοποιεί ως εξαρτημένη μεταβλητή τον ισοδύναμο αριθμό απλών αξόνων, που απαιτούνται μέχρι την έναρξη της ρηγμάτωσης και τον τροποποιημένο αριθμό δομικής αντοχής (structural number) ως ανεξάρτητη. Το πρότυπο εξέλιξης της ρηγμάτωσης βρέθηκε ότι είναι συνάρτηση κατασκευαστικών και ηλιακών παραμέτρων.

Το μηχανιστικό πρότυπο VESYS 3A-M [7] είναι ένα από τα προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή VESYS, τα οποία δημιουργήθηκαν από την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων των Η.Π.Α. (Federal Highway Administration, FHWA U.S.A.). Η υπολογιστική διαδικασία στο πρότυπο αυτό αποτελείται από τρία στάδια:

α) αρχική ανάλυση απόκρισης, β) προτυποποίηση αστοχιών, γ) πρόβλεψη μελλοντικής συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Ένας μεγάλος αριθμός από εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές εισέρχονται στο πρόγραμμα για τη διεκπεραίωση των τριών αυτών σταδίων, όπως παράμετροι σχεδιασμού, καθορισμός του φορτίου σχεδιασμού, κατασκευαστικά στοιχεία, στοιχεία κυκλοφορίας, κλιματολογικά στοιχεία κ.ά.. Η αστοχία του οδοστρώματος εκτιμάται με τη χρήση δύο επιμέρους προτύπων που περιλαμβάνονται στο VESYS και τα οποία προβλέπουν έναρξη και εξέλιξη ρηγματώσεων, αυλακώσεων και ομαλότητας.

Στα πλαίσια μιας άλλης έρευνας [8], αναπτύχθηκε ένα μηχανιστικό- εμπειρικό πρότυπο για υποβάσεις και ασύνδετα υλικά. Είναι ένα πρότυπο που συσχετίζει το βάθος των τροχαυλακώσεων με διάφορες ανεξάρτητες μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν τα κατασκευαστικά στοιχεία του οδοστρώματος, τις φορτίσεις και τους κλιματολογικούς παράγοντες. Το πρότυπο αυτό είναι της μορφής:

$$\varepsilon_p = aN^b$$

όπου:

ε_p = μόνιμη ή πλαστική τάση

N = αριθμός επανάληψης φορτίσεων

a, b = συντελεστές συναρτήσεων των εφαρμοζόμενων φορτίσεων και των χαρακτηριστικών των υλικών.

Το επόμενο πρότυπο [9], της ίδιας κατηγορίας με το προηγούμενο, βασίζεται στην αναλογικότητα μεταξύ των πλαστικών και ελαστικών τάσεων σε ένα οδόστρωμα υπό τη φόρτιση της κυκλοφορίας και έχει τη μορφή:

$$\varepsilon_p(N) = a' \varepsilon_e N^{b'}$$

όπου:

ε_e = ελαστική τάση

a' , b' = μόνιμοι παράμετροι παραμόρφωσης.

Δεδομένου ενός συγκεκριμένου επιπέδου ελαστικών τάσεων, αυτή η εξίσωση ισοδυναμεί με την προηγούμενη.

2.3 Αναλυτική Παρουσίαση Ερευνών

2.3.1 Εισαγωγή

Παρακάτω θα παρουσιαστούν ορισμένες έρευνες που επελέγησαν έτσι ώστε να καταστήσουν σαφές το αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία. Οι έρευνες που επελέγησαν για να παρουσιαστούν αναλυτικά στην συνέχεια αφορούν τις Δοκιμές Επιταχυνόμενης Φόρτισης (ALT). Δεν θα παρουσιαστούν αναλυτικά έρευνες Πραγματικού Χρόνου (RLT) καθώς δεν έχουν άμεση σχέση με την παρούσα διπλωματική εργασία. Όπως θα φανεί και αργότερα, η ανάπτυξη προτύπων πρόβλεψης αστοχιών δεν είναι εύκολη, καθώς τα προβλήματα που παρουσιάζονται είναι αρκετά και πολλές φορές οι αναλυτές / μηχανικοί είτε αδυνατούν να δώσουν κάποια λύση είτε η λύση δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένη. Μερικά από αυτά εμφανίζονται στις παρακάτω έρευνες και μαζί παρουσιάζεται και ο τρόπος προσέγγισης και αντιμετώπισής τους.

2.3.2 Έρευνες με Δοκιμές Επιταχυνόμενης Φόρτισης (ALT)

Η χρήση πειραματικών στοιχείων για την ανάπτυξη προτύπων έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, σε σχέση με τα στοιχεία που συλλέγονται από έρευνες σε εν λειτουργία οδοστρώματα [11]:

- Πλεονεκτήματα :** Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τις αυλακώσεις, όπως τα φορτία των τροχών και το πάχος της ασφαλικής στρώσης, μπορούν να ελέγχονται προσεκτικά και συστηματικά έτσι ώστε ο ερευνητής να έχει τη δυνατότητα να καταγράφει λεπτομερώς την επίδρασή τους στην εξέλιξη των αυλακώσεων. Αυτό είναι σχεδόν αδύνατο χρησιμοποιώντας μόνο στοιχεία από επί τόπου έρευνες, μιας και αυτά συνήθως εμπεριέχουν διακυμάνσεις στα αξονικά φορτία, των οποίων η μέτρηση δεν είναι πολύ ακριβής. Ο διαχωρισμός των επιπτώσεων του κάθε φορτίου χωριστά από ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών τιμών φορτίων είναι ένα δύσκολο πρόβλημα, το οποίο δεν παρουσιάζεται όταν το οδόστρωμα υπόκειται σε ένα γνωστό επίπεδο φορτίσεως. Επιπλέον, στα στοιχεία από εν λειτουργία οδοστρώματα, ο έλεγχος του πάχους της ασφαλικής στρώσης είναι κατώτερης ποιότητας και τα πάχη σχεδιασμού είναι συνήθως συνάρτηση της κυκλοφορίας. Το τελευταίο δημιουργεί ένα οικονομικό πρόβλημα που είναι γνωστό ως ενδογένεια. Οι ενδογενείς μεταβλητές καθορίζονται δια μέσου της αλληλεπίδρασής τους με άλλες μεταβλητές του προτύπου. Στα δεδομένα από εν λειτουργία οδοστρώματα, τα πάχη των στρωμάτων είναι ενδογενή γιατί δεν είναι συνήθως συνάρτηση της προβλεπόμενης κυκλοφορίας. Η εκτίμηση των παραμέτρων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων καταλήγει σε μεροληπτικά και αντιφατικά αποτελέσματα με την παρουσία των ενδογενών μεταβλητών [9]. Αυτό το πρόβλημα αποφεύγεται με τη χρήση των πειραματικών δεδομένων.
- Μειονεκτήματα :** Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι τα πειραματικά στοιχεία μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν τον πραγματικό μηχανισμό κοπώσεως των εν λειτουργία οδοστρωμάτων. Για παράδειγμα, η γήρανση των υλικών δεν συνυπολογίζεται στα πειράματα των εγκαταστάσεων επιταχυνόμενης φόρτισης (accelerated pavement loading tests).

Χρησιμοποιώντας τη φορητή συσκευή επιταχυνόμενης φόρτισης (ALF) το Ερευνητικό Κέντρο Μεταφορών της Louisiana (Transportation Research Center) πραγματοποίησε δοκιμές σε εννέα πειραματικά τμήματα, στην εγκατάσταση επιταχυνόμενης φόρτισης της Louisiana, με σκοπό να γίνει σύγκριση μεταξύ των

πραγματικών αστοχιών που μετρήθηκαν στα οδοστρώματα, έπειτα από φόρτισή τους με τη συσκευή ALF, με τις προβλεπόμενες αστοχίες του VESYS 3A-M (το πρότυπο αυτό αναφέρθηκε ήδη πιο πάνω) και την εξαγωγή λογικών συμπερασμάτων για τις αιτίες που μπορεί να προκαλούν διαφορές στις δύο αυτές τιμές [7]. Δηλαδή ουσιαστικά αυτή η εργασία διερευνά την εγκυρότητα του συγκεκριμένου προτύπου και τις ενδεχόμενες αιτίες που τυχόν οδηγούν στη μη επαλήθευσή του. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας κατέδειξαν ότι το πρότυπο VESYS 3A-M δίνει ικανοποιητικές προβλέψεις όσον αφορά την εξέλιξη των αυλακώσεων, αλλά δεν ισχύει το ίδιο για τις ρηγματώσεις. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι ρηγματώσεις που παρατηρήθηκαν στις επί τόπου μετρήσεις δεν ήταν αποτέλεσμα κοπώσεως, αλλά ήταν αντανακλαστικές ρωγμές λόγω της συστολής της κατεργασμένης με τσιμέντο βάσεως (ημι-άκαμπτα οδοστρώματα). Έτσι απαιτείται κάποια τροποποίηση του προτύπου για χρήση του σε δοκιμές επιταχυνόμενης φόρτισης. Δεν ισχύει όμως αυτό όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς εν λειτουργία οδοστρωμάτων, όπου και μπορεί να ληφθεί ως έχει.

Στα πλαίσια του ιδίου προγράμματος πραγματοποιήθηκε έρευνα για τον καθορισμό των κατάλληλων στατιστικών προτύπων και της συνάρτησης πιθανοτικής κατανομής (probability distribution function) του χρόνου μέχρι τη φθορά των οδοστρωμάτων [12]. Ο καθορισμός αυτής της συνάρτησης είναι ουσιώδης για την ανάπτυξη των προτύπων αστοχιών, γιατί αντικατοπτρίζει τη μεταβλητότητα της φθοράς των οδοστρωμάτων. Η ζωή ενός οδοστρώματος και ο χρόνος αστοχίας σχετίζονται με τον αριθμό των ισοδύναμων φορτίων των αξονικών διελεύσεων, για τα οποία η φθορά φτάνει σε ένα κρίσιμο επίπεδο και στο οποίο απαιτείται συντήρηση ή αποκατάστασή του. Τα απαραίτητα στοιχεία που χρειάζονταν για τη διεκπεραίωση της έρευνας, συλλέχθηκαν από μία δοκιμαστική λωρίδα και η ανάλυση οδήγησε στο συμπέρασμα ότι λύσεις κλειστής μορφής (closed-form solutions), καθώς και οι αλγόριθμοι Monte Carlo, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν τα πρότυπα αστοχιών έχουν γνωστή μορφή. Αν η μορφή των προτύπων δεν είναι γνωστή, τότε πρέπει να χρησιμοποιείται η μέθοδος της ανάλυσης επιβίωσης (survival analysis method) βασισμένη σε παρατηρήσεις περικοπόμενων στοιχείων (censored observations). Οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πρότυπα πρόβλεψης χρόνου έναρξης ρηγματώσεων και χρόνου ζωής οδοστρώματος με βάση τις ρηγματώσεις, τις αυλακώσεις, την τραχύτητα και την λειτουργικότητα.

Το Ερευνητικό Πρόγραμμα της Αμερικανικής Κρατικής Ένωσης Αυτοκινητοδρόμων (American Association of State Highway Officials, AASHO Road Test), πραγματοποιήθηκε στο τέλος της δεκαετίας του 1950 και είχε ως στόχο τη δημιουργία προτύπων πρόβλεψης αστοχιών οδοστρωμάτων [20]. Οι δοκιμές επιταχυνόμενης φόρτισης έλαβαν χώρα σε μία τοποθεσία κοντά στην πόλη Ottawa του Illinois και η οποία επελέγη γιατί το έδαφος στην περιοχή ήταν ομοιόμορφο και αντιπροσωπευτικό των εδαφών ενός μεγάλου αριθμού περιοχών της χώρας. Οι κλιματολογικές συνθήκες, που επικρατούσαν στην περιοχή της μελέτης, θεωρήθηκαν επίσης ότι ήταν αντιπροσωπευτικές αυτών που επικρατούσαν σε πολλές πολιτείες των βορείων Η.Π.Α.. Έτσι, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, εκτιμήθηκε μόνο ένα υλικό για την υπόβαση, καθώς και μία μόνο κλιματική ζώνη. Ακόμη, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των υπολοίπων στρώσεων στο οδόστρωμα διατηρήθηκαν σταθερά για όλα τα πειραματικά τμήματα και συνεπώς δεν είναι δυνατό να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα σε ότι αφορά την επιρροή των ιδιοτήτων των διαφόρων υλικών των στρώσεων στην αντοχή ενός οδοστρώματος. Έτσι διερευνήθηκε κυρίως η επιρροή του αριθμού των τυπικών αξονικών διελεύσεων. Τα πειραματικά οδοστρώματα είχαν τέσσερις λωρίδες κυκλοφορίας (δύο ανά κατεύθυνση) και χωρίζονταν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το μήκος της τροχιάς που έπρεπε να διανύσουν τα οχήματα.

Για την εξαγωγή των προτύπων πρόβλεψης αστοχιών, αρχικά χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα παλινδρόμησης (Regression Models), τα οποία οδηγούν στη δημιουργία μαθηματικών συναρτήσεων που έχουν ως σκοπό να προβλέπουν μία συγκεκριμένη αστοχία, απόκριση ή μείωση της λειτουργικότητας ενός οδοστρώματος ως συνάρτηση των φορτίσεων από την κυκλοφορία ή του χρόνου. Η πρώτη μορφή μιας τέτοιας συνάρτησης αναπτύχθηκε στα πλαίσια του συγκεκριμένου προγράμματος:

$$g_t = \left(\frac{ESA_t}{\rho} \right)^\beta$$

όπου:

g_t = φθορά τη χρονική στιγμή t

ESA_t = αριθμός τυπικών αξονικών διελεύσεων μέχρι τη χρονική στιγμή t (kips)

β = σταθερά που αντιπροσωπεύει το ρυθμό αύξησης της φθοράς

ρ = αριθμός τυπικών αξονικών διελεύσεων που απαιτείται για να αστοχήσει το οδόστρωμα και δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$\rho = \frac{A_0 (D + 1)^{A_1} L_2^{A_3}}{(L_1 + L_2)^{A_2}}$$

όπου:

D = αριθμός δομικής αντοχής του υπό μελέτη τμήματος

L_1 = αξονικά φορτία (kips)

L_2 = μεταβλητή dummy (L_2 = για μονοαξονική φόρτιση

$L_2 = 2$ για δίδυμους τροχούς)

$A_0, \dots, A_3$ = παράμετροι

Οι παράμετροι ρ και β διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο της αστοχίας και υπολογίζονται συναρτήσει διαφόρων ανεξάρτητων μεταβλητών, σύμφωνα με το είδος της συμπεριφοράς του υπό μελέτη οδοστρώματος. Έτσι, το παραπάνω πρότυπο, έπειτα από την εφαρμογή του σε άλλες σχετικές έρευνες, έδειξε ότι υπερεκτιμά τη διάρκεια ζωής των άκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς και ότι παρουσιάζει σημαντικά λάθη στον υπολογισμό των συντελεστών των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Η εργασία που ακολουθεί [14] είχε ως στόχο τη δημιουργία προτύπων χρονικής διάρκειας για την πρόβλεψη αστοχιών οδοστρωμάτων, καθώς και τη σύγκριση αυτών

με τα αντίστοιχα πρότυπα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια του AASHTO Road Test. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων με στοιχεία, τα οποία συλλέχθηκαν από δοκιμές σε εγκατάσταση επιταχυνόμενης φόρτισης. Τα στοιχεία αυτά αφορούσαν κλιματολογικά, κυκλοφοριακά κ.ά. δεδομένα. Η στατιστική ανάλυση της βάσης δεδομένων βασίστηκε στη χρήση πιθανοτικών παραμετρικών προτύπων χρονικής διάρκειας.

Ένα σύννηθες πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά την προτυποποίηση του χρόνου, οφείλεται στο γεγονός ότι οι έρευνες σε οδοστρώματα με σκοπό τη συλλογή δεδομένων διαρκούν συνήθως μικρό χρονικό διάστημα και για το λόγο αυτό δεν είναι εύκολο να καταγραφεί ο ακριβής χρόνος που πρωτοεμφανίζεται μία αστοχία. Έτσι κάποια υπό μελέτη τμήματα θα έχουν ήδη αστοχήσει πριν από την ημέρα που θα ξεκινήσει η έρευνα, άλλα θα αστοχήσουν κατά τη διάρκειά της, ενώ κάποια άλλα δεν θα αστοχήσουν μέχρι και το τέλος της. Αν στη στατιστική ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιηθούν μόνο τα στοιχεία των τμημάτων εκείνων που αστόχησαν κατά τη διάρκεια της έρευνας, τότε το πρότυπο που θα δημιουργηθεί θα είναι μεροληπτικό (truncation bias). Αν η περικοπή των στοιχείων αστοχιών δεν επεξηγηθεί κατάλληλα, τότε το πρότυπο που θα εξαχθεί μπορεί να χαρακτηρίζεται από μεροληψία περικοπής (censoring bias). Τα πρότυπα χρονικής διάρκειας παρέχουν τη δυνατότητα του υπολογισμού της στοχαστικής φύσεως του χρόνου αστοχίας ενός οδοστρώματος, καθώς και της ενσωμάτωσης περικεκομμένων στοιχείων στη διαδικασία της στατιστικής εκτίμησης των παραμέτρων του προτύπου.

Έτσι μετά το πέρας της στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων και με τη χρήση ενός παραμετρικού τύπου Weibull τύπου «hazard» η συγκεκριμένη εργασία κατέληξε στη δημιουργία του ακόλουθου προτύπου χρονικής διάρκειας:

$$\lambda(t) = \lambda \rho (\lambda t)^{\rho-1}$$

όπου:

λ, ρ = παράμετροι, με την ρ να δίνεται από την σχέση:

$$E[\rho] = \frac{10^{5.28} (D+1)^{6.68} L_2^{2.62}}{(L_1 + L_2)^{3.03}}$$

Το ανωτέρω πρότυπο έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα έναντι του αυθεντικού προτύπου AASHTO. Πρώτον, βασίζεται σε έγκυρη στατιστική ανάλυση υψηλών προδιαγραφών και συνεπώς είναι απαλλαγμένο από υποκειμενικές επιλογές και δεύτερον, μετά από τη διαδικασία επαλήθευσης, που ακολούθησε της στατιστικής επεξεργασίας, το νέο πρότυπο προέβλεψε χρόνους αστοχίας που βρίσκονται πολύ πιο κοντά στους πραγματικούς, απ' ό τι προέβλεψε το αυθεντικό πρότυπο.

2.4 Συμπεράσματα

Κλείνοντας τη βιβλιογραφική αναφορά θα πρέπει να επισημανθούν τα εξής: το κυριότερο ίσως στοιχείο που βοηθά στη δημιουργία αξιόπιστων προτύπων είναι η εγκυρότητα και πληρότητα σε στοιχεία της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιείται στην ανάλυση. Είναι πολύ σημαντικό να μην υπάρχουν ελλείψεις σε στοιχεία, καθώς επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Επίσης είναι σημαντικό, η βάση δεδομένων να καλύπτει ένα ευρύ φάσμα περιοχών (ή ακόμα και χωρών), ώστε τα παραγόμενα πρότυπα πρόβλεψης αστοχιών να βρίσκουν εφαρμογή, όσο αυτό είναι δυνατό, και σε άλλες περιοχές (ή και χώρες). Μία «πλούσια» βάση δεδομένων, τόσο σε πλήθος στοιχείων όσο και σε γκάμα πληροφοριών, με σωστή επεξεργασία μπορεί να δώσει πρότυπα που μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν και σε άλλες περιοχές, απλά με την εισαγωγή στα πρότυπα των υπαρχουσών συνθηκών (κυκλοφοριακών, κλιματολογικών, εδαφικών κ.ά.). Το πρόβλημα που εντοπίστηκε στις προηγούμενες εργασίες είναι ότι τα πρότυπα πρόβλεψης, εφόσον δημιουργήθηκαν με στοιχεία συγκεκριμένων περιοχών, αδυνατούσαν να καλύψουν

τις ανάγκες για πρόβλεψη αστοχιών μιας διαφορετικής περιοχής, πολύ δε περισσότερο μια άλλης χώρας.

Σε ό,τι αφορά στην επεξεργασία και στην τελική επιλογή των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών, τα πράγματα είναι ξεκάθαρα. Σημαντικό ρόλο παίζουν οι ακόλουθες μεταβλητές:

- πάχη στρώσεων
- αντοχή οδοστρώματος, όπως αυτή μπορεί να εκφράζεται (αριθμός δομικής αντοχής, υποχώρηση)
- κατακρήμνιση
- κυκλοφορία και
- ηλικία οδοστρώματος

Τουλάχιστον θεωρητικά, όσο περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές υπάρχουν στο πρότυπο, τόσο πιο αξιόπιστο μπορεί να είναι. Εδώ, βέβαια, τίθεται το ζήτημα της πρακτικότητας του προτύπου, δηλαδή ένα πρότυπο που απαρτίζεται από μεταβλητές που δεν είναι εύκολα διαθέσιμες στο μηχανικό για να το «τρέξει», είναι ουσιαστικά άχρηστο.

Το διευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure), που πραγματοποιήθηκε κατά το χρονικό διάστημα από 1 Οκτωβρίου 1996 έως 30 Σεπτεμβρίου 1998, αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προσπάθειες των τελευταίων ετών να συγκεντρωθούν τα στοιχεία οδοστρωμάτων των οδικών δικτύων δεκαπέντε χωρών της Ευρώπης. Αυτά έχουν να κάνουν με στοιχεία μετρήσεων διαφόρων τύπων αστοχιών, αλλά και κυκλοφοριακά, κλιματολογικά, κατασκευαστικά και ιστορικά. Μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα, οι υπεύθυνοι του προγράμματος κατάφεραν να δημιουργήσουν μία από τις πληρέστερες βάσεις δεδομένων που υπάρχουν αυτή τη στιγμή. Με κατάλληλη επεξεργασία αυτής κατέληξαν σε διάφορα πρότυπα πρόβλεψης και εξέλιξης αστοχιών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο έρευνας το συγκεκριμένο πρόγραμμα. Η βάση δεδομένων PARIS ήταν διαθέσιμη και η μετέπειτα επεξεργασία βασίστηκε σε αυτή. Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί πληρέστερη ανάλυση πάνω στο πρόγραμμα PARIS, που όπως αναφέρθηκε αποτελεί μια οργανωμένη προσπάθεια

δεκαπέντε ευρωπαϊκών χωρών (της Ελλάδας συμπεριλαμβανομένης) για την εξαγωγή ενιαίων προτύπων πρόβλεψης αστοχιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PARIS

3.1 Εισαγωγή

Το ερευνητικό πρόγραμμα **PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure)** είχε ως στόχο την ανάπτυξη προτύπων αστοχιών οδοστρωμάτων (pavement deterioration models) με χρήση της υπάρχουσας γνώσης που αφορούσε στις ευρωπαϊκές κλιματολογικές συνθήκες και φορτίσεις λόγω κυκλοφορίας, για εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Η ανάπτυξη τέτοιων προτύπων είναι σημαντική καθώς αποτελούν πολύτιμα στοιχεία για τα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων (pavement management systems). Ο σκοπός τους είναι να προβλέπουν τη χρονική στιγμή που ένα συγκεκριμένο τμήμα θα χρειαστεί συντήρηση ή/και αποκατάσταση, λαμβάνοντας υπόψη την κόπωση του οδοστρώματος. Η διάρκεια του προγράμματος ήταν δύο έτη, από 1 Οκτωβρίου 1996 έως 30 Σεπτεμβρίου 1998. Η χρηματοδότηση προερχόταν κατά 50% από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα (European Commission) υπό του τμήματος «Transport Research and Technological Development Programme» από το 4^ο Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης και το υπόλοιπο ποσοστό από τους δεκαεννέα οργανισμούς των δεκαπέντε ευρωπαϊκών χωρών που συμμετείχαν στο πρόγραμμα, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας μέσω του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του Ε.Μ.Π. Οι παραπάνω οργανισμοί παρείχαν δεδομένα από επιλεγμένα τμήματα του οδικού τους δικτύου με μετρήσεις που πραγματοποίησαν σε αυτά. Επιπλέον, συμμετείχαν στην ανάπτυξη των προτύπων αστοχιών καθώς και στην αξιολόγηση (validation) των εν λόγω προτύπων.

Το πρόγραμμα PARIS αποτελείτο συνολικά από έξι Πακέτα Εργασίας (Work Packages), τα οποία χωρίζονται σε εννέα επιμέρους στάδια εργασίας (Project Tasks). Τα Πακέτα περιλαμβάνουν τη διαχείριση του προγράμματος (Management), την εκπόνηση των διαφόρων σταδίων εργασίας (Elaboration), την κανονικοποίηση των δεδομένων (Normalisation), την συγκέντρωση των δεδομένων και την αποθήκευσή τους (Data), την ανάλυση των δεδομένων για την εξαγωγή των προτύπων (Analysis), και την αξιολόγηση των προτύπων (Validation).

Δύο τύποι αστοχιών αναπτύχθηκαν με την ανάλυση των δεδομένων. Ο πρώτος τύπος έχει τον χαρακτηρισμό Πρότυπα Έναρξης Αστοχιών (Distress Initiation Models) και ο δεύτερος τύπος Πρότυπα Εξέλιξης Αστοχιών (Distress Propagation Models). Τα πρότυπα έναρξης προβλέπουν την πρώτη εμφάνιση, στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων, της αστοχίας στην οποία αναφέρονται, ενώ τα πρότυπα εξέλιξης περιγράφουν με ποιο τρόπο η αστοχία εξελίσσεται τόσο σε σχέση με το χρόνο (time) όσο και με τον βαθμό σοβαρότητας και έκτασης (severity and extent). Στο PARIS αναπτύχθηκαν πρότυπα έναρξης μόνο για ρηγμάτωση (cracking) και πρότυπα εξέλιξης για ρηγμάτωση (cracking), αυλάκωση (rutting), ομαλότητα κατά μήκος (longitudinal unevenness) και αποκόλληση ασφαλτικού υλικού (ravelling).

Μια σημαντική παράμετρος του προγράμματος ήταν να ελεγχθεί το γεγονός, αν τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και σε χώρες, των οποίων τα δεδομένα δεν χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των προτύπων. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε κατά την αρχική φάση του προγράμματος, τα δεδομένα αστοχιών (distress data) τεσσάρων χωρών τα οποία κάλυπταν μικρότερη χρονική περίοδο σε σύγκριση με τα δεδομένα των άλλων έντεκα χωρών, να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση των προτύπων (validation).

Τα οφέλη από αυτή την έρευνα σε ό,τι αφορά τη διαχείριση οδοστρωμάτων (pavement management) είναι τα παρακάτω: τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν είναι άμεσα εφαρμόσιμα σε καθημερινή βάση. Απαιτούν μόνο εισαγωγή παραμέτρων (input parameters) που είναι άμεσα διαθέσιμες στο διαχειριστή του έργου (pavement manager). Επιπλέον, τα πρότυπα περιγράφουν την εξέλιξη των αστοχιών, κάτι που είναι μεγάλης σημασίας σε ό,τι αφορά τον προγραμματισμό των ενεργειών που σχετίζονται με την συντήρηση (maintenance) και την αποκατάσταση (rehabilitation) οδοστρωμάτων. Γενικά, τα πρότυπα που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη έρευνα βοηθούν τον διαχειριστή οδοστρωμάτων να λαμβάνει σωστές αποφάσεις για το οδικό του δίκτυο.

3.2 Στόχοι & Βήματα

Ο αντικειμενικός στόχος του προγράμματος PARIS ήταν η ανάπτυξη προτύπων αστοχιών οδοστρωμάτων, για τη χρησιμοποίησή τους σε συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων. Οι επιμέρους στόχοι του PARIS καθορίστηκαν ως εξής:

- Ανάπτυξη ενιαίων ορισμών, συστημάτων συλλογής δεδομένων και μεθόδων ανάλυσης για την κατανόηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων (pavement performance).
- Ανάπτυξη κεντρικής βάσης δεδομένων με στοιχεία από τα οδικά τμήματα των χωρών που συμμετείχαν στο πρόγραμμα.
- Ανάπτυξη κατανοητών προτύπων αστοχιών, που να εφαρμόζονται ακόμη και όταν επικρατούν διαφορετικές κυκλοφοριακές, κλιματολογικές και εδαφικές συνθήκες. Τα πρότυπα θα βασίζονται σε στοιχεία προερχόμενα από οδικά τμήματα, που βρίσκονται σε λειτουργία, των συμμετεχόντων χωρών καθώς και επιπλέον δεδομένα από δοκιμές επιταχυνόμενης φόρτισης (Accelerated Loading Tests ALT) σε εργαστήρια μεγάλης κλίμακας.
- Επαλήθευση των προτύπων.
- Προτάσεις για εφαρμογή των προτύπων στην πράξη.
- Συσχέτιση του προγράμματος με άλλες παρόμοιες δραστηριότητες.

Οι παραπάνω στόχοι έπρεπε να επιτευχθούν εντός των πλαισίων των παρεχόμενων οικονομικών πόρων, οι οποίοι είχαν προδιαγραφεί από το 4^ο Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης της Ευρωπαϊκής Κοινότητας. Το πρόγραμμα εκτός από την δέσμευση του προσδιορισμένου προϋπολογισμού, έπρεπε να ολοκληρωθεί εντός της δεδομένης χρονικής περιόδου των δύο ετών. Οι κύριες συνέπειες των παραπάνω ήταν οι εξής:

- Η ανάλυση έπρεπε να εστιαστεί σε δεδομένα λειτουργίας οδοστρωμάτων (ιστορικά στοιχεία) από οδικά τμήματα (test sections) στα οποία είχαν πραγματοποιηθεί παλαιότερες μελέτες, και τα οποία συμπληρώθηκαν με δεδομένα που συλλέχθηκαν στα ίδια τμήματα κατά τη διάρκεια του προγράμματος. Δεδομένα από τα νέα οδικά τμήματα μπορούσαν μόνο να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση των προτύπων,

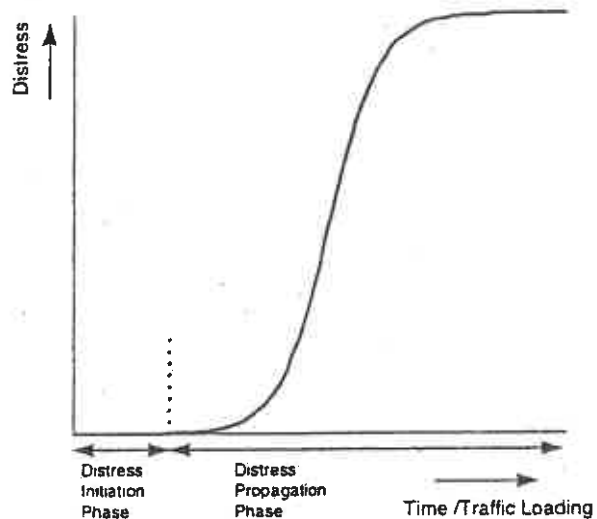
- Μόνο ήδη υπάρχοντα δεδομένα από δοκιμές επιταχυνόμενης φόρτισης (Accelerated Loading Tests ALT) μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση. Νέες δοκιμές στις αντίστοιχες εγκαταστάσεις θα απαιτούσε επιπλέον χρόνο και κόστος.
- Το πρόγραμμα περιορίστηκε στη μελέτη μόνο εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων.

Η ανάπτυξη των προτύπων βασίστηκε στην ανάλυση της εξέλιξης αστοχιών σε έναν μεγάλο αριθμό τμημάτων (test sections) και αξιολογώντας τα αποτελέσματα από διάφορα τμήματα ALT. Το πρόγραμμα επικεντρώθηκε στους εξής τύπους αστοχιών:

- Ρηγμάτωση (cracking)
- Αυλάκωση (rutting)
- Ομαλότητα κατά μήκος (longitudinal unevenness)
- Αποκόλληση ασφαλτικού υλικού (ravelling)

Οι παραπάνω τέσσερις τύποι αστοχίας επελέγησαν για μελέτη για δύο λόγους. Αρχικά γιατί αυτές είναι οι αστοχίες που αναγκάζουν τους μηχανικούς να λαμβάνουν μέτρα για μακροπρόθεσμες ενέργειες αποκατάστασης (rehabilitation). Κατά δεύτερον, τα πρότυπα που περιγράφουν τις παραπάνω αστοχίες είναι εκείνα που μπορούν να περιγράψουν τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται οι αστοχίες με το χρόνο. Και οι τέσσερις αστοχίες δείχνουν μια βαθμιαία αύξηση με το πέρασμα του χρόνου, κάτι που μπορεί να περιγραφεί με μαθηματικό πρότυπο. Τέλος, οι συγκεκριμένες αστοχίες είναι εκείνες που απαιτούνται για τον σχεδιασμό και την αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος συντήρησης και αποκατάστασης οδοστρωμάτων.

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η γενική μορφή της εξέλιξης μιας αστοχίας. Δύο φάσεις μπορούν να φανούν: η φάση της έναρξης (initiation phase) και η φάση της εξέλιξης (propagation phase). Η φάση έναρξης είναι η φάση μεταξύ της κατασκευής του οδοστρώματος και της πρώτης εμφάνισης της αστοχίας σε αυτό, ενώ η φάση εξέλιξης είναι η φάση μετά την πρώτη εμφάνιση της αστοχίας.



Σχήμα 3.1 : Γενική μορφή εξέλιξης αστοχίας.

Η στιγμή της πρώτης εμφάνισης της αστοχίας εξαρτάται από το επιβαλλόμενο φορτίο (κυκλοφοριακό και κλιματολογικό) στο οδόστρωμα καθώς και από την αντοχή του τελευταίου στα παραπάνω φορτία. Έτσι, παράμετροι που περιγράφουν την αιτία της αστοχίας και παράμετροι που περιγράφουν την αντοχή της κατασκευής θα πρέπει να συμπεριληφθούν στο πρότυπο έναρξης. Στο πρότυπο εξέλιξης αναλύεται η περαιτέρω ανάπτυξη της αστοχίας.

Με βάση τα παραπάνω, οι ανεξάρτητες μεταβλητές (explanatory variables) του προτύπου έναρξης θα είναι το επιβαλλόμενο φορτίο και η αντοχή σε αστοχία. Αυτές οι ανεξάρτητες μεταβλητές μπορούν να θεωρηθούν εύκολα διαθέσιμες στον διαχειριστή οδοστρωμάτων για την αστοχία λόγω ρηγμάτωσης. Το επιβαλλόμενο φορτίο είναι το κυκλοφοριακό φορτίο, ενώ μετρήσεις υποχωρήσεων (deflection data) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηρίσουν την αντοχή σε ρηγμάτωση (cracking). Για τους υπόλοιπους τύπους αστοχιών, για να εκφραστεί η αντοχή σε αστοχία απαιτούνται εργαστηριακοί έλεγχοι των υλικών των οδοστρωμάτων.

Δηλαδή, πρότυπα έναρξης αστοχιών για αυλάκωση (rutting), ομαλότητα κατά μήκος (longitudinal unevenness) και αποκόλληση ασφαλτικού υλικού (ravelling) δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμα στην διαχείριση οδοστρωμάτων. Οπότε, εφόσον στόχος του PARIS ήταν η ανάπτυξη προτύπων για χρήση σε συστήματα διαχείρισης

οδοστρωμάτων, αναπτύχθηκε πρότυπο έναρξης αστοχίας μόνο σε ό,τι αφορά την ρηγμάτωση.

Πρότυπα για την εξέλιξη των αστοχιών εξετάστηκαν και για τους τέσσερις τύπους. Σε αυτά, η εξέλιξη της αστοχίας προβλέπεται από το μετρημένο επίπεδο της υπό εξέταση αστοχίας (level of distress) σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Δεδομένης της εστίασης του προγράμματος στην ανάπτυξη προτύπων για χρήση σε συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων, τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν είναι πολύ πρακτικά. Αυτό σημαίνει ότι μόνο λίγες μεταβλητές περιλαμβάνονται στα πρότυπα και οι οποίες είναι εύκολο να συλλεχθούν από τον διαχειριστή του έργου.

3.3 Προέλευση των δεδομένων

Τα πρότυπα αστοχιών που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος PARIS είναι βασισμένα σε παρατηρήσεις της απόδοσης ενός μεγάλου αριθμού οδικών τμημάτων στην Ευρώπη. Τα περισσότερα τμήματα από αυτά βρίσκονται στο εθνικό δίκτυο κάθε χώρας και υπόκεινται σε φορτίσεις λόγω κυκλοφοριακών και κλιματολογικών συνθηκών. Αυτά τα τμήματα ονομάζονται **Πραγματικού Χρόνου (Real-Time Loading Testing RLT)**. Οι αστοχίες που παρατηρούνται σε αυτά τα τμήματα είναι συνήθως περιορισμένης έκτασης και/ή σοβαρότητας, αφού για λόγους ασφάλειας του χρήστη του δικτύου, εφαρμόζονται οι απαραίτητες εργασίες συντήρησης/αποκατάστασης όταν προσεγγίζεται ένα δεδομένο επίπεδο αστοχίας. Για να είναι εφικτή η μελέτη αστοχιών και πέρα από το φυσιολογικό επίπεδο επέμβασης, χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα από εγκαταστάσεις **Επιταχυνόμενης Φόρτισης (Accelerated Loading Testing ALT)**. Το ALT αναφέρεται στην εφαρμογή φορτίσεων από την κυκλοφορία μεγαλύτερων από το κανονικό (heavy wheel loads) με επιταχυνόμενο ρυθμό σε ειδικά κατασκευασμένα τμήματα χρησιμοποιώντας ειδικές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

Η εξέλιξη των αστοχιών σε ένα σύνθηδες οδικό δίκτυο πραγματοποιείται με αρκετά αργό ρυθμό. Αυτό σημαίνει ότι για την ανάπτυξη προτύπων κόπωσης οδοστρωμάτων με βάση παρατηρήσεις σε τμήματα του δικτύου, θα πρέπει αυτές να καλύπτουν μια

χρονική περίοδο αρκετών ετών έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα μέτρησης και επακόλουθης ανάλυσης των εκάστοτε επαυξήσεων της κοπώσεως. Δεδομένου του γεγονότος ότι το πρόγραμμα είχε διάρκεια δύο μόνο ετών, ήταν ανέφικτο να χρησιμοποιηθούν στη μελέτη δεδομένα κοπώσεων που συγκεντρώθηκαν από τα υπό μελέτη τμήματα μόνο κατά την διάρκεια αυτών των δύο ετών. Συνεπώς ένα πρωταρχικό κριτήριο για την επιλογή των κατάλληλων οδικών τμημάτων για το πρόγραμμα ήταν η ύπαρξη ή μη επαρκών ιστορικών δεδομένων. Έτσι επιλέχθηκαν ως κατάλληλα εκείνα τα τμήματα για τα οποία ήταν διαθέσιμες τουλάχιστον δύο επί τόπου μετρήσεις προ της έναρξης του PARIS. Βάση αυτού του κριτηρίου επελέγησαν συνολικά 720 οδικά τμήματα σε έντεκα από τις δεκαπέντε συμμετέχουσες χώρες. Για τις υπόλοιπες τέσσερις χώρες τα δεδομένα κρίθηκαν ελλιπή και αποκλείστηκαν από την ανάλυση. Χρησιμοποιήθηκαν όμως για την επαλήθευση των προτύπων. Ακολούθως έγινε διαχωρισμός ως προς τον τύπο του οδοστρώματος των διαφόρων τμημάτων, σε εύκαμπτα (flexible) και ημιάκαμπτα (semi-rigid). Έυκαμπτα (flexible) οδοστρώματα ορίστηκαν οι κατασκευές με μία ή περισσότερες ασφατικές στρώσεις (asphalt layers) που εδράζονται πάνω σε βάση από κοκκώδες υλικό (granular base) και εν συνεχεία πάνω σε εδαφικό υλικό (subgrade). Έυκαμπτα ορίστηκαν και τα οδοστρώματα στα οποία δεν παρεμβαλλόταν βάση. Ημιάκαμπτα (semi-rigid) ορίστηκαν εκείνα που η ασφατική στρώση εδραζόταν πάνω σε ειδικά κατεργασμένη (είτε με τσιμέντο είτε υδραυλικά) βάση με ή χωρίς υπόβαση πάνω από το έδαφος έδρασης. Παρακάτω ακολουθούν πίνακες και γραφήματα με τον καταμερισμό των τμημάτων ανά χώρα και κατηγορία.

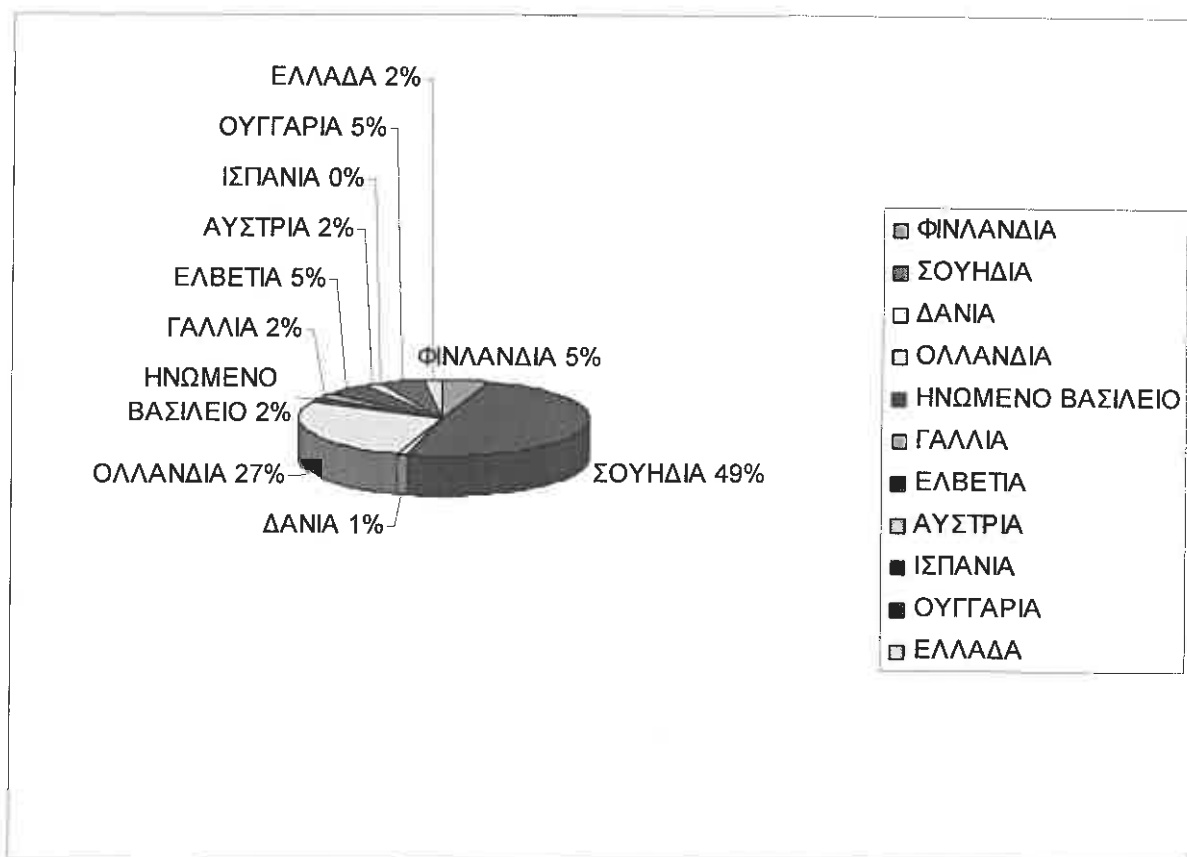
Χώρα	Εύκαμπα	Ημιάκαμπα	Σύνολο
Φινλανδία	33	0	33
Σουηδία	296	0	296
Δανία	7	0	7
Ολλανδία	168	37	205
Ηνωμένο Βασίλειο	15	13	28
Γαλλία	12	10	22
Ελβετία	31	5	36
Αυστρία	12	0	12
Ισπανία	3	7	10
Ουγγαρία	28	33	61
Ελλάδα	10	0*	10
Σύνολο	615	105	720

Πίνακας 3.1: Αριθμός τμημάτων RLT ανά χώρα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των προτύπων.

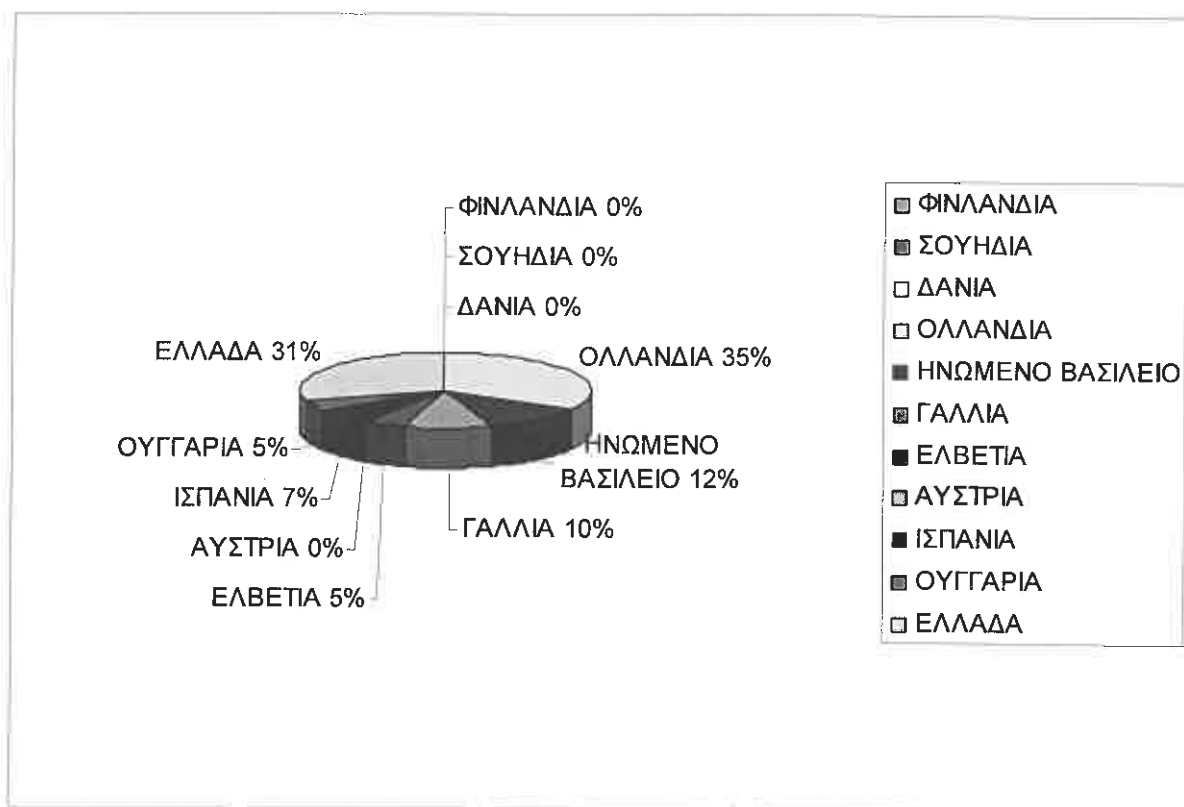
* Σημείωση: ημιάκαμπα οδοστρώματα υπάρχουν και στην Ελλάδα, αλλά δεν διατέθηκαν στο πρόγραμμα αντίστοιχα οδικά τμήματα.

Χώρα	Εύκαμπα	Ημιάκαμπα	Σύνολο
Βέλγιο	41	25	66
Ιρλανδία	25	0	25
Πορτογαλία	45	6	51
Σλοβενία	54	0	54
Σύνολο	165	31	196

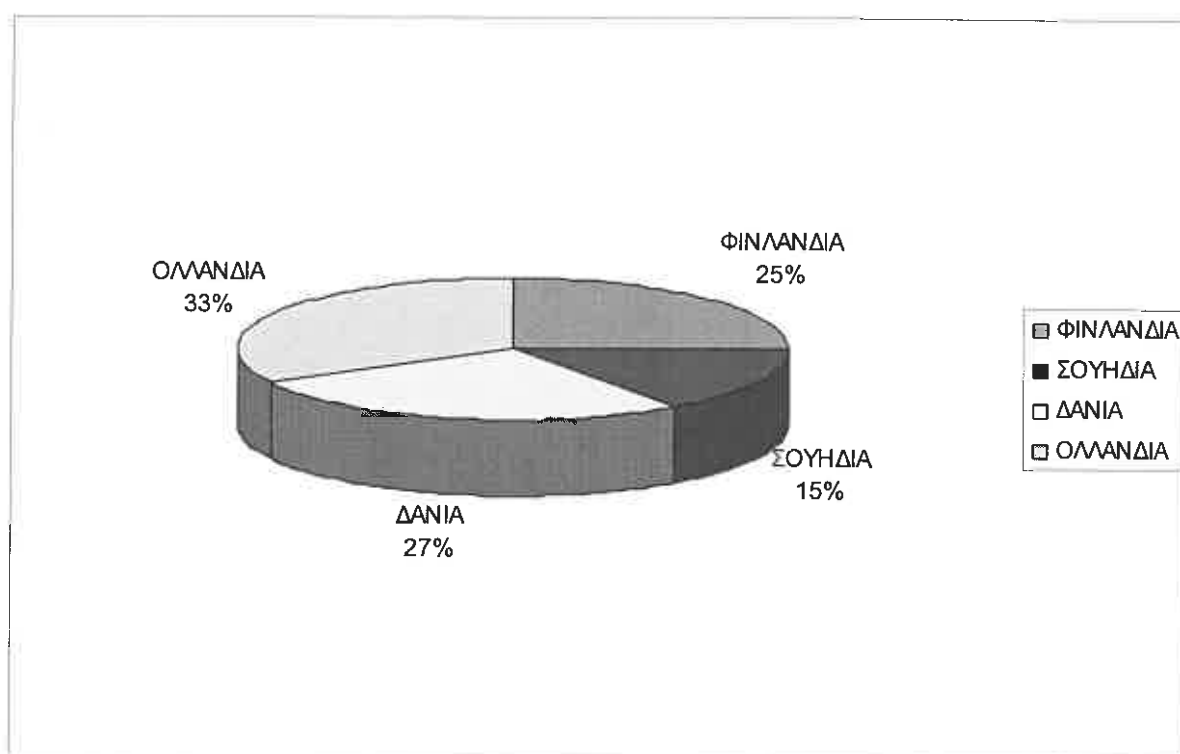
Πίνακας 3.2: Αριθμός τμημάτων RLT ανά χώρα που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των προτύπων.



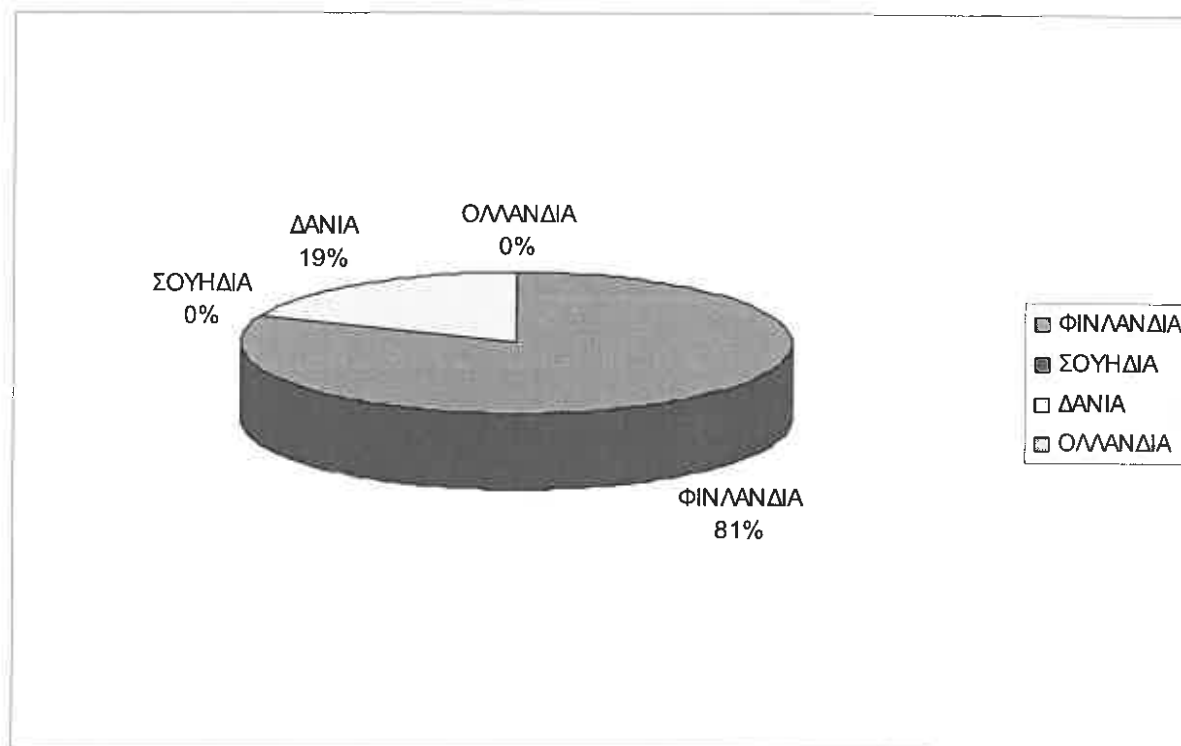
Γράφημα 3.1: Εύκαμπτα οδοστρώματα για την δημιουργία των προτύπων.



Γράφημα 3.2: Ημιάκαμπτα οδοστρώματα για την δημιουργία των προτύπων.



Γράφημα 3.3: Εύκαμπτα οδοστρώματα για την επαλήθευση των προτύπων.



Γράφημα 3.4: Ημιάκαμπτα οδοστρώματα για την επαλήθευση των προτύπων.

Επιπρόσθετα με τα τμήματα RLT χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση και αποτελέσματα από εγκαταστάσεις ALT. Συγκριτικά με τα τμήματα RLT όπου η συντήρηση ή αποκατάσταση προγραμματίζεται για ένα συγκεκριμένο επίπεδο λειτουργικότητας, τα τμήματα ALT υπόκεινται σε πολύ μεγαλύτερες φορτίσεις, έτσι ώστε να φτάσουν σε πολύ υψηλότερο επίπεδο αστοχιών, μέχρι αυτού που συνήθως σημαίνει και το τέλος της λειτουργικότητας μίας οδού. Επιπλέον, τα δεδομένα των εγκαταστάσεων ALT χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της συναρτησιακής μορφής των προτύπων αστοχιών (functional form of models).

Στο πρόγραμμα PARIS, τα δεδομένα από πειράματα σε εγκαταστάσεις ALT ελήφθησαν από την Ελβετία, την Ισπανία και τη Γαλλία. Η εγκατάσταση ALT με κωδικό LCPC στην πόλη Νάντ της Γαλλίας, έχει τρεις δακτυλοειδείς πειραματικές λωρίδες με εξωτερική διάμετρο 40 μ και εσωτερική 28 μ . Το οδόστρωμα έχει 2% κλίση προς το κέντρο, και η περίμετρος είναι 110 μ στη μέση ακτίνα των 17.5 μ . Οι πειραματικές δακτυλοειδείς λωρίδες μπορεί να έχουν από έναν έως τέσσερις τομείς με διαφορετικούς τύπους οδοστρωμάτων.

Η εγκατάσταση με κωδικό CEDEX στην πόλη Μαδρίτη της Ισπανίας είναι σχήματος οβάλ με δύο ευθείς τομείς που συνδέονται μεταξύ τους με δύο ημι-δακτυλοειδείς τομείς. Κάθε ευθύς τομέας έχει μήκος περίπου 75 μ και κάθε λωρίδα έχει συνολικό μήκος 304 μ . Εξαιρώντας την μεταβατική ζώνη, μεταξύ ευθέων και δακτυλοειδών τομέων, 67 μ είναι διαθέσιμα σε κάθε ευθύ τομέα για την πραγματοποίηση πειραμάτων. Αν το ελάχιστο μήκος ενός τομέα που απαιτείται για κάθε πείραμα είναι 20 μ , τότε έξι είναι διαθέσιμοι.

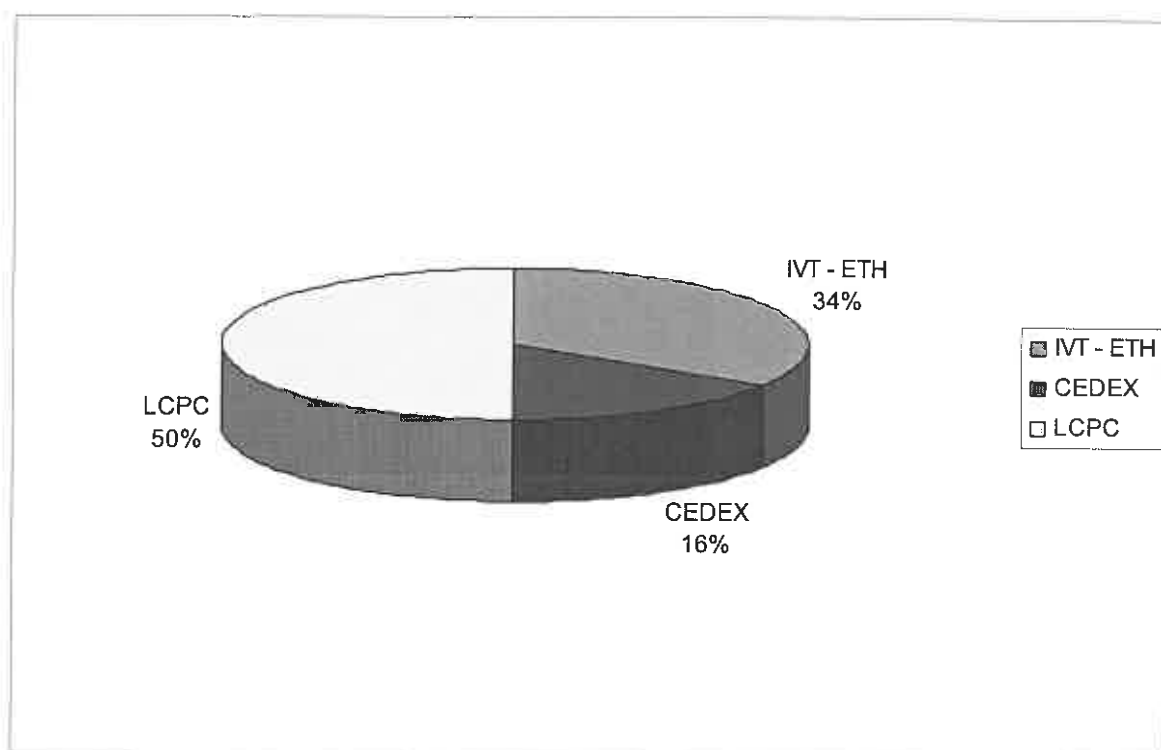
Η εγκατάσταση με κωδικό IVT-ETH στην πόλη Ζυρίχη της Ελβετίας είναι δακτυλοειδούς μορφής και η κατασκευή του οδοστρώματος στην πειραματική λωρίδα είναι ημι-άκαμπτη, με πλάτος 2 μ , πάχος 2 μ , και μέση διάμετρο 32 μ .

Δεδομένα από ένα σύνολο σαράντα τεσσάρων κατασκευών που υποβλήθηκαν σε δοκιμή στις παραπάνω εγκαταστάσεις ALT συμπεριλήφθηκαν στο πρόγραμμα PARIS. Ανάλυση αυτών των δεδομένων έγινε για δύο τύπους κοπώσεως : αυλακώσεις και ρηγματώσεις. Δεδομένα για ομαλότητα κατά μήκος δεν είναι δυνατό να συλλεχθούν σε μελέτες ALT, γιατί οι πειραματικοί τομείς είναι γενικά

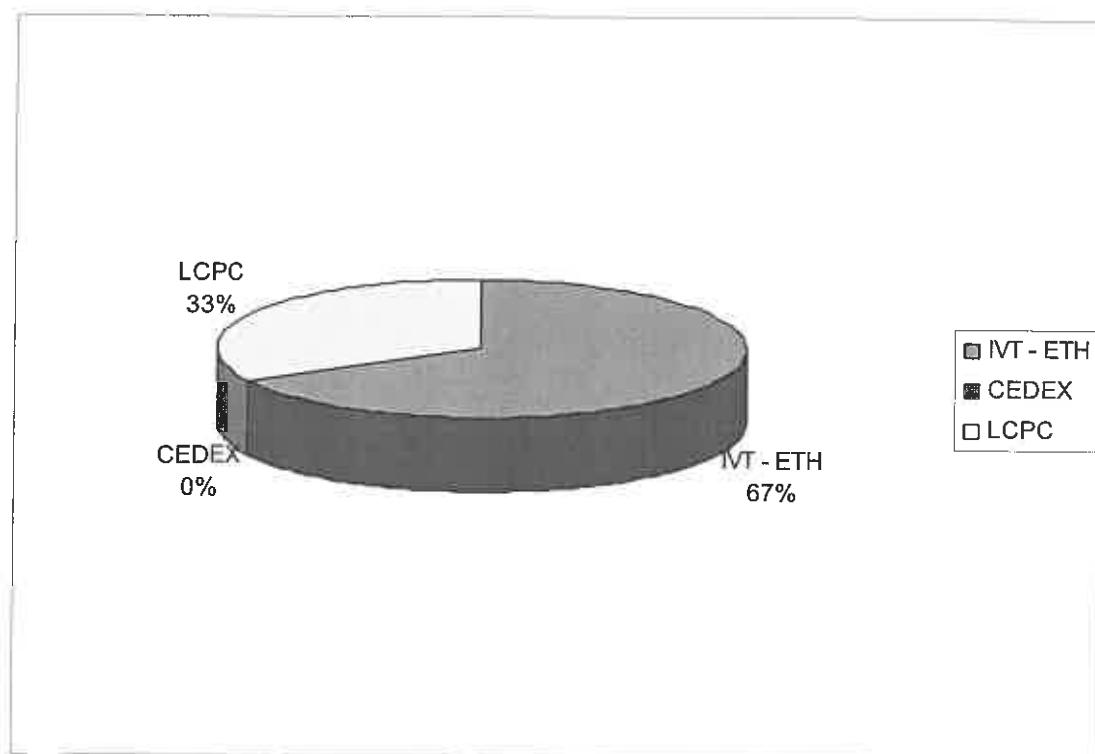
περιορισμένου μήκους και οι μετρήσεις δεν είναι εφαρμόσιμες σε δακτυλοειδή τμήματα. Επίσης δεδομένα σχετικά με την εξέλιξη της αποκόλλησης ασφαλικού υλικού δεν ήταν διαθέσιμα. Παρακάτω ακολουθούν πίνακες και γραφήματα αντίστοιχα των τμημάτων ALT.

Εγκατάσταση	Εύκαμπτα	Ημιάκαμπτα	Σύνολο
IVT-ETH	13	4	17
CEDEX	6	0	6
LCPC	19	2	21
Σύνολο	38	6	44

Πίνακας 3.3: Αριθμός τμημάτων ALT ανά εγκατάσταση.



Γράφημα 3.5: Εύκαμπτα οδοστρώματα ALT



Γράφημα 3.6: Ημιάκαμπτα οδοστρώματα ALT

3.4 Συλλογή Δεδομένων

Τα δεδομένα για το πρόγραμμα PARIS συλλέχθηκαν σε τρία στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο, στην αρχή του προγράμματος, τα κατασκευαστικά δεδομένα και τα δεδομένα για τις ανεξάρτητες μεταβλητές ταξινομήθηκαν για κάθε χώρα χωριστά από τα αρχεία σχετικών ερευνών της κάθε χώρας. Το δεύτερο στάδιο περιελάμβανε την ταξινόμηση των ιστορικών δεδομένων από καταγραφές αστοχιών πριν από την έναρξη του προγράμματος και των δεδομένων από την καταγραφή του 1997, τα οποία συγκεντρώθηκαν απευθείας από τις επιμέρους μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τις συμμετέχουσες χώρες στα πλαίσια του προγράμματος. Η τρίτη και τελευταία φάση αφορούσε την ταξινόμηση των δεδομένων που ελήφθησαν κατά την τελευταία καταγραφή αστοχιών του 1998.

Στα τμήματα RLT, τρεις κατηγορίες στοιχείων συλλέχθηκαν, οι οποίες είναι οι εξής:

- Γενικά στοιχεία (inventory data)
- Στοιχεία για τις εξαρτημένες μεταβλητές (data on dependent variables)
- Στοιχεία για τις ανεξάρτητες μεταβλητές (data on explanatory variables)

Τα γενικά στοιχεία είχαν να κάνουν, για παράδειγμα, με την τοποθεσία του τμήματος και τον τύπο της κατασκευής. Αυτά τα στοιχεία συλλέχθηκαν κατά την έναρξη του προγράμματος. Στοιχεία για τις εξαρτημένες μεταβλητές αφορούν την έκταση και τη σοβαρότητα των τύπων αστοχιών που πρόκειται να προτυποποιηθούν. Τέλος, τα στοιχεία για τις ανεξάρτητες μεταβλητές είναι, για παράδειγμα, ο κυκλοφοριακός φόρτος και τα πάχη των στρώσεων των τμημάτων.

Στα τμήματα ALT, τρεις κατηγορίες στοιχείων συλλέχθηκαν, οι οποίες είναι οι εξής:

- Γενικά στοιχεία (inventory data)
- Κατασκευαστικά στοιχεία (construction data)
- Στοιχεία βάθους αυλάκωσης (rut depth data)
- Στοιχεία ρηγματώσεως (cracking data)

Στο πρόγραμμα PARIS, επειδή τα στοιχεία δεν συλλέχθηκαν με την ίδια ακρίβεια και στον ίδιο βαθμό από όλες τις χώρες, έπρεπε να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ των διαθέσιμων πληροφοριών από τους συμμετέχοντες οργανισμούς των διαφόρων χωρών και τις αναγκαίες πληροφορίες για την ανάλυση στο PARIS. Ένα από τα κύρια στοιχεία για την εδραίωση αυτής της ισορροπίας ήταν το γεγονός ότι τα πρότυπα που θα αναπτύσσονταν στο PARIS προοριζόταν για χρήση στην καθημερινή πρακτική της διαχείρισης των οδοστρωμάτων.

3.5 Κανονικοποίηση Δεδομένων

Η συλλογή των στοιχείων οδοστρωμάτων που συμπεριλαμβάνονται στο πρόγραμμα PARIS έγινε από τους οργανισμούς των χωρών με βάση τους δικούς τους κάθε φορά κανόνες καταγραφής και αποθήκευσης. Για να αξιοποιηθούν σε ευρωπαϊκό επίπεδο, έπρεπε απαραίτητως τα στοιχεία να κανονικοποιηθούν σε μία ενιαία βάση τόσο σε ό,τι αφορά στην σοβαρότητα των αστοχιών όσο και στον τρόπο καταγραφής της έκτασης αυτών. Για τον σκοπό αυτό χορηγήθηκαν οδηγίες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η καταγραφή των τύπων αστοχιών. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε ένα σύστημα, ώστε τα στοιχεία των εκάστοτε χωρών να μπορούν να

προσαρμοστούν σε ενιαία βάση για περαιτέρω ανάλυση. Επιμέρους στόχοι ήταν να εξασφαλιστεί ότι:

- Η έκταση των αστοχιών θα εκφράζεται στις ίδιες μονάδες.
- Για συγκεκριμένους τύπους αστοχιών, η μέτρηση της έκτασης θα πραγματοποιείται με τα ίδια κριτήρια.
- Η σοβαρότητα της αστοχίας που καταγράφηκε σε κάθε χώρα ξεχωριστά, θα αποθηκεύεται στη βάση δεδομένων στην ίδια κατηγορία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τρεις διαβαθμίσεις: χαμηλή, μεσαία και υψηλή (low, moderate, high).
- Οι μετρήσεις υποχωρήσεων που έγιναν με διαφορετικές συσκευές, θα παρουσιάζονται σε κοινή βάση.
- Οι μετρήσεις βάθους αυλακώσεων που έγιναν με διαφορετικές συσκευές, θα παρουσιάζονται σε κοινή βάση.
- Οι μετρήσεις ομαλότητας που έγιναν με διαφορετικό εξοπλισμό θα παρουσιάζονται σε κοινή βάση.

3.6 Η Βάση Δεδομένων

3.6.1 Εισαγωγή

Στην αρχή του προγράμματος τα στοιχεία που είχαν συλλεχθεί για την απόδοση των τμημάτων, αποθηκεύτηκαν σε βάσεις δεδομένων από κάθε χώρα ξεχωριστά. Η δομή αυτών των βάσεων ήταν διαφορετική μεταξύ τους, και χρησιμοποιήθηκαν ποικίλα προγράμματα για την δημιουργία τους. Για να καθίσταται εύκολη και γρήγορη η πρόσβαση στα στοιχεία που αφορούσαν τα τμήματα, αποφασίστηκε η δημιουργία μιας ενιαίας βάσης δεδομένων ειδικά σχεδιασμένη για τις ανάγκες του PARIS. Η βάση αυτή αναπτύχθηκε με βάση το λογισμικό Microsoft Access 7.0, που παρείχε ένα φιλικό και εύκολο στο να το χειριστεί κανείς περιβάλλον.

Η βάση PARIS αποτελείται από στοιχεία και μετρήσεις που αφορούν στα τμήματα ALT καθώς και τα τμήματα RLТ, όπως αυτά αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.4. τα

στοιχεία αυτά είναι αποθηκευμένα σε 14 πίνακες. Τα ονόματα αυτών των πινάκων και μια σύντομη περιγραφή τους δίνεται στον παρακάτω πίνακα (3.4).

Όνομα Πίνακα	Περιγραφή
Κλίμα	Κλιματολογικά στοιχεία τμημάτων RLT
Κατασκευή	Κατασκευαστικά στοιχεία τμημάτων RLT
Ρηγμάτωση ALT	Στοιχεία ρηγματώσεων τμημάτων ALT
Υποχώρηση	Στοιχεία υποχωρήσεων τμημάτων RLT
Υποχώρηση 2	Κανονικοποιημένα στοιχεία υποχωρήσεων τμημάτων RLT
Ιστορία	Ιστορικά στοιχεία τμημάτων RLT
Γενικά	Γενικά στοιχεία τμημάτων RLT
Γενικά ALT	Γενικά στοιχεία τμημάτων ALT
Κατά μήκος ομαλότητα	Στοιχεία κατά μήκους ομαλότητας τμημάτων RLT
Μη κανονικοποιημένα στοιχεία αστοχιών	Στοιχεία αστοχιών τμημάτων RLT
Κανονικοποιημένα στοιχεία αστοχιών	Κανονικοποιημένα στοιχεία αστοχιών τμημάτων RLT
Βάθος αυλακώσεων	Στοιχεία βάθους αυλακώσεων τμημάτων RLT
Βάθος αυλακώσεων ALT	Στοιχεία βάθους αυλακώσεων τμημάτων ALT
Κυκλοφορία	Κυκλοφοριακά στοιχεία τμημάτων RLT

Πίνακας 3.4: Ονόματα πινάκων βάσεως δεδομένων και περιγραφής τους.

3.6.2 Αναλυτική Παρουσίαση Δεδομένων

Πιο αναλυτικά η διάρθρωση και η μορφή των δεδομένων που συλλέχθηκαν για το PARIS είναι η εξής:

Στοιχεία ALT

- Γενικά στοιχεία
 - Αριθμός αναγνώρισης
 - Τύπος κατασκευής
 - Έναρξη δοκιμής
 - Χώρα
 - Μήκος τμήματος
 - Διάρκεια δοκιμής
 - Μέση θερμοκρασία αέρα
 - Μέση θερμοκρασία αέρα κατά την διάρκεια της δοκιμής
 - Βροχόπτωση
- Κατασκευαστικά στοιχεία
 - Αριθμός αναγνώρισης
 - Τύπος επιφάνειας
 - Πάχος επιφανειακής στρώσης
 - Πάχος ασφαλτικών στρώσεων
 - Πάχος δύσκαμπτων στρώσεων
 - Πάχος βάσης από κοκκώδη υλικά
- Στοιχεία βάθους αυλάκωσης

Εφόσον μετρήθηκε το βάθος της αυλάκωσης (μετρημένο σε mm), παρουσιάζεται σε διαγράμματα η εξέλιξη αυτού σε συνάρτηση με τον ισοδύναμο αριθμό διελεύσεων αξόνων 100 kN (ESALs 100kN).
- Στοιχεία ρηγματώσεων

Η συνολική ρηγμάτωση (μετρημένη σε m) στο ίχνος των τροχών (wheelpath) οφείλεται στις εξής επιμέρους ρηγματώσεις: στην κατά μήκος ρηγμάτωση (longitudinal wheelpath cracking LWP), την εγκάρσια ρηγμάτωση (traverse wheelpath cracking TWP) και την αλλιγατορική ρηγμάτωση (alligator cracking ACR). Όπως και για την αυλάκωση, παρουσιάζεται η εξέλιξη του αθροίσματος των τριών επιμέρους τύπων ρηγματώσεων συναρτήσει των ESALs 100 kN.

Στοιχεία RLT

Η κεντρική σελίδα για τα στοιχεία RLT αποτελείται από πίνακες από τους οποίους κάποιος μπορεί να κάνει κανονικοποίηση (normalise distress data), έλεγχο (check data), να δει (view data), να διορθώσει (edit data) ή να εξάγει (export data) τα στοιχεία. Ο πίνακας που έχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι εκείνος όπου μπορούμε να δούμε τα στοιχεία. Ο παραπάνω πίνακας αποτελείται από τις εξής κατηγορίες:

- Κλιματολογικά στοιχεία
 - Paris ID
 - Μέση ετήσια ημερήσια θερμοκρασία
 - Αριθμός θερμών ημερών
 - Αριθμός ψυχρών ημερών
 - Δείκτης παγετού
 - Μέση ετήσια βροχόπτωση

- Κατασκευαστικά στοιχεία
 - Paris ID
 - Τύπος οδοστρώματος
 - Τύπος επιφάνειας
 - Πάχος ασφαλικών στρώσεων
 - Πάχος δύσκαμπτων στρώσεων
 - Πάχος βάσης από κοκκώδες υλικό
 - Πάχος υπόβασης
 - Τύπος δύσκαμπτων στρώσεων
 - Τύπος εδαφικού υλικού

- Στοιχεία υποχωρήσεων

Οι μετρήσεις υποχωρήσεων πραγματοποιήθηκαν με το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους FWD και σε αυτόν τον πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των υποχωρήσεων σε διάφορες αποστάσεις από την κεφαλή της συσκευής (π.χ. σε 0, 200, 300, 450 mm κ.ά.). Καταγράφηκαν επίσης και οι θερμοκρασίες της

ασφάλτου και της επιφάνειας του οδοστρώματος την στιγμή της μέτρησης. Οι τιμές των υποχωρήσεων παρουσιάζονται κατόπιν σε νέο πίνακα κανονικοποιημένες σε θερμοκρασία αναφοράς 20 βαθμών Κελσίου.

■ Ιστορικά στοιχεία

- Paris ID
- Χρονιά κατασκευής
- Χρονιά τελευταίας επανεπίστρωσης
- Χρονιά τελευταίας επιφανειακής συντήρησης

● Γενικά στοιχεία

Εδώ παρουσιάζονται πληροφορίες που αφορούν στα πρόσωπα που έλαβαν δράση στο πρόγραμμα και που αντιπροσώπευαν τις χώρες τους, όπως το όνομα, τηλέφωνο, e-mail, fax. Επίσης δίνεται για κάθε τμήμα ο τύπος κατασκευής (construction type), ο αριθμός των λωρίδων (number of lanes) και το πλάτος αυτών (width).

● Στοιχεία κυκλοφορίας

- Αριθμός τυπικών αξονικών φορτίων βάρους 10 τόνων (100kN) ανά έτος
- Αριθμός οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση
- Συνολικός αριθμός οχημάτων ανά ημέρα
- Ποσοστό % φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση
- Συνολικό ποσοστό % φορτηγών ανά ημέρα

■ Κανονικοποιημένα στοιχεία αστοχιών

Η ουσία της βάσης δεδομένων του PARIS βρίσκεται σε αυτή την κατηγορία, καθώς εμφανίζονται σε πίνακες όλα τα στοιχεία των αστοχιών (ρηγμάτωσης και αυλάκωσης) για τα εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Για τα εύκαμπτα υπάρχει ο διαχωρισμός σε ρηγμάτωση στο ίχνος των τροχών και σε ρηγμάτωση εκτός του ίχνους, ενώ για τα ημιάκαμπτα υπάρχει ο διαχωρισμός σε ρηγμάτωση εκτός του ίχνους και σε ανακλαστική ρηγμάτωση. Σε κάθε υποκατηγορία παρουσιάζεται ο κωδικός του τμήματος (Paris ID), ημερομηνία πραγματοποίησης της μέτρησης και η αντίστοιχη τιμή του τύπου αστοχίας κανονικοποιημένη

σύμφωνα με τους κανόνες κανονικοποίησης (διαβάθμιση τύπου low, moderate, high).

- Στοιχεία βάθους αυλακώσεων
 - Paris ID
 - Μέση αυλάκωση στο εσωτερικό των τροχών
 - Μέση αυλάκωση στο εξωτερικό των τροχών
 - Μέγιστη αυλάκωση
 - Τύπος εξοπλισμού μέτρησης
 - Ονομασία εξοπλισμού μέτρησης
 - Μήκος ευθείας
- Στοιχεία κατά μήκους ομαλότητας
 - Paris ID
 - IRI
 - Τύπος εξοπλισμού μέτρησης
 - Ονομασία εξοπλισμού μέτρησης

3.7 Μεθοδολογία Ανάλυσης

Για τους δύο τύπους των προτύπων, που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος PARIS, ακολουθήθηκε διαφορετική προσέγγιση. Διαφορετική προσέγγιση απαιτούσε και η ανάλυση των στοιχείων ALT σε σχέση με τα στοιχεία RLТ. Η μεθοδολογία της ανάλυσης αναπτύχθηκε παράλληλα με την διαδικασία συλλογής δεδομένων, έτσι ώστε αμέσως μετά την ολοκλήρωση της τελευταίας να προχωρούσε η διαδικασία. Για τα στοιχεία RLТ η ανάλυση περιελάμβανε αναγνώριση εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών, ανάλυση των μεταβλητών ανεξάρτητα (univariate analysis), ανάλυση ζευγαριών μεταβλητών για έλεγχο συσχέτισης τους (bivariate analysis) και προσέγγιση του τύπου του προτύπου.

Ανάλογα με τον τύπο του προτύπου (έναρξης ή εξέλιξης αστοχιών) έγινε και η επιλογή των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών. Ο πίνακας δείχνει τις ανεξάρτητες και εξαρτημένες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση

προτύπου για έναρξη και ο πίνακας για εξέλιξη των διαφόρων αστοχιών. Ο πίνακας δείχνει ότι στοιχεία RTL ήταν διαθέσιμα για όλους τους τύπους αστοχιών. Τα στοιχεία ALT χρησιμοποιήθηκαν έτσι ώστε να επιλεγεί το κατάλληλο μαθηματικό πρότυπο για την ρηγμάτωση, οφειλόμενο στην κυκλοφορία, και για την αυλάκωση.

Τύπος αστοχίας	Στοιχεία RLT	Στοιχεία ALT	Εξαρτημένη μεταβλητή	Ανεξάρτητη μεταβλητή
Ρηγμάτωση στο ίχνος	X		Συνολικό φορτίο λόγω κυκλοφορίας ή ηλικία	Κυκλοφορία / ηλικία, αντοχή οδοστρώματος
Συνολική ρηγμάτωση	X		Συνολικό φορτίο λόγω κυκλοφορίας ή ηλικία	Κυκλοφορία / ηλικία, αντοχή οδοστρώματος, κλίμα
Εγκάρσια ανακλαστική ρηγμάτωση των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων	X		Ηλικία	Πάχος ασφαλικών, κλίμα, αντοχή & πάχος δύσκαμπτων στρώσεων

Πίνακας 3.5: εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την προτυποποίηση της έναρξης ρηγμάτωσης.

Τύπος αστοχίας	Στοιχεία RLT	Στοιχεία ALT	Εξαρτημένη μεταβλητή	Ανεξάρτητη μεταβλητή
Ρηγμάτωση στο ίχνος	X	X	Έκταση και σοβαρότητα ρηγμάτωσης	Κυκλοφορία / ηλικία
Εγκάρσια ανακλαστική ρηγμάτωση των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων	X		Έκταση και σοβαρότητα ρηγμάτωσης	Κλίμα, κυκλοφορία / ηλικία
Αυλάκωση	X	X	Βάθος αυλάκωσης	Κυκλοφορία / ηλικία
Κατά μήκος ομαλότητα	X		Τραχύτητα	Κυκλοφορία / ηλικία
Αποκόλληση ασφαλικού υλικού	X		Έκταση και σοβαρότητα ρηγμάτωσης	Κυκλοφορία / ηλικία

Πίνακας 3.6: εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την προτυποποίηση της εξέλιξης ρηγμάτωσης.

Τα πρότυπα έναρξης ρηγμάτωσης προβλέπουν τον συνολικό αριθμό αξόνων ή τα έτη μέχρι την πρώτη εμφάνιση ρωγμής στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η εμφάνιση ρηγματώσεων στο ίχνος θεωρείται ότι προκαλείται κυρίως λόγω κυκλοφοριακού φορτίου. Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα, οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι τα φορτία λόγω κυκλοφορίας και/ή ηλικία οδοστρώματος και η αντοχή αυτού (που εκφράζεται ως υποχώρηση).

Τα πρότυπα εξέλιξης των αστοχιών προβλέπουν την περαιτέρω ανάπτυξη των αστοχιών σε δεδομένη στιγμή. Για τα συγκεκριμένα πρότυπα οι ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρήθηκε ότι είναι τα φορτία λόγω κυκλοφορίας και η ηλικία του οδοστρώματος.

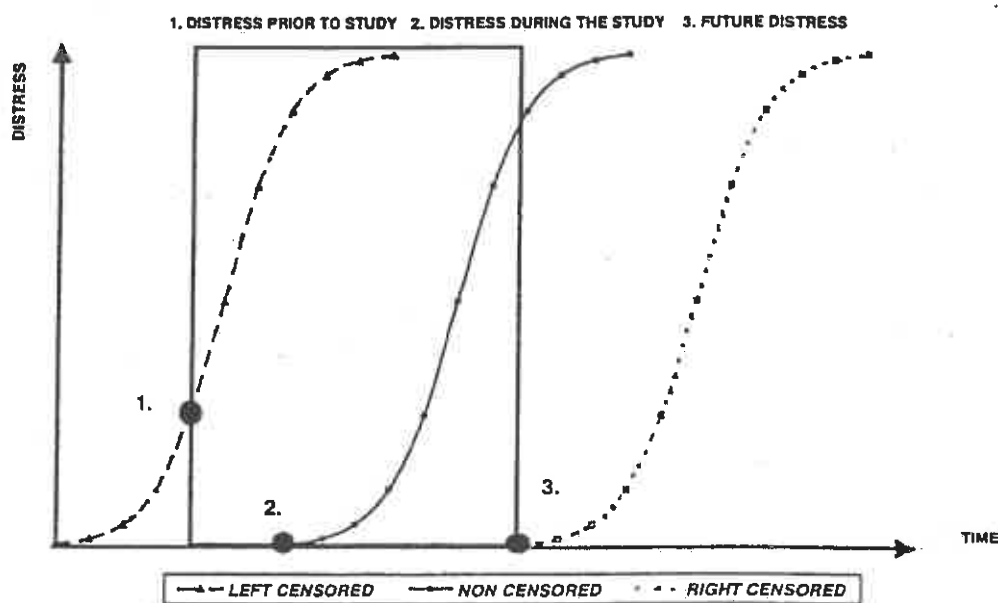
Η αρχική σκέψη για την προτυποποίηση της ρηγμάτωσης ήταν να αναπτυχθούν πρότυπα στο ίχνος (οφειλόμενο στην κυκλοφορία των οχημάτων) και σε όλη την επιφάνεια του οδοστρώματος (οφειλόμενο στην κυκλοφορία και στις κλιματολογικές συνθήκες). Όμως, τα στοιχεία κατέδειξαν ότι το κλίμα ήταν αιτία ρηγμάτωσης σε ελάχιστα τμήματα, γι' αυτό και η τελευταία επιλογή εγκαταλείφθηκε.

3.8 Τρόπος Προσέγγισης της Προτυποποίησης Αστοχιών

3.8.1 Έναρξη Αστοχιών (distress initiation)

Ένα τυπικό χαρακτηριστικό της κόπωσης του οδοστρώματος είναι ότι η ρηγμάτωση δεν συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλη την επιφάνεια του οδοστρώματος, αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και σε διάφορες τοποθεσίες, ακόμα και σε ένα μικρό τμήμα του δρόμου. Η μεταβλητότητα της κυκλοφορίας, οι κλιματολογικοί παράγοντες, το πάχος των διαφόρων στρώσεων, τα χαρακτηριστικά των υλικών και οι ιδιότητες της υποβάσεως, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των σημείων όπου πρωτοεμφανίζεται ρηγμάτωση. Επιπλέον, το φαινόμενο της ρηγμάτωσης είναι στοχαστικό εκ φύσεως. Αυτό σημαίνει ότι η εμφάνιση της πρώτης ρωγμής ποικίλει ακόμα και σε οδοστρώματα με τα ίδια χαρακτηριστικά. Συνεπώς, αυτό πρέπει να ληφθεί υπ' όψη για τον προσδιορισμό των προτύπων.

Χρησιμοποιώντας στατιστική ορολογία, ο χρόνος αστοχίας μπορεί να οριστεί ως χρόνος επιβίωσης (survival time) που καθορίζει την εμφάνιση ενός συγκεκριμένου γεγονότος. Σε αυτή την έρευνα, ο χρόνος επιβίωσης είναι ο συνολικός αριθμός αξόνων μέχρι τη στιγμή της εμφάνισης της πρώτης ρηγμάτωσης στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Το σχήμα παρουσιάζει την έννοια της ανάλυσης των περικομμένων δεδομένων (censored data) που λαμβάνει υπόψη της την διαφορετική συμπεριφορά των ρηγματωμένων και μη οδοστρωμάτων.



Σχήμα 3.2 : παρουσίαση της έννοιας των περικομμένων και μη δεδομένων.

Ορισμένα τμήματα που επελέγησαν για την έρευνα ήταν ήδη ρηγματωμένα τη στιγμή της πρώτης επιτόπου μέτρησης. Ο ακριβής χρόνος εμφάνισης της πρώτης ρωγμής είναι, επομένως, άγνωστος. Το μόνο γνώστο είναι ότι το συγκεκριμένο οδόστρωμα εμφάνισε ρηγματώσεις πριν πραγματοποιηθεί η πρώτη επιτόπου μέτρηση. Αυτές οι μετρήσεις ορίζονται ως αριστερές περικοπής (left censored) επειδή η πραγματική εμφάνιση της αστοχίας συνέβη «αριστερά» του χρόνου της πρώτης καταγραφής της (σημείο 1).

Ορισμένα τμήματα δεν εμφάνισαν καθόλου ρηγματώσεις κατά τη διάρκεια της περιόδου καταγραφής. Σε αυτή την περίπτωση, δεν είναι δυνατό να γνωρίζουμε πότε ακριβώς θα εμφανιστεί η πρώτη ρωγμή. Το μόνο γνωστό είναι ότι το οδόστρωμα αυτό «επιβίωσε» τουλάχιστον μέχρι το πέρας της περιόδου καταγραφής υπαίθρου. Αυτές οι μετρήσεις ορίστηκαν ως δεξιές περικοπής (right censored) επειδή ο πραγματικός χρόνος εμφάνισης της πρώτης ρηγματώσης είναι στα «δεξιά» του χρόνου της τελευταίας καταγραφής (σημείο 3).

Για τα τμήματα που απεικονίζονται από την καμπύλη 2, η πρώτη ρωγμή εμφανίστηκε κατά τη διάρκεια της περιόδου καταγραφής. Εδώ, ο ακριβής χρόνος πρώτης ρηγμάτωσης είναι γνωστός και η μέτρηση ορίζεται ως μη περικομμένη (non censored).

3.8.2 Εξέλιξη αστοχιών (distress propagation)

Τα πρότυπα εξέλιξης αστοχιών προβλέπουν την πρόοδο της αστοχίας με την πάροδο του χρόνου και είναι συχνά πρακτικά γιατί δεν απαιτούν στοιχεία σχετικά με τους παράγοντες που αιτιολογούν την αστοχία (π.χ. πάχη στρώσεων, ιδιότητες υλικών, κλιματολογικές συνθήκες). Γι' αυτόν το λόγο είναι εύκολη η χρήση τους σε ένα σύστημα διαχείρισης οδοστρωμάτων όταν επαρκή στοιχεία πεδίου είναι διαθέσιμα. Τα πρότυπα εξέλιξης διερευνήθηκαν για ρηγμάτωση, αυλάκωση, αποκόλληση ασφαλτικού υλικού και κατά μήκος ομαλότητα.

Η ανάπτυξη των προτύπων πρόβλεψης εξέλιξης αστοχιών βασίστηκε στην προσέγγιση πάνω στην οποία η συναρτησιακή μορφή του προτύπου καθορίστηκε από τα στοιχεία ALT. Ύστερα από την επιλογή της καταλληλότερης για κάθε τύπο αστοχίας, έγινε εφαρμογή για κάθε τμήμα χρησιμοποιώντας στοιχεία RLT.

3.9 Συναρτησιακή Μορφή της Εξέλιξης Αστοχιών

Στοιχεία από τμήματα ALT χρησιμοποιήθηκαν για να μελετηθεί η συναρτησιακή μορφή των προτύπων για ρηγμάτωση και αυλάκωση. Το πλεονέκτημα τέτοιων στοιχείων είναι ότι παρέχουν άμεση πληροφόρηση για τις αστοχίες που λαμβάνουν χώρα στα τμήματα με άμεσο τρόπο. Επιπλέον, περιέχουν σαφώς περισσότερες και πιο λεπτομερείς πληροφορίες σε σύγκριση με τα στοιχεία RLT και παρέχουν μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τους τύπους των αστοχιών, καθώς αυτές φτάνουν μέχρι το σημείο της πλήρης αστοχίας των οδοστρωμάτων.

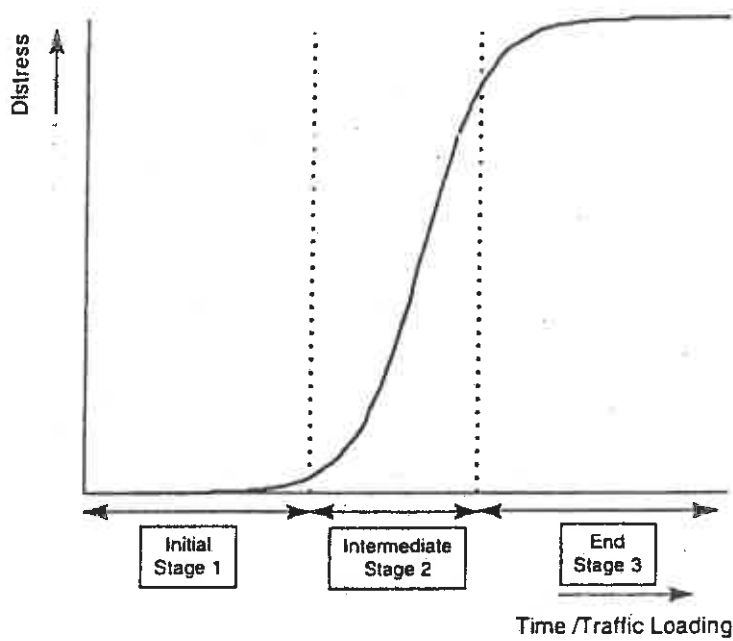
Κατά την προτυποποίηση της ρηγμάτωσης και της αυλάκωσης, ο συνολικός αριθμός των ισοδύναμων τυπικών αξόνων (ESALs) ήταν η ανεξάρτητη μεταβλητή. Οι εξαρτημένες μεταβλητές ήταν για την ρηγμάτωση το ποσοστό του συνολικού μήκους

του τμήματος που εμφάνισε ρηγματώσεις και για την αυλάκωση ήταν το βάθος αυλάκωσης (σε mm). Στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης, εξετάστηκαν γραμμική και μη-γραμμική συναρτησιακή μορφή, αλλά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η γραμμική είναι η πλέον κατάλληλη από πλευράς στατιστικών αποτελεσμάτων, αλλά και ευχρηστίας.

Μια τυπική μορφή της εξέλιξης αστοχίας ALT εμφανίζεται στο σχήμα. Σε αυτό μπορούμε να ξεχωρίσουμε τρία στάδια: Αρχικό (initial, stage 1), ενδιάμεσο (intermediate, stage 2) και τελικό (end, stage 3). Με βάση τα παραπάνω, πρέπει να ληφθούν τα εξής :

- Το αρχικό στάδιο της ρηγμάτωσης και της αυλάκωσης δεν προτυποποιήθηκε στην έρευνα των στοιχείων ALT επειδή ένας από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν την έναρξη των παραπάνω αστοχιών, η γήρανση (ageing) του οδοστρώματος δεν συμβαίνει στις μικρής έκτασης, από πλευράς χρόνου δοκιμές ALT. Επομένως τα στοιχεία ALT δεν παρέχουν καμία επιπλέον πληροφόρηση για το αρχικό στάδιο της αστοχίας.
- Οι εγκαταστάσεις ALT παρέχουν στοιχεία για τις αστοχίες σε πολύ υψηλότερα επίπεδα σοβαρότητας και έκτασης σε σχέση με τα στοιχεία αστοχιών που λαμβάνονται από το οδικό δίκτυο, το οποίο επιβάλλεται σε συντήρηση και αποκατάσταση ασφαλοτάτητα για να βρίσκεται πάντα σε ικανοποιητικό βαθμό εξυπηρέτησης. Για το λόγο αυτό, δεν υπάρχουν στοιχεία RLT που να χρησιμοποιηθούν, ώστε να προτυποποιηθεί το τελικό στάδιο εξέλιξης των αστοχιών.

Βασιζόμενοι στα παραπάνω, το τελικό συμπέρασμα είναι ότι τα στοιχεία RLT αφορούν κυρίως στο ενδιάμεσο στάδιο. Από την στιγμή που εμφανίζεται να υπάρχει γραμμικότητα στα στοιχεία ALT στο στάδιο αυτό, η γραμμική συνάρτησιακή μορφή επελέγη για την προτυποποίηση του φαινομένου της ρηγμάτωσης και της αυλάκωσης.



Σχήμα 3.3 : Τα διαφορετικά στάδια στην εξέλιξη της αστοχίας.

3.10 Πρότυπα Έναρξης Ρηγματώσεων (cracking initiation models)

3.10.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με την προτυποποίηση της έναρξης ρηγματώσεων στο ίχνος και την έναρξη των κάθετων αντανεκλαστικών ρηγματώσεων στα ημιάκαμπα οδοστρώματα. Η έναρξη ρηγματώσεων στο ίχνος ορίζεται ως η πρώτη εμφάνιση (ελάχιστο μήκος 0,5 m) κατά μήκος (longitudinal), εγκάρσιας (transverse) ή αλλιγοτοκικής (alligator) ρωγμής. Η έναρξη ρηγματώσεων στο ίχνος (οφειλόμενη μόνο στην κυκλοφορία) αναλύθηκε ξεχωριστά για εύκαμπα και ημιάκαμπα οδοστρώματα. Στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία μόνο από τμήματα δρόμου χωρίς συντήρηση στην επιφάνεια, γιατί η κατάσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος πριν την εφαρμογή των ενεργειών αυτών δεν ήταν γνωστή.

3.10.2 Ρηγματώσεις στο ίχνος (wheel path cracking)

3.10.2.1 Εύκαμπτα οδοστρώματα

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από μετρήσεις σε τμήματα από τα οποία 70 κατηγοριοποιήθηκαν ως αριστερής περικοπής, 203 δεξιάς περικοπής και 157 ως μη περικομμένα. Η προτυποποίηση πραγματοποιήθηκε με ανάλυση επιβίωσης (survival analysis) με διασπορά (distribution) Weibull. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι οι πιο σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές που περιέγραφαν την έναρξη ρηγματώσεων ήταν ο Δείκτης Επιφανειακής Καμπυλότητας 300 (Surface Curvature Index 300 ή SCI_{300}) και η ετήσια κυκλοφορία (annual traffic loading). Ο SCI_{300} είναι η διαφορά μεταξύ της υποχώρησης ακριβώς κάτω από το σημείο επιβολής του φορτίου και της υποχώρησης σε απόσταση 300 mm από αυτό ($d_0 - d_{300}$), οι οποίες μετρήθηκαν με τη βοήθεια του Παραμορφωσιμέτρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer FWD) που επιβάλλει φορτίο 50 kN. Τα στοιχεία υποχωρήσεως κανονικοποιήθηκαν σε θερμοκρασία 20⁰ C. Η ετήσια κυκλοφορία εκφράζεται σε 100 kN ESALs. Δύο διαφορετικά πρότυπα αναπτύχθηκαν, ένα για μη περικομμένα στοιχεία και ένα για όλα τα στοιχεία (left, right και non-censored).

Πρότυπα για μη περικομμένα στοιχεία (157 τμήματα)

$$N_{10} = 10^{7.169 - 0.0074(SCI_{300}) - 2899829 \left(\frac{1}{SCI_{300} * N_{10} Y} \right)}$$

Πρότυπο για όλα τα στοιχεία

$$N_{10} = 10^{7.287 - 0.0067(SCI_{300}) - 2280264 \left(\frac{1}{SCI_{300} * N_{10} Y} \right)}$$

Όπου:

N_{10} = συνολικές διελεύσεις αξονικών φορτίων κατά την έναρξη ρηγματώσεων, 100 kN ESALs

SCI_{300} = Δείκτης Επιφανειακής Καμπυλότητας 300 (μm)

$N_{10}Y$ = μέση ετήσια κυκλοφορία στην περίοδο της έρευνας, 100 kN ESALs

Όταν χρησιμοποιούνται τα πρότυπα για προβλέψεις θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιои περιορισμοί. Υπάρχει ένα σημείο αλλαγής στην καμπύλη μετά το οποίο ο αριθμός N_{10} ελαττώνεται όταν ελαττώνεται και ο SCI_{300} . Το σημείο αυτό δεν είναι σταθερό, αλλά εξαρτάται από την ετήσια κυκλοφορία ως εξής :

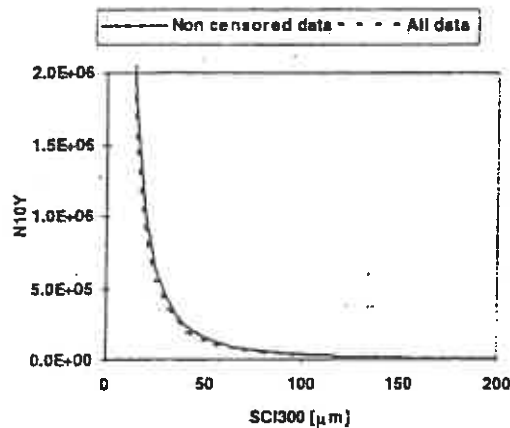
Ελάχιστο όριο εφαρμογής προτύπου για μη περικομμένα στοιχεία

$$SCI_{300,min} = \sqrt{\frac{2899829}{0.0074 * N_{10}Y}}$$

Ελάχιστο όριο εφαρμογής προτύπου για όλα τα στοιχεία

$$SCI_{300,min} = \sqrt{\frac{2280264}{0.0067 * N_{10}Y}}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις παρουσιάζονται στο σχήμα. Μη λογικές τιμές μπορεί να προκύψουν όταν το μετρούμενο SCI_{300} είναι μικρότερο από εκείνο που προκύπτει από τις παραπάνω εξισώσεις. Αυτό σημαίνει ότι το πρότυπο πρέπει να χρησιμοποιηθεί για προβλέψεις όταν το σημείο μέτρησης που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο SCI_{300} και ετήσιο κυκλοφοριακό φόρτο είναι στα δεξιά της καμπύλης του σχήματος. Η καμπύλη δείχνει ότι όταν ένας δρόμος έχει μικρή κυκλοφορία και η κατασκευή του είναι δύσκαμπτη, τότε υπάρχουν άλλοι παράγοντες που φαίνεται να περιγράφουν την έναρξη ρηγματώσεων.



Σχήμα 3.4 : Κατώτερα όρια για την εφαρμογή των προτύπων έναρξης ρηγματώσης σε εύκαμπτα οδοστρώματα.

3.10.2.2 Ημιάκαμπτα οδοστρώματα (semi-rigid pavements)

Τα στοιχεία εδώ προέρχονται από τμήματα τα οποία 20 είναι αριστερής περικοπής, 36 δεξιάς περικοπής και 33 μη περικομμένα. Η προτυποποίηση έγινε με τον ίδιο τρόπο όπως στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η ανεξάρτητη μεταβλητή που περιγράφει την έναρξη ρηγματώσεων στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα είναι ο δείκτης SCI_{900} . Η διαφορά του με τον SCI_{300} είναι ότι τώρα λαμβάνεται η διαφορά των υποχωρήσεων σε απόσταση 900 mm ($d_o - d_{900}$). Ομοίως προέκυψαν δύο πρότυπα, για μη περικομμένα και για όλα τα στοιχεία.

Πρότυπο για μη περικομμένα στοιχεία (33 τμήματα)

$$N_{10} = 10^{7.05 - 0.006(SCI_{900}) - 2496877 \left(\frac{1}{SCI_{900} * N_{10} Y} \right)}$$

Πρότυπο για όλα τα στοιχεία

$$N_{10} = 10^{7.353 - 0.0071 \{SCI_{900}\} - 3082829 \left(\frac{1}{SCI_{900} * N_{10} Y} \right)}$$

Όπου:

N_{10} = συνολικές διελεύσεις αξονικών φορτίων κατά την έναρξη ρηγματώσεων, 100 kN ESALs

SCI_{900} = Δείκτης Επιφανειακής Καμπυλότητας 900 (μm)

$N_{10} Y$ = μέση ετήσια κυκλοφορία στην περίοδο της έρευνας, 100 kN ESALs

Ισχύουν οι ίδιοι περιορισμοί:

Ελάχιστο όριο εφαρμογής προτύπου για μη περικομμένα στοιχεία

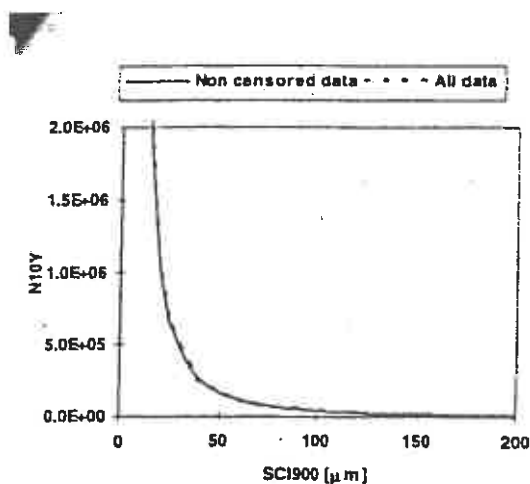
$$SCI_{900, \min} = \sqrt{\frac{2496877}{0.006 * N_{10} Y}}$$

Ελάχιστο όριο εφαρμογής προτύπου για όλα τα στοιχεία

$$SCI_{900, \min} = \sqrt{\frac{3082829}{0.0071 * N_{10} Y}}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις παρουσιάζονται στο σχήμα και ομοίως το πρότυπο αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθεί για προβλέψεις όταν το σημείο μέτρησης που αντιστοιχεί

στο συγκεκριμένο SCI_{900} και ετήσιο κυκλοφοριακό φόρτο είναι στα δεξιά της καμπύλης του σχήματος.



Σχήμα 3.5 : Κατώτερα όρια για εφαρμογή των προτύπων έναρξης ρηγμάτωσης σε ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

3.10.3 Εγκάρσια Ανακλαστική Ρηγμάτωση (transverse reflection cracking)

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από 109 τμήματα, 31 μη περικομμένα, 25 αριστερής περικοπής και 53 δεξιάς περικοπής. Από αυτά 75 είχαν υποστεί επανεπίστρωση, αλλά σε 21 ήταν γνωστό το πάχος της νέας ασφατικής στρώσης. Τα τμήματα που είχαν υποστεί συντήρηση στην επιφάνεια αποκλείστηκαν από την ανάλυση. Παρόλα αυτά η ανάλυση επιβίωσης έδωσε στατιστικώς πτωχά αποτελέσματα, δηλαδή οι εκτιμώμενες τιμές των υπό μελέτη προτύπων απείχαν αρκετά από τις τιμές που παρατηρήθηκαν κατά τις μετρήσεις υπαίθρου. Επομένως, δεν αναπτύχθηκε κανένα πρότυπο για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

3.10.4 Συμπεράσματα

Τα παρακάτω συμπεράσματα/σχόλια μπορούν να εξαχθούν σχετικά με τα πρότυπα πρόβλεψης έναρξης ρηγματώσεων στο ίχνος:

- Τα πρότυπα πρόβλεψης έναρξης ρηγματώσεων για εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα είναι στατιστικώς σημαντικά.
- Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα, οι σημαντικότερες μεταβλητές είναι ο δείκτης SCI_{300} και η ετήσια κυκλοφορία.
- Για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα, οι σημαντικότερες μεταβλητές είναι ο δείκτης SCI_{900} και η ετήσια κυκλοφορία.
- Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για τα εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα, οι προβλεπόμενες τιμές για τον αριθμό αξόνων μέχρι την πρώτη εμφάνιση ρηγμάτωσης είναι μεγαλύτερες χρησιμοποιώντας την ανάλυση για όλα τα στοιχεία σε σύγκριση με την ανάλυση για μη περικομμένα στοιχεία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα στοιχεία περιείχαν τμήματα που δεν είχαν εμφανίσει ρηγματώσεις (στοιχεία δεξιάς περικοπής).
- Τα πρότυπα μπορούν να προβλέψουν πόσες διελεύσεις αξονικών φορτίων μπορεί να αντέξει ένα οδόστρωμα μέχρι να εμφανίσει στην επιφάνειά του ρωγμή. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν περιορισμοί στην εφαρμογή των προτύπων που έχουν να κάνουν με την συσχέτιση του δείκτη SCI με την ετήσια κυκλοφορία σε άξονες.

Τα παρακάτω συμπεράσματα/σχόλια μπορούν να εξαχθούν σχετικά με τα πρότυπα πρόβλεψης έναρξης εγκάρσιας ανακλαστικής ρηγμάτωσης:

- Η εγκάρσια ανακλαστική ρηγμάτωση δημιουργήθηκε πιο σύντομα σε οδοστρώματα με συνήθεις βάσεις σταθεροποιημένες με τσιμέντο σε σχέση με αυτά με βάσεις με κατεργασμένες υδραυλικές κονίες.
- Για τα οδοστρώματα που είχαν υποστεί επανεπίστρωση, απαιτείτο τόσο μεγαλύτερος χρόνος για την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής, όσο πιο μεγάλο ήταν το πάχος της στρώσης αυτής.
- Οι συσχετίσεις των παραγόντων που επηρεάζουν την έναρξη της ρηγμάτωσης ήταν πολύ φτωχές σε όλες τις περιπτώσεις.
- Η ανάλυση επιβίωσης απέτυχε να δημιουργήσει σχέσεις με καλή στατιστική συσχέτιση.

3.11 Πρότυπα Εξέλιξης Αστοχιών (distress propagation models)

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, η ανάπτυξη της αστοχίας στο χρόνο διακρίνεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη είναι η φάση έναρξης της αστοχίας, όπου γίνεται η πρώτη εμφάνιση αυτής στην επιφάνεια του οδοστρώματος, και η δεύτερη είναι η φάση εξέλιξης της αστοχίας, κατά την οποία εξελίσσεται τόσο σε έκταση όσο και σε σοβαρότητα, μέχρι το σημείο πλήρης αστοχίας του οδοστρώματος. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στην ανάπτυξη προτύπων εξέλιξης για ρηγμάτωση, αυλάκωση, κατά μήκος ομαλότητα και αποκόλληση ασφαλτικού υλικού.

3.11.1 Ρηγμάτωση

3.11.1.1 Ρηγμάτωση στο ίχνος

Η ρηγμάτωση στο ίχνος βρέθηκε ότι είναι συνάρτηση του αριθμού ESALs (100 kN) ή της ηλικίας οδοστρώματος από την τελευταία επανεπίστρωση ή συντήρηση. Η ανάλυση έγινε ξεχωριστά για εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα και για τμήματα με και χωρίς συντήρηση. Η ρηγμάτωση εκφράζεται ως Δείκτης Ρηγμάτωσης (Cracking Index) που υπολογίζεται ως εξής :

$$CI = 2 * ACR + LCR + TCR$$

Όπου:

CI = Δείκτης Ρηγμάτωσης

ACR = $ACR_{low} + 1,5ACR_{moderate} + 2ACR_{high}$

LCR = $LCR_{low} + 1,5LCR_{moderate} + 2LCR_{high}$

TCR = $TCR_{low} + 1,5TCR_{moderate} + 2TCR_{high}$

ACR, LCR, TCR = αλληγορική ρηγμάτωση, κατά μήκος ρηγμάτωση,
εγκάρσια ρηγμάτωση

low, moderate, high = τα επίπεδα σοβαρότητας

Το μήκος των τμημάτων κανονικοποιήθηκε σε σταθερό μήκος 100 m. Κατά συνέπεια, η μέγιστη τιμή του Δείκτη Ρηγμάτωσης είναι 400, που ισοδυναμεί με το να έχει το τμήμα μέγιστη σοβαρότητα (high severity) αλλοιοτικής ρηγμάτωσης.

Ο συνολικός αριθμός των τμημάτων RLT για την δημιουργία των προτύπων ανερχόταν σε 720. Για να συμπεριληφθούν στην ανάλυση τα τμήματα έπρεπε να πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις, όπως:

- Η επιφάνεια του οδοστρώματος να ήταν το πολύ 20 ετών όταν ξεκίνησαν οι μετρήσεις.
- Περισσότερα από 3 σημεία μετρήσεων (data points) με την έναρξη της ρηγμάτωσης.
- Όχι μη λογική εξέλιξη της ρηγμάτωσης.
- Όχι μη λογικά στατιστικά δεδομένα (αρνητικές κλίσεις, όχι εξέλιξη ρηγμάτωσης ή $R^2 < 0.50$).

Από τα 472 εύκαμπτα και 95 ημιάκαμπτα τμήματα χωρίς συντήρηση, 86 και 1 αντίστοιχα πληρούσαν τις παραπάνω προϋποθέσεις, ενώ από τα 143 εύκαμπτα και 10 ημιάκαμπτα οδοστρώματα που είχαν υποστεί συντήρηση, 38 και 1 αντίστοιχα συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση. Πρότυπα για ρηγμάτωση στο ίχνος ημιάκαμπτων οδοστρώματων δεν κατέστη δυνατό να εξαχθούν.

Η ανάλυση των στοιχείων ALT έδειξε ότι η εξέλιξη της ρηγμάτωσης μπορεί να περιγραφεί με γραμμική σχέση. Αναλύθηκαν οι χρονικές σειρές των στοιχείων RLT και αποδείχθηκε ότι ακολουθούν την ίδια διάταξη με τα στοιχεία ALT. Η συναρτησιακή μορφή που επελέγη είναι η εξής:

$$y = A + B * x$$

Όπου:

- y = Δείκτης Ρηγμάτωσης
- x = ηλικία οδοστρώματος ή συνολικός αριθμός ESALs (100 kN)
- A = σταθερά (intercept)
- B = κλίση (slope)

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή την ηλικία οδοστρώματος και τον συνολικό αριθμό ESALs (100 kN), που ισούται με την ηλικία οδοστρώματος πολλαπλασιασμένη με τον ετήσιο αριθμό ESAL.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η διασπορά των κλίσεων που προέκυψαν από κάθε τμήμα και βρέθηκε ότι ακολουθούσε λογαριθμική σχέση όταν η ανεξάρτητη μεταβλητή ήταν ο αριθμός MESALs (Millions of ESALs) και γραμμική όταν η ανεξάρτητη μεταβλητή ήταν η ηλικία του οδοστρώματος. Με αυτό τον τρόπο εντοπίστηκαν οι ελάχιστες, μέσες και μέγιστες τιμές των κλίσεων ανά χώρα. Η παραπάνω διαδικασία έγινε και στις δύο διαφορετικές περιπτώσεις ανεξάρτητων μεταβλητών (ηλικία οδοστρώματος και αριθμός ESALs) και για τις δύο περιπτώσεις, δηλαδή, με ή χωρίς συντήρηση στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων.

Με βάση αυτή την ανάλυση προέκυψαν πρότυπα υπολογισμού των κλίσεων, δίνοντας στον μηχανικό τη δυνατότητα να υπολογίσει πώς θα εξελιχθεί η ρηγμάτωση χωρίς να έχει ιστορικά στοιχεία στα χέρια του. Τα πρότυπα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Τύπος οδοστρώματος	$\text{Log10}(\text{CI}_{\text{slope,ESAL}}) = \text{function}(\text{log10}(\text{CR}_{\text{ESAL}}))$	R^2
Εύκαμπτα χωρίς επιφανειακή συντήρηση	$y = 0.29 + 0.96x$	0.95
Εύκαμπτα με επιφανειακή συντήρηση	$y = -0.10 + 1.16x$	0.86

Πίνακας 3.5 : πρότυπα για τον υπολογισμό του λογαρίθμου της κλίσης του Δείκτη Ρηγμάτωσης, ανά MESALs, συναρτήσει του λογαρίθμου του CR_{ESAL} .

Τύπος οδοστρώματος	$CI_{\text{slope,age}} = \text{function}(CR_{\text{age}})$	R^2
Εύκαμπτα χωρίς επιφανειακή συντήρηση	$y = 2.32 + 1.31x$	0.85
Εύκαμπτα με επιφανειακή συντήρηση	$y = 2.33 + 1.07x$	0.82

Πίνακας 3.6 : πρότυπα για τον υπολογισμό της κλίσης κλίσης του Δείκτη Ρηγμάτωσης, ανά έτος, συναρτήσει του CRage .

$$CR_{\text{ESAL}} = \frac{CI_{\text{last}}}{MESAL_{\text{last}}} \quad \text{και} \quad CR_{\text{age}} = \frac{CI_{\text{last}}}{age_{\text{last}}}$$

Όπου:

CR_{ESAL} = Cracking Relationship με μεταβλητή ESAL

CR_{age} = Cracking Relationship με μεταβλητή age

CI_{last} = Δείκτης Ρηγμάτωσης κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση

$MESAL_{\text{last}}$ = Συνολικός αριθμός ESALs (σε εκατομμύρια) από την κατασκευή ή την συντήρηση της επιφάνειας, κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση.

Age_{last} = ηλικία επιφάνειας οδοστρώματος κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση, από την κατασκευή ή την ανακατασκευή της επιφάνειας.

3.11.1.2 Εγκάρσια ανακλαστική ρηγμάτωση

Η εξέλιξη των εγκάρσιων ανακλαστικών ρηγματώσεων εκφράζεται με δύο τρόπους, με αύξηση του αριθμού των ρωγμών και με αύξηση του μήκους και σοβαρότητας αυτών. Ο ρυθμός εξέλιξης τους μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του χρόνου και/ή της κυκλοφορίας. Παρόλο που εξετάστηκαν αρκετές μεταβλητές για να διαπιστωθεί ποιες περιγράφουν καλύτερα την εξέλιξη της ρηγμάτωσης, τα στατιστικά αποτελέσματα ήταν μη σημαντικά, με χαμηλούς δείκτες R^2 . Εξήχθησαν

ενδιαφέροντα συμπεράσματα, που δυστυχώς δεν μπορούσαν να ποσοτικοποιηθούν και να εκφραστούν με μαθηματικές σχέσεις.

3.11.1.3 Σχόλια

Σχετικά με την ρηγμάτωση στο ίχνος μπορούν να σχολιαστούν τα εξής:

- Η γραμμική σχέση περιγράφει καλύτερα το φαινόμενο.
- Για κάθε τμήμα δρόμου, η κλίση του γραμμικού τύπου μπορεί να υπολογισθεί από το βαθμό αστοχίας κατά την τελευταία μέτρηση υπαίθρου, χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες σχέσεις.
- Εάν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για το τμήμα δρόμου, τότε η κλίση μπορεί να προκύψει απευθείας αποτυπώνοντας τα σημεία μετρήσεων (data points).

Σχετικά με την εγκάρσια ανακλαστική ρηγμάτωση μπορούν να σχολιαστούν τα εξής :

- Η εξέλιξη του αριθμού των ανακλαστικών ρωγμών ακολούθησε μια γραμμική σχέση μέχρι το σημείο όπου σχηματίστηκε ο μέγιστος αριθμός ρωγμών.
- Το μήκος των ρωγμών φάνηκε να αυξάνεται γραμμικά μέχρι το σημείο όπου σχηματίστηκε ο μέγιστος αριθμός ρωγμών. Κατά συνέπεια, η αύξηση του μήκους έτεινε ασυμπτωτικά σε μια μέγιστη τιμή, καθορισμένη από τον αριθμό των ρωγμών και το πλάτος της λωρίδας.
- Ο βαθμός αύξησης του αριθμού των ανακλαστικών ρωγμών ήταν συνάρτηση του κλίματος και του αριθμού ESALs.
- Ο βαθμός αύξησης του μήκους και της σοβαρότητας των ανακλαστικών ρωγμών ήταν συνάρτηση του κλίματος και του αριθμού ESALs.

3.11.2 Αυλάκωση

3.11.2.1 Ανάλυση αυλάκωσης

Στην ανάλυση για την εξαγωγή προτύπων που να περιγράφουν την εξέλιξη των αυλακώσεων δεν έγινε ο διαχωρισμός των τμημάτων σε εκείνα που είχαν υποστεί συντήρηση και σε εκείνα που δεν είχαν υποστεί. Αυτό οφείλεται στο ότι θεωρήθηκε ότι οι επεμβάσεις στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων δεν επηρεάζουν την εξέλιξη των αυλακώσεων με την πάροδο του χρόνου. Η ανάλυση βασίστηκε σε μέγιστα βάθη αυλακώσεων για την Ουγγαρία και σε βάθη αυλακώσεων εκτός του ίχνους των τροχών για τις άλλες χώρες. πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Από τα 273 εύκαμπτα και 98 ημιάκαμπτα οδοστρώματα, 98 και 43 τμήματα αντίστοιχα πληρούσαν τις προϋποθέσεις και συμπεριλήφθησαν στην τελική ανάλυση.

Η ανάλυση που ακολουθήθηκε ήταν παρόμοια με αυτή για την ρηγμάτωση, όπως και η μορφή του τελικού προτύπου που επίσης είναι γραμμική, μόνο που αυτή τη φορά η εξαρτημένη μεταβλητή είναι το βάθος της αυλάκωσης σε mm. Με τον ίδιο τρόπο έγινε γραμμική συσχέτιση για να ελεγχθεί η διασπορά των κλίσεων και προέκυψαν τα παρακάτω πρότυπα:

Τύπος οδοστρώματος	$\text{Log10}(\text{RD}_{\text{slope,ESAL}}) = \text{function}(\text{log10}(\text{RR}_{\text{ESAL}}))$	R^2
Εύκαμπτα	$y = 0.05 + 0.93x$	0.89
Ημιάκαμπτα	$y = 0.02 + 0.86x$	0.86
Όλα τα οδοστρώματα	$y = 0.04 + 0.90x$	0.88

Πίνακας 3.7 : Πρότυπα για τον υπολογισμό του λογαρίθμου της κλίσης του Βάθους Αυλάκωσης, ανά MESALs, συναρτήσει του λογαρίθμου του RR_{ESAL} , για διαφορετικούς τύπους οδοστρωμάτων.

Τύπος οδοστρώματος	$RD_{slope,age} =$ $function(RR_{age})$	R^2
Εύκαμπτα	$y = -0.02 + 1.05x$	0.77
Ημιάκαμπτα	$y = -0.18 + 1.16x$	0.87
Όλα τα οδοστρώματα	$y = -0.07 + 1.09x$	0.81

Πίνακας 3.8 : Πρότυπα για τον υπολογισμό της κλίσης του Βάθους Αυλάκωσης, ανά χρόνο, συναρτήσει του RR_{age} , για διαφορετικούς τύπους οδοστρωμάτων.

$$RR_{ESAL} = \frac{RD_{last}}{MESAL_{last}} \quad \text{και} \quad RR_{age} = \frac{RD_{last}}{age_{last}}$$

Όπου:

RR_{ESAL} = Rutting Relationship με μεταβλητή ESAL

RR_{age} = Rutting Relationship με μεταβλητή age

RD_{last} = Βάθος Αυλάκωσης κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση

$MESAL_{last}$ = Συνολικός αριθμός ESALs (σε εκατομμύρια) από την κατασκευή ή την επανεπίστρωση της επιφάνειας, κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση.

Age_{last} = ηλικία επιφάνειας οδοστρώματος κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση, από την κατασκευή ή την επανεπίστρωση της επιφάνειας.

3.11.2.2 Σχόλια

- Η γραμμική σχέση περιγράφει καλύτερα το φαινόμενο.
- Για κάθε τμήμα δρόμου, η έκταση της αυλάκωσης μπορεί να υπολογιστεί από το βάθος της αυλάκωσης που μετρήθηκε κατά την τελευταία επιτόπου

μέτρηση και τον αριθμό ESALs ή την ηλικία οδοστρώματος χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες σχέσεις.

- Εάν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για το τμήμα δρόμου, τότε η κλίση μπορεί να προκύψει απευθείας αποτυπώνοντας τα σημεία μετρήσεων.
- Η έκταση της αυλάκωσης στα εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα ήταν ίδια, που σημαίνει ότι η αυλάκωση αναπτύσσεται στις επιφανειακές στρώσεις της ασφάλτου, δηλαδή δεν παρατηρήθηκε κατασκευαστική αυλάκωση (structural rutting).

3.11.3 Ομαλότητα κατά μήκος

Εδώ εξετάζεται η αλλαγή στην κατά μήκος ομαλότητα στο πέρασμα του χρόνου. Διαφορετικές συσκευές χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις από την πλευρά των χωρών που συμμετέχουν στο πρόγραμμα, αλλά οι μετρήσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαχθεί ένας κοινός δείκτης άνεσης κύλισης. Ο δείκτης αυτός ονομάζεται International Roughness Index (IRI), αναπτύχθηκε στην Βραζιλία στη δεκαετία του 80 και έχει ως μονάδα μέτρησης mm/m. Ο πίνακας παρουσιάζει τον αριθμό των τμημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

Χώρα	Εύκαμπτα	Ημιάκαμπτα	Συνολικό ποσοστό ανά χώρα
Φινλανδία	33	0	100%
Σουηδία	296	0	100%
Δανία	7	0	100%
Ολλανδία	167	37	99%
Ηνωμένο Βασίλειο	15	12	96%
Γαλλία	7	2	41%
Ελβετία	0	0	0%
Αυστρία	10	0	83%
Ισπανία	0	0	0%
Ουγγαρία	24	26	82%
Ελλάδα	9	0	90%
Σύνολο	568	77	88%

Πίνακας 3.9 : αριθμός τμημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση για την κατά μήκος ομαλότητα.

Οι μετρήσεις έδειξαν ότι στα περισσότερα τμήματα, ο IRI είχε γραμμική εξέλιξη με το πέρασμα του χρόνου. Επομένως, το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε ήταν γραμμικό της μορφής:

$$y = A + B * x$$

Όπου:

y = η μετρημένη τιμή του IRI (mm/m)

x = χρόνος από την τελευταία επανεπίστρωση ή κατασκευή του οδοστρώματος (χρόνια)

A = σταθερά

B = κλίση

Από την ανάλυση των κλίσεων που προέκυψαν για κάθε τμήμα και τη διασπορά αυτών, αποδείχτηκε ότι η μεταβολή του IRI ανά χρόνο είναι πολύ μικρή. Σε αρκετά τμήματα η κλίση μπορούμε να πούμε ότι ήταν στατιστικώς μηδενική. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι στα εν λόγω τμήματα δεν υφίστατο καμία μεταβολή του δείκτη με το πέρασμα του χρόνου. Αυτό όμως δεν ισχύει για την Ελλάδα, αφού οι τιμές που υπολογίστηκαν ήταν αρκετά πιο μεγάλες απ' ό,τι στις άλλες χώρες. Συνεπώς, τα στοιχεία για την Ελλάδα πρέπει να αναλυθούν χωριστά από αυτά των άλλων χωρών. Μια πιθανή εξήγηση για τις διαφορετικές τιμές που υπολογίστηκαν στην Ελλάδα είναι ότι ο IRI καθορίστηκε από τη συσκευή Bump Integrator ενώ στις άλλες χώρες από προφιλόμετρα (profilometers).

Ένας μεγάλος αριθμός μεταβλητών χρησιμοποιήθηκε για να διαπιστωθεί ποιες έχουν επιρροή σε ό,τι αφορά στην μεταβολή του IRI. Η ανάλυση όμως δεν έδωσε απευθείας σχέση κάποιας μεταβλητής με την μεταβολή του IRI. Παρόλα αυτά, διαπιστώθηκε ότι στα εύκαμπτα οδοστρώματα, οδικά τμήματα με μικρούς φόρτους είναι πιο επιρρεπή στο να μεταβάλλουν τον IRI.

3.11.4 Αποκόλληση Ασφαλτικού Υλικού

Η αποκόλληση ασφαλτικού υλικού από την επιφάνεια οδοστρωμάτων με ασφατικές στρώσεις καθορίζεται ως η απώλεια αδρανών δομικών υλικών από την επιφάνεια του οδοστρώματος και μπορεί να προκληθεί από την κυκλοφορία των οχημάτων, αλλά και από κλιματολογικές παράγοντες. Το φαινόμενο αυτό έχει αρνητικές επιπτώσεις τόσο σε ό,τι αφορά στην ποιότητα κύλισης όσο και στην κατασκευαστική ποιότητα του δρόμου. Αυξάνονται οι πιθανότητες να προκληθούν ζημιές στα παρμπρίζ των αυτοκινήτων, αλλά αυξάνεται και ο παραγόμενος θόρυβος. Επίσης όταν το φαινόμενο γίνεται σοβαρό, μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό λακκουβών.

Υπάρχουν τρία επίπεδα σοβαρότητας (low, medium, high) που περιγράφουν το φαινόμενο της αποκόλλησης και εκφράζουν το ποσοστό των αδρανών υλικών που έχει αποκολληθεί. Η έκταση μετράται σε μέτρα ανά 100 μέτρα μήκους δρόμου, και επομένως η μέγιστη τιμή που μπορεί να υπάρξει είναι 100 μέτρα (συνολικά και από τα τρία επίπεδα σοβαρότητας). Ο πίνακας παρουσιάζει τον αριθμό των τμημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

Χώρα	Αριθμός τμημάτων	Συνολικό ποσοστό ανά χώρα
Δανία	7	100%
Ολλανδία	109	53%
Μεγάλη Βρετανία	7	25%
Γαλλία	4	18%
Ουγγαρία	21	34%
Σύνολο	148	21%

Πίνακας 3.10 : αριθμός τμημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση για την αποκόλληση ασφαλτικού υλικού.

Η επιλογή της συναρτησιακής μορφής του προτύπου που να περιγράφει τον συγκεκριμένο τύπο αστοχίας ήταν δύσκολη διαδικασία καθώς δεν υπήρχαν στοιχεία ALT που να δώσουν μία πρώτη ένδειξη για το ποια θα μπορούσε να είναι η μορφή του προτύπου. Τελικά επελέγησαν δύο μορφές προτύπων, λογιστικό και γραμμικό, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

$$y = \frac{1}{\frac{1}{U} + A * B^x} \quad \text{και} \quad y = A + B * x$$

Όπου:

y = συνολική έκταση αποκόλλησης ασφαλτικού υλικού (%)

x = χρόνος από την τελευταία επανεπίστρωση, βελτίωση ή κατασκευή (χρόνια)

A, B = παράμετροι

U = άνω όριο (=100%)

Για κάθε τμήμα έγινε γραμμική παλινδρόμηση και προέκυψαν ζευγάρια των παραμέτρων A και B. Η παράμετρος B είναι εκείνη που περιγράφει την εξέλιξη της αποκόλλησης με την πάροδο του χρόνου. Επίσης, και για τους δύο τύπους προτύπων εξετάστηκε ποιες ανεξάρτητες μεταβλητές επηρεάζουν την κλίση B, αλλά καμμία δεν έδωσε στατιστικώς σημαντικά αποτελέσματα.

3.12 Αξιολόγηση

3.12.1 Εισαγωγή

Από την αρχή του προγράμματος είχε αποφασιστεί ότι τα πρότυπα αστοχιών που θα αναπτύσσονταν θα προέκυπταν από χρονικές σειρές δεδομένων που κάλυπταν ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Ειδικότερα για τα πρότυπα εξέλιξης αστοχιών ήταν απαραίτητο να γίνεται εποπτεία των οδοστρωμάτων για αρκετά χρόνια, έτσι ώστε να εξαχθεί μια καθαρή εικόνα σχετικά με την ανάπτυξη αυτών. Οι περισσότερες χώρες που συμμετείχαν στο πρόγραμμα διέθεταν ικανά δεδομένα κυρίως από αντίστοιχα εθνικά προγράμματα που έλαβαν χώρα παλαιότερα, ενώ τέσσερις χώρες δεν είχαν αρκετά στοιχεία. Οι χώρες αυτές είναι το Βέλγιο, η Ιρλανδία, η Πορτογαλία και η Σλοβενία και τα στοιχεία από τις χώρες αυτές δεν χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία ανάλυσης για την εξαγωγή προτύπων. Ο βασικός στόχος της διαδικασίας αξιολόγησης είναι να διαπιστωθεί αν τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν με βάση τα δεδομένα των έντεκα χωρών, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στις υπόλοιπες τέσσερις χώρες. Και οι δύο τύποι προτύπων (έναρξης και εξέλιξης αστοχιών) ήταν αντικείμενα προς αξιολόγηση.

3.12.2 Έναρξη Αστοχιών

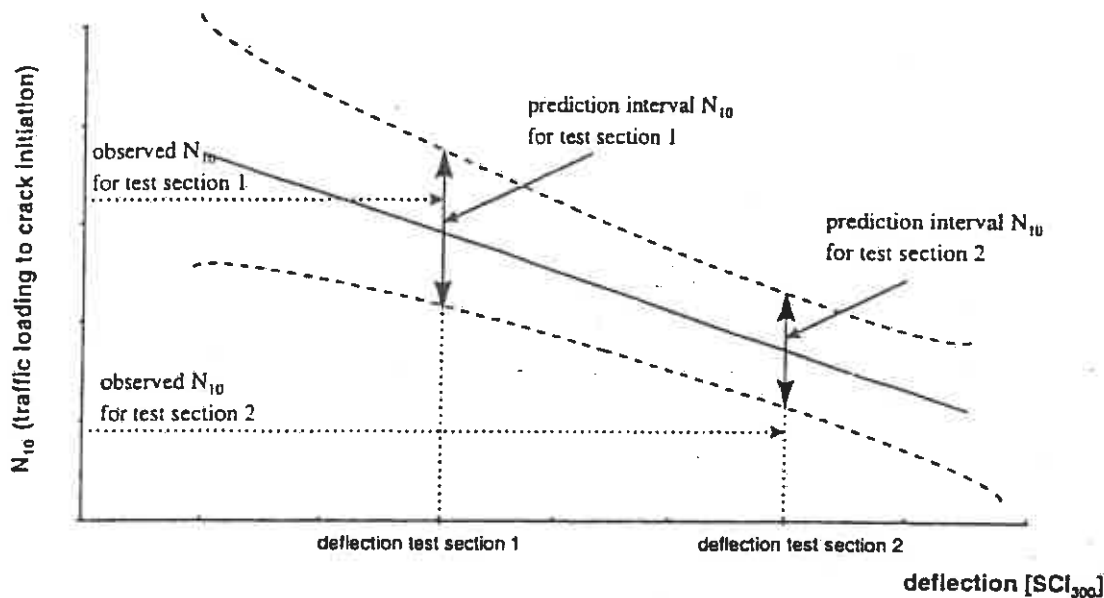
Στην ανάλυση για την ανάπτυξη των προτύπων έναρξης ρηγμάτωσης, το έτος εμφάνισης πρώτης ρωγμής καθορίστηκε από την χρονοσειρά δεδομένων για ρηγμάτωση. Επειδή τα στοιχεία των τμημάτων των τεσσάρων χωρών δεν κάλυπταν ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, αποφασίστηκε να συμπεριληφθούν επιπλέον τμήματα τα οποία βρίσκονταν στη φάση έναρξης ρηγμάτωσης.

Η συνήθης διαδικασία για τον καθορισμό του έτους κατά το οποίο ένα οδικό τμήμα ξεκινά να ρηγματώνεται είναι η ετήσια επιθεώρηση του τμήματος, ξεκινώντας από μια χρονική στιγμή κατά την οποία το τμήμα δεν έχει ρηγματωθεί. Είναι εμφανές ότι αυτή η διαδικασία δεν μπορούσε να εφαρμοστεί για την αξιολόγηση των προτύπων του PARIS, λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χρόνου. Έτσι η διαδικασία για τις τέσσερις χώρες περιελάμβανε αρχικά την επικοινωνία με τους διαχειριστές των δικτύων, έτσι ώστε να προτείνουν υποψήφια για τις ανάγκες του PARIS τμήματα. Έπειτα επελέγη ένας αριθμός από αυτά με βάση τις προδιαγραφές του PARIS για τον φόρτο κυκλοφορίας και πραγματοποιήθηκε οπτική έρευνα για να διαπιστωθεί αν τα τμήματα βρίσκονταν όντως στη φάση της έναρξης ρηγματώσεων. Αυτό ήταν και το αδύνατο σημείο της όλης διαδικασίας. Το βασικό κριτήριο για τον μηχανικό που πραγματοποίησε την έρευνα, ήταν ότι οι ρηγματώσεις έπρεπε να είχαν μήκος μικρότερο από 0.5m. Ακολούθως πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις υποχωρήσεων και συλλέχθηκαν κυκλοφοριακά στοιχεία. Τα επιπλέον τμήματα που τελικά επελέγησαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Χώρα	Αριθμός τμημάτων		Εύρος κυκλοφοριακού φόρτου	Εύρος υποχωρήσεων
	Εύκαμπτα	Ημιάκαμπτα	(ESALs/year)	(SCI ₃₀₀)
Βέλγιο	0	0	800 – 4000	40 – 322
Ιρλανδία	16	-	67000 – 290000	71 – 230
Πορτογαλία	24	-	9000 – 750000	28 – 268
Σλοβενία	15	-	10000 – 210000	47 – 205
Σύνολο	55	0	800 - 750000	28 - 322

Πίνακας 3.11: Τελική επιλογή τμημάτων για επαλήθευση των προτύπων έναρξης.

Η βασική αρχή για να επαληθευτούν τα πρότυπα έναρξης ρηγμάτωσης είναι να γίνει σύγκριση του αριθμού αξόνων που υπολογίζουν τα πρότυπα με τον αριθμό αξόνων που παρατηρήθηκε με επιτόπου μετρήσεις στα τμήματα. Τα πρότυπα θεωρούνται έγκυρα όταν ο υπολογισμένος και ο παρατηρούμενος αριθμός αξόνων βρίσκονται μέσα στα καθορισμένα όρια αντοχής. Το σχήμα δείχνει ακριβώς αυτή την λογική.



Σχήμα 3.6 : Παρουσίαση της αρχής της διαδικασίας αξιολόγησης.

Το παραπάνω σχήμα δείχνει τη σχέση της ανεξάρτητης μεταβλητής SCI₃₀₀ και της εξαρτημένης μεταβλητής N_{10} . Η δεύτερη ανεξάρτητη μεταβλητή ESAL/year δεν λαμβάνεται υπόψη, που σημαίνει ότι το πρότυπο στο σχήμα είναι έγκυρο μόνο για ένα συγκεκριμένο επίπεδο ESAL/year. Οι καμπύλες εκατέρωθεν της καμπύλης του προτύπου είναι τα όρια πρόβλεψης (prediction interval), που καθορίζονται από την απαιτούμενη ακρίβεια για τον προσδιορισμό του N_{10} . Και για τα δύο τμήματα έχουν υπολογιστεί οι καμπύλες και προκύπτει το συμπέρασμα ότι για το section 1 το πρότυπο είναι έγκυρο, ενώ για το section 2 όχι. Για την αξιολόγηση επελέγη να χρησιμοποιηθεί επίπεδο σημαντικότητας 10 % και χαράχθηκαν καμπύλες πρόβλεψης 90 % που σημαίνει ότι για να είναι έγκυρο το πρότυπο, πρέπει 90 % των σημείων να βρίσκεται μέσα στα όρια ανοχής.

3.12.3 Εξέλιξη Αστοχιών

Για την επαλήθευση των προτύπων εξέλιξης αστοχιών απαιτήθηκαν χρονοσειρές δεδομένων και επομένως δεν συμπεριλήφθηκαν επιπλέον τμήματα, αφού δεν μπορούσαν να αποκτηθούν χρονοσειρές κατά τη διάρκεια του προγράμματος για νέα τμήματα. Ο πίνακας εμφανίζει τα τμήματα που χρησιμοποιήθηκαν για αξιολόγηση ανά χώρα και τα οποία διέθεταν χρονοσειρές δεδομένων για κάποια χρονικά περίοδο, από παλαιότερες τοπικές έρευνες της συμπεριφοράς οδοστρωμάτων.

Χώρα	Αριθμός εύκαμπτων τμημάτων	Αριθμός ημιάκαμπτων τμημάτων
Βέλγιο	23	11
Ιρλανδία	7	0
Πορτογαλία	20	6
Σλοβενία	13	0
Σύνολο	63	17

Πίνακας 3.12 : αριθμός τμημάτων με διαθέσιμα στοιχεία

Παρόλα αυτά, τέθηκαν συγκεκριμένα κριτήρια για την τελική επιλογή των τμημάτων που ήταν: Ηλικία επιφάνειας οδοστρώματος όχι μεγαλύτερη από 20 έτη από την πρώτη επιτόπου μέτρηση και τουλάχιστον δύο σημεία με τιμή αστοχίας διάφορη του μηδενός. Ο παρακάτω πίνακας εμφανίζει τα τμήματα που επελέγησαν τελικά για αξιολόγηση.

Τύπος αστοχίας	Αριθμός τμημάτων	Χώρα
Ρηγματώση	13	Πορτογαλία
Αυλάκωση	51	Βέλγιο, Ιρλανδία, Πορτογαλία, Σλοβενία
Ομαλότητα κατά μήκος	25	Βέλγιο, Ιρλανδία, Σλοβενία
Αποκόλληση ασφαλικού υλικού	2	Ιρλανδία

Πίνακας 3.13: αριθμός τμημάτων που ικανοποιούσαν τα κριτήρια για να εισαχθούν στη διαδικασία της επαλήθευσης των προτύπων εξέλιξης για εύκαμπτα οδοστρώματα.

Η μεθοδολογία επαλήθευσης για την εξέλιξη ρηγματώσεων και αυλακώσεων είναι παρόμοια με εκείνη που αφορούσε στην έναρξη ρηγματώσεων. Για κάθε τμήμα υπολογίστηκε η κλίση του γραμμικού προτύπου και έγινε έλεγχος εάν οι παρατηρούμενες τιμές των κλίσεων ήταν ανάμεσα στις καμπύλες ανοχής (prediction interval) του αρχικού προτύπου. Έπειτα πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος για τον προσδιορισμό του αριθμού των τμημάτων εκτός των καμπυλών ανοχής έτσι ώστε να καθοριστεί αν το πρότυπο επαληθευόταν ή όχι από τις επί τόπου παρατηρήσεις.

Σχετικά με την επαλήθευση της εξέλιξης της ομαλότητας, έγινε ένας απλός έλεγχος για να διαπιστωθεί η γραμμικότητα των στοιχείων που συλλέχθηκαν από τις τέσσερις χώρες. Για την αποκόλληση ασφαλικού υλικού δεν έγινε επαλήθευση ελλείψει στοιχείων.

3.13 Εφαρμογή των Προτύπων

Η ιδέα για τη δημιουργία των προτύπων προήλθε από την ανάγκη για την καθημερινή τους χρήση στα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων. Συνεπώς οι ανεξάρτητες μεταβλητές που χρειάζονταν για να προβλέπουν τη μελλοντική εξέλιξη των αστοχιών έπρεπε να είναι άμεσα διαθέσιμες στην καθημερινή πρακτική. Εξαιτίας αυτού, ανεξάρτητες μεταβλητές όπως η σύσταση του ασφαλικού υλικού ή οι παράμετροι δυσκαμψίας των βάσεων με κοκκώδη υλικά, αποκλείστηκαν από την αρχή ως πιθανές ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι μόνες πληροφορίες που απαιτούνται για να χρησιμοποιήσουμε τα πρότυπα είναι, για τα πρότυπα έναρξης ο ετήσιος αριθμός τυπικών αξόνων και πληροφορίες για τις υποχωρήσεις, ενώ για τα πρότυπα εξέλιξης ο συνολικός αριθμός κυκλοφορίας ή η ηλικία οδοστρώματος και το τωρινό επίπεδο των αστοχιών.

Ο αποκλεισμός από τα πρότυπα ενός μεγάλου αριθμού πολύπλοκων ανεξάρτητων μεταβλητών, είχε τις συνέπειές του. Τα πρότυπα που δημιουργήθηκαν είναι πολύ γενικά και δεν μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας για όλες τις ιδιαίτερες τοπικές συνθήκες στην Ευρώπη. Τα οδικά τμήματα που ερευνήθηκαν βρίσκονταν κυρίως στο δίκτυο οδών ταχείας κυκλοφορίας και συνεπώς αναφέρονται σε αυτό το μέρος του συνολικού δικτύου. Οι τοπικές κατασκευαστικές πρακτικές και τα υλικά μπορεί να διαφέρουν από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο, στον οποίο είναι βασισμένα τα πρότυπα. Αν μελλοντικά αλλάξει ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων, τα πρότυπα θα πρέπει να προσαρμοστούν στις νέες συνθήκες.

Ένα άλλο γεγονός που πρέπει να αναγνωριστεί κατά την εφαρμογή των προτύπων είναι ότι βασίστηκαν σε στοιχεία αστοχιών ανώτερης ποιότητας, από αυτά που είναι διαθέσιμα στην καθημερινή πρακτική της διαχείρισης οδοστρωμάτων. Αυτό αναφέρεται κυρίως στις ρηγματώσεις και αυλακώσεις που καταγράφηκαν στις επί τόπου έρευνες.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ελέγχεται πριν την εφαρμογή των προτύπων είναι ότι τα στοιχεία αστοχιών κανονικοποιήθηκαν με το σύστημα του PARIS πριν από την ανάλυση, με σκοπό να εξασφαλιστεί η συμβατότητα των στοιχείων των

δεκαπέντε συμμετεχόντων χωρών. Συνεπώς, τα πρότυπα αφορούν κυρίως αστοχίες που μπορούν να εκφραστούν σύμφωνα με το σύστημα του PARIS, το οποίο να μην είναι πλήρως συμβατό με τις τοπικές πρακτικές των επί τόπου ερευνών.

Για τους παραπάνω λόγους τα πρότυπα του PARIS δεν πρέπει να εφαρμόζονται σε τοπικά συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων χωρίς προσεκτική αντιμετώπιση. Κατά την εφαρμογή των προτύπων θα πρέπει πρώτα να διορθώνονται ώστε να γίνεται χρήση των τοπικών στοιχείων αστοχιών, τα οποία ελήφθησαν σύμφωνα με τις τοπικές πρακτικές των επί τόπου ερευνών.

3.14 Συμπεράσματα

- Παρ' όλο που τα συστήματα συλλογής των στοιχείων που αφορούσαν στις αστοχίες οδοστρωμάτων των δεκαπέντε χωρών ήταν παρόμοια, οι διαφορές ήταν τέτοιες ώστε τα τοπικά στοιχεία έπρεπε να κανονικοποιηθούν σε κοινή βάση για να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση.
- Σχετικά με την κανονικοποίηση, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν οι πληροφορίες έκτασης και σοβαρότητας των αστοχιών, που είχαν συλλεχθεί από τα τοπικά συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων, να συγκεντρωθούν σε κοινή ευρωπαϊκή βάση.
- Τα στοιχεία υποχωρήσεων που εκφράζονταν με τον Δείκτη Επιφανειακής Καμπυλότητας (Surface Curvature Index), μαζί με τα στοιχεία κυκλοφορίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλεφθεί η έναρξη ρηγματώσεων στο ίχνος. Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα ο SCI_{300} αποδείχθηκε ότι παράγει τα πιο ακριβή αποτελέσματα, ενώ για τα ημιάκαμπτα αντίστοιχα ο SCI_{900} .
- Σχετικά με την εξέλιξη των αστοχιών, αναπτύχθηκαν πρότυπα που προβλέπουν την μελλοντική εξέλιξη των αστοχιών με ικανοποιητική ακρίβεια, χρησιμοποιώντας στοιχεία που είναι άμεσα διαθέσιμα στον μηχανικό.
- Η συναρτησιακή μορφή αυτών των προτύπων είναι προτιμότερο να προκύψει από στοιχεία που έχουν συλλεχθεί από εγκαταστάσεις επιταχυνόμενης φόρτισης οδοστρωμάτων (Accelerated Loading Testing).

Τα στοιχεία αυτά καλύπτουν όλη την εξέλιξη της αστοχίας, από την γένεση έως την αστοχία του οδοστρώματος.

- Για την ρηγμάτωση και την αυλάκωση, η εξέλιξη της αστοχίας περιγράφεται με γραμμική σχέση, η κλίση της οποίας μπορεί να υπολογιστεί από το παρατηρούμενο επίπεδο αστοχίας και την ηλικία ή τον συνολικό αριθμό των αξόνων του οδοστρώματος, τη στιγμή της μέτρησης.
- Η εξέλιξη της κατά μήκος ομαλότητας, που εκφράζεται με τον Διεθνή Δείκτη Ομαλότητας (International Roughness Index), φάνηκε ότι είναι επίσης γραμμική. Καμία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές δεν βρέθηκε ότι μπορεί να υπολογίσει την κλίση. Ο βαθμός μεταβολής του IRI ήταν πρακτικά μηδενικός, κάτι που υποδηλώνει ότι ο IRI δεν είναι ο κατάλληλος δείκτης για να μελετηθεί η αλλαγή της ομαλότητας εμπειριστατωμένα, ειδικά όταν αφορά σε ποιοτικά οδοστρώματα της Ευρώπης.
- Για την αποκόλληση ασφαλτικού υλικού, το λογιστικό πρότυπο φάνηκε να περιγράφει καλύτερα την εξέλιξη του φαινομένου με την πάροδο του χρόνου. Όμως, επειδή τα στοιχεία ήταν ελλιπή, δεν αναπτύχθηκε ένα πραγματικό ευρωπαϊκό πρότυπο.
- Για την επαλήθευση των προτύπων με βάση τα στοιχεία των τεσσάρων χωρών που δεν συμμετείχαν στην δημιουργία αυτών, το πρότυπο έναρξης ρηγματώσεων φάνηκε να εφαρμόζεται ικανοποιητικά σε τρεις από τις τέσσερις χώρες, αλλά με τον αριθμό των προβλεπόμενων αξονικών διελεύσεων να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των πραγματικών αξονικών διελεύσεων. Για αυτές τις χώρες, τα τμήματα από τα οποία συλλέχθηκαν τα στοιχεία βρίσκονταν στο κεντρικό δικό δίκτυο, σε αναλογία με τα τμήματα που συμμετείχαν στην ανάλυση των έντεκα χωρών.
- Από την τέταρτη χώρα, μόνο στοιχεία τμημάτων δρόμου με μικρή κυκλοφορία ήταν διαθέσιμα. Το πρότυπο αποδείχθηκε ότι δεν εφαρμόζεται σωστά σε τέτοια τμήματα. στους δρόμους μικρής κυκλοφορίας διαφορετικοί μηχανισμοί καθορίζουν την ανάπτυξη της ρηγμάτωσης.

- Τα πρότυπα εξέλιξης αστοχιών φάνηκε να εφαρμόζονται ικανοποιητικά και στις τέσσερις χώρες, αλλά ομοίως με τα πρότυπα έναρξης ρηγματώσεων ο αριθμός των προβλεπόμενων αξονικών διελεύσεων ήταν μεγαλύτερος από τον αριθμό των πραγματικών αξονικών διελεύσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 Βάση Δεδομένων

4.1.1 Εισαγωγή

Σε πρώτο στάδιο έγινε οργάνωση της βάσης δεδομένων του PARIS η οποία είναι σε μορφή ACCESS και περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που συλλέχθηκαν στα δύο χρόνια μελέτης του προγράμματος. Δημιουργήσαμε μια καινούργια βάση δεδομένων σε μορφή EXCEL χρησιμοποιώντας αποκλειστικά δεδομένα που αφορούσαν τμήματα επιταχυνόμενης φόρτισης (accelerated loading testing ALT). Για τα τμήματα αυτά συλλέξαμε στοιχεία γενικά (inventory data) ,κατασκευαστικά (construction data) ,για τις ρωγμές (cracking data) καθώς και για το βάθος αυλάκωσης (rut depth data). Η νέα αυτή βάση δεδομένων θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την εξέλιξη των αυλακώσεων.

4.1.2 Περιγραφή της Βάσης Δεδομένων

Στη βάση δεδομένων περιέχονται στοιχεία που θεωρήθηκε ότι θα φανούν χρήσιμα στη μετέπειτα επεξεργασία. Από τον πίνακα «Γενικά στοιχεία» (inventory data) του PARIS επελέγησαν τα ακόλουθα στοιχεία που αναφέρονται σε τμήματα επιταχυνόμενης φόρτισης (accelerated loading testing ALT):

- Ο κωδικός αναγνώρισης του υπό εξέταση τμήματος (identification no). Συμβολίζεται ως IDENT.
- Ο τύπος κατασκευής του οδοστρώματος (construction type). Συμβολίζεται ως CONSTR. Στη βάση συναντούμε τύπο 2 που αντιστοιχεί στα ημιάκαμπτα

οδοστρώματα και τους τύπους 3,4,5 που αντιστοιχούν σε εύκαμπτα οδοστρώματα.

- Η ημερομηνία ενάρξεως της διαδικασίας για το συγκεκριμένο τμήμα (start of test). Συμβολίζεται ως START.
- Η μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας σε C (temperature). Συμβολίζεται ως TEMP.
- Η μέση θερμοκρασία κατά την διάρκεια της επεξεργασίας του τμήματος ALT σε C (temperature during test). Συμβολίζεται ως TEMP_T.
- Η μέση ετήσια βροχόπτωση σε mm (amount of rainfall). Συμβολίζεται ως RAIN.
- Η χώρα προέλευσης του τμήματος ALT. Συμβολίζεται ως COUNTRY.
- Το μήκος σε m του υπό εξέταση τμήματος (Length of test section). Συμβολίζεται ως LENGTH.
- Ο αριθμός ημερών επεξεργασίας του εκάστοτε τμήματος (Duration of test). Συμβολίζεται ως DURAT.

Ο επόμενος πίνακας από τον οποίο αντλήθηκαν στοιχεία ήταν ο πίνακας «Κατασκευαστικά Στοιχεία» (construction data) ο οποίος περιέχει κατασκευαστικά δεδομένα για τα τμήματα επιταχυνόμενης φόρτισης (accelerated loading testing ALT). Εκτός από τον κωδικό αναγνώρισης του υπό εξέταση τμήματος, αυτά ήταν:

- Ο τύπος της επιφανειακής στρώσης (surface layer type). Συμβολίζεται ως SURFACE. Στη βάση συναντούμε μόνο τύπο 1 που αντιστοιχεί σε πυκνή (dense) επιφανειακή στρώση.
- Το πάχος της επιφανειακής στρώσης (thickness of surface layer) σε mm. Συμβολίζεται ως TH_SUR.

- Το πάχος της ασφαλτικής στρώσης (thickness bituminous layers) σε mm. Συμβολίζεται ως TH_BIT.
- Το πάχος της δύσκαμπτης στρώσης (thickness rigid layers) σε mm. Συμβολίζεται ως TH_RIG.
- Το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό (thickness granular layers) σε mm. Συμβολίζεται ως TH_GRA
- Ο τύπος της υπόβασης (type of subgrade). Συμβολίζεται ως SUBGRADE.
- Η περιεκτικότητα σε υγρασία της υπόβασης (moisture content %). Συμβολίζεται ως MOIST.
- Η φέρουσα ικανότητα της υπόβασης (bearing capacity). Συμβολίζεται ως BEARING.
- Ο εξοπλισμός για την μέτρηση της φέρουσας ικανότητας της υπόβασης (equipment for measuring bearing). Συμβολίζεται ως EQUIP_BE.

Στη συνέχεια από τα διαγράμματα για το βάθος αυλάκωσης (rut depth alt test sections) που περιέχει το PARIS για κάποια από τα τμήματα επιταχυνόμενης φόρτισης (accelerated loading testing ALT) επιλέγω τα στοιχεία:

- Ο αριθμός των τυπικών αξονικών φορτίων βάρους 10 τόνων (100 kN) που διέρχονται από το υπό μελέτη τμήμα (no ESAL 10t). συμβολίζεται ως ESAL_10T.
- Το βάθος της αυλάκωσης σε mm (rut depth). Συμβολίζεται ως RUT_DEP.

Τέλος, από τα διαγράμματα για τις ρωγμές (cracking alt test sections) που περιέχει το PARIS για κάποια από τα τμήματα επιταχυνόμενης φόρτισης (accelerated loading testing ALT) επιλέγω τα στοιχεία:

- Τα συσσωρευμένα φορτία κυκλοφορίας τη στιγμή έναρξης της ρηγμάτωσης (Cumulative Traffic Loadings at the Initiation of Cracking, 100 kN ESALs). Συμβολίζεται ως LOAD_N10.
- Τα μήκη σε m της κατά μήκος ρηγμάτωσης στο ίχνος των τροχών (longitudinal cracking in the wheel path). Συμβολίζεται ως LWP.
- Τα μήκη σε m της εγκάρσιας ρηγμάτωσης στο ίχνος των τροχών (transverse cracking in the wheel path). Συμβολίζεται ως TWP.
- Τα μήκη σε m της αλλιγοτορικής ρηγμάτωσης (alligator cracking). Συμβολίζεται ως ACR.
- Το συνολικό άθροισμα των LWP, TWP, ACR (sum of ACR, LWP, TWP). Συμβολίζεται ως TOT_WP.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω στοιχεία που προκύπτουν από τα διαγράμματα για τις ρωγμές (cracking alt test sections) που περιέχει το PARIS, ενώ εμπεριέχονται στην νέα βάση δεδομένων που κατασκευάζουμε, δεν θα συμπεριληφθούν στην στατιστική ανάλυση που θα ακολουθήσει καθώς στόχος της είναι η ποσοτική διερεύνηση του βάθους αυλάκωσης και δεν θα γίνει αντίστοιχη ανάλυση για τις ρηγματώσεις.

4.1.3 Στατιστική Ανάλυση Βάσης Δεδομένων

Με βάση το πρόγραμμα SPSS ακολούθησε στατιστική ανάλυση της βάσης δεδομένων. Για αυτή την ανάλυση όλες οι μεταβλητές θεωρήθηκαν ανεξάρτητες. Με τον όρο ανεξάρτητη μεταβλητή νοείται κάθε καθοριζόμενο και πλήρως ορισμένο στοιχείο, το οποίο εκφράζει είτε μια ιδιότητα είτε ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό και το οποίο επιδρά συστηματικά, και κατά τρόπο που μπορεί να εκτιμηθεί, σε ένα άλλο επίσης καθοριζόμενο στοιχείο (εξαρτημένη μεταβλητή).

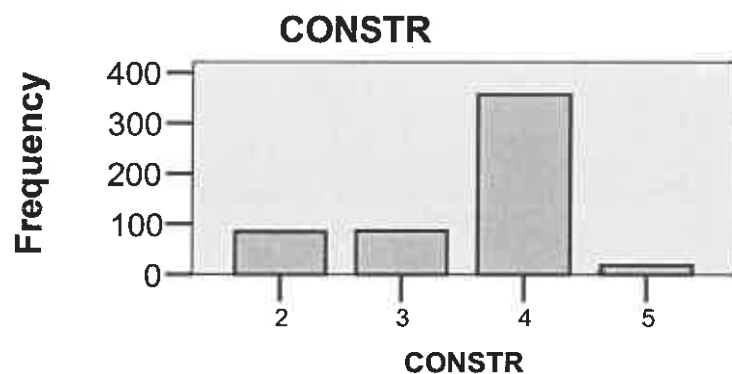
Για την ανάλυση των μεταβλητών στο πρόγραμμα SPSS, απαιτείται ο διαχωρισμός τους σε δύο κατηγορίες, με βάση τα δεδομένα που περιέχουν, για τις οποίες ακολουθείται στη συνέχεια διαφορετικός τρόπος ανάλυσης. Έτσι προκύπτουν οι απόλυτες μεταβλητές (categorical) και οι μεταβλητές κλίμακας (scale). Στην κατηγορία των απολύτων μεταβλητών (categorical) περιλαμβάνονται δεδομένα που έχουν περιορισμένο αριθμό διακεκριμένων τιμών της μεταβλητής καθώς και ποιοτικά δεδομένα. Στη κατηγορία των μεταβλητών κλίμακας (scale) περιέχονται δεδομένα μετρημένα σε κάποια κλίμακα, όπου η τιμή της μεταβλητής υποδηλώνει ταυτοχρόνως και την διάταξη των τιμών και την μεταξύ τους απόσταση.

Ως απόλυτες μεταβλητές (categorical) θεωρήσαμε τον τύπο κατασκευής του οδοστρώματος (CONSTR), την ημερομηνία ενάρξεως της διαδικασίας για το συγκεκριμένο τμήμα (START), τη χώρα προέλευσης του τμήματος ALT (COUNTRY), τον τύπο της επιφανειακής στρώσης (SURFACE), τον τύπο της υπόβασης (SUBGRADE) και τον εξοπλισμό για την μέτρηση της φέρουσας ικανότητας της υπόβασης (EQUIP_BE). Η ανάλυση για αυτήν την κατηγορία μεταβλητών συνίσταται κυρίως στην εύρεση ποσοστών και συχνότητας εμφάνισης των διαφόρων τιμών σε κάθε μεταβλητή. Προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα σε μορφή πινάκων.

Για τον τύπο κατασκευής του οδοστρώματος (CONSTR):

CONSTR

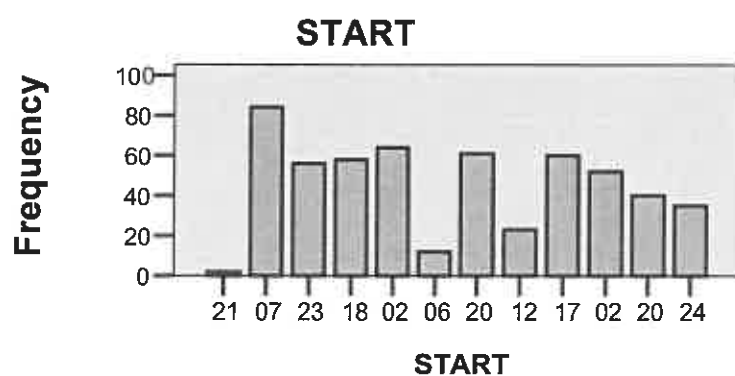
		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	2	85	15,5	15,5	15,5
	3	87	15,9	15,9	31,4
	4	357	65,3	65,3	96,7
	5	18	3,3	3,3	100,0
	Total	547	100,0	100,0	



Για την ημερομηνία έναρξης της διαδικασίας για το συγκεκριμένο τμήμα (START):

START

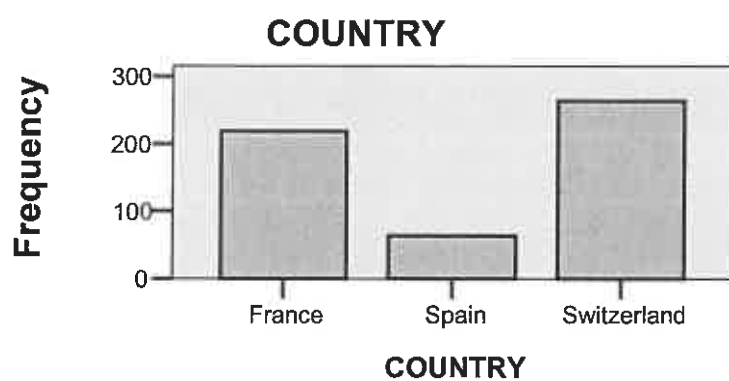
		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	21-MAY-1980	2	,4	,4	,4
	07-JUL-1980	84	15,4	15,4	15,7
	23-AUG-1983	56	10,2	10,2	26,0
	18-NOV-1986	58	10,6	10,6	36,6
	02-JAN-1988	64	11,7	11,7	48,3
	06-OCT-1988	12	2,2	2,2	50,5
	20-DEC-1988	61	11,2	11,2	61,6
	12-NOV-1989	23	4,2	4,2	65,8
	17-OCT-1990	60	11,0	11,0	76,8
	02-JUL-1991	52	9,5	9,5	86,3
	20-OCT-1991	40	7,3	7,3	93,6
	24-NOV-1993	35	6,4	6,4	100,0
	Total	547	100,0	100,0	



Για τη χώρα προέλευσης του τμήματος ALT (COUNTRY):

COUNTRY

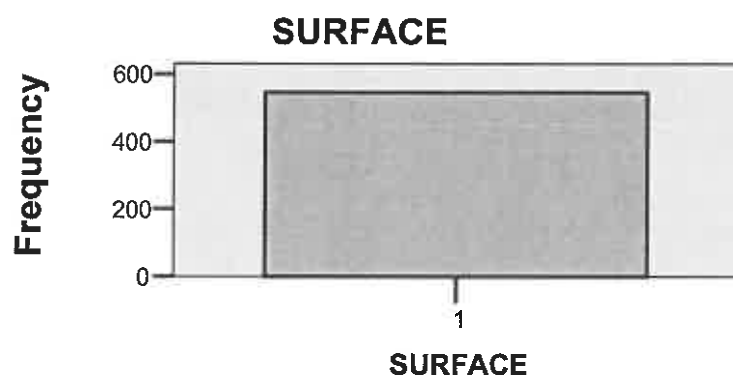
		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	France	219	40,0	40,0	40,0
	Spain	64	11,7	11,7	51,7
	Switzerland	264	48,3	48,3	100,0
	Total	547	100,0	100,0	



Για τον τύπο της επιφανειακής στρώσης (SURFACE):

SURFACE

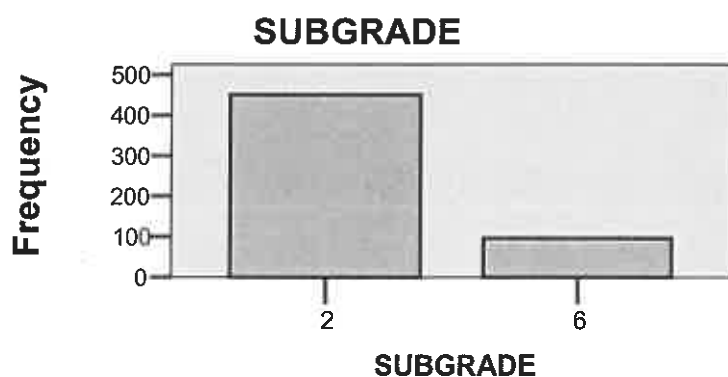
		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	1	547	100,0	100,0	100,0



Για τον τύπο της υπόβασης (SUBGRADE):

SUBGRADE

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	2	451	82,4	82,4	82,4
	6	96	17,6	17,6	100,0
	Total	547	100,0	100,0	

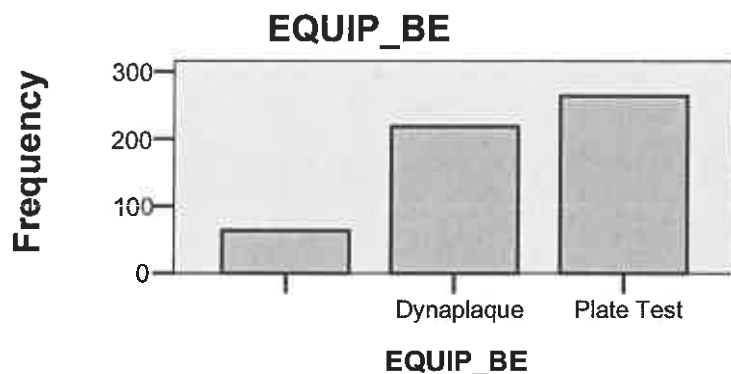


Για τον εξοπλισμό για την μέτρηση της φέρουσας ικανότητας της υπόβασης (EQUIP_BE):

EQUIP_BE

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid		64	11,7	11,7	11,7
	Dynaplaque	219	40,0	40,0	51,7
	Plate Test	264	48,3	48,3	100,0
	Total	547	100,0	100,0	

Στο παρακάτω διάγραμμα, όπου δεν αναφέρεται ο εξοπλισμός για την μέτρηση της φέρουσας ικανότητας της υπόβασης, αναφέρεται σε μέθοδο υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας με βάση το CBR της υπόβασης.



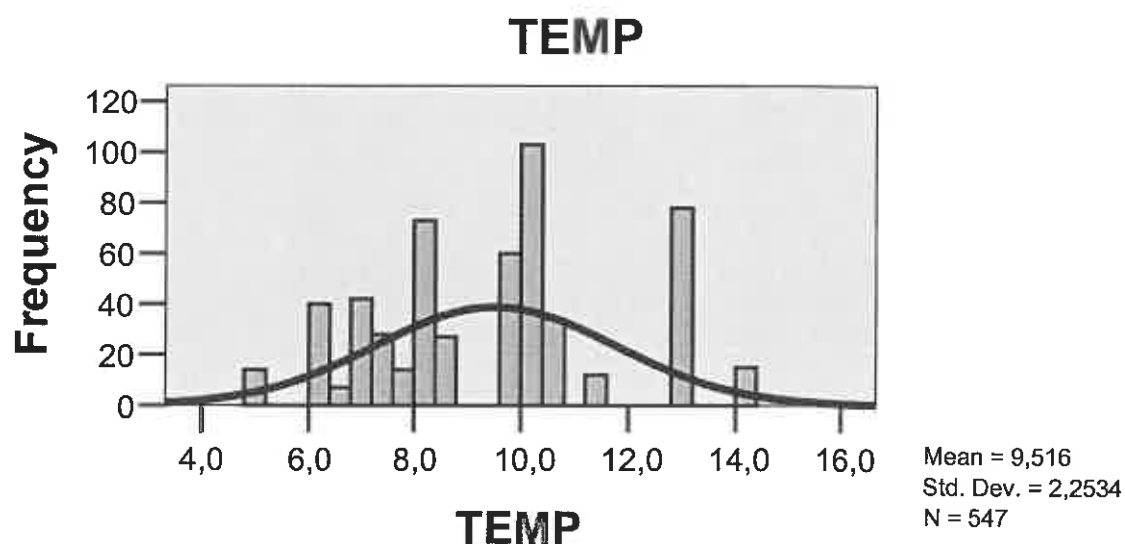
Ως μεταβλητές κλίμακας (scale) θεωρήσαμε την μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας σε C (TEMP), την μέση θερμοκρασία κατά την διάρκεια της επεξεργασίας του τμήματος ALT σε C (TEMP_T), την μέση ετήσια βροχόπτωση σε mm (RAIN), το μήκος σε m του υπό εξέταση τμήματος (LENGTH), τον αριθμό ημερών επεξεργασίας του εκάστοτε τμήματος (DURAT), το πάχος της επιφανειακής στρώσης σε mm (TH_SUR), το πάχος της ασφαλτικής στρώσης σε mm (TH_BIT), το πάχος της δύσκαμπτης στρώσης σε mm (TH_RIG), το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό σε mm (TH_GRA), την περιεκτικότητα σε υγρασία της υπόβασης (MOIST), τον αριθμό των τυπικών αξονικών φορτίων βάρους 10 τόνων (100 kN) που διέρχονται από το υπό μελέτη τμήμα (ESAL_10T), και το βάθος της αυλάκωσης σε mm (RUT_DEP). Η ανάλυση για αυτήν την κατηγορία μεταβλητών συνίσταται κυρίως στην εύρεση του μέσου όρου (mean), του διαμέσου (median), της τυπικής απόκλισης (std.deviation), καθώς και το μέγιστο και το ελάχιστο των τιμών κάθε μεταβλητής. Προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα σε μορφή πινάκων.

Statistics

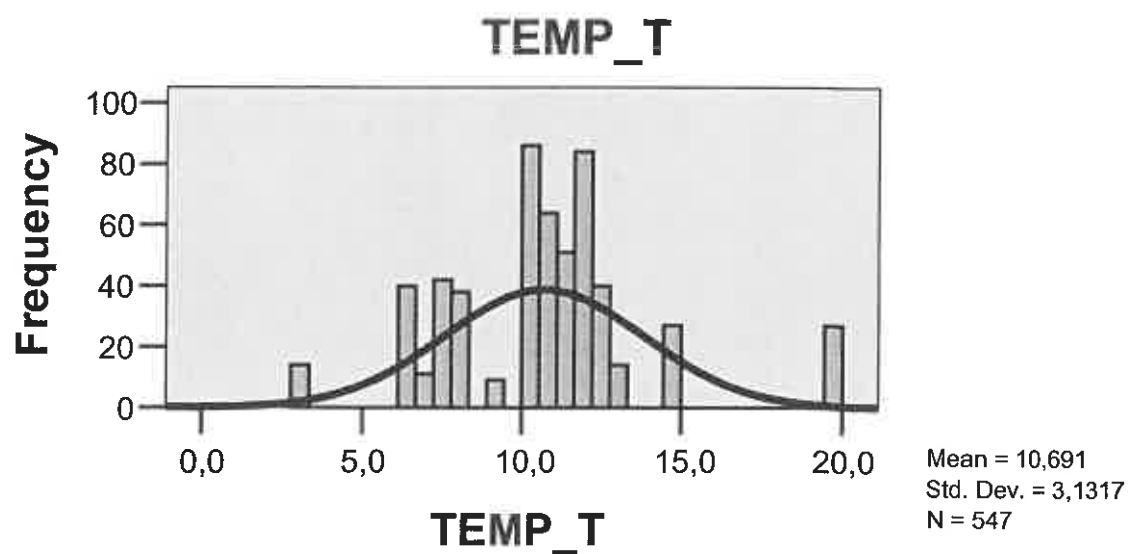
		TEMP	TEMP_T	RAIN	LENGTH	DURAT
N	Valid	547	547	547	547	547
	Missing	0	0	0	0	0
Mean		9,516	10,691	349,56	23,603	742,67
Median		9,800	10,900	138,00	18,000	638,00
Std. Deviation		2,2534	3,1317	482,360	7,4998	565,495
Minimum		4,9	3,2	0	7,8	46
Maximum		14,2	19,7	1496	40,0	2254

TH_SUR	TH_BIT	TH_RIG	TH_GRA	MOIST	ESAL_10T	RUT_DEP
547	547	547	547	547	547	547
0	0	0	0	0	0	0
59,56	121,12	47,66	264,66	8,94	1308271,74	8,70
50,00	97,00	,00	300,00	9,70	852984,00	7,60
30,105	67,338	103,460	190,958	3,719	1488803,17	6,236
22	49	0	0	0	0	0
139	304	350	550	14	8345702	33

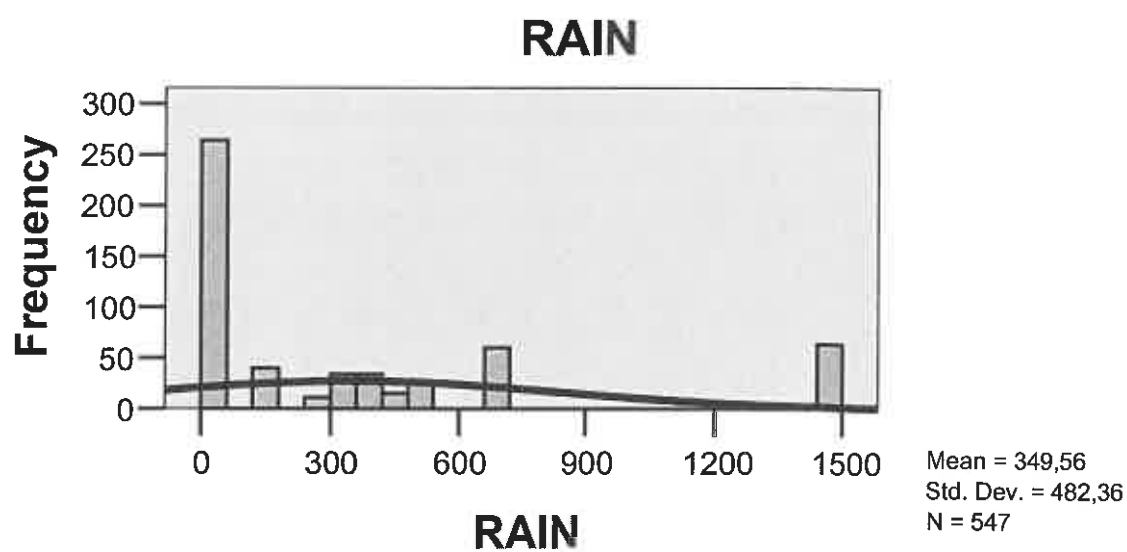
Για την μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας σε C (TEMP):



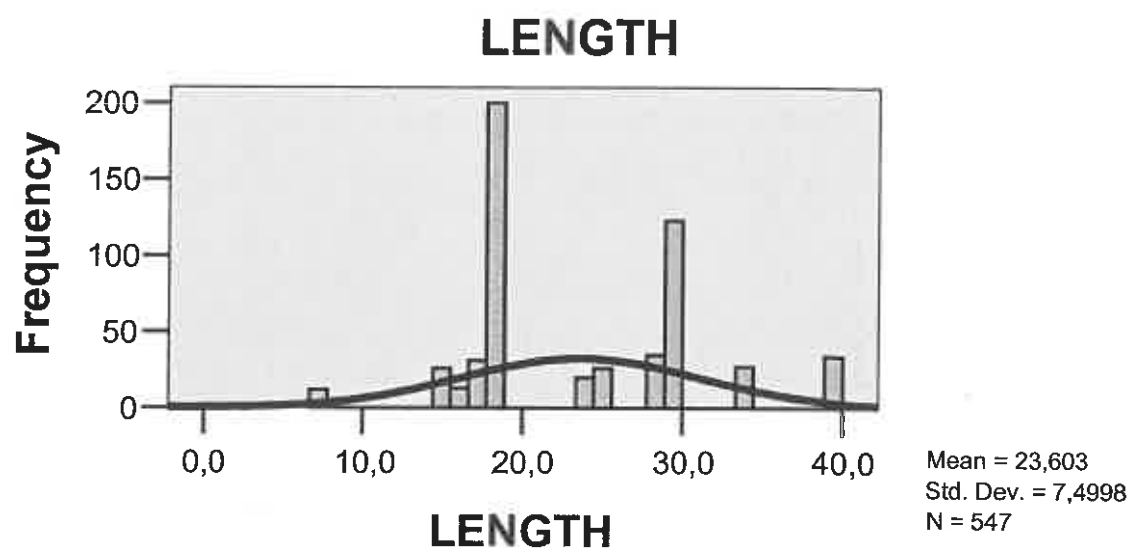
Για την μέση θερμοκρασία κατά την διάρκεια της επεξεργασίας του τμήματος ALT σε C (TEMP_T):



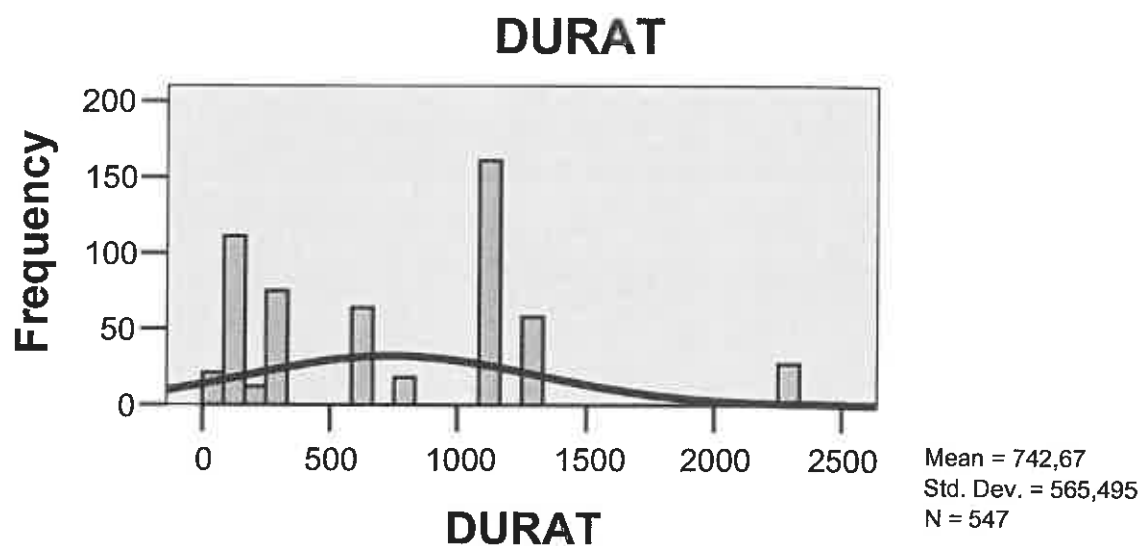
Για την μέση ετήσια βροχόπτωση σε mm (RAIN):



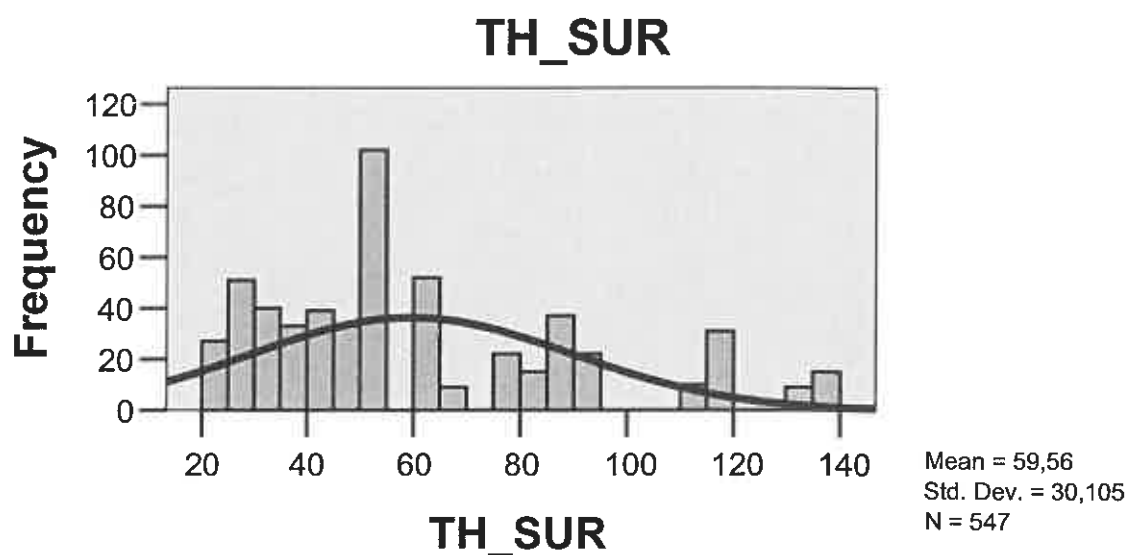
Για το μήκος σε m του υπό εξέταση τμήματος (LENGTH):



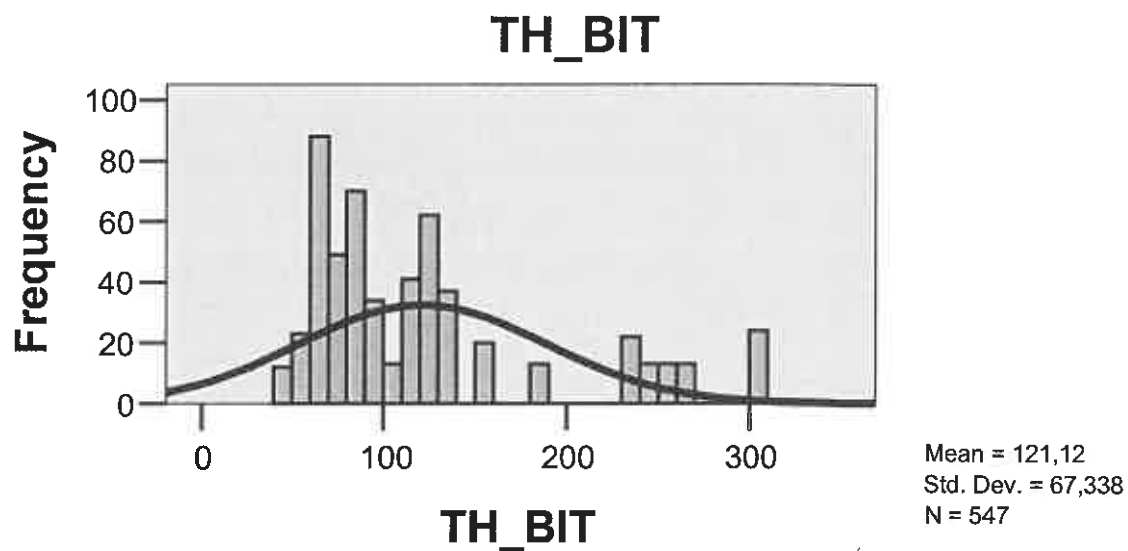
Για τον αριθμό ημερών επεξεργασίας του εκάστοτε τμήματος (DURAT):



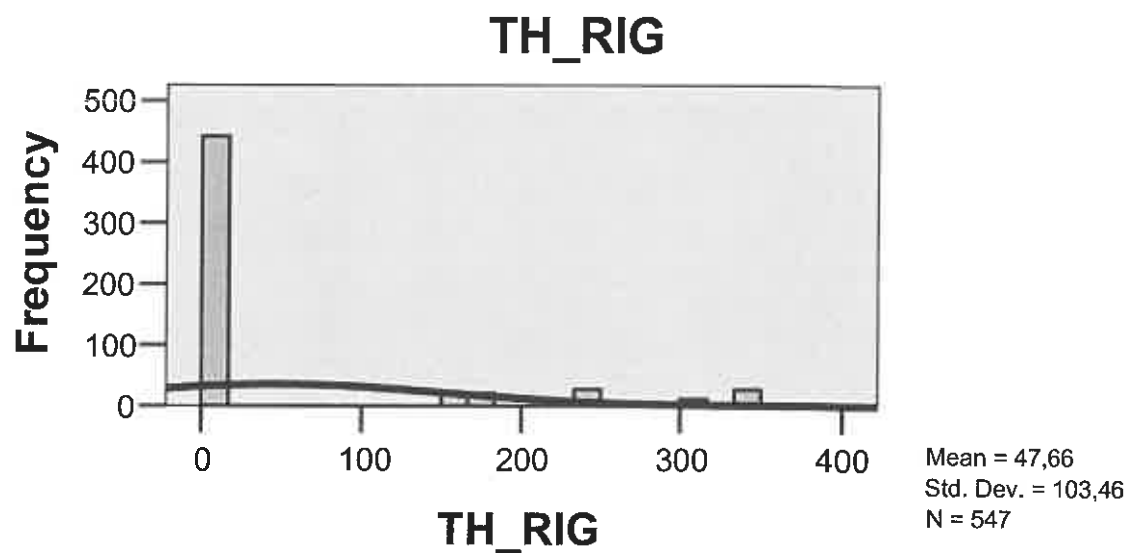
Για το πάχος της επιφανειακής στρώσης σε mm (TH_SUR):



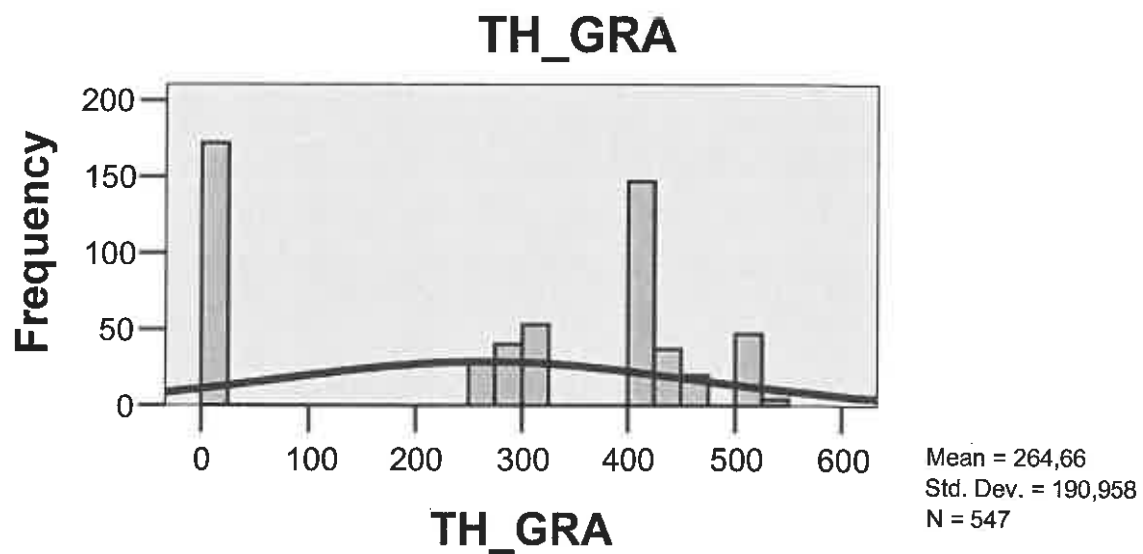
Για το πάχος της ασφαλτικής στρώσης σε mm (TH_BIT):



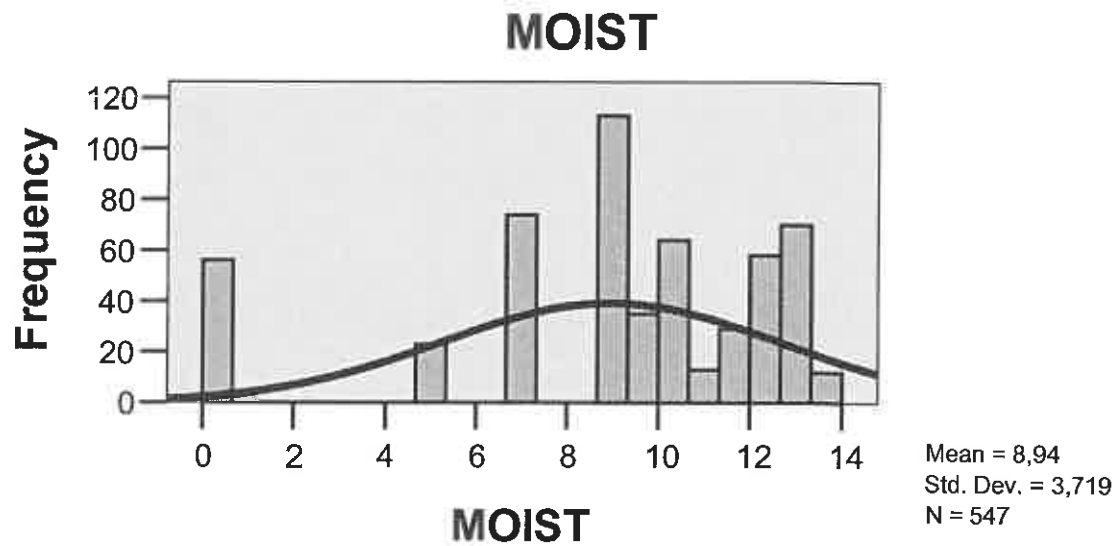
Για το πάχος της δύσκαμπτης στρώσης σε mm (TH_RIG):



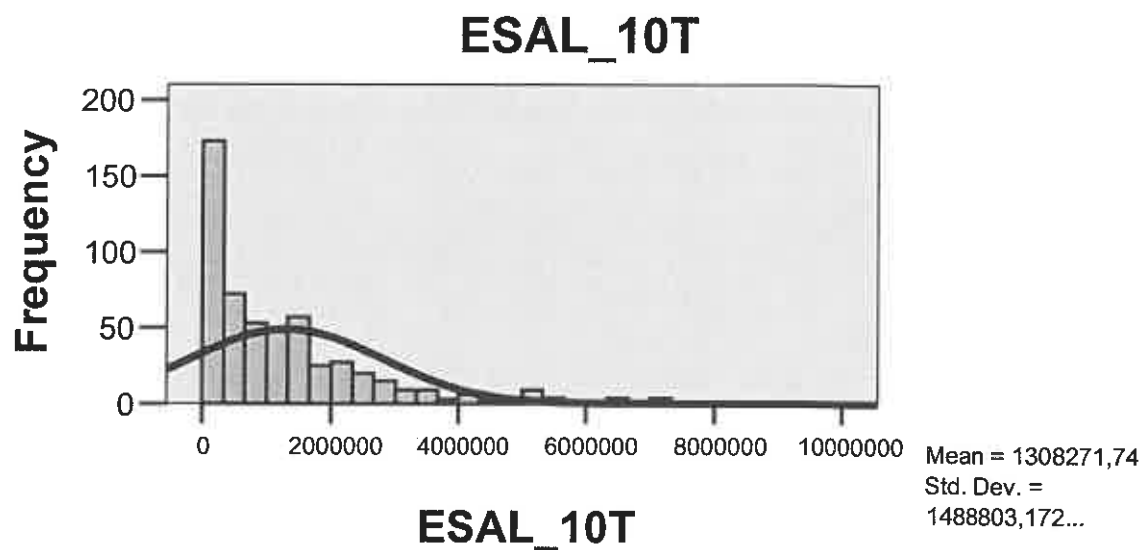
Για το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό σε mm (TH_GRA):



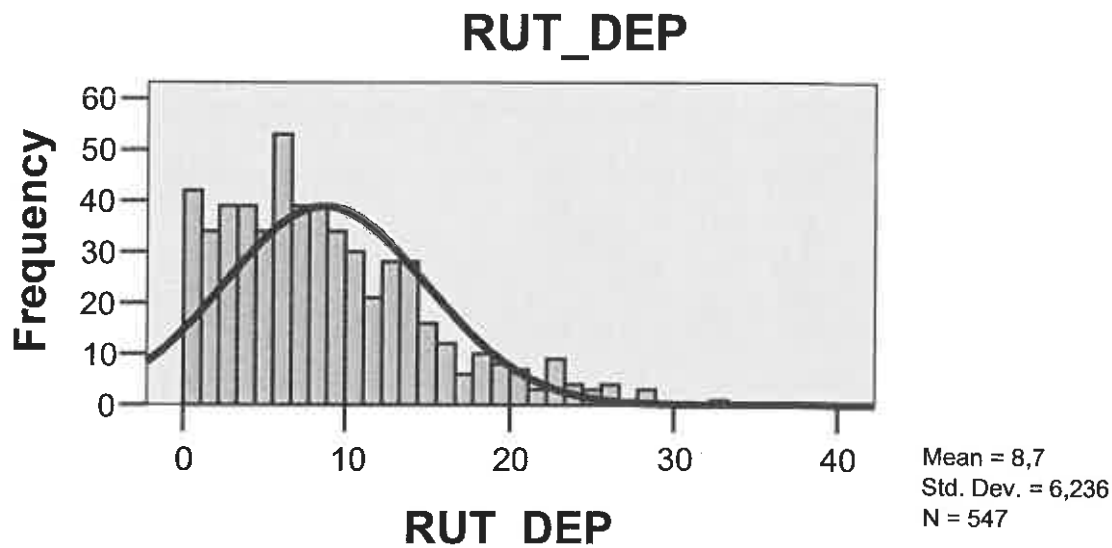
Για την περιεκτικότητα σε υγρασία της υπόβασης (MOIST):



Για τον αριθμό των τυπικών αξονικών φορτίων βάρους 10 τόνων (100 kN) που διέρχονται από το υπό μελέτη τμήμα (ESAL_10T):



Για το βάθος της αυλάκωσης σε mm (RUT_DEP):



4.2 Μεθοδολογία

4.2.1 Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας (Duration Models)

Σκοπός της στατιστικής επεξεργασίας που θα πραγματοποιήσουμε στην βάση δεδομένων που έχουμε κατασκευάσει είναι η ποσοτική διερεύνηση και η δημιουργία προτύπων πρόβλεψης για το βάθος αυλάκωσης. Μας αφορά η εξέλιξη του φαινομένου της αυλάκωσης με βάση τα στοιχεία που προκύπτουν από εγκαταστάσεις επιταχυνόμενης φόρτισης (στοιχεία ALT). Είναι ανάγκη να μελετηθεί και να προσομοιωθεί η επιρροή που έχουν διάφοροι παράγοντες (οι ανεξάρτητες μεταβλητές στη βάση δεδομένων) στην εξαρτημένη μεταβλητή (βάθος αυλάκωσης σε mm) που είναι και το αντικείμενο της μελέτης μας. Πρέπει να γίνει συνυπολογισμός των παραγόντων αυτών στον υπολογισμό του βάθους αυλάκωσης.

Ένας τρόπος για να εκφράσουμε αυτή την επιρροή και την σχέση των ανεξαρτήτων μεταβλητών με το βάθος αυλάκωσης είναι μέσω της γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων). Αυτή η μέθοδος ακολουθείται στο ερευνητικό πρόγραμμα PARIS για την εξαγωγή των προτύπων που αναφέρονται στην εξέλιξη του βάθους αυλάκωσης. Όμως η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων εμφανίζει σημαντικά μειονεκτήματα. Προϋπόθεση για την χρησιμοποίηση της μεθόδου είναι η κανονική κατανομή των δεδομένων. Αν τα δεδομένα δεν ακολουθούν κανονική κατανομή τότε η χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων θα οδηγήσει σε μεροληπτική εκτίμηση (biased estimation) των παραμέτρων του προτύπου.

Για τον λόγο αυτό στην στατιστική επεξεργασία που θα ακολουθήσει θα χρησιμοποιήσουμε πρότυπα χρονικής διάρκειας. Τα στοιχεία της βάσης δεδομένων θα προτυποποιηθούν με τεχνικές hazard (hazard based modeling). Συνήθως, η εξαρτημένη μεταβλητή που αναλύεται με βάση αυτά τα πρότυπα σχετίζεται με χρονική διάρκεια οπότε και τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων αναφέρονται ως στοιχεία χρονικής διάρκειας. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι τέτοιου είδους στοιχεία μπορούν να βρουν πληθώρα εφαρμογών στον τομέα της έρευνας των μεταφορών. Για παράδειγμα, στοιχεία χρονικής διάρκειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οδική ασφάλεια ώστε να βρεθεί ο χρόνος μέχρι να εμπλακεί κάποιος νέος οδηγός σε ατύχημα από τη στιγμή που παίρνει το δίπλωμα οδήγησης ή ο χρόνος που χρειάζεται να πραγματοποιηθεί κάποια δραστηριότητα (ψώνια, δραστηριότητες που αφορούν τον ελεύθερο χρόνο, κ.λ.π.) καθώς και ο χρόνος που χρειάζεται για να υιοθετηθούν νέες τεχνολογίες. Όμως εκτός από το γεγονός ότι τα «hazard based» πρότυπα είναι κατάλληλα για την επεξεργασία δεδομένων που εξαρτώνται από την χρονική διάρκεια, προσομοιάζουν κατάλληλα την επιρροή που έχουν διάφοροι παράγοντες (μεταβλητές) σε μια μεταβλητή κατά την χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων. Οπότε ενδείκνυται η χρησιμοποίησή τους και στην περίπτωσή μας για την επιρροή διαφόρων παραγόντων στην εξέλιξη του βάθους ρηγμάτωσης.

4.2.2 Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας «Hazard»

Τα «hazard based» πρότυπα ή πρότυπα «διακινδύνευσης» έχουν εκτενώς εφαρμοστεί σε πολλά επιστημονικά πεδία, όπως στη βιοστατιστική (Kalbfleisch and Prentice, 1980- Fleming and Harrington, 1991) και στα οικονομικά (Kiefer, 1998). Στον τομέα των μεταφορών και συγκοινωνιακής υποδομής, μέχρι πρόσφατα η εφαρμογή των προτύπων αυτών ήταν περιορισμένη. Έρευνες έχουν γίνει με την χρήση των «hazard based» προτύπων και αφορούν στην χρονική διάρκεια μετακινήσεων για την πραγματοποίηση διαφόρων δραστηριοτήτων όπως το χρόνο που χρειάζεται για αγορά αντικειμένων, για την πραγματοποίηση δραστηριοτήτων που γίνονται στον ελεύθερο χρόνο, για επισκέψεις καθώς και του χρόνου που μένει κάποιος σπίτι μεταξύ των μετακινήσεων (Hamed and Mannering, 1993, Bhat, 1996, Ettema and Timmermans, 1997, Kharoufeh and Goulias 2002).

Για να αναλυθούν στοιχεία χρονικής διάρκειας εισάγονται τα «hazard based» πρότυπα τα οποία μελετούν την πιθανότητα λήξης του χρονικού διαστήματος μιας δραστηριότητας κάποια χρονική στιγμή t , δεδομένου ότι η δραστηριότητα αυτή συνεχίστηκε μέχρι τη χρονική αυτή στιγμή (t). Οι πιθανότητες, οι οποίες εξαρτώνται από τον χρόνο, προσαρμόζονται κατάλληλα στην ανάλυση των «hazard based» συναρτήσεων.

Η εξέλιξη των «hazard based» προτύπων ξεκινά με την εισαγωγή της έννοιας της αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας (cumulative distribution function):

$$F(t) = P(T < t), \quad (4.1)$$

όπου P είναι η πιθανότητα, T είναι η τυχαία μεταβλητή του χρόνου και t είναι κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η εξίσωση 4.1 δίνει την πιθανότητα του να λήξει, για παράδειγμα, κάποια μετακίνηση πριν το τέλος του προκαθορισμένου χρόνου t . Η συνάρτηση πιθανότητας (density function) η οποία ανταποκρίνεται σε αυτή την συνάρτηση κατανομής είναι:

$$f(t) = dF(t) / dt, \quad (4.2)$$

και η συνάρτηση «hazard» (διακινδύνευσης) είναι:

$$h(t) = f(t) / [1 - F(t)] \quad (4.3)$$

όπου $h(t)$ είναι η, υπό συνθήκη, πιθανότητα του να συμβεί ένα γεγονός (για παράδειγμα η λήξη μιας δραστηριότητας) μεταξύ χρόνου t και $t+dt$, δεδομένου ότι το γεγονός (η δραστηριότητα) δεν έχει λήξει μέχρι το χρόνο t . Με άλλα λόγια, η συνάρτηση «διακινδύνευσης» $h(t)$ δίνει την πιθανότητα κάποιο γεγονός να τελειώσει τη χρονική στιγμή t δεδομένου ότι το γεγονός δεν έχει τελειώσει μέχρι τη χρονική αυτή στιγμή (t). Η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας «διακινδύνευσης» (cumulative hazard) $H(t)$ είναι η ολοκληρωμένη (integrated) συνάρτηση «διακινδύνευσης» η οποία δίνει την αθροιστική τιμή της πιθανότητας ένα γεγονός να τελειώσει, μέχρι ή πριν, από τη χρονική στιγμή t .

Η συνάρτηση επιβίωσης (survivor function), η οποία δίνει την πιθανότητα η διάρκεια ενός γεγονότος να είναι μεγαλύτερη ή ίση από κάποιο συγκεκριμένο χρόνο t , χρησιμοποιείται επίσης στην ανάλυση «διακινδύνευσης» για την επεξήγηση αποτελεσμάτων τα οποία προκύπτουν από την επεξεργασία στοιχείων χρονικής διάρκειας. Η συνάρτηση «επιβίωσης» δίνεται από:

$$S(t) = P(T \geq t) \quad (4.4)$$

Εάν κάποια από τις παραπάνω συναρτήσεις είναι γνωστή – η συνάρτηση πιθανότητας, η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, η συνάρτηση «survivor», η συνάρτηση «διακινδύνευσης» ή η αθροιστική συνάρτηση «διακινδύνευσης» - τότε οποιαδήποτε άλλη από αυτές μπορεί εύκολα να προκύψει. Οι μαθηματικές σχέσεις των παραπάνω συναρτήσεων είναι:

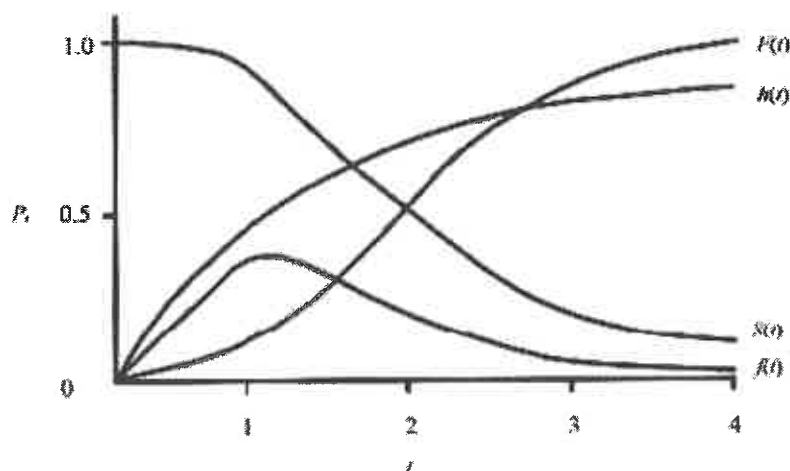
$$S(t) = 1 - F(t) = \int_0^t f(t) dt = EXP[-H(t)]$$

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = h(t) \text{ EXP}[-H(t)] = -\frac{d}{dt} S(t) \quad (4.5)$$

$$H(t) = \int_0^t h(t) dt = -LN [S(t)]$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{d}{dt} H(t)$$

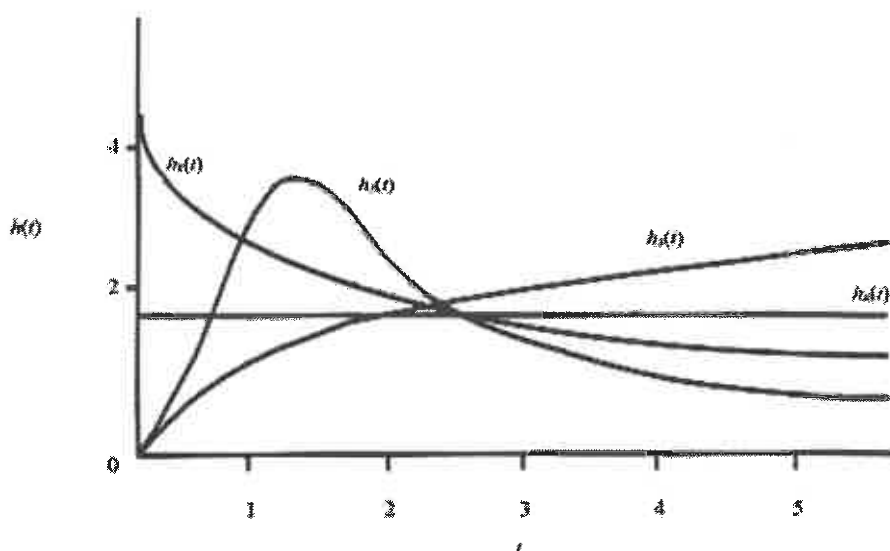
Γραφικά, οι συναρτήσεις «διακινδύνευσης», συνάρτηση πιθανότητας, αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας και η «επιβίωσης» παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων: hazard (διακινδύνευσης) ($h(t)$), πιθανότητας ($f(t)$), αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας ($F(t)$) και συνάρτησης survivor (επιβίωσης) ($S(t)$).

Η κλίση της γραφικής παράστασης της συνάρτησης «διακινδύνευσης» οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα. Αναπαριστά την εξάρτηση της πιθανότητας του τέλους της χρονικής διάρκειας μιας δραστηριότητας ή μιας μετακίνησης από το χρόνο που ήδη έχει διαρκέσει η συγκεκριμένη δραστηριότητα. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται τέσσερις περιπτώσεις της συνάρτησης «διακινδύνευσης». Η συνάρτηση «διακινδύνευσης» $h_1(t)$, έχει ρυθμό μεταβολής (1η παράγωγος, δηλαδή κλίση) $dh_1(t)/dt < 0$ για κάθε χρονική στιγμή t . Η κλίση της συνάρτησης αυτής μειώνεται μονotonικά (monotonically decreasing) σε συνάρτηση με το χρόνο. Η δεύτερη

περίπτωση που αφορά στη συνάρτηση «διακινδύνευσης», $h_2(t)$, δείχνει ότι η συνάρτηση αυτή δεν είναι μονοτονική αλλά έχει ρυθμό μεταβολής $dh_2(t)/dt > 0$ και $dh_2(t)/dt < 0$ ο οποίος εξαρτάται από το χρόνο t . Η τρίτη συνάρτηση «διακινδύνευσης» έχει $dh_3(t)/dt > 0$ για κάθε t και αυξάνεται μονοτονικά σε σχέση με το χρόνο. Τέλος, η τέταρτη συνάρτηση έχει ρυθμό μεταβολής μηδέν δηλαδή έχει σταθερή κλίση, πράγμα που καταδεικνύει ότι η πιθανότητα «hazard» δεν εξαρτάται από το χρόνο t .



Σχήμα 4.2: Γραφική παράσταση των τεσσάρων παραγόμενων συναρτήσεων «hazard» (διακινδύνευσης).

Επιπλέον, εκτός από το γεγονός ότι τα «hazard based» πρότυπα είναι κατάλληλα για την επεξεργασία δεδομένων που εξαρτώνται από την χρονική διάρκεια, προσομοιάζουν κατάλληλα την επιρροή που έχουν διάφοροι παράγοντες (μεταβλητές) στη χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων ή στο χρόνο που χρειάζεται προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι δραστηριότητες αυτές.

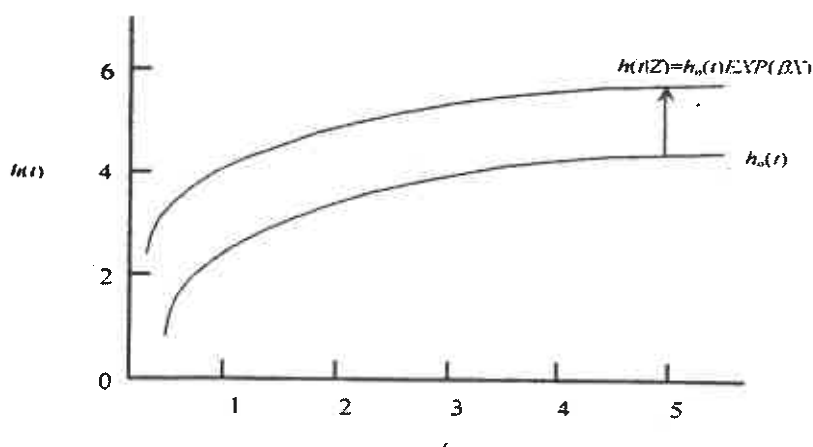
Τα αναλογικά πρότυπα «διακινδύνευσης» («proportional hazards») και τα «επιταχυνόμενης ζωής» («accelerated lifetime») πρότυπα αποτελούν επίσης δύο

εναλλακτικές μεθόδους οι οποίες προσαρμόζονται κατάλληλα στις επιρροές που έχουν οι διάφοροι εξωγενείς παράγοντες στη χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων.

Τα αναλογικά πρότυπα «διακινδύνευσης» υποθέτουν ότι οι μεταβλητές οι οποίες αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν τη χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων δρουν με πολλούς τρόπους σε κάποιες βασικές (underlying) συναρτήσεις «διακινδύνευσης». Αυτή η βασική συνάρτηση «διακινδύνευσης» («baseline hazard») συναντάτε στη βιβλιογραφία ως $h_0(t)$ και είναι η συνάρτηση «διακινδύνευσης» η οποία υποθέτει ότι όλα τα στοιχεία της εξαρτημένης μεταβλητής, X , είναι μηδέν. Υποτίθεται ότι οι μεταβλητές επηρεάζουν τη βασική συνάρτηση «διακινδύνευσης» με τη μορφή $\exp(\beta X)$, όπου β είναι ο παράγοντας των εξαρτημένων μεταβλητών. Έτσι, η σχέση της συνάρτησης «διακινδύνευσης» με την εξαρτημένη μεταβλητή X είναι:

$$h(t|X) = h_0(t) \exp(\beta X) \quad (4.6)$$

Η αναλογική («proportional») συνάρτηση «hazard» αναπαρίσταται γραφικά στο Σχήμα 4.3:



Σχήμα 4.3: Γραφική παράσταση του «proportional hazard» προτύπου

Η δεύτερη προσέγγιση των ανεξάρτητων μεταβλητών στα πρότυπα «διακινδύνευσης» είναι αυτή η οποία υποθέτει ότι οι μεταβλητές επιταχύνουν τον χρόνο άμεσα σε μια

βασική συνάρτηση επιβίωσης, η οποία είναι η συνάρτηση επιβίωσης όταν όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι μηδέν. Αυτά τα πρότυπα «επιταχυνόμενης ζωής» ξανά υποθέτουν ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές επηρεάζουν την χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων ή το χρόνο μετακίνησης με την συνάρτηση $\exp(\beta X)$. Η εξίσωση των «accelerated lifetime» προτύπων είναι:

$$S(t | X) = S_0 [t \exp(\beta X)], \quad (4.7)$$

η οποία οδηγεί στην υπό συνθήκη συνάρτηση «διακινδύνευσης»

$$h(t | X) = h_0 [t \exp(\beta X)] \exp(\beta X) \quad (4.8)$$

Τα «accelerated lifetime» πρότυπα έχουν, μαζί με τα «proportional hazard» πρότυπα, ευρεία χρήση και έχουν χαρακτηριστεί ως πρότυπα μέγιστης πιθανοφάνειας (αφού η συνηθέστερη μέθοδος υπολογισμού τους είναι μέσα από τη συνάρτηση μέγιστης πιθανοφάνειας).

4.2.3 Ημι-παραμετρικά Πρότυπα

Τα ημι-παραμετρικά και τα παραμετρικά «hazard based» πρότυπα έχουν απασχολήσει ευρέως την βιβλιογραφία. Τα παραμετρικά πρότυπα υποθέτουν μια κατανομή των στοιχείων της χρονικής διάρκειας (για παράδειγμα, Weibull, εκθετική, κτλ.) και επίσης κάνουν μια παραμετρική υπόθεση για την συναρτησιακή μορφή της επιρροής των ανεξαρτήτων μεταβλητών στην συνάρτηση «διακινδύνευσης» (συνήθως $\exp(\beta X)$ όπως αναφέρθηκε προηγουμένως). Τα ημι-παραμετρικά πρότυπα, αντιθέτως, είναι περισσότερο γενικά γιατί δεν υποθέτουν κατανομή για τα στοιχεία της χρονικής διάρκειας δραστηριοτήτων ή μετακινήσεων, παρόλο που διατηρούν την υπόθεση των παραμετρικών προτύπων, δηλαδή της επιρροής των ανεξαρτήτων μεταβλητών στην συνάρτηση «διακινδύνευσης».

Η μη-παραμετρική προσέγγιση προτυποποίησης της συνάρτησης «διακινδύνευσης» είναι κατάλληλη όταν ελάχιστα είναι γνωστά σχετικά με τη συναρτησιακή μορφή της συνάρτησης «διακινδύνευσης». Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε μια προσέγγιση από

τον Cox (1972) και η οποία βασίστηκε στην αναλογική προσέγγιση «hazard». Το αναλογικό πρότυπο «διακινδύνευσης» τύπου Cox («Cox proportional hazard») αποτελεί ένα ημι-παραμετρικό πρότυπο «διακινδύνευσης» αφού η συνάρτηση $\exp(\beta X)$ εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ως η συναρτησιακή μορφή της επιρροής των ανεξάρτητων μεταβλητών. Το πρότυπο αυτό βασίζεται στην αναλογία των συναρτήσεων «διακινδύνευσης». Έτσι, η πιθανότητα μιας παρατήρησης ενός φαινομένου i που ξεκινάει την χρονική στιγμή t_i , δεδομένου ότι τουλάχιστον μια παρατήρηση του ίδιου φαινομένου έχει ξεκινήσει την χρονική στιγμή t_i δίνεται ως:

$$\frac{\exp(\beta X_i)}{\sum_{j \in R_i} \exp(\beta X_j)} \quad (4.9)$$

όπου R_i είναι το σύνολο των παρατηρήσεων και j είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων του φαινομένου που έχει ήδη ξεκινήσει τη χρονική στιγμή t_i . Το πρότυπο αυτό έχει καθοριστεί με τη χρήση μεθόδων μέγιστης πιθανοφάνειας. Εάν μόνο μια παρατήρηση ξεκινάει τη χρονική της διάρκεια σε κάθε χρόνο (δεν υπάρχουν «tied» στοιχεία) και το φαινόμενο των περικομμένων στοιχείων (censoring) δεν παρατηρείται σε καμία από τις παρατηρήσεις, η μερική λογαριθμική συνάρτηση πιθανοφάνειας είναι:

$$LN(L) = \sum_{i=1}^l [\beta X_i - \sum_{j \in R_i} \exp(\beta X_j)] \quad (4.10)$$

Εάν καμία από τις παρατηρήσεις δεν εμφανίζει το φαινόμενο των περικομμένων στοιχείων (censoring) και τα «tied» στοιχεία παρουσιάζονται με περισσότερες από μία παρατηρήσεις που εξάγονται την χρονική στιγμή t_i , η μερική λογαριθμική πιθανοφάνεια είναι το άθροισμα των ατομικών πιθανοτήτων από τις n_i παρατηρήσεις οι οποίες εξάγονται την χρονική στιγμή t_i

$$LN(L) = \sum_{i=1}^l [\beta \sum_{j \in E_i} X_j - n_i \sum_{j \in R_i} \exp(\beta X_j)]. \quad (4.11)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή Δεδομένων

5.1.1 Γενικά

Με βάση ένα πλήθος στοιχείων τα οποία συλλέχθηκαν στα δύο χρόνια του ερευνητικού προγράμματος PARIS (στο οποίο η Ελλάδα συμμετείχε μέσω του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου) δημιουργήθηκε μια νέα βάση δεδομένων όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ποσοτική διερεύνηση του βάθους αυλάκωσης με βάση τα στοιχεία που προκύπτουν από εγκαταστάσεις επιταχυνόμενης φόρτισης (στοιχεία ALT). Για τον λόγο αυτό θα γίνει στατιστική ανάλυση των στοιχείων της νέας βάσης δεδομένων με την βοήθεια του προγράμματος SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), αφού προηγουμένως πραγματοποιηθεί το απαραίτητο στάδιο καθορισμού των εξαρτημένων και ανεξαρτήτων μεταβλητών της επεξεργασίας με κατάλληλη επιλογή από το σύνολο των στοιχείων της βάσης δεδομένων.

5.1.2 Ανεξάρτητες Μεταβλητές

Με τον όρο *ανεξάρτητη μεταβλητή* νοείται κάθε καθοριζόμενο και πλήρως ορισμένο στοιχείο, το οποίο εκφράζει είτε μια ιδιότητα είτε ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό και το οποίο επιδρά συστηματικά, και κατά τρόπο που μπορεί να εκτιμηθεί, σε ένα άλλο επίσης καθοριζόμενο στοιχείο (εξαρτημένη μεταβλητή).

Η επιλογή ενός στοιχείου και ο χαρακτηρισμός του ως ανεξάρτητη μεταβλητή υπόκειται σε ορισμένους κανόνες που αφορούν, κυρίως, την φύση και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Συνεπώς, για να γίνει κατάλληλη αξιολόγηση των επιμέρους χαρακτηριστικών που πρόκειται να χαρακτηριστούν ως ανεξάρτητες μεταβλητές, απαιτείται η πλήρης καταγραφή τους και η άμεση μελέτη των ιδιοτήτων που αυτά εκφράζουν. Άλλωστε, για την επιλογή ενός στοιχείου ως ανεξάρτητης μεταβλητής στα πλαίσια μιας μελέτης αξιολόγησης, είναι απαραίτητη, αρχικά, η ανάλυση της

ταυτότητάς του και η εκτίμηση της σημαντικότητάς του ως εξωγενούς παράγοντα επίδρασης. Με αυτή τη λογική, σε μια έρευνα εκτίμησης της επίδρασης παραγόντων όπως είναι οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε τμήμα οδοστρώματος, τα κυκλοφοριακά και τα κατασκευαστικά δεδομένα για τα οδοστρωματικά τμήματα, στο βάθος αυλάκωσης κατά το στάδιο της εξέλιξης της αστοχίας, τα συλλεγόμενα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά του φαινομένου που μελετάται, δηλαδή της εξέλιξης της αυλάκωσης στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων.

Στην παρούσα διπλωματική έχουν επιλεγεί ως ανεξάρτητες μεταβλητές της στατιστικής επεξεργασίας, οι εξής:

1. Ο τύπος κατασκευής του οδοστρώματος (CONSTR)
2. Η μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας σε C (TEMP)
3. Η μέση θερμοκρασία κατά την διάρκεια της επεξεργασίας του τμήματος ALT σε C (TEMP_T)
4. Η μέση ετήσια βροχόπτωση σε mm (RAIN)
5. Το πάχος της επιφανειακής στρώσης σε mm (TH_SUR)
6. Το πάχος της ασφαλτικής στρώσης σε mm (TH_BIT)
7. Το πάχος της δύσκαμπτης στρώσης σε mm (TH_RIG)
8. Το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό σε mm (TH_GRA)
9. Την περιεκτικότητα σε υγρασία της υπόβασης (MOIST)
10. Τον αριθμό των τυπικών αξονικών φορτίων βάρους 10 τόνων (100 kN) που διέρχονται από το υπό μελέτη τμήμα (ESAL_10T)

Η διαδικασία με την οποία πραγματοποιήθηκε η συγκέντρωση όλων των παραπάνω πληροφοριών έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3 (Το ερευνητικό πρόγραμμα PARIS). Στην επιλογή των ανεξαρτήτων μεταβλητών δεν συμπεριλήφθησαν το μήκος σε m του υπό εξέταση τμήματος (LENGTH), ο αριθμός ημερών επεξεργασίας του εκάστοτε τμήματος (DURAT), η ημερομηνία ενάρξεως της διαδικασίας για το συγκεκριμένο τμήμα (START), η χώρα προέλευσης του τμήματος ALT (COUNTRY), ο τύπος της επιφανειακής στρώσης (SURFACE), ο τύπος της υπόβασης (SUBGRADE) και ο εξοπλισμός για την μέτρηση της φέρουσας ικανότητας της υπόβασης (EQUIP_BE) παρά το γεγονός ότι συμπεριλαμβάνονται

στην νέα βάση δεδομένων που κατασκευάσαμε στο κεφάλαιο 4, όπου και έγινε στατιστική ανάλυση των παραπάνω παραμέτρων. Στη βάση δεδομένων που κατασκευάσαμε στο κεφάλαιο 4 είχαν συμπεριληφθεί επίσης στοιχεία που προκύπτουν από τα διαγράμματα για τις ρωγμές (cracking alt test sections) που περιέχει το PARIS, αλλά καθώς στόχος μας είναι η ποσοτική διερεύνηση του βάθους αυλάκωσης και δεν θα γίνει αντίστοιχη ανάλυση για τις ρηγματώσεις, δεν συμπεριλαμβάνουμε τα στοιχεία αυτά στις ανεξάρτητες μεταβλητές.

Με βάση τις ανεξάρτητες μεταβλητές που επιλέξαμε για την στατιστική επεξεργασία, κατασκευάζουμε μια νέα βάση δεδομένων την οποία θα επεξεργαστούμε μέσω του προγράμματος SPSS (Statistical Package for the Social Sciences). Στο κεφάλαιο 4 έχει πραγματοποιηθεί στατιστική ανάλυση των ανεξαρτήτων μεταβλητών που επιλέξαμε που συνίσταται κυρίως στην εύρεση του μέσου όρου (mean), του διαμέσου (median), της τυπικής απόκλισης (std.deviation) και του εύρους τιμών κάθε μεταβλητής.

5.1.3 Εξαρτημένη Μεταβλητή

Με τον όρο *εξαρτημένη μεταβλητή* νοείται κάθε στοιχείο που είναι δυνατό να αντιπροσωπεύει μια ιδιότητα ή ένα χαρακτηριστικό και η εμφάνισή του οποίου εξαρτάται και επηρεάζεται από εξωγενείς παράγοντες που αναφέρονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η εκτίμηση της επίδρασης των ανεξαρτήτων μεταβλητών, όπως αυτές ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, στο βάθος της αυλάκωσης σε mm, κατά την εξέλιξη της αστοχίας, στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων. Δηλαδή, η εξαρτημένη μεταβλητή για την οποία θα διερευνηθεί η επιρροή των ανεξαρτήτων μεταβλητών θα είναι η μεταβλητή RUT_DEP, που εκφράζει το βάθος της αυλάκωσης σε mm.

5.2 Στατιστική Επεξεργασία Δεδομένων

5.2.1 Γενικά

Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων είναι μια διαδικασία που μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα. Πρώτον, στον καθορισμό των μεταβλητών και δεύτερον στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού προτύπου τύπου «hazard» κατάλληλου για την επεξεργασία στοιχείων χρονικής διάρκειας καθώς και για την δημιουργία ενός κατάλληλου προτύπου που θα συνυπολογίζει τις ανεξάρτητες μεταβλητές στον υπολογισμό του βάθους αυλάκωσης. Η ανάπτυξη αυτή μπορεί να γίνει με παραμετρικές και ημι-παραμετρικές μεθόδους, αλλά όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, στην παρούσα διπλωματική θα ακολουθήσουμε τις ημι-παραμετρικές μεθόδους. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται παρουσίαση της μεθόδου και των αποτελεσμάτων της στατιστικής επεξεργασίας και αξιολόγηση της επίδρασης που διαπιστώνεται.

5.2.2 Ημι-παραμετρική Μέθοδος

Τα παραμετρικά πρότυπα υποθέτουν μια κατανομή των στοιχείων της χρονικής διάρκειας (για παράδειγμα Weibull, εκθετική, κλπ.) και επίσης κάνουν μια παραμετρική υπόθεση για την συναρτησιακή μορφή της επιρροής των ανεξαρτήτων μεταβλητών στην συνάρτηση «διακινδύνευσης». Στην παρούσα διπλωματική έχουμε επιλέξει τα ημι-παραμετρικά πρότυπα, που είναι περισσότερο γενικά διότι δεν υποθέτουν κατανομή για τα στοιχεία χρονικής διάρκειας παρόλο που διατηρούν την υπόθεση των παραμετρικών προτύπων, δηλαδή της επιρροής των ανεξαρτήτων μεταβλητών στην συνάρτηση «διακινδύνευσης». Η στατιστική ανάλυση των στοιχείων με την χρήση ημι-παραμετρικών προτύπων «διακινδύνευσης» («hazard») γίνεται με την βοήθεια του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης SPSS. Χρησιμοποιείται το ημι-παραμετρικό πρότυπο τύπου Cox. Οι ημι-παραμετρικές μέθοδοι περιγράφηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.3.

5.2.3 Αποτελέσματα από τη Στατιστική Επεξεργασία

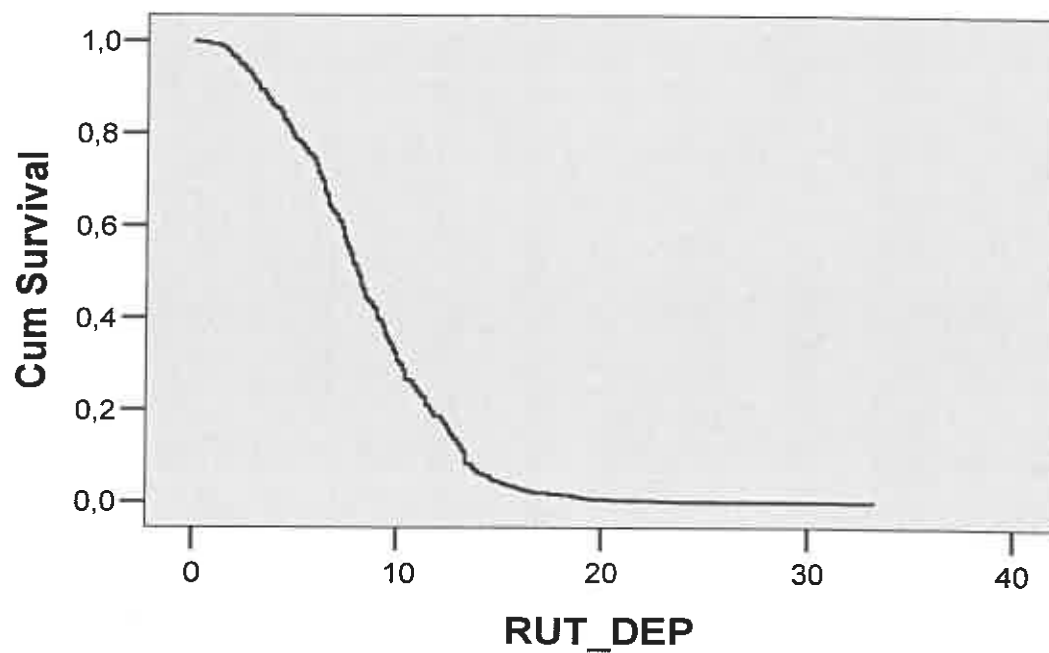
Σκοπός της στατιστικής επεξεργασίας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με τις παραμέτρους εκείνες που επηρεάζουν το βάθος αυλάκωσης. Το μεγαλύτερο μέρος της στατιστικής επεξεργασίας επικεντρώνεται στον προσδιορισμό της σχέσης των ανεξαρτήτων μεταβλητών, όπως είναι οι κλιματολογικές συνθήκες, τα κατασκευαστικά και κυκλοφοριακά δεδομένα για τα οδοστρώματα, με την εξαρτημένη μεταβλητή, δηλαδή το βάθος αυλάκωσης στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα SPSS γίνεται στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα:

ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ (coefficient B)	ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ (P-Value)
CONSTR	-1,402	$7,548 * 10^{-11}$
Constr3	1,382	0,008
Constr4	1,599	$9,716 * 10^{-7}$
Constr5	.	.
TEMP	-0,611	$6,459 * 10^{-15}$
TEMP_T	0,345	$4,310 * 10^{-13}$
RAIN	0,001	$4,870 * 10^{-8}$
TH_SUR	0,012	$9,079 * 10^{-5}$
TH_BIT	0,018	$1,015 * 10^{-15}$
TH_RIG	0,011	$1,393 * 10^{-10}$
TH_GRA	0,009	$1,466 * 10^{-20}$
ESAL_10T	$5,717 * 10^{-6}$	$1,081 * 10^{-29}$

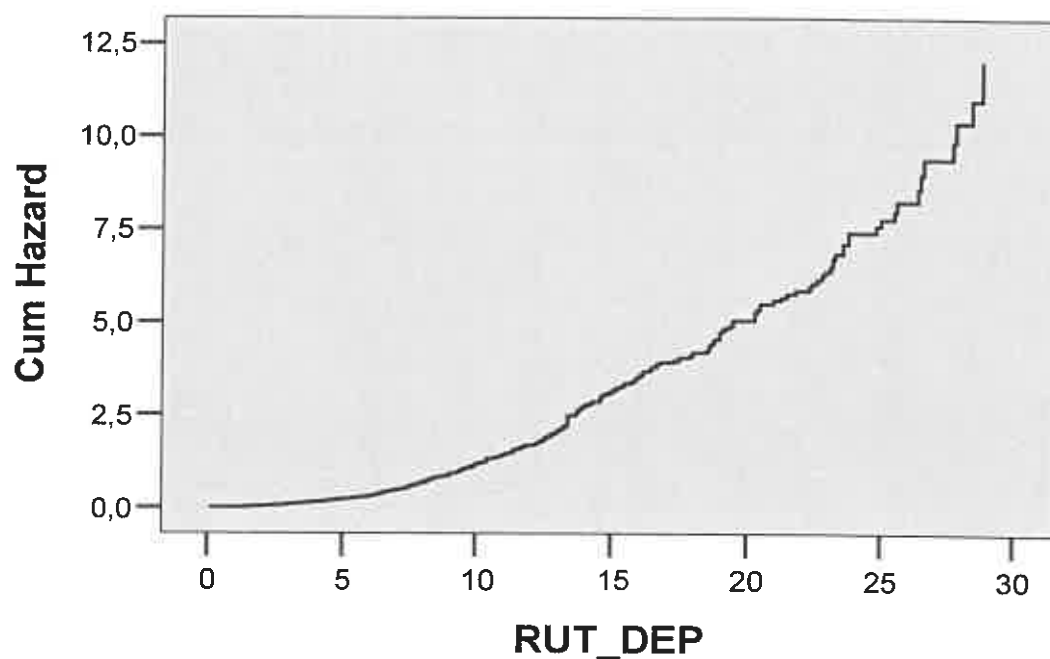
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα της επεξεργασίας της εξαρτημένης μεταβλητής
(Βάθος Αυλάκωσης) με Ημι-παραμετρικά Πρότυπα.

Survival Function at mean of covariates



Σχήμα 5.1: Γραφική παράσταση της κατανομής «επιβίωσης» για την ημι-παραμετρική μέθοδο.

Hazard Function at mean of covariates



Σχήμα 5.2: Γραφική παράσταση της κατανομής «διακινδύνευσης» για την ημι-παραμετρική μέθοδο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι επειδή η μεταβλητή που εκφράζει τον τύπο κατασκευής του οδοστρώματος (CONSTR) είναι απόλυτη μεταβλητή (categorical), δηλαδή όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 4.1.3 περιλαμβάνει δεδομένα που έχουν περιορισμένο αριθμό διακεκριμένων τιμών της μεταβλητής, χρειάστηκε κάποια επεξεργασία για την ανάλυση της στο πρόγραμμα SPSS. Κατασκευάσαμε $n-1$ καινούργιες μεταβλητές, όπου n ο αριθμός των τύπων κατασκευής οδοστρωμάτων στη βάση δεδομένων. Άρα εφόσον στη βάση δεδομένων είχαμε 4 τύπους κατασκευής οδοστρωμάτων, κατασκευάσαμε 3 νέες μεταβλητές, τις *constr3*, *constr4* και *constr5*. Οι νέες αυτές μεταβλητές λάμβαναν μόνο δύο τιμές, 0 όταν συναντούσαμε τύπο κατασκευής διαφορετικό από την νέα μεταβλητή και 1 όταν συναντούσαμε ίδιο τύπο κατασκευής. Για παράδειγμα η μεταβλητή *constr4* παίρνει τιμή 1 όταν συναντάμε τύπο κατασκευής οδοστρώματος 4 ενώ παίρνει τιμή 0 όταν συναντάμε τους τύπους κατασκευής οδοστρώματος 2,3,5. Με αυτό τον τρόπο καταφέρνουμε να εκφράσουμε όλους τους τύπους κατασκευής στην ανάλυση μέσω του προγράμματος SPSS. Ο τύπος κατασκευής 2 εκφράζεται μέσω της αρχικής μεταβλητής CONSTR. Οι υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές είναι όλες μεταβλητές κλίμακας (scale), οπότε δεν προκύπτει αντίστοιχο πρόβλημα και πραγματοποιείται κανονικά η επεξεργασία τους στο SPSS.

Στον πίνακα 5.1 οι δύο στήλες εκφράζουν το συντελεστή επίδρασης (coefficient estimate b) της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη και το επιτυγχανόμενο επίπεδο σημαντικότητας (P-value) αντίστοιχα. Η τιμή P ενός ελέγχου (P-value) είναι η οριακή τιμή του επιπέδου σημαντικότητας α για την οποία κρίνεται απορριπτέα η μηδενική υπόθεση H_0 . Αν $P < \alpha$, η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και το αποτέλεσμα του ελέγχου κρίνεται σημαντικό. Η τιμή του μεγέθους P-value είναι ιδιαίτερα χρήσιμη διότι συμβάλλει στο να εξαχθούν συμπεράσματα για το αν η επιρροή των ανεξαρτήτων μεταβλητών στην εξαρτημένη είναι στατιστικώς σημαντική ή όχι. Έχουμε λάβει τιμή του επιπέδου σημαντικότητας $\alpha=0,10$. Άρα γίνονται δεκτές μόνο οι ανεξάρτητες μεταβλητές με επίπεδο εμπιστοσύνης $(1-\alpha)\% : 90\%$. Δηλαδή, οι ανεξάρτητες μεταβλητές που παρουσιάζουν τιμή P μεγαλύτερη από 0,10 δεν συμπεριλαμβάνονται στην τελική ανάλυση.

Με βάση αυτό το κριτήριο η μεταβλητή που εκφράζει την περιεκτικότητα σε υγρασία της υπόβασης (MOIST) απορρίπτεται καθώς στο πρώτο στάδιο επεξεργασίας

προέκυψε τιμή P ίση με 0,573, μεγαλύτερη από 0,10. Τα αποτελέσματα που παρατίθενται παραπάνω, έχουν προκύψει από το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας όπου η στατιστική ανάλυση έγινε με εξαίρεση της συγκεκριμένης μη στατιστικά σημαντικής μεταβλητής.

Με βάση το συντελεστή επίδρασης (coefficient estimate b) της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη προκύπτει ότι οι περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές επηρεάζουν θετικά το βάθος αυλάκωσης. Θετική επιρροή σημαίνει ότι αύξηση της τιμής της ανεξάρτητης μεταβλητής (μία κάθε φορά με τις υπόλοιπες σταθερές) προκαλεί αύξηση του βάθους αυλάκωσης. Δύο μεταβλητές όμως επηρεάζουν αρνητικά το βάθος αυλάκωσης, δηλαδή αύξηση των μεταβλητών αυτών (μία κάθε φορά με τις υπόλοιπες σταθερές) προκαλεί μείωση του βάθους αυλάκωσης. Αυτές οι μεταβλητές είναι η CONSTR (που όπως αναλύσαμε παραπάνω εκφράζει τον τύπο κατασκευής οδοστρώματος 2, δηλαδή ημιάκαμπτα οδοστρώματα) και η TEMP (η μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας σε $^{\circ}\text{C}$).

Το γεγονός ότι η μεταβλητή CONSTR επηρεάζει αρνητικά το βάθος αυλάκωσης ενώ οι μεταβλητές Constr3, Constr4, Constr5 (που αναφέρονται σε εύκαμπτα οδοστρώματα) επηρεάζουν θετικά το βάθος αυλάκωσης, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι εάν όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές διατηρηθούν σταθερές, τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα εμφανίζουν μικρότερο βάθος αυλάκωσης από τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Δηλαδή, τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα εμφανίζουν καλύτερη αντοχή σε αυλάκωση σε σχέση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, γεγονός που επαληθεύεται και πειραματικά αλλά και από την καθημερινή πρακτική στην διαχείριση οδοστρωμάτων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα πρότυπα που αναπτύσσει το PARIS για την εξέλιξη της αυλάκωσης σημειώνει ότι η έκταση της αυλάκωσης στα εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα ήταν ίδια, που σημαίνει ότι η αυλάκωση αναπτύσσεται στις επιφανειακές στρώσεις της ασφάλτου, δηλαδή δεν παρατηρήθηκε κατασκευαστική αυλάκωση (structural rutting).

Τα σχήματα 5.2, 5.3 παρουσιάζουν τις γραφικές παράστασεις της κατανομής «επιβίωσης» και της κατανομής «διακινδύνευσης» αντίστοιχα για την ημι-παραμετρική μέθοδο. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται το βάθος αυλάκωσης σε

την ενώ στους κατακόρυφους οι τιμές της πιθανότητας και οι εκτιμώμενες τιμές της συνάρτησης διακινδύνευσης αντίστοιχα.

Έτσι με την βοήθεια της στατιστικής επεξεργασίας που πραγματοποιήθηκε στην νέα βάση δεδομένων που είχε κατασκευαστεί αναπτύξαμε κάποια πρότυπα πρόβλεψης για την εξέλιξη του βάθους αυλάκωσης όπως δείχνουν και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Πρέπει να αναφερθεί ότι τα πρότυπα πρόβλεψης που αναπτύσσει το πρόγραμμα PARIS για το βάθος αυλάκωσης υστερούν σε σχέση με τα πρότυπα πρόβλεψης που προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία.

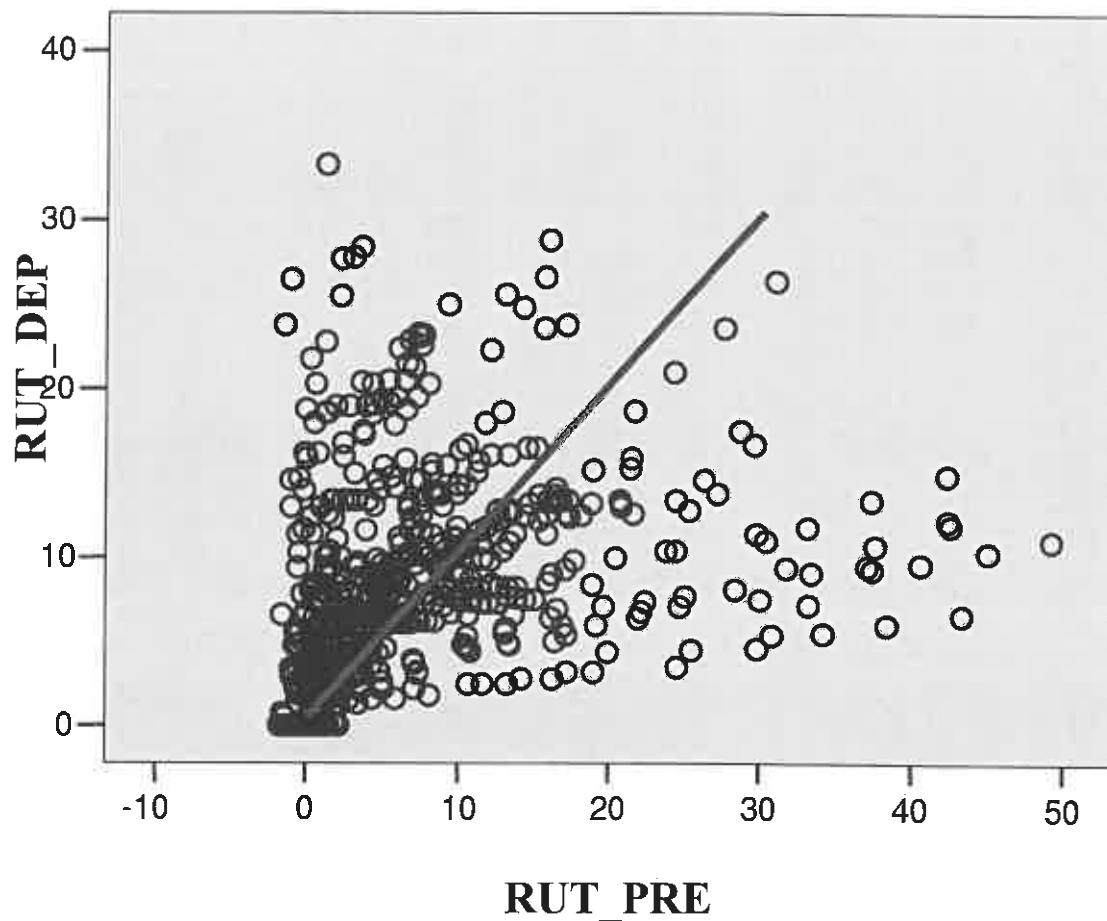
- Στο PARIS για την εξαγωγή των προτύπων γίνεται χρήση της μεθόδου της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης που υποθέτει κανονική κατανομή των δεδομένων γεγονός που αποτελεί απλούστευση σε σχέση με τα ημι-παραμετρικά πρότυπα, που είναι περισσότερο γενικά διότι δεν υποθέτουν κατανομή για τα στοιχεία της βάσης δεδομένων.
- Τα πρότυπα εξέλιξης της αυλάκωσης του PARIS περιέχουν μόνο δύο ανεξάρτητες μεταβλητές, τον συνολικό αριθμό ESALs (MESAL) και την ηλικία επιφάνειας οδοστρώματος (age). Το βάθος αυλάκωσης υπολογίζεται με βάση μία από τις δύο παραπάνω μεταβλητές κάθε φορά ανάλογα με το είδος της σχέσης υπολογισμού που χρησιμοποιούμε. Αντιθέτως στην στατιστική επεξεργασία της νέας βάσης δεδομένων με ημι-παραμετρικά πρότυπα υπήρχε πλήθος ανεξαρτήτων μεταβλητών γεγονός που καθιστά τα νέα πρότυπα πιο «ευέλικτα» σε ό,τι αφορά την εφαρμογή τους.
- Τα πρότυπα πρόβλεψης που αναπτύσσει το PARIS εκφράζουν το βάθος αυλάκωσης σε συνάρτηση με το βάθος αυλάκωσης κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση (RDlast). Άρα, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προβλέψεις καθώς υπολογίζουν την αυλάκωση σε συνάρτηση με το ίδιο μέγεθος. Αντιθέτως, τα νέα πρότυπα πρόβλεψης που προέκυψαν καταλήγουν σε ένα τύπο με τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε και να προβλέψουμε το βάθος αυλάκωσης σε συνάρτηση με πλήθος ανεξαρτήτων μεταβλητών.

Ακολουθώντας υπολογίσαμε τις προβλεπόμενες τιμές του βάθους αυλάκωσης σε συνάρτηση με τις ανεξάρτητες μεταβλητές με βάση τα νέα πρότυπα που προέκυψαν. Για να κρίνουμε την αξιοπιστία των προτύπων, έγινε σύγκριση των προβλεπόμενων

τιμών τους βάθους αυλάκωσης με τις πραγματικές τιμές του βάθους αυλάκωσης. Οι πραγματικές τιμές περιέχονται στην βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην επεξεργασία. Είναι δεδομένα που υπήρχαν στη βάση δεδομένων του PARIS και προέκυψαν από τμήματα επιταχυνόμενης φόρτισης (accelerated loading testing ALT). Υπολογίσαμε την μέση τυπική απόκλιση για το σύνολο των τμημάτων της βάσης δεδομένων αλλά και κατά τμήματα, και κατασκευάσαμε ένα διάγραμμα με άξονες Y και X, το πραγματικό βάθος αυλάκωσης και το προβλεπόμενο αντίστοιχα, για να έχουμε μία εικόνα της διασποράς των τιμών. Κατά τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης, σε μερικά τμήματα προέκυψαν μεγάλες διαφορές ανάμεσα στην προβλεπόμενη και την πραγματική τιμή του βάθους αυλάκωσης. Οι περιπτώσεις αυτές δεν λήφθηκαν υπόψη στο τελικά αποτελέσματα της μέσης τυπικής απόκλισης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα και πίνακα.

	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ %
ΣΥΝΟΛΟ ΤΜΗΜΑΤΩΝ (547 ΤΜΗΜΑΤΑ)	33%
ΤΜΗΜΑΤΑ ΜΕ ΤΙΜΗ RUT_DEP ΑΠΟ 0 ΕΩΣ ΚΑΙ 5 (186 ΤΜΗΜΑΤΑ)	8%
ΤΜΗΜΑΤΑ ΜΕ ΤΙΜΗ RUT_DEP ΑΠΟ 6 ΕΩΣ ΚΑΙ 10 (186 ΤΜΗΜΑΤΑ)	37%
ΤΜΗΜΑΤΑ ΜΕ ΤΙΜΗ RUT_DEP ΑΠΟ 11 ΕΩΣ ΚΑΙ 33 (175 ΤΜΗΜΑΤΑ)	80%

Πίνακας 5.1: Τυπική απόκλιση πραγματικής και προβλεπόμενης τιμής του βάθους Αυλάκωσης.



Σχήμα 5.2: Γραφική παράσταση της διασποράς προβλεπόμενης και πραγματικής τιμής του βάθους αυλάκωσης

5.2.4 Συμπεράσματα

Μετά την στατιστική επεξεργασία και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι κυκλοφοριακές, οι κατασκευαστικές και οι κλιματολογικές συνθήκες, έχουν όλες επίδραση στο βάθος αυλάκωσης του οδοστρώματος.
- Τα ημιάκαμπα οδοστρώματα εμφανίζουν καλύτερη αντοχή σε αυλάκωση σε σχέση με τα εύκαμπα οδοστρώματα, γεγονός που επαληθεύεται και πειραματικά αλλά και από την καθημερινή πρακτική στην διαχείριση οδοστρωμάτων.
- Ο αριθμός των τυπικών αξονικών φορτίων έχει μεγάλη επίδραση στην εξέλιξη της αυλάκωσης.

- Αύξηση των ψυχρών ημερών, παρόλο που θεωρητικά καθιστά το οδόστρωμα πιο άκαμπτο και συνεπώς αναμένεται αύξηση της αντοχής του, πάνω από κάποιο όριο ακαμψίας το οδόστρωμα εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά και αυξάνεται το βάθος αυλάκωσης. Σε περίπτωση υπερβολικά χαμηλής θερμοκρασίας κατά την διάρκεια μίας μόνο μέρας δεν συμβαίνει κάτι αντίστοιχο. Κατά την διάρκεια μίας μόνο μέρας, αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση του βάθους αυλάκωσης.
- Αύξηση στα πάχη των στρώσεων οδηγεί σε αύξηση του βάθους αυλάκωσης με μεγαλύτερη επίδραση να εμφανίζει το πάχος της επιφανειακής στρώσης σε σχέση με τα πάχη των άλλων στρώσεων που ευθύνονται για την κατασκευαστική αυλάκωση (structural rutting).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική επιχειρήθηκε να αναπτυχθούν πρότυπα εξέλιξης αυλακώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιώντας αποκλειστικά δεδομένα από εγκαταστάσεις Επιταχυνόμενης Φόρτισης (Accelerated Loading Testing ALT) χωρίς την βοήθεια μεγεθών μηχανικής (όπως μέτρα ελαστικότητας και τάσεις – παραμορφώσεις). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων του ερευνητικού προγράμματος PARIS, που αποτελεί μία από τις πλέον ολοκληρωμένες προσπάθειες σε ό,τι αφορά στα πρότυπα έναρξης και εξέλιξης αστοχιών στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Αφού μελετήθηκε εκτεταμένα η συγκεκριμένη έρευνα, κατόπιν επελέγησαν εκείνες οι ανεξάρτητες μεταβλητές για τις οποίες υπήρχαν επαρκή δεδομένα για όλα τα υπό μελέτη οδικά τμήματα και οι οποίες στη συνέχεια αποτέλεσαν την βάση δεδομένων της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Τα πρότυπα εξέλιξης αυλακώσεων του PARIS περιείχαν μόνο δύο ανεξάρτητες μεταβλητές, τον συνολικό αριθμό ESALs (MESAL) και την ηλικία επιφάνειας οδοστρώματος (age), θέτοντας με αυτόν τον τρόπο περιοριστικούς παράγοντες για την εφαρμογή τους σε οδοστρώματα που επικρατούν, για παράδειγμα, πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ή έντονες βροχοπτώσεις. Από μόνη της, δηλαδή, η ανεξάρτητη μεταβλητή «τυπικό αξονικό φορτίο» ή η μεταβλητή «ηλικία επιφάνειας οδοστρώματος», αδυνατεί να περιγράψει πλήρως το φαινόμενο της εξέλιξης της αυλάκωσης. Ο μελετητής/διαχειριστής του οδοστρώματος, έχει στα χέρια του ένα πρότυπο με μόνη μεταβλητή την κυκλοφορία, το οποίο υπολογίζει την βάθος αυλάκωσης σε συνάρτηση με το βάθος αυλάκωσης κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση. Δηλαδή, πρακτικά, αδυνατεί να κάνει προβλέψεις για το βάθος αυλάκωσης και να καθορίσει την στρατηγική του για να είναι το πρότυπο πάντα λειτουργικό.

Η ανάγκη για να αναπτυχθούν πρότυπα που να αποδίδουν καλύτερες εκτιμήσεις, αλλά και να περιέχουν επιπλέον ανεξάρτητες μεταβλητές ήταν το αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Η στατιστική επεξεργασία της βάσης δεδομένων, πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης SPSS. Συγκεκριμένα το SPSS χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του ημι-παραμετρικού προτύπου ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για το βάθος αυλάκωσης. Σκοπός της επεξεργασίας ήταν να γίνει ποσοτική διερεύνηση και να προτυποποιηθεί το βάθος αυλάκωσης καθώς και να αξιολογηθεί ο βαθμός επιρροής των παραμέτρων που σύμφωνα με θεωρητικές πηγές, αρχικά, βρέθηκε ότι τον επηρεάζουν.

Τα πρότυπα πρόβλεψης του βάθους αυλάκωσης που προέκυψαν περιέχουν επιπλέον μεταβλητές, όπως πάχη στρώσεων, τύπο κατασκευής οδοστρώματος, θερμοκρασία, βροχόπτωση και αριθμό τυπικών αξονικών φορτίων που διέρχονται από το υπό μελέτη τμήμα. Τα εν λόγω πρότυπα είναι «ευέλικτα» στην εφαρμογή τους, καθώς περιέχουν αρκετές ανεξάρτητες μεταβλητές και συνεπώς μπορούν να αξιοποιηθούν κατά το δοκούν από τον μελετητή/διαχειριστή ενός οδικού δικτύου ανάλογα με τα δεδομένα που διαθέτει ή πρόκειται να μετρήσει επιτόπου.

6.2 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Μετά την στατιστική επεξεργασία και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε για να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψε από την βάση δεδομένων του PARIS. Χρησιμοποιήθηκαν μόνο στοιχεία που προέρχονταν από εγκαταστάσεις Επιταχυνόμενης Φόρτισης (Accelerated Loading Testing ALT).
- Η δημιουργία προτύπων πρόβλεψης του βάθους αυλάκωσης στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων αποτέλεσε αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας και πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη νέα βάση δεδομένων και το πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης SPSS.

του οδοστρώματος, καθώς και να συλλέξει χρήσιμες πληροφορίες ως προς το σκέλος σχεδιασμού του.

6.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και τα τελικά συμπεράσματα της παρούσης διπλωματικής εργασίας, τα παρακάτω μπορούν να προταθούν για περαιτέρω έρευνα:

- Προτείνεται, η εφαρμογή των συγκεκριμένων προτύπων σε διαφορετική βάση δεδομένων για να διαπιστωθεί η εγκυρότητά τους, αλλά και εφαρμοσιμότητά τους σε διαφορετικές συνθήκες (κλιματολογικές ή φορτίσεων). Ειδικότερα, θα μπορούσε να γίνει εφαρμογή σε μια εκτενή βάση δεδομένων από οδικά τμήματα του ελλαδικού χώρου, ώστε να διερευνηθεί αν τα συγκεκριμένα πρότυπα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην Ελλάδα.
- Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμη η ανάπτυξη παρόμοιων προτύπων εξέλιξης και για τους άλλους τύπους αστοχιών (π.χ. ρηγμάτωση, ομαλότητα κατά μήκος και αποκόλληση ασφαλτικού υλικού).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

1. Ronald S. Harichandran, Neeraj Buch, and Gilbert Y. Baladi, "Flexible Pavement Design in Michigan: Transition from Empirical to Mechanistic Methods", Transportation Research Record 1778, 2001.
2. Zhenyu Lou, Jian John lu, Manjriker Gunaratne and Bruce Dietrich, "Forecasting of Pavement Crack Performance with Adaptive Filter Model", Transportation Research Record 1699, 2000.
3. Fernando de Melo e Silva, Thomas J. Van Dam, William M. Bulleit, and Ross Ylitalo, "Proposed Pavement Performance Models for Local Government Agencies in Michigan", Transportation Research Record 1699, 2000
4. Zhenyu Lou, Jian John Lu, Manjriker Gunaratne, and Bruce Dietrich, "Application of Neural Network Model to Forecast Short-Term Pavement Crack Condition: Florida Case Study", Journal of Infrastructure Systems, Vol.7, No.4, 2001.
5. Samer Madanat, Srinivas Bulusu, and Amr Mahmoud, "Estimation of Infrastructure Distress Initiation and Progression Models", Journal of Infrastructure Systems, Vol.1, No.3, 1995.
6. Paterson, W.D.O., "Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management", Hwy.Des. and Maintenance Standard Ser., Johns Hopkins University Press, Baltimore 1987.
7. Lud fi Djakfar and Freddy L. Roberts, "Performance Prediction of Louisiana Accelerated Loading Facility Test Sections", Transportation Research Record 1716, 2000.
8. C. L. Monismith, "Rutting Prediction in Asphalt Concrete Pavements", Transportation Research Record 616, 1976.
9. W. Greene, " Econometric Analysis", Macmillan Publishing Co., New York, 1993.
10. Sammer Madanat and Hee Cheol Shin, "Development of Distress Progression Models Using Panel Data Sets of in-Service Pavements", Transportation Research Record 1643, 1998.

11. Adrian Ricardo Arcilla and Samer Madanat, "Development of a Pavement Rutting Model from Experimental Data", Journal of Transportation Engineering Vol.126, No.4, July/August 2000.
12. Stefan A. Romanoschi and John B. Metcalf, "Evaluation of Probability Distribution Function for the Life of Pavement Structures", Transportation Research Record 1730, 2000.
13. The AASHTO Road Test, Report 5, Pavement Research, Special Report 61E, HRB, National Research Council, Washington D.C., 1962
14. Jorge A. Prozzi and Samer Madanat, "Using Duration Models to Analyse Experimental Pavement Failure Data", Transportation Research Record 1699, 2000.
15. Stolle, Dieter; Guo, Peijun "A practical approach to falling weight deflectometer (FWD) data reduction", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, No 2, 2005.
16. Appea, AK; AlQadi, IL, "Assessment of falling weight deflectometer data for stabilized flexible pavements", Transportation Research Record, No 1709, 2000.
17. Chen, DH; Bilyeu, J; Lin, HH; Murphy, M, "Temperature Correction on Falling Weight Deflectometer Measurements", Transportation Research Record, No 1716, 2000.
18. Aouad, MF; Stokoe, KH; Joh, SH, "Estimating Subgrade Stiffness and Bedrock Depth; Combined Falling Weight Deflectometer and Simplified Spectral Analysis of Surface Waves Measurements", Transportation Research Record, No 1716, 2000.
19. zaghoul, S; Elfino, M, "Pavement Rehabilitation Selection Based on Mechanistic Analysis and Field Diagnosis of Falling Weight Deflectometer Data: Virginia Experience", Transportation Research Record, No 1730, 2000.
20. Mehta, Y; Roque, R "Evaluation of FWD Data for Determination of Layer Moduli Pavements", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15, No 1, 2003.
21. Wang, Yuhong; Mahboub, Kamyar C; Hancher, Donn E "Survival Analysis of Fatigue Cracking for Flexible Pavements Based on Long-Term Pavement Performance Data", Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No 8, 2005.

22. Rao, S; Roesler, JR “Characterizing Effective Built-in Curling from Concrete Pavement Field Measurements”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No 4, 2005.
23. Mishalani, RG; Madanat, SM “Computation of Infrastructure Transition Probabilities Using Stochastic Duration Models”, Journal of Infrastructure Systems, Vol. 8, No 4, 2002.
24. Madanat, S; Prozzi, JA; Han, M “Effect of Performance Model Accuracy on Optimal Pavement Design”, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 17, No 1, 2002.
25. Prozzi, JA; Madanat, SM “Using Duration Models to Analyse Experimental Pavement Failure Data”, Transportation Research Record No 1699, 2000.
26. Martin, AE; Walubita, LF; Hugo, F; Bangera, NU “Pavement Response and Rutting for Full-scale and Scaled Apt”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, No 4, 2003.
27. Han A; Hausman JA, “Flexible Parametric Estimation and Competing Risk Models”, Journal of Applied Econometrics, Vol. 5, 1990.
28. PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure) Final Report 1998.
29. Γ Κοκολάκης και Ι. Σπηλώτης “Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική” Έκδοση 3^η, 1999.
30. Σ. Κόλιας – Α. Λοΐζος “Σημειώσεις Οδοστρωμάτων” ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, 1999.