



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Επιβλέποντες:

A. ΛΟΪΖΟΣ & Μ. ΚΑΡΛΑΥΤΗΣ

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ
ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ
ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ
ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ

Διπλωματική εργασία
ΚΟΚΚΙΝΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ

Αθήνα - 10/11/05 - 2006

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Ευχαριστώ επίσης τον Γρηγόρη Ρετσίνη και τη Σάντρα Σαμουηλίδη για τον χρόνο που μου αφιέρωσαν και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν, καθώς και όλους εκείνους που συνέβαλαν είτε συμβολικά είτε παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες στην ολοκλήρωση της εν λόγω Διπλωματικής Εργασίας.

Αθήνα, Ιούλιος 2004

Ευαγγελία Κοκκίνου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η δημιουργία προτύπων πρόβλεψης του χρόνου που μεσολαβεί από την κατασκευή, τελευταία επίστρωση ή τελευταία επιφανειακή συντήρηση μέχρι την πρώτη εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία επί τόπου μετρήσεων, τα οποία ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων του ερευνητικού προγράμματος PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure), το οποίο πραγματοποιήθηκε με τη 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, που κάλυπταν ένα χρονικό διάστημα της τάξεως των δέκα ετών περίπου. Με τη βοήθεια των προτύπων χρονικής διάρκειας τύπου «hazard» (παραμετρικών και ημι-παραμετρικών), επιχειρήθηκε η ανάπτυξη ενός πιθανοτικού προτύπου που να υπολογίζει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων συναρτήσει ορισμένων ανεξάρτητων μεταβλητών, που φαίνεται να προκαλούν έναρξη του φαινομένου. Η ανάλυση έδειξε ότι η πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων επηρεάζεται σημαντικά από τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες, τα πάχη των διαφόρων στρώσεων, την κυκλοφορία και τον τύπο του οδοστρώματος (εύκαμπτο ή ημιάκαμπτο).

ABSTRACT

The object of this thesis is the development of models predicting the time that intervenes between the construction, last overlay or last maintenance and the initiation of cracking on the surface of flexible and semi-rigid pavements. To achieve this goal field data from distress surveys were used. These 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, which covered a period of approximately ten years. The modeling of crack initiation was done with the use of probabilistic duration «hazard» models (parametric and semi-parametric), which included the explanatory variables that seemed to cause crack initiation. The analysis showed that the probability of crack initiation is affected mostly from the climate conditions, the thicknesses of layers, the traffic and the pavement type (flexible or semi-rigid).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	8
2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2 Αναφορά σε Προηγούμενες Έρευνες.....	10
2.3 Αναλυτική Παρουσίαση Ερευνών.....	14
2.3.1 Εισαγωγή	14
2.3.2 Έρευνες Πραγματικού Χρόνου (RLT).....	15
2.3.3 Έρευνες με Δοκιμές Επιταχυνόμενης φόρτισης (ALT)	27
2.4 Συμπεράσματα.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΤΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PARIS.....	34
3.1 Εισαγωγή.....	34
3.2 Στόχοι & Βήματα.....	35
3.3 Προέλευση των Δεδομένων.....	39
3.4 Συλλογή Δεδομένων	46
3.5 Κανονικοποίηση Δεδομένων.....	47
3.6 Η Βάση Δεδομένων	48
3.6.1 Εισαγωγή	48
3.6.2 Αναλυτική Παρουσίαση Δεδομένων	49
3.7 Μεθοδολογία Ανάλυσης.....	53
3.8 Τρόπος Προσέγγισης της Προτυποποίησης Αστοχιών	56
3.8.1 Έναρξη Αστοχιών (distress initiation).....	56
3.8.2 Εξέλιξη Αστοχιών (distress propagation).....	58
3.9 Συναρτησιακή Μορφή της Εξέλιξης Αστοχιών	58
3.10 Πρότυπα Έναρξης Ρηγματώσεων (cracking initiation models)	60
3.10.1 Εισαγωγή	60
3.10.2 Ρηγματώσεις στο ίχνος (wheel path cracking)	60
3.10.2.1 Εύκαμπτα οδοστρώματα (flexible pavements).....	60

3.10.2.2 Ημιάκαμπτα οδοστρώματα (semi-rigid pavements).....	63
3.10.3 Εγκάρσια Ανακλαστική Ρηγμάτωση (transverse reflection cracking)	64
3.10.4 Συμπεράσματα	65
3.11 Πρότυπα Εξέλιξης Αστοχιών (distress propagation models)	66
3.11.1 Εισαγωγή	66
3.11.2 Ρηγμάτωση	66
3.11.2.1 Ρηγμάτωση στο ίχνος	66
3.11.2.2 Εγκάρσια ανακλαστική ρηγμάτωση	69
3.11.2.3 Σχόλια	70
3.11.3 Αυλάκωση	70
3.11.3.1 Ανάλυση αυλάκωσης.....	70
3.11.3.2 Σχόλια	72
3.11.4 Ομαλότητα κατά Μήκος.....	72
3.11.5 Αποκόλληση Ασφαλτικού Υλικού	74
3.12 Αξιολόγηση	76
3.12.1 Εισαγωγή	76
3.12.2 Έναρξη Αστοχιών.....	76
3.12.3 Εξέλιξη Αστοχιών	78
3.13 Εφαρμογή των Προτύπων	80
3.14 Συμπεράσματα	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ84

4.1 Βάση Δεδομένων	84
4.1.1 Εισαγωγή	84
4.1.2 Περιγραφή της Βάσης Δεδομένων	84
4.2 Μεθοδολογία	91
4.2.1 Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας (Duration Models)	91
4.2.2 Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας «Hazard»	92
4.2.3 Χαρακτηριστικά των Στοιχείων Χρονικής Διάρκειας.....	97
4.2.4 Μη Παραμετρικά Πρότυπα	99
4.2.5 Ημι-παραμετρικά Πρότυπα	100
4.2.6 Παραμετρικά Πρότυπα	101

4.2.7 Ετερογένεια	104
-------------------------	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ -

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....106

5.1 Εισαγωγή Δεδομένων	106
5.1.1 Γενικά	106
5.1.2 Ανεξάρτητες Μεταβλητές.....	106
5.1.3 Εξαρτημένη Μεταβλητή.....	107
5.1.4 Μορφοποίηση Δεδομένων.....	108
5.1.5 Στατιστική Επεξεργασία Δεδομένων.....	111
5.1.5.1 Παραμετρική Μέθοδος.....	112
5.1.5.2 Ημι-παραμετρική Μέθοδος	112
5.1.6 Αποτελέσματα από τη Στατιστική Επεξεργασία	113
5.1.6.1 Αποτελέσματα από τη Στατιστική Επεξεργασία των Στοιχείων με Παραμετρικά Πρότυπα	114
5.1.6.2 Αποτελέσματα από τη Στατιστική Επεξεργασία των Στοιχείων με Ημι-παραμετρικά Πρότυπα.....	132
5.1.6.3 Σύγκριση μεταξύ Παραμετρικών και Ημι- παραμετρικών Μεθόδων.....	136
5.1.7 Συμπεράσματα	138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Γενικά	140
6.2 Σύνοψη Αποτελεσμάτων	141
6.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	143

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ.....144

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. Η έννοια ενός καλού δομικού σχεδιασμού εμπεριέχει το συνολικό κόστος ζωής των οδοστρωμάτων και τις συνέπειες για τους χρήστες, από την άποψη των καθυστερήσεων και της ασφάλειας σε περιόδους κατά τις οποίες εκτελούνται απαραίτητες εργασίες συντήρησης ή αποκατάστασης οδικών τμημάτων. Επιπλέον, για την κατάρτιση ενός τέτοιου σχεδιασμού είναι απαραίτητη η χρήση συστημάτων διαχείρισης οδοστρωμάτων, τα οποία εφαρμόζονται σε πολλές χώρες της Ευρώπης. Στα συστήματα αυτά, διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο η μελέτη της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων των διαφόρων δικτύων. Έτσι, είναι αναγκαία η συλλογή πληροφοριών για την υπάρχουσα και μελλοντική κατάστασή τους. Προκειμένου λοιπόν, για την καταγραφή της παρούσης κατάστασης πραγματοποιούνται επί τόπου μετρήσεις στα υπό εξέταση οδικά τμήματα. Σε ότι αφορά την μελλοντική κατάστασή τους, γίνεται πρόβλεψη με τη 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. Έτσι, εκ των δύο ειδών των ανωτέρω προτύπων, το μεν της έναρξης αστοχιών έχει ως στόχο 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. Ακολούθως, το πρότυπο της εξέλιξης αστοχιών στοχεύει στο να περιγράψει το πώς η αστοχία αναπτύσσεται με την πάροδο του χρόνου τόσο ως προς την σοβαρότητα, όσο και την

έκταση αυτής. Συνεπώς, ο διαχειριστής του έργου εκμεταλλευόμενος σωστά αυτές τις πληροφορίες μπορεί να προγραμματίσει τον χρόνο συντήρησης ή αποκατάστασης του οδοστρώματος, συνεκτιμώντας και το ποσό των χρημάτων που θα απαιτηθούν στον ίδιο χρόνο ανάλογα με το ποιό από τις δύο μεθόδους θα εφαρμοστεί έτσι ώστε το οδόστρωμα να καταστεί και πάλι λειτουργικό. Επιπλέον, η διενέργεια των παραπάνω προβλέψεων συμβάλλει στην ενδεδειγμένη διαχείριση των οικονομικών πόρων που έχει στην διάθεσή του ο διαχειριστής του δικτύου, στον υπολογισμό της εναπομείνουσας ζωής του δικτύου και στην ανάλυση του κόστους ζωής του. Επειδή λοιπόν, τα πρότυπα πρόβλεψης αστοχιών είναι απαραίτητα για πολλούς και διαφορετικούς σκοπούς είναι ήδη ευρεία, όπως προειπώθηκε, η χρήση τους στα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων σε όλο τον κόσμο.

Τα παραπάνω πρότυπα μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν για την παροχή πληροφοριών και πρακτικών οδηγιών στο μελετητή του οδοστρώματος, σε ότι αφορά το σκέλος του σχεδιασμού του. Έτσι, με βάση τις παραμέτρους σχεδιασμού του υπό κατασκευή οδοστρώματος και γνωρίζοντας τον κύκλο ζωής του έργου, μπορεί να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα σχετικό με το αν το οδόστρωμα θα αστοχήσει πριν ή μετά το χρόνο ζωής του έργου. Κατά συνέπεια, αν κριθεί απαραίτητο, οι παράμετροι του σχεδιασμού μπορεί να τροποποιηθούν ώστε το αποτέλεσμα να είναι το επιθυμητό.

Είναι, όμως, απαραίτητο να τονιστεί το γεγονός ότι παρ'όλο που τα πρότυπα πρόβλεψης αστοχιών αποτελούν το πιο σημαντικό μέρος των συστημάτων διαχείρισης οδοστρωμάτων είναι επίσης ένα από τα αδύνατα σημεία τους. Μή ακριβή πρότυπα μπορεί να κάνουν την επιλογή της καλύτερης στρατηγικής για την διατήρηση των οδοστρωμάτων πολύ δύσκολη. Από την άλλη πλευρά, 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 περιβαλλόντος, βροχοπτώσεις, υγρασία κ.λ.π), κυκλοφοριακά δεδομένα (αριθμός ετήσιων διελεύσεων τυπικών αξόνων, ποσοστό φορτηγών κ.λ.π), δηλαδή στοιχεία

σχετικά με τους παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν αστοχία, ιστορικά δεδομένα (έτος κατασκευής οδοστρωμάτων, χρονολογίες μετέπειτα συντηρήσεων ή αποκαταστάσεων κ.λ.π) και κατασκευαστικά δεδομένα (πάχη υπόβασης – βάσης – ασφαλτικών 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 ότι άλλο κρίνεται ότι μπορεί να φανεί χρήσιμο στη μετέπειτα επεξεργασία. Έτσι, δημιουργείται μία βάση δεδομένων η οποία αφού υποστεί κατάλληλη επεξεργασία οδηγεί με ικανοποιητική ακρίβεια στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το ποιοί παράγοντες επηρεάζουν την συμπεριφορά των οδοστρωμάτων και σε ποιο βαθμό ο καθένας. Αυτά τα συμπεράσματα μπορούν να τεθούν στην διάθεση του διαχειριστή, με σκοπό να προβλέψει πιο σωστά τον τρόπο συντήρησης του οδικού δικτύου.

Ο σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η εξεύρεση των παραγόντων που επηρεάζουν τον χρόνο που μεσολαβεί από το έτος κατασκευής, επιφανειακής συντήρησης ή τελευταίας επίστρωσης, μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσης στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς και ο προσδιορισμός της βέλτιστης κατανομής του χρόνου αυτού με τη χρήση στατιστικής ανάλυσης υψηλών προδιαγραφών.

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

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται αναφορές από τη 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 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 εξαγωγή των προτύπων του χρόνου που μεσολαβεί από το έτος κατασκευής, επιφανειακής συντήρησης ή τελευταίας

επίστρωσης, μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Αναλύεται, επίσης, και η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων της βάσης, με σκοπό την εξαγωγή των προτύπων.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται ανάλυση της στατιστικής επεξεργασίας των στοιχείων της βάσης δεδομένων και ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Επίσης, γίνεται παρουσίαση και των νέων προτύπων που δημιουργήθηκαν.

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 του δίκτυο έχει φτάσει σε επίπεδο συντήρησης ή/και αποκατάστασης. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία περιέχει έναν 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 την λειτουργικότητα και ασφάλεια της κατασκευής. Οι αστοχίες μπορεί να οφείλονται στα φορτία, την υγρασία, θερμοκρασία, τις τυχόν κατασκευαστικές ατέλειες ή συνδυασμό των παραπάνω.

Τα πρότυπα πρόβλεψης αστοχιών που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: ντετερμινιστικά (deterministic), μηχανιστικά (mechanistic), μηχανιστικά – εμπειρικά (mechanistic – empirical) και πιθανοτικά (probabilistic).

Η θεωρία ανάπτυξης των πρώτων (deterministic), βασίζεται σε μία απλή διαδικασία που χρησιμοποιεί ιστορικά στοιχεία από προγενέστερες επιθεωρήσεις των οδοστρωμάτων. Τα οδοστρώματα εν συνεχεία ταξινομούνται σε τάξεις ή οικογένειες. Μια οικογένεια, είναι ένα γκρούπ 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 και από τους τρεις τύπους στο να τεθούν σε εφαρμογή. Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχουν πρότυπα πρόβλεψης για κάθε μία αστοχία χωριστά. Τα πρότυπα αυτά περιλαμβάνουν παράγοντες, όπως είναι ο όγκος της κυκλοφορίας, οι κλιματολογικές συνθήκες, και 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 μία 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.

Και ο τελευταίος τύπος προτύπων, τα πιθανοτικά (probabilistic), χρησιμοποιούν οικογένειες, όπως και τα ντετερμινιστικά (deterministic), για να ομαδοποιήσουν οδοστρώματα με παρόμοια χαρακτηριστικά. Τα πρότυπα αυτά καταταμίζουν τα ιστορικά στοιχεία σε έναν 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 συγγράματα και αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

2.2 Αναφορά σε Προηγούμενες Έρευνες

Οι πιο σημαντικές προηγούμενες 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 την μελλοντική συμπεριφορά των ρηγματώσεων με βάση ιστορικά στοιχεία αυτών. Και αυτό το πρότυπο, όπως και τα Νευρωνικά Δίκτυα (αναφέρονται παρακάτω), είναι μη γραμμικό και έχει τη δυνατότητα να ανταποκρίνεται άμεσα σε αλλαγές που τυχόν υφίσταται το οδόστρωμα και μάλιστα κατά τρόπο ώστε να βελτιώνεται η απόδοση του με τη συνεχή επεξεργασία των χρονικών διακυμάνσεων της εξέλιξης των ρηγματώσεων. Επίσης και αυτό το πρότυπο κάνει μελλοντική πρόβλεψη βάσει των παρόντων και προγενεστέρων συνθηκών.

Το Πρότυπο Λογιστικής Εξέλιξης (Logistic Growth Model) [3] είναι ένα πρότυπο εξέλιξης αστοχιών που βασίζεται στην ντετερμινιστική θεωρία (deterministic) και ο Κιο 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 μηδέν. Το πρότυπο, έτσι, περνάει από την τιμή μηδέν τη χρονική στιγμή μηδέν (νέα κατασκευή). Για να

αντικατοπτριστεί αυτή η οριακή κατάσταση στο πρότυπο, χρησιμοποιείται η παρακάτω 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)

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

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» απευθείας από παρελθοντικά δεδομένα. Δηλαδή, ομοίως με τον ανθρώπινο εγκέφαλο, αφού “εκπαιδευτεί” ένα πρότυπο Neural Network μπορεί σε ικανοποιητικό βαθμό να διεξάγει 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 σε 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), αποκόλληση ασφαλτικού υλικού (ravelling), δημιουργία λακκουβών (potholes) και 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 της αστοχίας.

Η ομάδα RITM2 [5], επίσης, ανέπτυξε διαφορετικά πρότυπα για έναρξη και εξέλιξη των ρηγματώσεων. Το πρότυπο έναρξης προβλέπει τον 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 Arizona (Arizona Department of Transportation) [5] ανέπτυξε πρότυπα που κάνουν πιθανοτικές προβλέψεις σχετικά με την μελλοντική κατάσταση των οδοστρωμάτων. Τα πρότυπα αυτά θεωρούν ότι η εξέλιξη της αστοχίας με το πέρασμα του χρόνου ακολουθεί την Μαρκοβιανή διαδικασία. Η πιθανότητα μεταβίβασης από μία δεδομένη κατάσταση σε μία χειρότερη, από

πλευράς έκτασης και σοβαρότητας αστοχιών, εξαρτάται μόνον από τις τωρινές τιμές των μεταβλητών και είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες καταστάσεις που βρισκόταν το υπό μελέτη οδοστρώμα. 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 την συμπεριφορά 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 της επιφάνειας του οδοστρώματος (εξαιτίας 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 τον 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 ηλικιακών παραμέτρων.

Το μηχανιστικό πρότυπο VESYS 3A-M [7] είναι ένα από τα προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή VESYS τα οποία δημιουργήθηκαν από τη 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 την 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 δυο επιμέρους προτύπων που περιλαμβάνονται στο VESYS και τα οποία προβλέπουν έναρξη και εξέλιξη ρηγματώσεων, αυλακώσεων και ομαλότητας.

Στα πλαίσια μίας 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 την 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 Πραγματικού Χρόνου (RLT) και με Δοκιμές Επιταχυνόμενης Φόρτισης (ALT), που επελέγησαν έτσι ώστε να καταστήσουν σαφές το αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η 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 Πραγματικού Χρόνου (RLT)

Η έρευνα που ακολουθεί είχε ως στόχο την δημιουργία προτύπων που να προβλέπουν την μελλοντική κατάσταση του οδικού δικτύου της περιοχής 5 (district 5) της Φλόριντα (Florida) από πλευράς βαθμού αστοχίας [10]. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση είχαν να κάνουν με μετρήσεις κυκλοφορίας, όρια ταχυτήτων, κατακρήμνιση, θερμοκρασίες, υλικά στρώσεων, τύπους αστοχιών, πάχη στρώσεων, ηλικία οδοστρώματος και κάτι που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια, ο βαθμός πτώσης στην ποιότητα των οδοστρωμάτων χρόνο με το χρόνο. Τα στοιχεία αυτά κάλυπταν ένα χρονικό διάστημα επτά ετών. Ένα από τα εννέα τμήματα της περιοχής 5 χρησιμοποιήθηκε ως πιλοτικό και τα στοιχεία αυτού αναλύθηκαν για να προσδιοριστούν εκείνες οι μεταβλητές για την δημιουργία του προτύπου. Η εγκυρότητα του προτύπου διαπιστώθηκε πραγματοποιώντας σύγκριση της εκτιμώμενης κατάστασης των οδοστρωμάτων από το πρότυπο και της πραγματικής κατάστασης αυτών. Αφού έγινε αυτή η διαδικασία, η ίδια προσέγγιση προτυποποίησης ακολουθήθηκε και για τα υπόλοιπα οχτώ τμήματα της περιοχής 5. Τέλος, αναπτύχθηκε ένα πρότυπο πρόβλεψης της εναπομένουσας ζωής των οδοστρωμάτων βασισμένο σε επιτόπου μετρήσεις.

Η κατάσταση ενός οδοστρώματος εκφράστηκε με τον Δείκτη Κατάστασης Οδοστρώματος PCS (Pavement Condition Survey) που κυμαίνεται από 0 έως 10. Εάν ο PCS είναι 10, το οδόστρωμα βρίσκεται σε αρίστη κατάσταση, ενώ αν είναι ίσος με 0, τότε έχει αστοχήσει πλήρως. Ο χαρακτηρισμός ενός οδοστρώματος με τον PCS αναφέρεται στις εξής τρεις κατηγορίες: ρηγμάτωση, άνεση κύλισης και αυλάκωση. Μετά από εξέταση διαφόρων πιθανών εξαρτημένων μεταβλητών, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ο βαθμός κατάστασης (condition rating) σε ό,τι αφορά στην ρηγμάτωση. Επιπλέον, οι εξής ανεξάρτητες μεταβλητές εισήχθησαν στην τελική ανάλυση για την δημιουργία του προτύπου: Βαθμός κατάστασης ρηγμάτωσης, πάχος ασφαλικής στρώσης, ιστορικά δεδομένα σχετικά με την ετήσια και ημερήσια κυκλοφορία και το ποσοστό φορτηγών, υλικά στρώσεων, ηλικία οδοστρωμάτων και

μηνιαία και ετήσια κατακρήμνιση. Η ανάλυση των στοιχείων με τη βοήθεια του στατιστικού προγράμματος SAS (Statistical Analysis System), κατέληξε στο εξής πρότυπο:

$$y_{cc} = 0.979 \cdot y_{m1c} - 0.08561 \cdot s \cdot (a/10000)$$

όπου:

y_{cc} = βαθμός ρηγμάτωσης (crack rating) της τρέχουσας χρονιάς

y_{m1c} = βαθμός ρηγμάτωσης της προηγούμενης χρονιάς

s = η κλίση του βαθμού αστοχίας (slope of rating deterioration)

a = ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία

Η ανάλυση έδωσε τιμές R^2 πολύ υψηλές (της τάξης του 0.926) και επιπλέον οι εκτιμώμενες τιμές του βαθμού ρηγμάτωσης για τις επόμενες τρεις χρονιές ήταν αρκετά κοντά στις μετρήσιμες τιμές, πράγμα που σημαίνει ότι το συγκεκριμένο πρότυπο απέδωσε αρκετά ικανοποιητικά στην συγκεκριμένη περιοχή.

Στα πλαίσια μίας άλλης έρευνας [11], σκοπός ήταν να αναπτυχθούν πρότυπα που να προβλέπουν έναρξη και εξέλιξη της εγκάρσιας αντανάκλαστικής ρηγμάτωσης σε τμήματα οδοστρωμάτων που έχουν υποστεί επανεπίστρωση. Η διαδικασία ανάπτυξης των προτύπων στηρίχθηκε στη μηχανιστική θεωρία και τα απαραίτητα στοιχεία οδικών τμημάτων (διαπολιτειακών και αρτηριακών) για τη διαδικασία ανάλυσης ελήφθησαν από Τμήμα Μεταφορών της Φλόριντα (Florida Department of Transportation FDOT). Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στα πρότυπα είναι οι εξής: ιστορικά στοιχεία από παλαιότερες επί τόπου έρευνες, ιστορικά στοιχεία για κυκλοφοριακούς φόρτους, τα πάχη των διαφόρων στρώσεων, κλιματολογικά στοιχεία, το επίπεδο των ρηγματώσεων πριν την επανεπίστρωση κ.ά. Έπειτα από την μελέτη των επιμέρους στοιχείων και την επί τόπου επιθεώρηση των υποψηφίων τμημάτων, επελέγησαν 20 τμήματα για να χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη του προτύπου έναρξης και 30 τμήματα για το πρότυπο εξέλιξης.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν είναι πάντα διαθέσιμα όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την μηχανιστική προσέγγιση, σε αυτή την έρευνα χρησιμοποιήθηκε μια εμπειρική μέθοδος στοχαστικής μορφής. Μετά την ανάλυση τα πρότυπα που προέκυψαν είναι τα εξής:

Πρότυπο έναρξης:

$$N_{f_0} = \rho N_{f_c} \left(\frac{\beta}{\beta+1} \right)^{\left(\frac{\beta+1}{\beta} \right)}$$

όπου:

N_{f_0} = συνολικές διελεύσεις αξονικών φορτίων κατά την έναρξη ρηγματώσεων.

N_{f_c} = συνολικές διελεύσεις αξονικών φορτίων που απαιτούνται έτσι ώστε η ρηγμάτωση να φτάσει στην επιφάνεια της επανεπίστρωσης σε περιοχές πάνω από ρηγματωμένο παλαιό οδόστρωμα

ρ , β = παράμετροι σχετικά με το πόσο ευρεία και απότομη είναι η σιγμοειδής καμπύλη, αντίστοιχα.

Πρότυπο εξέλιξης:

$$c = c_r \left(e^{-\left(\frac{\rho N_{f_c}}{N} \right)^\beta} \right) + (1 - c_r) \left(e^{-\left(\frac{\rho N_{f_c}}{fN} \right)^\beta} \right)$$

όπου:

c = το συνολικό ποσοστό της επιφάνειας επανεπίστρωσης που έχει ρηγματωθεί

c_r = το συνολικό ποσοστό της επιφάνειας του παλαιού οδοστρώματος που είναι ρηγματωμένο κατά την έναρξη της επανεπίστρωσης

N = δεδομένος αριθμός αξονικών διελεύσεων

Έπειτα οι παραπάνω προτεινόμενες μορφές των προτύπων προσαρμόστηκαν σε κάθε οδικό τμήμα με την εφαρμογή των στοιχείων του καθενός. Έτσι, η ανάλυση έδωσε τιμές R^2 πολύ υψηλές για το πρότυπο εξέλιξης (της τάξης του 0.97 για διαπολιτειακά τμήματα και του 0.96 για αρτηριακά τμήματα) και επιπλέον οι εκτιμώμενες τιμές του βαθμού ρηγμάτωσης ήταν αρκετά κοντά στις μετρήσιμες τιμές, πράγμα που σημαίνει ότι το συγκεκριμένο πρότυπο απέδωσε αρκετά ικανοποιητικά στην συγκεκριμένη περιοχή. Όσον αφορά το πρότυπο έναρξης, επειδή τα στοιχεία δεν αποδείχτηκαν επαρκή, δεν έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η επόμενη εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος που έλαβε χώρα κατά το χρονικό διάστημα 1991-1998 και είχε ως στόχο τον καθορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τις αυλακώσεις σε εύκαμπτα οδοστρώματα, καθώς και την δημιουργία ενός μηχανιστικού-εμπειρικού προτύπου πρόβλεψης αυλακώσεων [12]. Τα απαραίτητα στοιχεία για την διεκπεραίωση των παραπάνω εργασιών ελήφθησαν από 39 εύκαμπτα εν λειτουργία τμήματα οδοστρωμάτων (μήκους 100 έως 150m) της ευρύτερης περιοχής του Michigan. Τα στοιχεία αυτά ήταν ιστορικά, κατασκευαστικά, κυκλοφορίας, υποχωρήσεων, κλιματολογικά, κ.ά.

Για τον προσδιορισμό των μεταβλητών που θα χρησιμοποιούνταν στη διαδικασία ανάλυσης του προτύπου, έγινε η υπόθεση ότι η σχέση μεταξύ της αρχικής ελαστικής τάσης στα διάφορα στρώματα του οδοστρώματος και του αριθμού των επαναλήψεων φορτίσεων, δηλαδή η σχέση μεταξύ των παραγόντων που χαρακτηρίζουν τον μηχανισμό της δημιουργίας αυλακώσεων, μπορεί να εξηγήσει το μέγεθος της αθροιστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το οδόστρωμα. Ένας πίνακας συσχέτισης δημιουργήθηκε με τη χρήση του προγράμματος H/Y SPSS. Δηλαδή διερευνήθηκε, μέσω της στατιστικής ανάλυσης των στοιχείων, η επίδραση της απόκρισης του οδοστρώματος, των κλιματολογικών στοιχείων, και της κυκλοφορίας, στο βάθος αυλακώσεων βασισμένο σε επί τόπου μετρήσεις. Επίσης, θεωρήθηκε ότι οι μεταβλητές έχουν μόνο γραμμικές σχέσεις μεταξύ τους. Έτσι τελικά οι ανεξάρτητες μεταβλητές που επελέγησαν για την δημιουργία του προτύπου ήταν οι:

- SD = επιφανειακές υποχωρήσεις (in)
- KV = κινηματική ρευστότητα (kinematic viscosity, centistroke)
- T_{annual} = μέση ετήσια θερμοκρασία ($^{\circ}F$)
- H_{AC} = πάχος της στρώσης ασφαλτικού σκυροδέματος (in)
- N = συνολικός όγκος κυκλοφορίας (ισοδύναμα μονοαξονικά φορτία)
- $\epsilon_{v,\text{base}}$ = κατακόρυφη ελαστική τάση στην επιφάνεια της βάσεως (10^{-3})
- $\epsilon_{v,\text{SG}}$ = κατακόρυφη ελαστική τάση στην επιφάνεια της υποβάσεως (10^{-3})
- E_{AC} = συντελεστής ελαστικότητας του ασφαλτικού σκυροδέματος (lbf/in^2)
- E_{SG} = συντελεστής ελαστικότητας της υποβάσεως (lbf/in^2)

Έτσι το πρότυπο που αναπτύχθηκε είχε τη μορφή:

$$\text{Rut depth} = g(x) * f(x'),$$

όπου:

$g(x)$, είναι μία εμπειρική συνάρτηση, λαμβάνοντας υπόψη την προσαρμογή του θεωρητικού μηχανισμού δημιουργίας των αυλακώσεων στις πραγματικές συνθήκες

$f(x')$, είναι μία μηχανιστική συνάρτηση που αντικατοπτρίζει τον βασικό μηχανισμό δημιουργίας αυλακώσεων.

Για τον προσδιορισμό των δύο αυτών συναρτήσεων στη συγκεκριμένη έρευνα, πραγματοποιήθηκε μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης με τα στοιχεία των 39 οδικών τμημάτων και το τελικό πρότυπο πρόβλεψης αυλακώσεων είναι το εξής:

$$RD = [-0.016H_{AC} + 0.033 \ln(SD) + 0.011T_{annual} - 0.01 \ln(KV)] * \left[-2.703 + 0.657(\varepsilon_{v,base})^{0.097} + 0.271(\varepsilon_{v,SG})^{0.883} + 0.258 \ln(N) - 0.0341 \ln\left(\frac{E_{AC}}{E_{SG}}\right) \right]$$

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι η ανάλυση έδωσε τιμές R^2 πολύ υψηλές, της τάξης του 90.5%, γεγονός που σημαίνει ότι το πρότυπο είναι στατιστικά σημαντικό. Επιπλέον και η επαλήθευση του από στοιχεία επί τόπου μετρήσεων των 39 τμημάτων το έτος 1998, καθώς και από στοιχεία που ελήφθησαν από την βάση δεδομένων του προγράμματος LTPP (Long Term Pavement Performance), έδειξε ότι οι προβλεπόμενες και παρατηρούμενες τιμές βάθους αυλακώσεων συμφωνούσαν σε αρκετά μεγάλο βαθμό (της τάξης του 75%).

Η επόμενη έρευνα είχε ως στόχο την ανάπτυξη προτύπων για την πρόβλεψη της έναρξης και της εξέλιξης ρηγματώσεων σε οδοστρώματα υπό συνθήκες παγετού [13]. Τα πρότυπα βασίζονται στις αρχές της μηχανιστικής θεωρίας και καθορίστηκαν με τη χρήση στοιχείων από εν λειτουργία οδοστρώματα κυρίως στην επαρχία του Quebec, καθώς και στο Connecticut, Minnesota, και Φιλανδία. Ο σημαντικότερος παράγοντας που θεωρήθηκε ότι επηρεάζει την κόπωση αυτών των οδοστρωμάτων είναι η μόνιμη προς τα επάνω κίνηση του οδοστρώματος (δημιουργία ανυψωμάτων), λόγω της

διείσδυσης του νερού και της συσσώρευσης του, σε σημεία με ευάλωτο εδαφικό υλικό, υπό μορφή συμπαγούς πάγου. Πιό συγκεκριμένα για την περίπτωση των κατά μήκος ρηγματώσεων που δεν βρίσκονται στην περιοχή διέλευσης των τροχών, οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο έναρξης και το ρυθμό εξέλιξής τους θεωρήθηκε πως είναι η σοβαρότητα του φαινομένου που προαναφέρθηκε και η αντοχή σε τάση της ασφαλικής στρώσης, η οποία εξελίσσεται συν τω χρόνω εξαιτίας της οξειδωσης του ασφαλικού συνδετικού υλικού.

Ως εξαρτημένη μεταβλητή του προτύπου ελήφθη ένας δείκτης που εκφράζει την έκταση των κατά μήκος ρωγμών εκτός της περιοχής του ίχνους των τροχών και συμβολίζεται με F_g . Είναι βέβαια πιθανό ότι η δράση του παγετού συνεισφέρει στην έναρξη και την εξέλιξη των ρηγματώσεων και στο ίχνος των τροχών, αλλά σε αυτή την περίπτωση ο κυριώτερος παράγοντας επιρροής είναι τα φορτία εκ κυκλοφορίας. Έπειτα ορίστηκε ένας άλλος δείκτης, ο Re , που ορίζεται ως ο λόγος της τάσης που αναπτύσσεται στην επιφανειακή ασφαλική στρώση, προς την τάση αστοχίας του ασφαλικού σκυροδέματος, που υπολογίζεται από εργαστηριακά πειράματα.

Εξαιτίας της ειδικής φύσεως των στοιχείων που απαιτούντο για την ανάπτυξη του προτύπου, ένας περιορισμένος αριθμός οδικών τμημάτων επελέγη. Για όλα αυτά τα τμήματα ήταν διαθέσιμες πληροφορίες σχετικές με την έκταση και τη σοβαρότητα της διείσδυσης του παγετού και των αστοχιών που αυτό συνεπάγεται στο κέντρο και στα άκρα του οδοστρώματος, καθώς και λεπτομερή στοιχεία για τις επιφανειακές αστοχίες.

Δύο τύποι προτύπων δημιουργήθηκαν μετά το πέρας αυτής της εργασίας. Ένα πρότυπο έναρξης-εξέλιξης ρηγματώσεων, το οποίο βασίζεται σε καμπύλες που οριοθετούν διαφορετικά επίπεδα έκτασης ρηγματώσεων, και ένα πρότυπο βασισμένο στην ισοδύναμη ετήσια εξέλιξη της έκτασης των ρηγματώσεων, η οποία απλά λαμβάνεται από τη διαίρεση του συνόλου της έκτασης των ρηγματώσεων που καταγράφηκε τον τελευταίο χρόνο της παρακολούθησης δια της ηλικίας του οδοστρώματος. Η μορφή του δεύτερου προτύπου είναι:

$$\Delta F_g = 1.38Re^2 - 0.23Re$$

Η δημιουργία, όμως, αυτών των προτύπων βασίστηκε σε μία σειρά απλοποιήσεων που έγιναν με σκοπό να είναι το πρότυπο εύχρηστο στην πράξη. Κάθε μία από αυτές τις απλοποιήσεις είναι πιθανό να εισάγει ένα λάθος στον υπολογισμό του δείκτη Re. Αυτά τα λάθη πρέπει να διορθώνονται, τουλάχιστον εν μέρει, με την ένταξη στο πρότυπο των συνθηκών που επικρατούν σε κάθε διαφορετικό τμήμα εφαρμογής του. Παρ' όλα αυτά απαιτείται περισσότερη έρευνα για τον καλύτερο χαρακτηρισμό της μηχανικής απόκρισης των δικτύων οδοστρωμάτων που υπόκεινται σε συνθήκες παγετού.

Μία άλλη ομάδα ερευνητών ασχολήθηκε με την δημιουργία προτύπων αστοχιών για την περιοχή της Βιρτζίνια (Virginia) [14]. Ειδικά, η εργασία είχε τους εξής σκοπούς: α) αναγνώριση των κυριοτέρων παραγόντων που επηρεάζουν τα οδοστρώματα του οδικού δικτύου της Βιρτζίνια, β) πειραματισμός ως προς διάφορες συναρτησιακές μορφές προτύπων για να διαπιστωθεί ποιά είναι η καταλληλότερη για τα δεδομένα που αφορούσαν στην περιοχή της Βιρτζίνια, γ) έλεγχος της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των προτύπων και εκτίμηση της όλης διαδικασίας προτυποποίησης.

Αρχικά έγινε κατηγοριοποίηση των οδικών τμημάτων με βάση την γεωγραφική τους θέση και τον τύπο του οδοστρώματος (δηλαδή σε εύκαμπτα χωρίς επανεπίστρωση, εύκαμπτα με επανεπίστρωση, ημιάκαμπτα με μία επανεπίστρωση, ημιάκαμπτα με παραπάνω από μία επανεπίστρωση. Η κατηγοριοποίηση οδήγησε στην δημιουργία δέκα ομάδων και με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατό να μελετηθούν διαφορές στην τάση για αστοχία καθώς στις ομάδες αυτές επικρατούσαν διαφορετικές κλιματολογικές και εδαφικές συνθήκες και επιπλέον διαφορετικοί τύποι οδοστρωμάτων. Ως εξαρτημένη μεταβλητή χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης DMR (Distress Maintance Rating), ενώ οι ανεξάρτητες μεταβλητές καθορίστηκαν ανάλογα με τον τύπο των οδοστρωμάτων. Για τα εύκαμπτα με επανεπίστρωση ήταν οι α) η ηλικία του οδοστρώματος (AGE), β) το πάχος της επανεπίστρωσης (DEPTH), γ) ο αριθμός δομικής αντοχής (STRUCTURAL NUMBER) και δ) ο μέσος αριθμός ισοδύναμων απλών αξόνων σε εκατομμύρια (YESAL). Για τα εύκαμπτα χωρίς επανεπίστρωση όλες οι παραπάνω εκτός του πάχους, ενώ για τα ημιάκαμπτα εκτός του αριθμού κατασκευής. Για να ληφθεί υπόψη η κατηγοριοποίηση εισήχθησαν τέσσερις μεταβλητές dummy, που αφορούσαν στον κυκλοφοριακό φόρτο ανάμεσα στις λωρίδες κυκλοφορίας, στον αριθμό λωρίδων ανά

κατεύθυνση και οι υπόλοιπες δύο που είχαν να κάνουν με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής που βρίσκονταν τα οδικά τμήματα.

Το επόμενο βήμα ήταν να επιλεγούν οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιούνταν στην ανάλυση. Αυτό επετεύχθη με ανάστροφη ανάλυση παλινδρόμησης σε ένα υποθετικό γραμμικό πρότυπο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλες οι μεταβλητές ήταν σημαντικές, αλλά επιπλέον διαπιστώθηκε ότι το γραμμικό πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε έδινε ικανοποιητικές προβλέψεις. Κατόπιν εξετάστηκαν δύο συναρτησιακές μορφές, η εκθετική και η σιγμοειδής. Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σιγμοειδές πρότυπο φαίνεται να προσαρμόζεται λίγο καλύτερα στα δεδομένα, αλλά είναι πιο δύσκολο στην εφαρμογή του εν συγκρίσει με το εκθετικό πρότυπο. Τέλος, εξετάστηκαν δύο μέθοδοι για την διόρθωση - προσαρμογή των προτύπων στα δεδομένα από τα οποία δημιουργήθηκαν. Σύμφωνα με την πρώτη (PAVER system), επιλύεται η εξίσωση του προτύπου για την μεταβλητή AGE που αντιστοιχεί στην τιμή του δείκτη DMR που παρατηρήθηκε από τις μετρήσεις. Οι μελλοντικές προβλέψεις γίνονται κατόπιν θεωρώντας ότι αυτή είναι η παρατηρούμενη τιμή της μεταβλητής AGE. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί έναν διορθωτικό συντελεστή, που είναι ο λόγος της αρχικής και θεωρητικής μείωσης του δείκτη DMR. Και οι δύο μέθοδοι φάνηκε να αποδίδουν το ίδιο.

Κατά το χρονικό διάστημα 1995-1997 διεξήχθη στο ευρύτερο οδικό δίκτυο της περιοχής του Riyadh μια έρευνα με σκοπό τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης και αποκατάστασης οδοστρωμάτων για το συγκεκριμένο οδικό δίκτυο [15]. Η έρευνα αυτή έγινε από την υπηρεσία Γενικής Διοίκησης της Λειτουργίας και Συντήρησης των οδοστρωμάτων (General Administration of Operation and Maintenance, GAOM), που είναι υπεύθυνη για τη συντήρηση και αποκατάσταση του δικτύου. Ειδικά η έρευνα είχε τους εξής σκοπούς: 1) τον καθορισμό των κυριότερων παραγόντων που επηρεάζουν την κατάσταση των οδοστρωμάτων του Riyadh, 2) τον πειραματισμό ως προς διάφορες συναρτησιακές μορφές προτύπων για να διαπιστωθεί ποιά είναι η καταλληλότερη για τα δεδομένα που αφορούσαν στην περιοχή του Riyadh, 3) τον έλεγχο της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των προτύπων και εκτίμηση της όλης διαδικασίας προτυποποίησης.

Αρχικά δημιουργήθηκε ένας συνδιαστικός δείκτης όλων των αστοχιών του τοπικού οδικού δικτύου. Αυτός ο δείκτης ονομάζεται urban distress index (UDI) κυμαίνεται από 0 έως 100, όπου το 100 αντιπροσωπεύει άριστη κατάσταση οδοστρώματος και υπολογίζεται με βάση το είδος της αστοχίας, την έκταση και σοβαρότητά της. Έπειτα εξακριβώθηκαν οι κύριοι τύποι αστοχιών που προκαλούν φθορά στο συγκεκριμένο δίκτυο, κατηγοριοποιήθηκαν σε πέντε γκρούπ (ρηγμάτωση, αυλάκωση, επιφανειακά βυθίσματα, επιφανειακές ανωμαλίες, και αστοχίες σε τμήματα που έχουν υποστεί συντήρηση), και τέλος για κάθε γκρούπ χωριστά τα αντίστοιχα οδικά τμήματα μπήκαν σε μία σειρά ανάλογα με το επίπεδο σοβαρότητας των αστοχιών (low, medium, high).

Το επόμενο στάδιο αφορούσε την δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, η οποία περιελάμβανε, εκτός από τα προαναφερθέντα δεδομένα, στοιχεία σχετικά με χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων (τύπος, ηλικία, κυκλοφορία, ύπαρξη ή μη συστήματος απορροής ομβρίων υδάτων) και σχετικά με το αν το τμήμα έχει υποστεί συντήρηση ή όχι. Η έρευνα τελικά περιορίστηκε μόνο σε εύκαμπτα οδοστρώματα.

Για την ανάλυση των δεδομένων ελέγχθηκαν μηχανιστικά (mechanistic), μηχανιστικά-εμπειρικά (mechanistic-empirical), πιθανοτικά (probabilistic) και εμπειρικά πρότυπα παλινδρόμησης (regression models). Τελικά, ως η καλύτερη λύση επελέγη ένα πρότυπο της τελευταίας μορφής, regression, γιατί είναι πρακτικό, εύκολο στη χρήση και είναι εύκολη η μορφοποίησή του ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα. Το πρότυπο έχει την εξής μορφή:

$$UDI = a + b * AGE^n + c * ADT + d * DR$$

όπου:

AGE = ηλικία οδοστρώματος (χρόνια)

n = 1 ή 2

ADT = μεταβλητή dummy, που αντιπροσωπεύει το επίπεδο κυκλοφορίας (0=low traffic level, 1=high traffic level)

DR = μεταβλητή dummy, που αντιπροσωπεύει την ύπαρξη ή μη συστήματος απορροής ομβρίων υδάτων (0= χωρίς σύστημα, 1= με σύστημα)

a, b, c, d = συντελεστές

Τελικά τρία διαφορετικά πρότυπα αναπτύχθηκαν για τρεις διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης:

- 1) Στρατηγική διαχείρισης που δεν περιλαμβάνει συντήρηση:

$$UDI = 87.8 + -0.410 * AGE^2$$

- 2) BRM (σφράγιση ρωγμών και βυθισμάτων)

$$UDI = 88.8 + -0.203 * AGE^2 + -4.140 * ADT + 4.981 * DR$$

- 3) Επανεπίστρωση.

$$UDI = 99.0 + -0.119 * AGE^2 + -2.250 * ADT + 0.713 * DR$$

Τέλος η επαλήθευση των παραπάνω προτύπων έδειξε κάποιες διαφορές μεταξύ των προβλεπόμενων και μετρηθέντων τιμών του δείκτη UDI, αλλά αυτές βρίσκονταν μέσα σε λογικά πλαίσια. Λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο και το κόστος που απαιτείται για τη συγκέντρωση εκ νέου στοιχείων σχετικών με την κατάσταση των οδοστρωμάτων, αυτά τα πρότυπα θεωρούνται αποδεκτά.

Στην έρευνα που ακολουθεί διερευνήθηκε το ζήτημα της εγκυρότητας των προτύπων που υπάρχουν στην βιβλιογραφία με το σκεπτικό ότι «πάσχουν» από «μεροληψία επιλογής» («selectivity bias») [5]. Το σκεπτικό ήταν ότι οι επιτόπου μετρήσεις για την συλλογή στοιχείων οδοστρωμάτων περιέχουν έναν μεγάλο αριθμό από μηδενικές τιμές, ενδεικτικό της απουσίας αστοχίας κατά την στιγμή της μέτρησης. Τα περισσότερα πρότυπα στην βιβλιογραφία είναι απλά πρότυπα παλινδρόμησης που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας μόνο στοιχεία μετρήσεων αστοχιών, οι οποίες βρίσκονται ήδη σε φάση έναρξης. Τα πρότυπα αυτά είναι στατιστικώς εσφαλμένα καθώς, όπως προαναφέρθηκε, «πάσχουν» από «μεροληψία επιλογής» εξαιτίας της μη τυχούσας επιλογής των στοιχείων προς ανάλυση για την ανάπτυξη των προτύπων.

Στην εργασία αυτή, εφαρμόστηκε μία δομημένη οικονομετρική προσέγγιση για την δημιουργία προτύπων έναρξης και εξέλιξης αστοχιών. Το πρότυπο έναρξης είναι διακριτό πρότυπο, ενώ το πρότυπο εξέλιξης συνεχές. Στο διακριτό πρότυπο η εξαρτημένη μεταβλητή είναι δείκτης μηδέν/μονάδα, δηλαδή εάν έχουμε έναρξη αστοχίας, ο δείκτης λαμβάνει την τιμή 1, ενώ σε αντίθετη περίπτωση την τιμή 0. Τα οδοστρώματα εκείνα που είχαν τιμή 1 συμπεριλαμβάνονταν στην ανάλυση για το πρότυπο εξέλιξης. Με αυτόν τον τρόπο, όμως, καθίσταται σαφές ότι το συνεχές

πρότυπο δημιουργείται μόνο από μετρήσεις οδοστρωμάτων που είχαν αυξημένο βαθμό αστοχίας. Επιλέγησαν οδοστρώματα με αυξημένο βαθμό αστοχίας καθώς ήταν πιο πιθανό να βρίσκονται ήδη σε φάση έναρξης αστοχίας σε σχέση με οδοστρώματα με μικρό βαθμό αστοχίας. Τα πρότυπα έχουν την γενική μορφή:

Πρότυπο έναρξης

$$Z_i^* = uw_i + u_i, \quad i = 1, \dots, N$$

$$Z_i = 1 \quad \text{εάν } Z_i^* > 0 \quad \text{και} \quad Z_i = 0 \quad \text{εάν } Z_i^* \leq 0$$

όπου:

Z_i^* = μεταβλητή που εκφράζει την έναρξη της αστοχίας

Z_i = δείκτης μεταβλητής

u = συντελεστές προς υπολογισμό

w = ανεξάρτητες μεταβλητές

u_i = σταθερός όρος

Πρότυπο εξέλιξης

$$Y_i = \beta X_i + \varepsilon_i, \quad \text{εάν } Z_i = 1$$

όπου:

Y_i = εξαρτημένη μεταβλητή που εκφράζει την έκταση της αστοχίας

B = συντελεστές προς υπολογισμό

X_i = ανεξάρτητες μεταβλητές

ε_i = σταθερός όρος

Για να αντιμετωπιστεί σε κάποιο βαθμό το πρόβλημα της «μεροληψία επιλογής», που δίνει προβληματικές τιμές για τους συντελεστές των μεταβλητών, τόσο στο πρότυπο έναρξης όσο και στο πρότυπο εξέλιξης, ακολουθήθηκε η διαδικασία κατά Heckman [16], η οποία πραγματοποιείται σε δύο βήματα: Πρώτα υπολογίζονται οι συντελεστές u με την μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood) και κατόπιν οι συντελεστές β με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Παρόλο που η διαδικασία κατά Heckman δίνει «αμερόληπτες» τιμές για τους συντελεστές (unbiased parameter estimates), υπάρχει συστηματικό λάθος στην εκτίμηση των συντελεστών του προτύπου εξέλιξης. Η καλύτερη μέθοδος, αλλά και πιο δύσκολη στην εφαρμογή, για

πιο αξιόπιστα αποτελέσματα αποτελεί η μέθοδος FIML (Full Information Maximum Likelihood) που υπολογίζει τους συντελεστές των δύο προτύπων ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας όλα τα στοιχεία.

Τα παραπάνω εφαρμόστηκαν σε στοιχεία που πάρθηκαν από την Παγκόσμια Τράπεζα και αφορούσαν σε αστοχίες από τη Βραζιλία οι οποίες κάλυπταν το χρονικό διάστημα μεταξύ 1975 και 1982. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο αριθμός δομικής αντοχής του οδοστρώματος (structural number), η υποχώρηση με επιβολή φορτίου 80 kN διπλού αξονικού φορτίου, το πάχος της ασφαλτικής στρώσης, ο ετήσιος αριθμός των ισοδύναμων αξόνων 80 kN ανά λωρίδα κυκλοφορίας και χρόνο και ο αριθμός τροχών που περνούν ανά μονάδα αντοχής του οδοστρώματος. Πέρα από το ότι εξετάστηκαν όλα όσα ειπώθηκαν προηγουμένως, επιπλέον μελετήθηκε εκτενώς και ένα άλλο φαινόμενο που συναντάται συχνά σε συστήματα πολλαπλών εξισώσεων: Το πρόβλημα των ενδογενών ανεξάρτητων μεταβλητών (endogeneity in explanatory variables). Αυτό συμβαίνει όταν το μετρημένο μέγεθος (π.χ. η αντοχή του οδοστρώματος) ενός τύπου αστοχίας περιλαμβάνεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή στα πρότυπα έναρξης ή εξέλιξης μιας άλλης αστοχίας. Στην εργασία το πρόβλημα των ενδογενών μεταβλητών διορθώθηκε με τη βοήθεια της μεθόδου των «instrumental» μεταβλητών.

Επεκτείνοντας την παραπάνω έρευνα, μία ομάδα ερευνητών εξέτασε την ενδεχόμενη εμφάνιση μη παρατηρούμενης ετερογένειας στα πρότυπα, που σχετίζεται με την επιλογή και χρησιμοποίηση ορισμένων στοιχείων για την δημιουργία των προτύπων [17]. Η ετερογένεια αναφέρεται στην παρουσία μη παρατηρούμενων παραγόντων που σχετίζονται με την κατασκευή καθ' αυτή, όπως η αλλαγή στην ποιότητα αυτής ή μεταβολή στα χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής. Εάν δεν διορθωθεί, τότε θα οδηγήσει σε «μεροληπτικές» εκτιμήσεις των συντελεστών των προτύπων. Η μη παρατηρούμενη ετερογένεια στα οδοστρώματα εκφράζεται με τον σταθερό όρο u_i (σταθερός όρος του προτύπου έναρξης), ο οποίος με τη σειρά του εκφράζει εκείνους τους παράγοντες που δεν προσδιορίζονται, αλλά ενισχύουν την τάση που έχει το οδόστρωμα για περαιτέρω ρηγμάτωση. Και επειδή, όπως αποδείχτηκε κατά την ανάλυση των στοιχείων, ο σταθερός όρος u_i του προτύπου έναρξης σχετίζεται με τον σταθερό όρο ε_i του προτύπου εξέλιξης, η επιρροή της ετερογένειας θα έχει έμμεσο

αντίκτυπο και στο πρότυπο εξέλιξης ρηγματώσης. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την χρησιμοποίηση προτύπων τυχαίων επιπτώσεων.

2.3.3 Έρευνες με Δοκιμές Επιταχυνόμενης φόρτισης (ALT)

Η χρήση πειραματικών στοιχείων για την ανάπτυξη προτύπων έχει τα εξής πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με τα στοιχεία που συλλέγονται από έρευνες σε εν λειτουργία οδοστρώματα [18] :

- **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 επίδραση 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 έναν 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 διαμέσου της αλληλεπίδρασης 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 [16]. 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 την 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 έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω) 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 στην 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 ίδιου προγράμματος πραγματοποιήθηκε έρευνα για τον καθορισμό των κατάλληλων στατιστικών προτύπων και της συνάρτησης πιθανοτικής κατανομής (probability distribution function) του χρόνου μέχρι την φθορά των οδοστρωμάτων [19]. Ο καθορισμός αυτής της συνάρτησης είναι ουσιώδης για την ανάπτυξη των προτύπων αστοχιών, γιατί αντικατοπτρίζει την 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, AASHTO Road Test), πραγματοποιήθηκε στο τέλος της δεκαετίας του 1950 και είχε ως στόχο την δημιουργία προτύπων πρόβλεψης αστοχιών οδοστρωμάτων [20]. Οι δοκιμές επιταχυνόμενης φόρτισης έλαβαν χώρα σε μια 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 Ηνωμένων Πολιτειών. Έτσι, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, εκτιμήθηκε μόνο ένα υλικό για την υπόβαση, καθώς και μόνο μία κλιματική ζώνη. Επίσης, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των υπολοίπων στρώσεων στο οδόστρωμα διατηρήθηκαν σταθερές για όλα τα πειραματικά τμήματα και συνεπώς δεν ήταν 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 στην δημιουργία μαθηματικών συναρτήσεων που έχουν ως σκοπό να προβλέπουν μια 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 παρακάτω 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 ($L_2 = 1$ 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 οδοστρώματος που βρίσκεται υπό μελέτη. Έτσι, το παραπάνω πρότυπο, έπειτα από την εφαρμογή του σε άλλες σχετικές έρευνες, έδειξε ότι υπερεκτιμά την διάρκεια ζωής των άκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς και ότι παρουσιάζει σημαντικά λάθη στον υπολογισμό των συντελεστών των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Η εργασία που ακολουθεί [21], είχε ως στόχο την 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 μια βάση δεδομένων με στοιχεία, τα οποία συλλέχθηκαν από δοκιμές σε εγκατάσταση επιταχυνόμενης φόρτισης. Τα στοιχεία αυτά αφορούσαν κλιματολογικά, κατασκευαστικά, κυκλοφοριακά κ.ά δεδομένα. Η

στατιστική ανάλυση της βάσης δεδομένων βασίστηκε στη χρήση πιθανοτικών παραμετρικών προτύπων χρονικής διάρκειας.

Ένα σύνηθες 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 τον λόγο αυτό δεν είναι εύκολο να καταγραφεί ο ακριβής χρόνος που πρωτοεμφανίζεται μια αστοχία. Έτσι, κάποια υπό μελέτη τμήματα θα έχουν ήδη αστοχήσει πριν από τη μέρα 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 στην διαδικασία της στατιστικής εκτίμησης των παραμέτρων του προτύπου.

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

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

όπου:

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

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

Το παραπάνω 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.

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'ότι προέβλεψε το αυθεντικό πρότυπο.

2.4 Συμπεράσματα

Κλείνοντας την βιβλιογραφική αναφορά θα πρέπει να επισημανθούν τα εξής: το κυριότερο ίσως στοιχείο που βοηθά στην 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. Είναι, επίσης, σημαντικό η βάση δεδομένων να καλύπτει ένα ευρύ φάσμα περιοχών (ή ακόμη και χωρών), ώστε τα παραγόμενα πρότυπα πρόβλεψης αστοχιών να βρίσκουν εφαρμογή, όσο αυτό μπορεί να γίνει, 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 σε άλλες περιοχές, απλά εισάγοντας στα πρότυπα τις υπάρχουσες συνθήκες, κυκλοφοριακές, κλιματολογικές, εδαφικές κ.ά. Το πρόβλημα που εντοπίστηκε στις προηγούμενες εργασίες είναι ότι τα πρότυπα πρόβλεψης, εφόσον δημιουργούνταν με στοιχεία συγκεκριμένων περιοχών, αδυνατούσαν να καλύψουν τις ανάγκες για πρόβλεψη αστοχιών μιας διαφορετικής περιοχής, πόσο μάλλον μιας χώρας.

Σε ό,τι αφορά στην επεξεργασία και στην τελική επιλογή των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών, τα πράγματα είναι ξεκάθαρα. Σημαντικό ρόλο παίζουν οι εξής 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 οδικών δικτύων δεκαπέντε χωρών της Ευρώπης. Αυτά έχουν να κάνουν με στοιχεία μετρήσεων διαφόρων τύπων αστοχιών, κυκλοφοριακά, κλιματολογικά, κατασκευαστικά και ιστορικά στοιχεία. 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 του PARIS ήταν διαθέσιμη και η μετέπειτα επεξεργασία βασίστηκε σε αυτή. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3) ακολουθεί πληρέστερη ανάλυση πάνω στο πρόγραμμα PARIS, που αποτελεί μία οργανωμένη προσπάθεια δεκαπέντε ευρωπαϊκών χωρών (συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας) 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 εξεύρεση τέτοιων προτύπων είναι πολύ σημαντική, δεδομένου ότι αποτελούν πολύ σημαντικά στοιχεία για τα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων (pavement management systems) μιας και ο σκοπός τους είναι να προβλέπουν τη χρονική στιγμή που ένα συγκεκριμένο τμήμα οδικού δικτύου 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** αποτελείται 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 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 προτύπων 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 ποιον τρόπο η αστοχία εξελίσσεται τόσο σε σχέση με το χρόνο (time) όσο και με το 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).

Μία 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 ωφέλη από αυτή την έρευνα σε ότι αφορά τη διαχείριση οδοστρωμάτων είναι παρακάτω: Τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα σε καθημερινή βάση. Απαιτούν μόνο εισαγωγή παραμέτρων (input parameters) που είναι άμεσα διαθέσιμες στον διαχειριστή του έργου (pavement manager). Επιπλέον, τα πρότυπα περιγράφουν την εξέλιξη των αστοχιών, κάτι που είναι μεγάλης σημασίας σε ό,τι αφορά στον 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. Πιο συγκεκριμένα το PARIS αποσκοπούσε στα 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 (in-service road sections) 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 παρεχομένων οικονομικών πόρων, οι οποίοι είχαν προδιαγραφεί από το 4^ο Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης της Ευρωπαϊκής Κοινότητας. Το πρόγραμμα έπρεπε να ολοκληρωθεί εντός του προσδιορισμένου προϋπολογισμού και της δεδομένης χρονικής περιόδου των δύο ετών. Οι κύριες συνέπειες των παραπάνω ήταν οι εξής:

- Με σκοπό την ολοκλήρωση των στόχων του προγράμματος εντός της περιόδου των δύο ετών, 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 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.

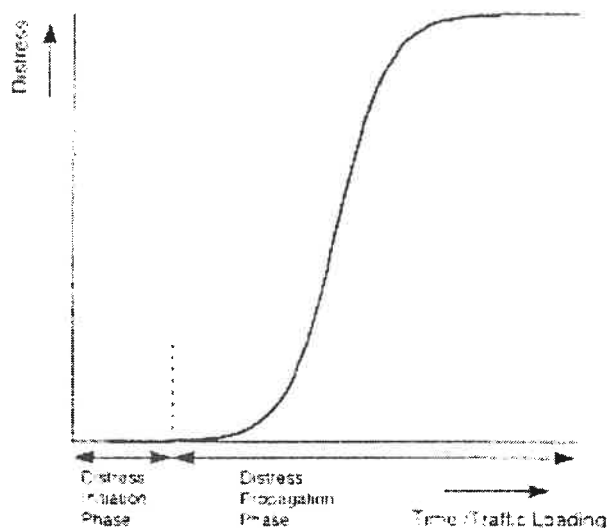
- Το πρόγραμμα περιορίστηκε στη μελέτη μόνο εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων.

Η ανάπτυξη των προτύπων βασίστηκε στην ανάλυση της εξέλιξης αστοχιών σε έναν μεγάλο αριθμό τμημάτων στην Ευρώπη και αξιολογώντας τα αποτελέσματα από διάφορα τμήματα ALT σε εγκαταστάσεις πλήρους κλίμακας. 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. Κατ' αρχάς 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 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.



Σχήμα 3.1: Γενική μορφή εξέλιξης αστοχίας [22].

Η στιγμή της πρώτης εμφάνισης αστοχίας εξαρτάται από το επιβαλλόμενο φορτίο (κυκλοφοριακό και κλιματολογικό) στο οδόστρωμα καθώς και από την αντοχή του τελευταίου στα παραπάνω φορτία. Έτσι, λοιπόν, 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, η περαιτέρω ανάπτυξη της αστοχίας θα πρέπει να αναλυθεί. Με βάση τα παραπάνω, οι ανεξάρτητες μεταβλητές (explanatory variables) του προτύπου έναρξης θα είναι το επιβαλλόμενο φορτίο και η αντοχή σε αστοχία. Το επιβαλλόμενο φορτίο είναι λόγω κυκλοφορίας, ενώ μετρήσεις υποχωρήσεων (deflection data) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηρίσουν την αντοχή σε ρηγμάτωση. Παρόλα αυτά, για τους υπόλοιπους τύπους αστοχιών δεν είναι τόσο σημαντική η φάση της έναρξης για να αξιολογηθούν από ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης οδοστρωμάτων. Επομένως, αναπτύχθηκε πρότυπο έναρξης αστοχίας μόνο σε ό,τι αφορά στην 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 τους σε συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων, τα προτύπα που αναπτύχθηκαν είναι πολύ

πρακτικά. Αυτό σημαίνει ότι πολύ λίγες μεταβλητές περιλαμβάνονται στα προτύπα, και οι οποίες είναι εύκολο να συλλεχθούν από τον διαχειριστή του έργου.

3.3 Προέλευση των Δεδομένων

Τα προτύπα αστοχιών οδοστρωμάτων 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 είναι τμήματα του εθνικού οδικού δικτύου της εκάστοτε χώρας και υπόκεινται σε φορτίσεις λόγω κυκλοφοριακών και κλιματολογικών συνθηκών. Τέτοια τμήματα ονομάζονται **Πραγματικού Χρόνου (Real-Time Loading Testing RLT)**. Οι αστοχίες που παρατηρήθηκαν σε αυτά τα τμήματα είναι περιορισμένης έκτασης και/ή σοβαρότητας, μιας και για την ασφάλεια του χρήστη του δικτύου, οι αρχές έχουν φροντίσει να γίνονται οι απαραίτητες εργασίες συντήρησης/αποκατάστασης όταν προσεγγίζεται ένα δεδομένο επίπεδο αστοχίας. Για να μπορέσουν να παρατηρηθούν και αστοχίες πέρα από το φυσιολογικό επίπεδο επέμβασης, χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα από **Εγκαταστάσεις Επιταχυνόμενης Φόρτισης (Accelerated Loading Testing ALT)**. Στις εγκαταστάσεις αυτές και στα ειδικά κατασκευασμένα αυτών τμήματα, εφαρμόζονται μεγαλύτερες από το κανονικό φορτίσεις από κυκλοφορία (heavy wheel loads) για την παρακολούθηση της εξέλιξης των αστοχιών.

Η εξέλιξη των αστοχιών σε ένα σύνθητες οδικό δίκτυο συμβαίνει με αρκετά αργό ρυθμό. Αυτό σημαίνει ότι για την ανάπτυξη προτύπων κόπωσης οδοστρωμάτων από 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 στην μελέτη δεδομένα κοπώσεων που συγκεντρώθηκαν από τα υπό μελέτη τμήματα μόνο κατά τη διάρκεια αυτών των ετών. Συνεπώς ένα βασικό κριτήριο για την επιλογή των κατάλληλων οδικών τμημάτων για το πρόγραμμα αποτέλεσε 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, λοιπόν, 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. Έπειτα έγινε διαχωρισμός ως προς τον τύπο του οδοστρώματος των διαφόρων τμημάτων, σε εύκαμπτα (flexible) και ημιάκαμπτα (semi-rigid). Εύκαμπτα (flexible) οδοστρώματα ορίστηκαν οι κατασκευές με μία ή περισσότερες ασφαλικές στρώσεις (asphalt layers) που εδράζονται πάνω σε βάση από κοκκώδες υλικό (granular base) και εν συνεχεία πάνω σε εδαφικό υλικό (subgrade). Εύκαμπτα ορίστηκαν και τα οδοστρώματα στα οποία δεν παρεμβαλλόταν βάση. Ημιάκαμπτα (semi-rigid) ορίστηκαν εκείνα που η ασφαλική 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.

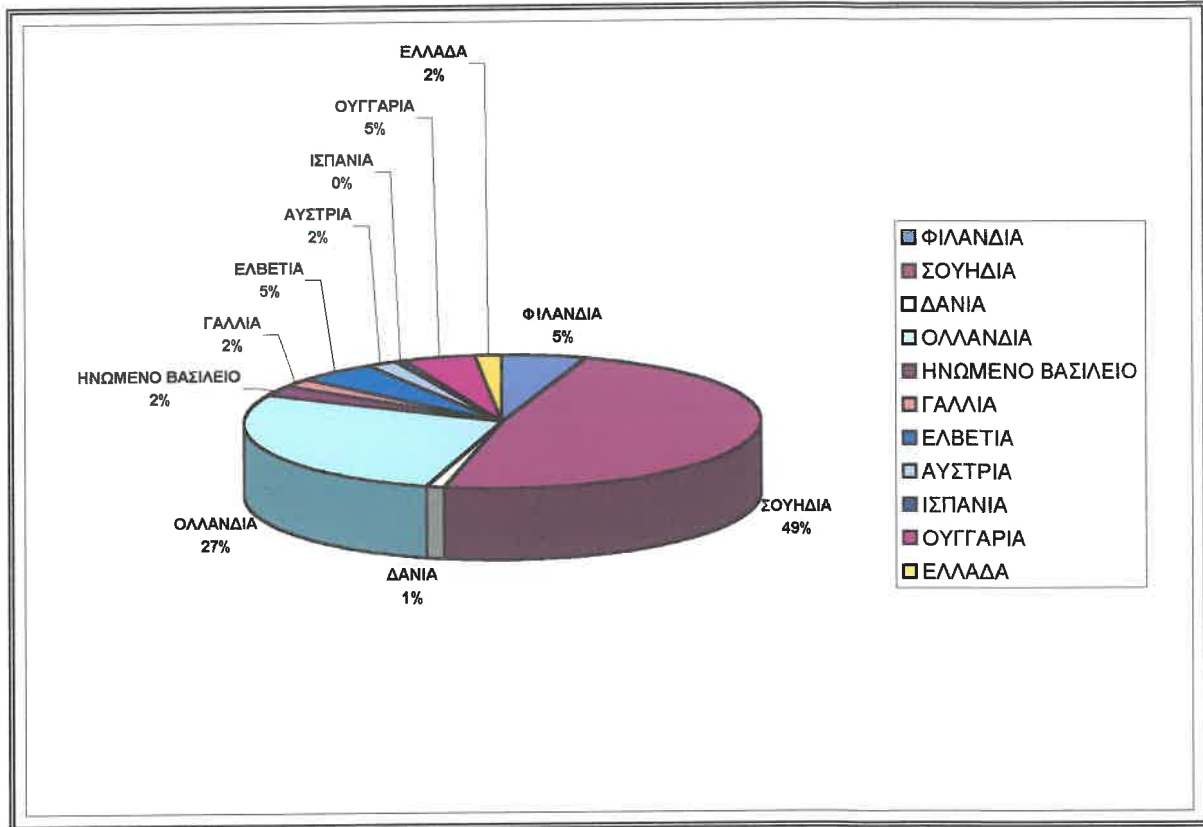
Χώρα	Εύκαμπτα	Ημιάκαμπτα	Σύνολο
Φιλανδία	33	0	33
Σουηδία	296	0	296
Δανία	7	0	7
Ολλανδία	168	37	205
Ηνωμένο Βασίλειο	15	13	28
Γαλλία	12	10	22
Ελβετία	31	5	36
Αυστρία	12	0	12
Ισπανία	3	7	10
Ουγγαρία	28	33	61
Ελλάδα	10	0*	10
Σύνολο	615	105	720

Πίνακας 3.1: Αριθμός τμημάτων RLT ανά χώρα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των προτύπων [22].

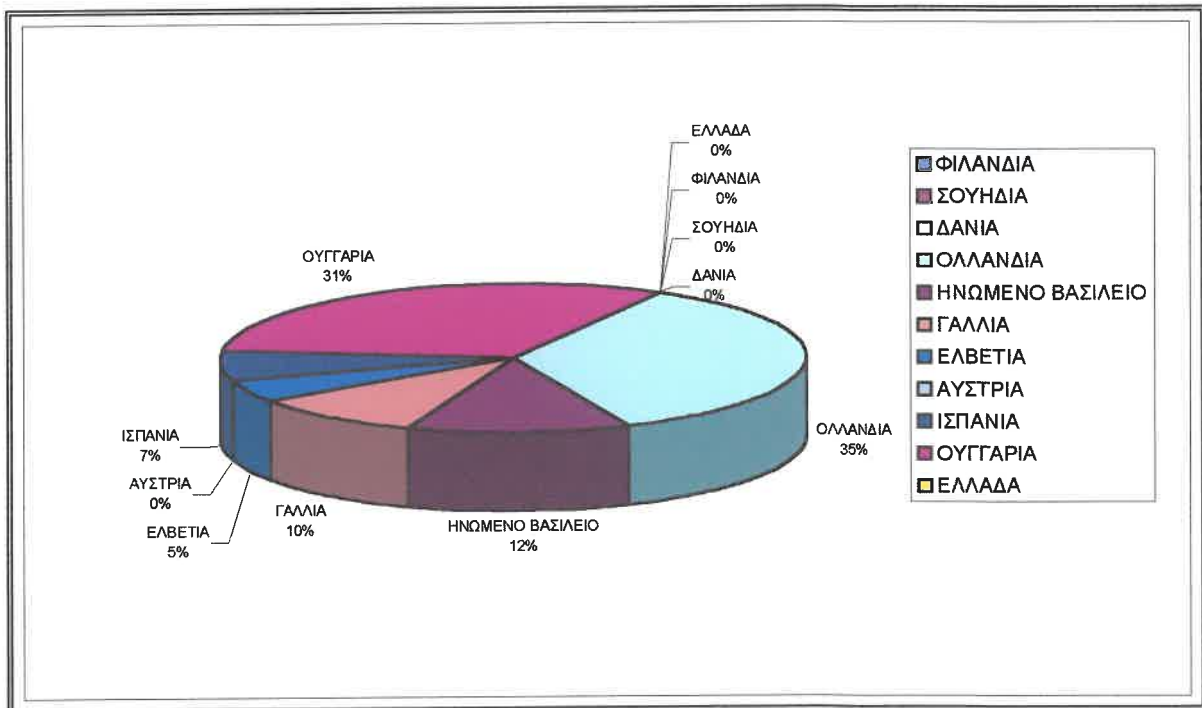
* Σημείωση: Ημιάκαμπτα οδοστρώματα υπάρχουν στην Ελλάδα, αλλά δεν διατέθηκαν στο πρόγραμμα αντίστοιχα οδικά τμήματα

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

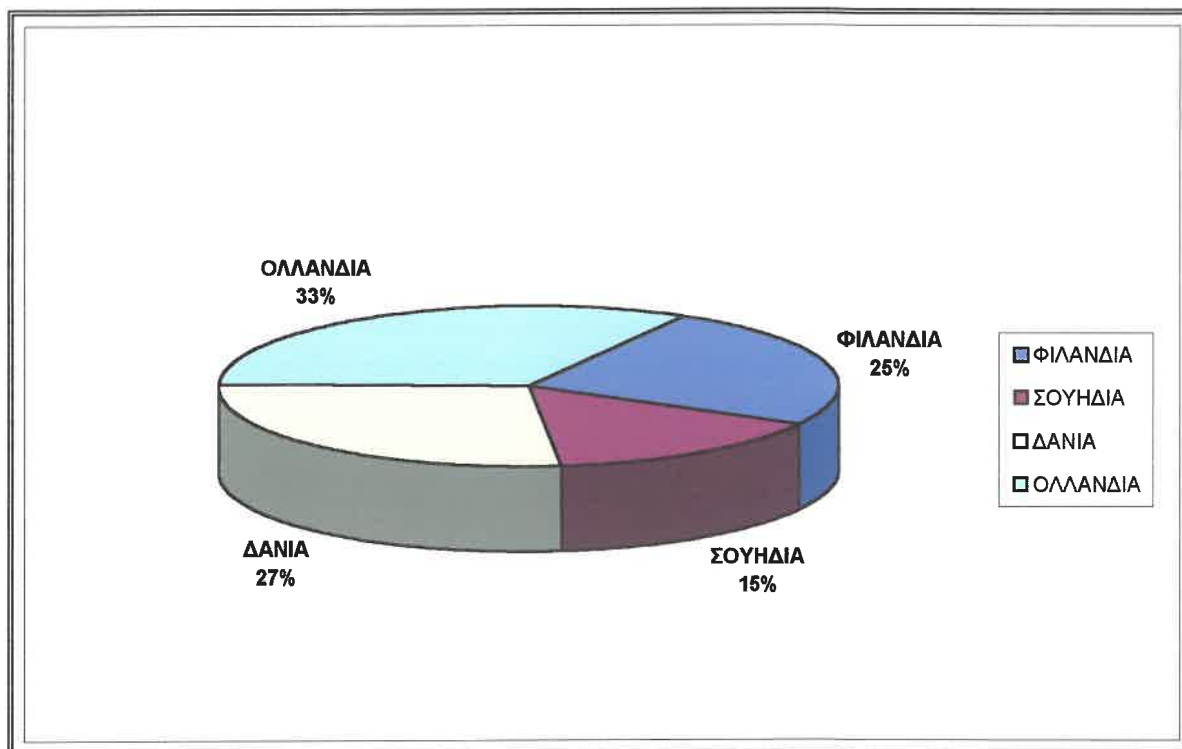
Πίνακας 3.2: Αριθμός τμημάτων RLT ανά χώρα που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των προτύπων [22].



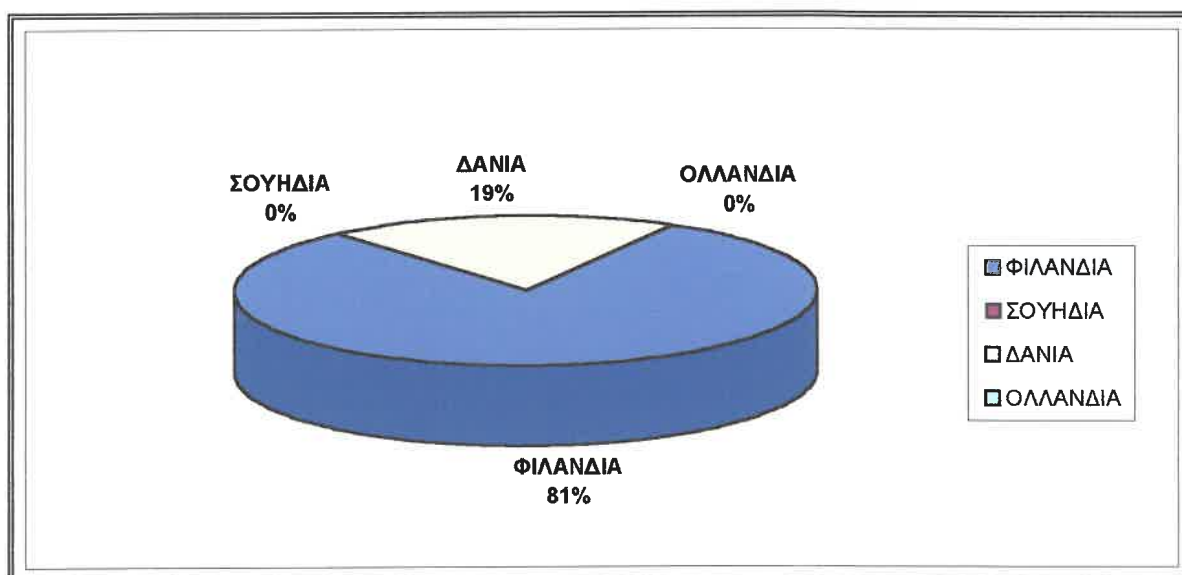
Γράφημα 3.1: Εύκαμπτα οδοστρώματα για την δημιουργία των προτύπων.



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, μέχρις 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 δακτυλιοειδείς 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 δακτυλιοειδείς λωρίδες μπορεί να έχουν από έναν έως τέσσερις τομείς με διαφορετικούς τύπους οδοστρωμάτων.

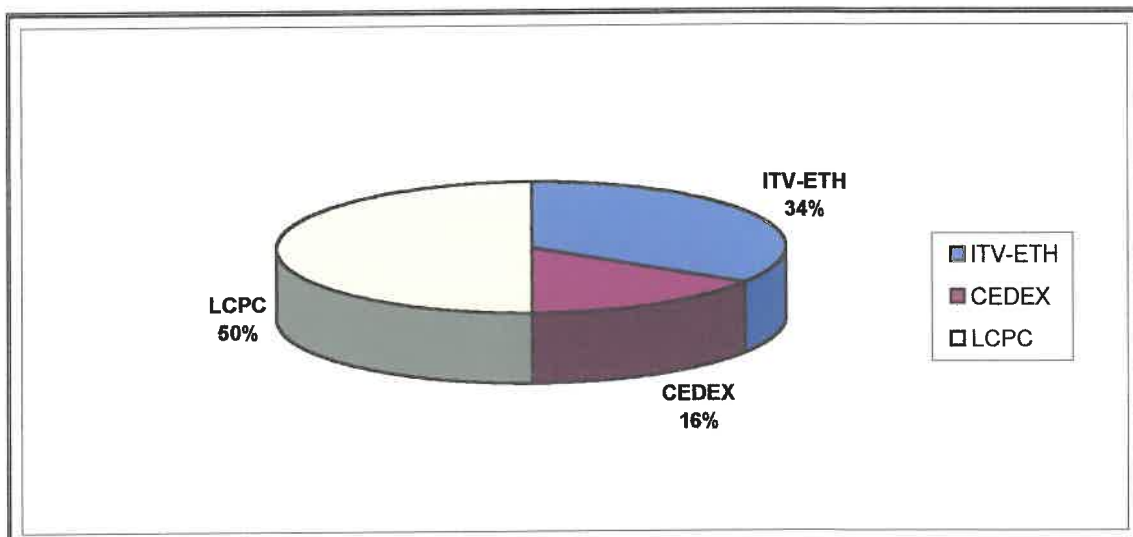
Η εγκατάσταση με κωδικό CEDEX στην πόλη Μαδρίτη της Ισπανίας είναι σχήματος οβάλ με δύο ευθείς τομείς που συνδέονται μεταξύ τους με δύο ημι-δακτυλιοειδείς τομείς. Κάθε ευθύς τομέας έχει μήκος περίπου 75 μ και κάθε λωρίδα έχει συνολικό μήκος 304 μ . Εξαιρώντας την μεταβατική ζώνη, μεταξύ ευθέων και δακτυλιοειδών 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 δακτυλιοειδούς μορφής και η κατασκευή του οδοστρώματος στην πειραματική λωρίδα είναι ημι-άκαμπτη, με πλάτος 2 μ , πάχος 2 μ , και μέση διάμετρο 32 μ .

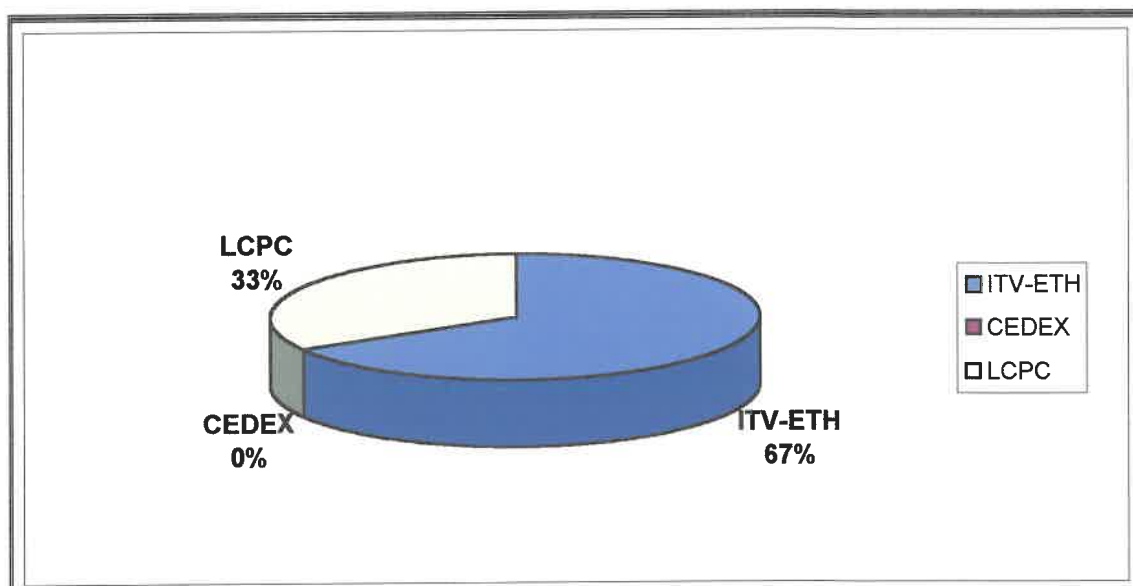
Δεδομένα από ένα σύνολο σαράντα τεσσάρων κατασκευών που υποβλήθηκαν σε δοκιμή στις παραπάνω εγκαταστάσεις ALT συμπεριλήφθηκαν στο πρόγραμμα PARIS. Ανάλυση αυτών των δεδομένων έγινε για δύο τύπους κοπώσεως : αυλακώσεις και ρηγματώσεις. Δεδομένα για ομαλότητα κατά μήκος δεν είναι δυνατό να συλλεχθούν σε μελέτες ALT, γιατί οι πειραματικοί τομείς είναι γενικά περιορισμένου μήκους και οι μετρήσεις δεν είναι εφαρμόσιμες σε δακτυλιοειδή τμήματα. Επίσης δεδομένα σχετικά με την εξέλιξη της αποκόλλησης ασφαλτικού υλικού δεν ήταν διαθέσιμα. Παρακάτω ακολουθούν πίνακες και γραφήματα αντίστοιχα των τμημάτων ALT.

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

Πίνακας 3.3: Αριθμός τμημάτων ALT ανά εγκατάσταση [22].



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 ρηγματώσεων (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 προορίζονταν για χρήση στην καθημερινή πρακτική της διαχείρισης των οδοστρωμάτων.

3.5 Κανονικοποίηση Δεδομένων

Η συλλογή των στοιχείων οδοστρωμάτων που συμπεριλήφθηκαν 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 και 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

Όπως ήδη ειπώθηκε στην αρχή του προγράμματος τα στοιχεία που είχαν συλλεχθεί από τα τμήματα, αποθηκεύτηκαν σε βάσεις δεδομένων από κάθε χώρα ξεχωριστά. Η δομή αυτών ήταν διαφορετική μεταξύ τους, όπως και το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία τους. Για να καθίσταται εύκολη και γρήγορη πρόσβαση στα στοιχεία που αφορούσαν στα 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 χειριστεί κανείς περιβάλλον.

Η βάση PARIS αποτελείται από στοιχεία και μετρήσεις που αφορούν στα τμήματα ALT καθώς και τα τμήματα RLT, 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 περιγραφή τους [22].

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 τη διάρκεια της δοκιμής
- Βροχόπτωση

- Κατασκευαστικά στοιχεία
 - Αριθμός αναγνώρισης
 - Τύπος επιφάνειας
 - Πάχος επιφανειακής στρώσης
 - Πάχος ασφαλικών 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 100 kN).

- 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 (transverse wheelpath cracking TWP) και την αλλιγοροική 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), 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 Παραμορφοσίμετρο 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. Επίσης η ανάλυση των στοιχείων ALT απαιτήσε διαφορετική προσέγγιση από αυτή των στοιχείων RLT. Η μεθοδολογία της ανάλυσης αναπτύχθηκε παράλληλα με τη διαδικασία συλλογής δεδομένων, έτσι ώστε αμέσως μετά την ολοκλήρωση της τελευταίας να προχωρούσε η διαδικασία. Για τα στοιχεία RLT η μεθοδολογία της ανάλυσης ακολούθησε τα εξής βήματα: 1) αναγνώριση εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών, 2) ανάλυση των μεταβλητών ανεξάρτητα (univariate analysis), 3) ανάλυση ζευγαριών μεταβλητών για έλεγχο συσχέτισης τους (bivariate analysis), και 4) 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 3.5 δείχνει τις ανεξάρτητες και εξαρτημένες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση προτύπου για έναρξη και ο 3.6 για εξέλιξη των διαφόρων αστοχιών. Ο πίνακας 3.5 δείχνει ότι στοιχεία RLT ήταν διαθέσιμα για όλους τους τύπους αστοχιών. Τα

στοιχεία ALT χρησιμοποιήθηκαν ούτως ώστε να επιλεγεί το κατάλληλο μαθηματικό πρότυπο για τη 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 ημιακάμπτων οδοστρωμάτων	X		Ηλικία	Πάχος ασφαλτικών, κλίμα, αντοχή & πάχος δύσκαμπτων στρώσεων

Πίνακας 3.5: Εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την προτυποποίηση της έναρξης ρηγμάτωσης [22].

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 ημιακάμπτων οδοστρωμάτων	X		Έκταση και σοβαρότητα ρηγμάτωσης	Κλίμα, Κυκλοφορία / ηλικία
Αυλάκωση	X	X	Βάθος αυλάκωσης	Κυκλοφορία / ηλικία
Κατά μήκος ομαλότητα	X		Τραχύτητα	Κυκλοφορία / ηλικία
Αποκόλληση ασφαλτικού υλικού	X		Έκταση και σοβαρότητα ρηγμάτωσης	Κυκλοφορία / ηλικία

Πίνακας 3.6: Εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την προτυποποίηση της εξέλιξης της ρηγμάτωσης [22].

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.

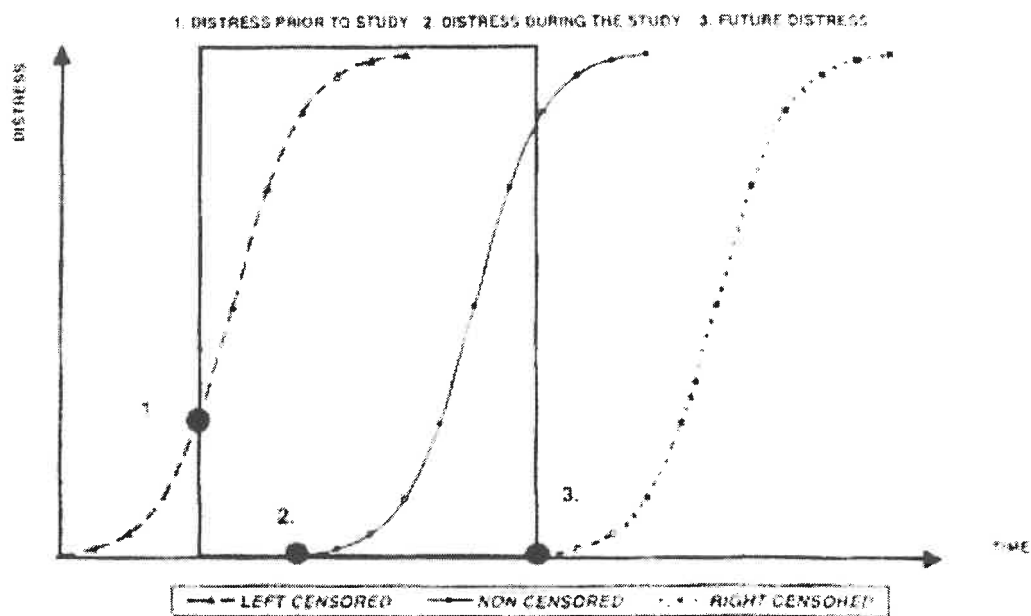
Η αρχική σκέψη για την προτυποποίηση της ρηγμάτωσης ήταν να αναπτυχθούν πρότυπα στο ίχνος (οφειλόμενο στην κυκλοφορία των οχημάτων) και σε όλη την επιφάνεια του οδοστρώματος (οφειλόμενο στην κυκλοφορία και στις κλιματολογικές συνθήκες). Όμως, τα στοιχεία κατέδειξαν ότι το κλίμα ήταν αιτία ρηγμάτωσης 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 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 τη έρευνα, ο χρόνος επιβίωσης είναι ο συνολικός αριθμός αξόνων μέχρι τη στιγμή της εμφάνισης της πρώτης ρηγμάτωσης στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Το σχήμα 3.2 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 [22].

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 γνωστό είναι ότι το συγκεκριμένο οδόστρωμα εμφάνισε ρηγματώσεις πριν πραγματοποιηθεί η πρώτη επιτόπου μέτρηση. Αυτές οι μετρήσεις ορίζονται ως αριστερής περικοπής (left censored) επειδή η πραγματική εμφάνιση της αστοχίας συνέβη «αριστερά» του χρόνου της πρώτης καταγραφής της (σημείο 1).

Απ' την άλλη μεριά, 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 δεξιάς περικοπής (right censored) επειδή ο πραγματικός χρόνος εμφάνισης 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 της αστοχίες που λαμβάνουν χώρα στα τμήματα με άμεσο τρόπο. Επιπλέον, περιέχουν σαφώς περισσότερες πληροφορίες εν συγκρίσει με τα στοιχεία RLT και δίνουν πιο ολοκληρωμένη εικόνα για της τύπους των αστοχιών, καθώς αυτές φθάνουν μέχρις του σημείου της πλήρους αστοχίας των οδοστρωμάτων. Επιπλέον, τα στοιχεία ALT περιέχουν πολύ πιο λεπτομερείς πληροφορίες από τα αντίστοιχα RLT.

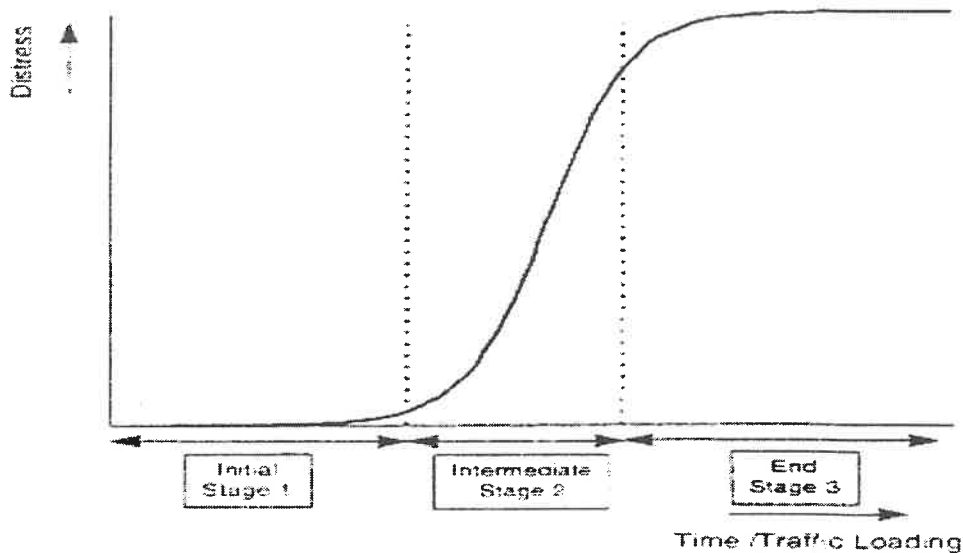
Κατά την προτυποποίηση της ρηγμάτωσης και αυλάκωσης, ο συνολικός αριθμός των ισοδύναμων τυπικών αξόνων (ESALs) ήταν η ανεξάρτητη μεταβλητή. Οι εξαρτημένες ήταν για τη ρηγμάτωση το ποσοστό του συνολικού μήκους του τμήματος που εμφάνισε ρηγματώσεις και για την αυλάκωση ήταν το βάθος της αυλάκωσης (σε mm). 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 3.3. Σε αυτό μπορούν να ξεχωρίσουν τρία στάδια : Αρχικό (initial, stage 1), ενδιάμεσο (intermediate, stage 2) και τελικό (end, stage 3). Με βάση τα παραπάνω, πρέπει να ληφθούν υπόψη 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 της 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. Και από τη στιγμή που εμφανίζεται να υπάρχει γραμμικότητα στα στοιχεία ALT στο στάδιο αυτό, η γραμμική συναρτησιακή μορφή επελέγη για την προτυποποίηση του φαινομένου της ρηγμάτωσης και της αυλάκωσης.



Σχήμα 3.3: Τα διαφορετικά στάδια στην εξέλιξη της αστοχίας [22].

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 κάθετων ανακλαστικών ρηγματώσεων στα ημιάκαμπα οδοστρώματα. Η έναρξη ρηγματώσεως στο ίχνος ορίζεται ως η πρώτη εμφάνιση (ελάχιστο μήκος 0.5 m) κατά μήκος (longitudinal), εγκάρσιας (transverse) ή αλλιγοροειδούς (alligator) ρωγμής. Η έναρξη ρηγματώσεως 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 Εύκαμπα οδοστρώματα (flexible pavements)

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 κανκνικοποιήθηκαν σε θερμοκρασία αναφοράς 20°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).

Πρότυπο για μη περικομμένα στοιχεία (157 τμήματα)

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

Πρότυπο για όλα τα στοιχεία

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

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 κάποιοι 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:

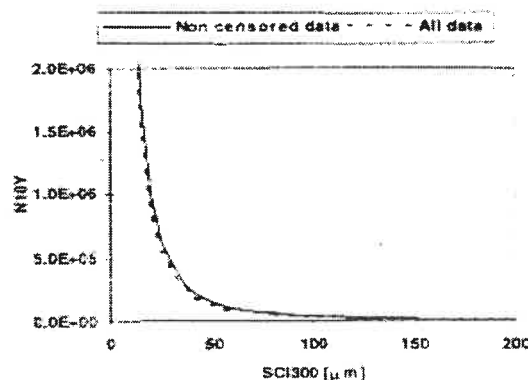
Ελάχιστο όριο εφαρμογής προτύπου για μη περικομμένα στοιχεία

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

Ελάχιστο όριο εφαρμογής προτύπου για όλα τα στοιχεία

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

Οι παραπάνω εξισώσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4. Μη λογικές τιμές μπορεί να προκύψουν όταν το μετρημένο 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 εφαρμογή των προτύπων έναρξης ρηγματώσεως σε εύκαμπτα οδοστρώματα [22].

3.10.2.2 Ημιάκαμπα 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 εύκαμπα οδοστρώματα. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η ανεξάρτητη μεταβλητή που περιγράφει την έναρξη ρηγματώσεων στα ημιάκαμπα 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 ($d_0 - d_{900}$). Ομοίως, επομένως, προέκυψαν δύο πρότυπα, για μη περικομμένα στοιχεία και όλα τα στοιχεία.

Πρότυπο για μη περικομμένα στοιχεία (33 τμήματα)

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

Πρότυπο για όλα τα στοιχεία

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

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, φυσικά, και οι ίδιοι περιορισμοί:

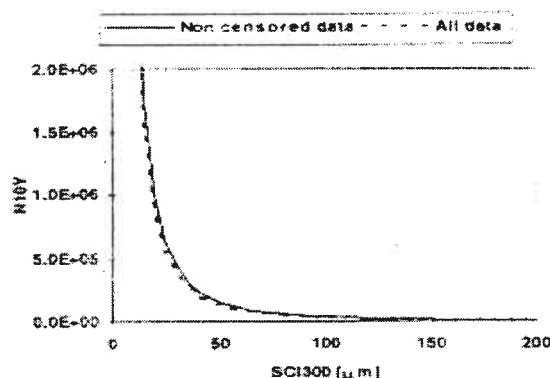
Ελάχιστο όριο εφαρμογής προτύπου για μη περικομμένα στοιχεία

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

Ελάχιστο όριο εφαρμογής προτύπου για όλα τα στοιχεία

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

Οι παραπάνω εξισώσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 3.5 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 [22].

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 ασφαλικής 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 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, οι σημαντικότερες μεταβλητές είναι ο δείκτης SCI_{300} και η ετήσια κυκλοφορία.
- Για τα ημιάκαμπτα, 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 ρηγματώσης 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, όμως, 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 μπορούν να εξαχθούν σχετικά με τα πρότυπα πρόβλεψης έναρξης εγκάρσιας ανακλαστικής ρηγματώσης:

- Η εγκάρσια ανακλαστική ρηγματώση δημιουργήθηκε πιο σύντομα σε οδοστρώματα με συνήθεις βάσεις σταθεροποιημένες με τσιμέντο σε σχέση με αυτά με βάσεις με καταργασμένες 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 της στρώσης αυτής.
- Οι συσχετίσεις των παραγόντων που επηρεάζουν την έναρξη της ρηγματώσης ήταν πολύ φτωχές σε όλες τις περιπτώσεις.

- Επίσης και η ανάλυση επιβίωσης απέτυχε να δημιουργήσει σχέσεις με καλή στατιστική συσχέτιση.

3.11 Πρότυπα Εξέλιξης Αστοχιών (distress propagation models)

3.11.1 Εισαγωγή

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, μέχρις του σημείου της πλήρους αστοχίας του οδοστρώματος. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρεται η ανάπτυξη προτύπων εξέλιξης για ρηγμάτωση, αυλάκωση, κατά μήκος ομαλότητα και αποκόλληση ασφαλτικού υλικού.

3.11.2 Ρηγμάτωση

3.11.2.1 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 χωριστά για εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα και για τμήματα με και χωρίς συντήρηση. Η ρηγμάτωση εκφράζεται ως Δείκτης Ρηγμάτωσης (Cracking Index) που υπολογίζεται ως εξής :

$$CI = 2 \cdot ACR + LCR + TCR$$

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) αλλιατορικής ρηγμάτωσης.

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

- 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 πληρούσαν τις παραπάνω προϋποθέσεις, ενώ από τα 143 εύκαμπτα και 10 ημιάκαμπτα οδοστρώματα που είχαν υποστεί συντήρηση, 38 και 1 συμπεριλήφθησαν στην ανάλυση. Πρότυπα για ρηγμάτωση στο ίχνος ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων δεν μπορούσαν να εξαχθούν.

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

$$y = A + B \cdot x$$

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 και την ηλικία οδοστρώματος και τον συνολικό αριθμό ESALs (100 kN), που ισούται με την ηλικία οδοστρώματος πολλαπλασιασμένη με τον ετήσιο αριθμό ESAL.

Κατόπιν εξετάστηκε η διασπορά των κλίσεων που προέκυψαν από κάθε τμήμα και βρέθηκε ότι αυτή ακολουθούσε λογαριθμική σχέση όταν η ανεξάρτητη μεταβλητή ήταν ο αριθμός MESALs (Millions of ESALs) και γραμμική όταν ήταν η ηλικία οδοστρώματος. Για παράδειγμα, όταν ο λογάριθμος της κλίσεως έχει την τιμή 2 σημαίνει ότι ο CI θα αυξηθεί κατά 100 όταν ο συνολικός αριθμός κυκλοφορίας αυξηθεί κατά ένα εκατομμύριο ESALs. Ομοίως τιμή κλίσεως ίση με 10, σημαίνει ότι ο CI με βάση την ηλικία οδοστρώματος θα αυξάνεται κατά 10 το χρόνο. Εντοπίστηκαν με αυτό τον τρόπο 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 με ή χωρίς συντήρηση στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων.

Με την παραπάνω 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	$\log_{10}(CI_{\text{slope,ESAL}}) =$ $\text{function}(\log_{10}(CR_{\text{ESAL}}))$	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} [22].

Τύπος οδοστρώματος	$CI_{slope,age} = \text{function } (CR_{age})$	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 του Δείκτη Ρηγμάτωσης, ανά έτος, συναρτήσει του CR_{age} [22].

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

CR_{ESAL}	=	Cracking Relationship με μεταβλητή ESAL
CR_{age}	=	Cracking Relationship με μεταβλητή age
CI_{last}	=	Δείκτης Ρηγμάτωσης κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση
$MESAL_{last}$	=	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

3.11.2.2 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. Όταν οι αντανακλαστικές ρηγματώσεις προτοεμφανίζονται στην επιφάνεια μιας οδού, μπορεί να μην επεκταθούν σε όλο το πλάτος του δρόμου, αλλά να διευρυνθούν με το χρόνο. Ο ρυθμός της εξέλιξής τους μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του χρόνου και/ή της κυκλοφορίας. Παρ'όλο που εξετάστηκαν αρκετές μεταβλητές για να διαπιστωθεί ποιές περιγράφουν καλύτερα την εξέλιξη της ρηγμάτωσης, εντούτοις τα στατιστικά αποτελέσματα ήταν μη σημαντικά, με

χαμηλούς δείκτες R^2 . Παρόλα αυτά, εξήχθησαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα, που δυστυχώς δεν μπορούσαν να ποσοτικοποιηθούν και να εκφραστούν με μαθηματικές σχέσεις.

3.11.2.3 Σχόλια

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

- Η γραμμική σχέση περιγράφει καλύτερα το φαινόμενο.
- Για κάθε τμήμα δρόμου, η κλίση του γραμμικού προτύπου μπορεί να υπολογισθεί από το βαθμό αστοχίας κατά την τελευταία μέτρηση υπαίθρου, χρησιμοποιώντας της 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 μία γραμμική σχέση μέχρις του σημείου που σχηματίστηκε ο μέγιστος αριθμός των ρωγμών.
- Το μήκος των ρωγμών φάνηκε να αυξάνεται γραμμικά μέχρις του σημείου που σχηματίστηκε ο μέγιστος αριθμός των ρωγμών. Κατά συνέπεια, η αύξηση του μήκους έτεινε ασυμπτωτικά σε μία 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.

3.11.3 Αυλάκωση

3.11.3.1 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 οδοστρώματων δεν επηρεάζουν την εξέλιξη των αυλακώσεων συν τω χρόνω. Η ανάλυση βασίστηκε σε μέγιστα βάθη αυλακώσεων για την Ουγγαρία και σε βάθη αυλακώσεων εκτός του ίχνους των τροχών για όλες τις άλλες χώρες. Επίσης πραγματοποιήθηκε χωριστά για εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα.. Από τα 273 εύκαμπτα και 98 ημιάκαμπτα οδοστρώματα, 98 και 43 τμήματα πληρούσαν τις προϋποθέσεις και συμπεριλήφθησαν στην τελική ανάλυση.

Κατά τα άλλα, η ανάλυση που ακολουθήθηκε ήταν παρόμοια με αυτή για τη 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	$\log_{10}(\text{RD}_{\text{slope,ESAL}}) = \text{function}(\log_{10}(\text{RR}_{\text{ESAL}}))$	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 οδοστρώματων [22].

Τύπος οδοστρώματος	$\text{RD}_{\text{slope,age}} = \text{function}(\text{RR}_{\text{age}})$	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 οδοστρώματων [22].

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

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

3.11.3.2 Σχόλια

- Η γραμμική σχέση περιγράφει καλύτερα το φαινόμενο.
- Για κάθε τμήμα δρόμου, η έκταση της αυλάκωσης μπορεί να υπολογισθεί 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).

3.11.4 Ομαλότητα κατά Μήκος

Εδώ εξετάζεται η αλλαγή στην κατά μήκος ομαλότητα με το 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. Αυτός ο δείκτης ονομάζεται International Roughness Index (IRI), αναπτύχθηκε στη Βραζιλία στη δεκαετία του 80 και έχει ως μονάδα μέτρησης mm/m. Ο πίνακας 3.9 παρουσιάζει τον αριθμό των τμημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

Χώρα	Εύκαμπτα	Ημιάκαμπτα	Συνολικό ποσοστό ανά χώρα
Φιλανδία	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 [22].

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:

$$y = A + B \cdot x$$

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 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. Το ίδιο όμως δεν ισχύει και για την Ελλάδα, μιας και οι τιμές του IRI που υπολογίστηκαν εκεί ήταν αρκετά πιο μεγάλες απ'ότι στις άλλες χώρες. Συνεπώς τα στοιχεία για την Ελλάδα πρέπει να αναλυθούν χωριστά από των άλλων χωρών. Μια πιθανή εξήγηση για τις διαφορετικές τιμές από την Ελλάδα μπορεί να είναι ότι, στην Ελλάδα, ο IRI καθορίστηκε από τη συσκευή Bump Integrator ενώ στις άλλες χώρες από προφιλόμετρα (profilometers).

Όπως έγινε και για τους προηγούμενους τύπους αστοχιών, ένας μεγάλος αριθμός μεταβλητών χρησιμοποιήθηκε για να διαπιστωθεί ποιές έχουν επιρροή σε ό,τι αφορά στην μεταβολή του IRI. Η ανάλυση, όμως, δεν έδωσε απευθείας σχέση κάποιας μεταβλητής με τη μεταβολή του IRI. Παρόλα αυτά, διαπιστώθηκε ότι στα εύκαμπτα οδοστρώματα, οδικά τμήματα με μικρούς φόρτους είναι πιο επιρρεπή στο να μεταβάλλουν τον IRI.

3.11.5 Αποκόλληση Ασφαλτικού Υλικού

Η αποκόλληση ασφαλτικού υλικού από την επιφάνεια οδοστρωμάτων με ασφαλικές 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 κλιματολογικούς 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 λακκούβων με τις γνωστές συνέπειες.

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 3.10 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 [22].

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 ποιά θα μπορούσε να είναι η μορφή του προτύπου. Τελικά επελέγησαν δύο μορφές προτύπων, λογιστικό και γραμμικό, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

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

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 συν τω χρόνω. Επίσης, και για τους δύο τύπους προτύπων εξετάστηκε ποιες ανεξάρτητες μεταβλητές επηρεάζουν την κλίση B, αλλά καμία 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, Πορτογαλία και Σλοβενία και τα στοιχεία από αυτές δεν χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία ανάλυσης για την εξαγωγή των 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 αυτών τα οποία βρίσκονταν στη φάση έναρξης ρηγμάτωσης.

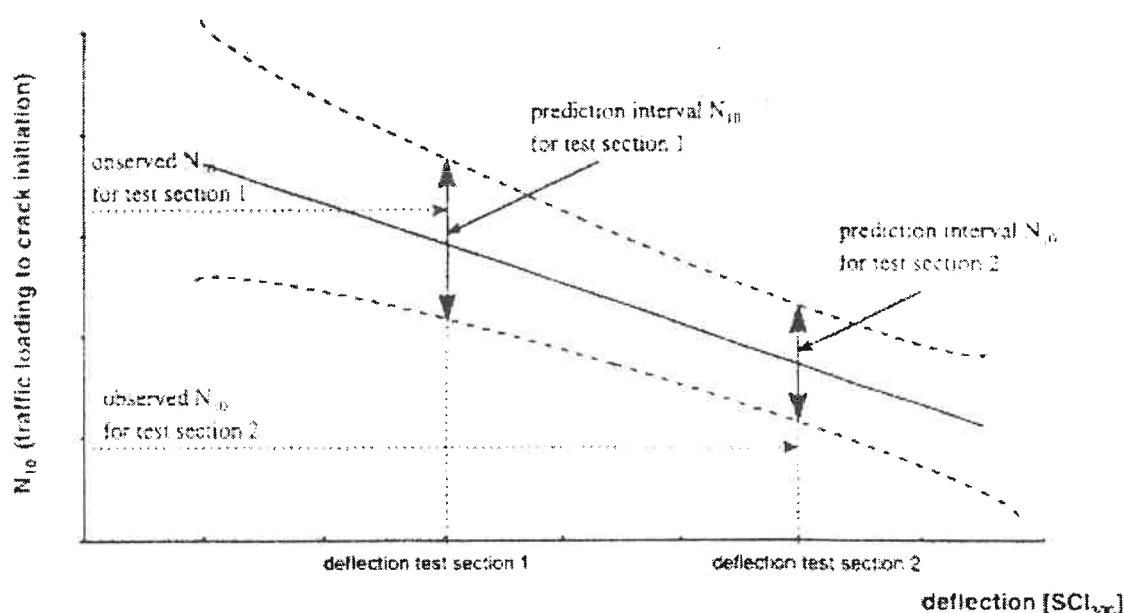
Η συνήθης διαδικασία για τον καθορισμό του έτους κατά το οποίο ένα οδικό τμήμα ξεκινά να ρηγματώνεται είναι η ετήσια επιθεώρηση του τμήματος, ξεκινώντας από μια χρονική στιγμή κατά την οποία το τμήμα δεν έχει ρηγματωθεί. Είναι εμφανές ότι αυτή η διαδικασία δεν μπορούσε να εφαρμοστεί για την αξιολόγηση των προτύπων του

PARIS, λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χρόνου. Έτσι η διαδικασία για τις τέσσερις χώρες περιελάμβανε αρχικά την επικοινωνία με τους διχειριστές 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 οι ρηγματώσεις να είχαν μήκος μικρότερο από 0.5m. Τέλος, 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 [22].

Η βασική αρχή για να επαληθευτούν τα πρότυπα έναρξης ρηγματώσεως 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 παρατηρούμενος αριθμός αξόνων βρίσκονται μέσα στα καθορισμένα όρια ανοχής. Το σχήμα 3.6 δείχνει ακριβώς τη λογική.



Σχήμα 3.6: Παρουσίαση της αρχής της διαδικασίας αξιολόγησης [22].

Το παραπάνω σχήμα δείχνει τη σχέση της ανεξάρτητης μεταβλητής SCI_{300} 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 βρίσκονται 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 3.12 εμφανίζει τα τμήματα που χρησιμοποιήθηκαν για αξιολόγηση ανά χώρα και τα οποία διέθεταν χρονοσειρές δεδομένων για κάποια

χρονική 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 [22].

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 ασφαλτικού 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 [22].

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 απ' 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. Γι' αυτό το λόγο, 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. Έτσι οι μόνες πληροφορίες που απαιτούνται για να “τρέξουν” τα πρότυπα είναι, για τα μεν έναρξης ο ετήσιος αριθμός τυπικών αξόνων και πληροφορίες για τις υποχωρήσεις, και για τα δε 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, έχει 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. Επιπλέον, οι τοπικές κατασκευαστικές πρακτικές και τα υλικά μπορεί να διαφέρουν από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο, στον οποίο είναι βασισμένα τα πρότυπα. Τέλος, 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.

Ο τρίτος 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, λοιπόν, λόγους τα πρότυπα του PARIS δεν πρέπει να εφαρμόζονται σε τοπικά συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων χωρίς προσεκτική αντιμετώπιση. Έτσι, κατά την εφαρμογή 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 ίδια, τα τοπικά στοιχεία έπρεπε να κανονικοποιηθούν σε κοινή βάση για να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση.
- Σχετικά με την κανονικοποίηση, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν να έρθουν οι πληροφορίες έκτασης και σοβαρότητας των αστοχιών σε κοινή ευρωπαϊκή βάση.
- Τα στοιχεία υποχωρήσεων που εκφράζονταν με τον Δείκτη Επιφανειακής Καμπυλότητας (Surface Curvature Index), μαζί με στοιχεία κυκλοφορίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλεφθεί η έναρξη ρηγματώσεων στο ίχνος. Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα ο SCI_{300} αποδείχτηκε ότι παράγει τα πιο ακριβή αποτελέσματα, ενώ για τα ημιάκαμπτα ο SCI_{900} .
- Σχετικά με την εξέλιξη των αστοχιών, αναπτύχθηκαν πρότυπα που προβλέπουν την περαιτέρω εξέλιξη των αστοχιών με ικανοποιητική ακρίβεια, χρησιμοποιώντας στοιχεία που είναι άμεσα διαθέσιμα στον μηχανικό.

- Η συναρτησιακή μορφή των παραπάνω προτύπων μπορεί 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 αυλάκωση, η εξέλιξη 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 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 συν τω χρόνω. Παρ'όλα αυτά, επειδή τα στοιχεία ήταν ελλιπή, δεν αναπτύχθηκε ένα πραγματικό ευρωπαϊκό πρότυπο.
- Για την επαλήθευση των προτύπων με στοιχεία τεσσάρων χωρών που δεν συμμετείχαν στην δημιουργία αυτών, το πρότυπο έναρξης ρηγματώσεων φάνηκε να εφαρμόζεται ικανοποιητικά σε τρεις απ' 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 οδικό δίκτυο, σε αναλογία με τα τμήματα που συμμετείχαν στην ανάλυση των έντεκα χωρών.
- Για την τέταρτη χώρα, στοιχεία τμημάτων δρόμου με μικρή κυκλοφορία ήταν διαθέσιμα. Το πρότυπο αποδείχτηκε ότι δεν εφαρμόζεται σωστά σε τέτοια τμήματα. Φαίνεται ότι κάποιος άλλος μηχανισμός οδηγεί στην ρηγμάτωση δρόμων με μικρή κυκλοφορία.

- 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

Η βάση δεδομένων που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την εξαγωγή των προτύπων του χρόνου της πρώτης εμφάνισης ρηγματώσεων (στο ίχνος των τροχών) στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, από την κατασκευή ή επανεπίστρωση-αποκατάστασή τους, είναι η βάση δεδομένων του PARIS. Πρόκειται για μια μεγάλη μεγέθους βάση, η οποία περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία τα οποία συλλέχθηκαν στα δύο χρόνια μελέτης του προγράμματος. Η βάση αυτή βρίσκεται υπό μορφή EXCEL και περιέχει τέσσερις πίνακες. Οι δύο από αυτούς περιλαμβάνουν στοιχεία για τα εύκαμπτα οδοστρώματα και οι άλλοι δύο για τα ημιάκαμπτα.

4.1.2 Περιγραφή της Βάσης Δεδομένων

Αρχικά γίνεται ο διαχωρισμός των τμημάτων των οδοστρωμάτων σε εύκαμπτα και ημιάκαμπτα. Κάθε τμήμα ενός οδοστρώματος σημειώνεται με έναν κωδικό της μορφής 121001. Τα δύο πρώτα ψηφία αντιπροσωπεύουν τον κωδικό της χώρας από την οποία προέρχεται το αντίστοιχο τμήμα. Το τρίτο ψηφίο δείχνει αν το συγκεκριμένο τμήμα είναι εύκαμπτο ή ημιάκαμπτο. Έτσι το ψηφίο 1 υποδηλώνει εύκαμπτο οδόστρωμα ενώ το ψηφίο 2 ημιάκαμπτο. Τα τρία τελευταία ψηφία χρησιμοποιούνται για την αρίθμηση του κάθε τμήματος. Το 001 είναι το πρώτο τμήμα της εκάστοτε χώρας κ.ο.κ.. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, τους προαναφερθέντες κωδικούς γίνεται διαχωρισμός στα δύο είδη οδοστρωμάτων και λαμβάνονται έτσι δύο πίνακες: Ένας για τα εύκαμπτα και ένας για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Αναλυτικότερα οι κωδικοί των επί μέρους συμμετεχόντων χωρών στο πρόγραμμα PARIS είναι οι εξής:

Κωδικός χώρας	Χώρα
<i>11</i>	<i>Φιλανδία</i>
<i>12</i>	<i>Σουηδία</i>
<i>13</i>	<i>Δανία</i>
<i>14</i>	<i>Ολλανδία</i>
<i>15</i>	<i>Αγγλία</i>
<i>16</i>	<i>Ιρλανδία</i>
<i>17</i>	<i>Βέλγιο</i>
<i>18</i>	<i>Γαλλία</i>
<i>19</i>	<i>Ελβετία</i>
<i>20</i>	<i>Αυστρία</i>
<i>21</i>	<i>Ισπανία</i>
<i>22</i>	<i>Πορτογαλία</i>
<i>23</i>	<i>Σλοβενία</i>
<i>24</i>	<i>Ουγγαρία</i>
<i>25</i>	<i>Ελλάδα</i>

Πίνακας 4.1: Κωδικοί χωρών.

Στη συνέχεια περιλαμβάνονται στοιχεία σχετικά με το ποιά από τα ανωτέρω τμήματα είναι αριστερής περικοπής, δεξιάς περικοπής και ποιά μη περικομμένα. Με βάση το γεγονός ότι η εργασία του PARIS ξεκίνησε την 1 Οκτωβρίου 1996 και ολοκληρώθηκε στις 30 Σεπτεμβρίου 1998 και κοιτάζοντας σε κάθε τμήμα τις ημερομηνίες των επιτόπου μετρήσεων, καθώς και το πότε αυτά εμφάνισαν για πρώτη φορά ρηγμάτωση μεγαλύτερη από 0.5m, έγινε έλεγχος για το αν βρίσκονταν μέσα στο χρόνο μελέτης του PARIS ή όχι. Έτσι, αν ήταν μέσα, χαρακτηρίζονταν ως μη περικεκομμένα (non-censored), ενώ αν ήταν εκτός ή δεν εμφάνιζαν καθόλου ρηγμάτωση μέχρι το τέλος της μελέτης χαρακτηρίζονταν ως αριστερής περικοπής (left-censored) ή δεξιάς περικοπής (right-censored) αντίστοιχα. Όπως είναι γνωστό και από το κεφαλαίο 3, κάποια τμήματα χαρακτηρίστηκαν ως αριστερής περικοπής γιατί, κατά την πρώτη επιτόπου μέτρηση που έγινε μετά την έναρξη του PARIS, τα τμήματα αυτά βρέθηκαν να έχουν ήδη ρηγματωθεί και μάλιστα το μήκος της ρωγμής ήταν μεγαλύτερο από 0.5m. Το τελευταίο αποτελεί κριτήριο του PARIS για να θεωρηθεί ότι πραγματοποιήθηκε έναρξη ρωγμής σε ένα οδόστρωμα. Αντίστοιχα, ως δεξιάς περικοπής χαρακτηρίστηκαν τα τμήματα εκείνα, τα οποία μέχρι και την

τελευταία επιτόπου μέτρηση πριν από τη λήξη του PARIS δεν εμφάνισαν καμία ρωγμή μεγαλύτερη από 0.5m. Τέλος, ως μη περικομμένα χαρακτηρίστηκαν τα τμήματα που η πρώτη τους ρωγμή μήκους μεγαλύτερου από 0.5m εμφανίστηκε σε κάποια επιτόπου μέτρηση η οποία έγινε κατά τη διάρκεια μελέτης του PARIS και συνεπώς ο χρόνος έναρξης της ρωγμής θεωρείτο γνωστός. Έτσι, έγινε ο διαχωρισμός και δημιουργήθηκαν δύο πίνακες για τα εύκαμπτα και δύο για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Για τα εύκαμπτα, ο ένας περιείχε τα τμήματα που χαρακτηρίστηκαν ως μη περικομμένα ενώ ο άλλος όλα τα τμήματα, δηλαδή αριστερής, δεξιάς περικοπής και μη περικομμένα. Όμοια έγιναν και οι πίνακες για τα ημιάκαμπτα. Ο διαχωρισμός αυτός έπρεπε να γίνει αφού στο PARIS είχαν δημιουργήσει δύο διαφορετικά πρότυπα. Το ένα εφαρμόζεται σε τμήματα που χαρακτηρίζονται ως μη περικομμένα και το άλλο εφαρμόζεται σε όλα τα τμήματα.

Αναλυτικότερα, ο πίνακας του PARIS με τις μετρήσεις των ρωγμών ανά τμήμα και τις ημερομηνίες κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν αυτές, είχε την μορφή που φαίνεται στον πίνακα 4.2, όπου παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τιμές τριών διαφορετικών τμημάτων. Στο επάνω μέρος του πίνακα υπάρχουν οι ονομασίες των μεταβλητών. Το PARIS_ID είναι ο κωδικός αναγνώρισης του υπό εξέταση τμήματος. Το DATE είναι οι ημερομηνίες κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι επιτόπου μετρήσεις του μήκους των ρωγμών, όπου αυτές είχαν εμφανιστεί. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι επιτόπου μετρήσεις είχαν γίνει και πριν την έναρξη του PARIS και απλώς οι μελετητές συγκέντρωσαν αυτά τα στοιχεία ώστε να τα επεξεργαστούν. Τα LWP_L, LWP_M και LWP_H είναι τα μήκη (σε μέτρα) της κατά μήκος ρηγμάτωσης στο ίχνος των τροχών (longitudinal cracking in the wheel path) μαζί με τους δείκτες σοβαρότητας L, M, H (Low, Moderate, High). Τα TWP_L, TWP_M και TWP_H είναι τα μήκη (σε μέτρα) της εγκάρσιας ρηγμάτωσης στο ίχνος των τροχών (transverse cracking in the wheel path) μαζί με τους ίδιους δείκτες σοβαρότητας. Τέλος, τα ACR_L, ACR_M, ACR_H είναι τα μήκη (σε μέτρα) της αλλιγοτορικής ρηγμάτωσης (alligator cracking) με τους ίδιους δείκτες όπως και πιο πάνω. Τα SUM_LWP, SUM TWP και SUM_ACR είναι τα επιμέρους αθροίσματα των πιο πάνω ενώ το SUM_WP είναι το συνολικό άθροισμα.

Έπειτα στη βάση δεδομένων περιέχονται στοιχεία που θεωρήθηκε ότι θα φανούν χρήσιμα στην μετέπειτα επεξεργασία. Αρχικά, από τον πίνακα «Ιστορικά Στοιχεία» (History Data) του PARIS επελέγησαν:

- Η χρονιά κατασκευής του κάθε τμήματος (year of construction), και συμβολίζεται ως CONSTR.
- Η χρονιά της τελευταίας επίστρωσης (year of latest overlay), εάν είχε γίνει, και συμβολίζεται ως OVERLAY.
- Η χρονιά της τελευταίας επιφανειακής συντήρησης (year of latest surface treatment), εάν είχε γίνει, και συμβολίζεται ως SURFACE.

Στη συνέχεια, από τον πίνακα «Κλιματολογικά Στοιχεία» (Climate Data) του PARIS πάρθηκαν τα κλιματολογικά δεδομένα, τα οποία περιγράφουν τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε τμήμα οδοστρώματος. Αυτά ήταν:

- Η μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας (average yearly day temperature) σε °C, και συμβολίζεται ως T_DAY.
- Ο αριθμός των θερμών ημερών (number of warm days) δηλαδή ο αριθμός των ημερών του έτους με μέγιστη θερμοκρασία πάνω από 25°C, και συμβολίζεται ως W_DAY.
- Ο αριθμός των ψυχρών ημερών (number of cold days) δηλαδή ο αριθμός των ημερών του έτους με ελάχιστη θερμοκρασία κάτω από 0°C, και συμβολίζεται ως C_DAY.
- Ο Δείκτης Παγετού σε h°C που συμβολίζεται ως FREEZ.
- Η μέση ετήσια βροχόπτωση (average yearly rainfall) σε mm, και συμβολίζεται ως RAIN.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα ανωτέρω δεδομένα δεν ήταν διαθέσιμα σε ορισμένα τμήματα.

Ο επόμενος πίνακας του PARIS από τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία ήταν ο πίνακας «Κατασκευαστικά Στοιχεία» (Construction Data) ο οποίος περιέχει κατασκευαστικά δεδομένα για τα οδοστρωματικά τμήματα. Αυτά ήταν:

- Το πάχος της ασφαλτικής στρώσης (thickness bituminous layers) σε mm, και συμβολίζεται ως TH_BIT.
- Το πάχος της δύσκαμπτης στρώσης (thickness rigid layers) σε mm, και συμβολίζεται ως TH_RIG.
- Το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό (thickness granular layers) σε mm, και συμβολίζεται ως TH_GRA.
- Το πάχος της υπόβασης (thickness sub-base layers) σε mm, και συμβολίζεται ως TH_SUB.

Σειρά είχαν τα κυκλοφοριακά δεδομένα ανά τμήμα, τα οποία υπήρχαν στον πίνακα «Στοιχεία Κυκλοφορίας» (Traffic Data) του PARIS. Από αυτά επιλέχθηκαν:

- Ο αριθμός των τυπικών αξονικών φορτίων βάρους 10 τόνων (100 kN) που διέρχονται από το υπό μελέτη τμήμα στη διάρκεια ενός έτους (esal/year), και συμβολίζεται ως ESAL/Y.
- Ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος (veh/day in direction of test section), και συμβολίζεται ως DVEH.
- Το ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος (% of trucks in direction of test section), και συμβολίζεται ως D%TRU.
- Ο συνολικός αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα στο υπό μελέτη τμήμα (veh/day at test section), και συμβολίζεται ως LVEH.
- Το συνολικό ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα στο υπό μελέτη τμήμα (% of trucks at test section), και συμβολίζεται ως L%TRU.

Τέλος, από τον πίνακα «Κανονικοποιημένα Στοιχεία Αστοχιών» (Normalised deflection data) του PARIS πάρθηκαν οι τιμές των υποχωρήσεων των τμημάτων που προέκυψαν από το παραμορφοσίμετρο πίπτοντος βάρους σε διάφορες αποστάσεις από την κεφαλή της συσκευής, η οποία ήταν της τάξης των 50kN. Οι τελικές τιμές του πίνακα είχαν κανονικοποιηθεί σε θερμοκρασία αναφοράς 20°C. Αναλυτικότερα κρατήθηκαν:

- Η υποχώρηση σε απόσταση 0 mm από την κεφαλή της συσκευής (D0) σε μm, και συμβολίζεται ως D0.
- Η υποχώρηση σε απόσταση 300mm από την κεφαλή της συσκευής (D300) σε μm. Η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε μόνο για τα εύκαμπτα οδοστρώματα και συμβολίζεται ως D300.
- Η υποχώρηση σε απόσταση 900mm από την κεφαλή της συσκευής (D900) σε μm. Η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε μόνο για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα και συμβολίζεται ως D900.

Από τη βάση αυτή αφαιρέθηκαν όλα εκείνα τα τμήματα , για τα οποία δεν περιλαμβάνονταν επαρκή δεδομένα. Υπήρχαν τμήματα για τα οποία τα παρεχόμενα δεδομένα ήταν πάρα πολύ λίγα, με κίνδυνο να δημιουργηθεί πρόβλημα κατά τη στατιστική επεξεργασία που θα ακολουθούσε, αφού τα στοιχεία αυτά θα επηρέαζαν τα τελικά αποτελέσματα.

Στους πίνακες του EXCEL υπάρχει ακόμα μία στήλη, στην οποία αναφέρεται το έτος κατά το οποίο εμφανίστηκε η πρώτη ρωγμή σε κάθε τμήμα. Αυτό προκύπτει εύκολα από τον πίνακα 4.2 ελέγχοντας το μήκος της πρωτοεμφανιζόμενης ρωγμής και το αντίστοιχο έτος που αυτή εμφανίστηκε. Για τα τμήματα που δεν αστόχησαν μέχρι και το τέλος της μελέτης του PARIS (δεξιάς περικοπής) θεωρείται σαν έτος «αστοχίας» το 1998 (έτος λήξης του προγράμματος). Η στήλη αυτή ονομάζεται YEAR_DIS (year of pavement distress).

Η στήλη με την ονομασία AGE (pavement age) εκφράζει τον αριθμό των ετών που είχαν περάσει από την κατασκευή ή την τελευταία επίστρωση ή την τελευταία επιφανειακή συντήρηση του τμήματος, μέχρι και την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής. Αυτό υπολογίζεται εύκολα αν από το έτος που έκανε την εμφάνιση της η πρώτη ρωγμή (pavement distress), αφαιρεθεί το έτος που έγινε η τελευταία επιφανειακή συντήρηση (year of latest surface treatment) ή η τελευταία επίστρωση (year of latest overlay) ή το αρχικό έτος κατασκευής (year of construction) του τμήματος, εάν καμία συντήρηση δεν είχε πραγματοποιηθεί σε αυτό. Για τα τμήματα που δεν αστόχησαν μέχρι και το τέλος του PARIS, η τιμή αυτή δείχνει απλώς, πόσα χρόνια βρίσκεται το τμήμα σε λειτουργία.

Το τελευταίο στοιχείο που περιλαμβάνεται στη βάση δεδομένων είναι ο Δείκτης Επιφανειακής Καμπυλότητας 300 (Surface Curvature Index 300 ή SCI_{300}) όσον αφορά στα εύκαμπτα οδοστρώματα και ο Δείκτης Επιφανειακής Καμπυλότητας 900 (Surface Curvature Index 900 ή SCI_{900}) όσον αφορά στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Ξεκινώντας από τον SCI_{300} , αυτός υπολογίζεται αφαιρώντας από την υποχώρηση D_0 την υποχώρηση D_{300} . Η τιμή του πρέπει να έχει μονάδες μm . Όμοια, ο SCI_{900} υπολογίζεται αφαιρώντας από την υποχώρηση D_0 την υποχώρηση D_{900} . Οι μονάδες και εδώ πρέπει να είναι μm .

Όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση του PARIS, υπάρχει ένα κατώτατο όριο, τόσο του SCI_{300} όσο και του SCI_{900} κάτω από το οποίο, τα αποτελέσματα που δίνουν τα πρότυπα δεν είναι σωστά. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να υπολογιστούν τα ελάχιστα όρια εφαρμογής των προτύπων του PARIS. Χρησιμοποιώντας τους τύπους που δίνονται στο κεφάλαιο 3 υπολογίστηκε το $SCI_{300,\text{min}}$, τόσο για μη περικομμένα τμήματα όσο και για όλα τα τμήματα (all data). Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο υπολογίστηκε το $SCI_{900,\text{min}}$ και για μη περικομμένα τμήματα αλλά και για όλα τα τμήματα (all data). Τα αποτελέσματα τοποθετήθηκαν σε νέα στήλη και στον αντίστοιχο πίνακα στον οποίο ανήκουν.

Όλα λοιπόν τα προαναφερθέντα στοιχεία περιλαμβάνονται στην τελική μορφή της βάσης δεδομένων του PARIS και η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω επεξεργασία που θα ακολουθήσει. Στο τεύχος 2 (παράρτημα Α) γίνεται αναλυτική παρουσίαση της βάσης, τόσο για τα εύκαμπτα όσο και για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

4.2 Μεθοδολογία

4.2.1 Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας (Duration Models)

Λόγω της φύσεως των προτύπων που θα προκύψουν από τη διαδικασία της στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων, γίνεται φανερό ότι προκύπτει η ανάγκη να μελετηθεί ο χρόνος που χρειάζεται για να ξεκινήσει ένα γεγονός, μια δραστηριότητα ή, στην προκειμένη περίπτωση, ο χρόνος που μεσολαβεί από την κατασκευή, τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή τελευταία επίστρωση, για την εμφάνιση

ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Για να διερευνηθεί ο χρόνος αυτός τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στην βάση δεδομένων αναφέρονται ως στοιχεία χρονικής διάρκειας. Τέτοιου είδους στοιχεία χρησιμοποιούνται συχνά 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 κάποιο 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.), αλλά και ο χρόνος που χρειάζεται για να υιοθετηθούν νέες τεχνολογίες στον τομέα των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής. Τα στοιχεία που αναφέρονται σε χρονικές διάρκειες είναι συνεχή και μπορούν, στις περισσότερες περιπτώσεις, να προτυποποιηθούν με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Ωστόσο, η χρήση καθιερωμένων τεχνικών, οι οποίες έχουν σαν βάση τα πρότυπα «hazard», συχνά δημιουργεί επιπλέον προβλήματα στο ήδη υπάρχον πρόβλημα της χρονικής διάρκειας.

4.2.2 Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας «Hazard»

Τα «hazard based» πρότυπα ή πρότυπα «διακινδύνευσης» [23] έχουν εκτενώς εφαρμοστεί σε πολλά επιστημονικά πεδία, όπως στη βιοστατιστική και στα οικονομικά. 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 την 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 αλλά και του χρόνου που μένει κάποιος σπίτι μεταξύ των μετακινήσεων [24].

Για να αναλυθούν στοιχεία χρονικής διάρκειας εισάγονται τα «hazard based» πρότυπα τα οποία μελετούν την πιθανότητα έναρξης του χρονικού διαστήματος μιας δραστηριότητας κάποια χρονική στιγμή t , δεδομένου ότι η δραστηριότητα αυτή δεν έχει ξεκινήσει 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 ξεκινήσει, για παράδειγμα, η εμφάνιση κάποιας ρηγματώσεως πριν την έναρξη 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 «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 έναρξη της εμφάνισης ρηγματώσεων) μεταξύ χρόνου t και $t+dt$, δεδομένου ότι το γεγονός δεν έχει συμβεί μέχρι το χρόνο t . Με άλλα λόγια, η συνάρτηση «διακινδύνευσης» $h(t)$ δίνει την πιθανότητα κάποιο γεγονός να ξεκινήσει τη χρονική στιγμή t δεδομένου ότι το γεγονός δεν έχει ξεκινήσει 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 ξεκινήσει τη χρονική στιγμή t . Δηλαδή, στην συγκεκριμένη περίπτωση, η ολοκληρωμένη συνάρτηση «διακινδύνευσης» δίνει την αθροιστική τιμή της πιθανότητας να ξεκινήσει η εμφάνιση ρηγματώσεων σε ένα οδόστρωμα τη χρονική στιγμή t .

Η συνάρτηση επιβίωσης (survival 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» («survival») είναι:

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

Εάν κάποια από τις παραπάνω συναρτήσεις είναι γνωστή – η συνάρτηση πιθανότητας, η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, η συνάρτηση «επιβίωσης», η

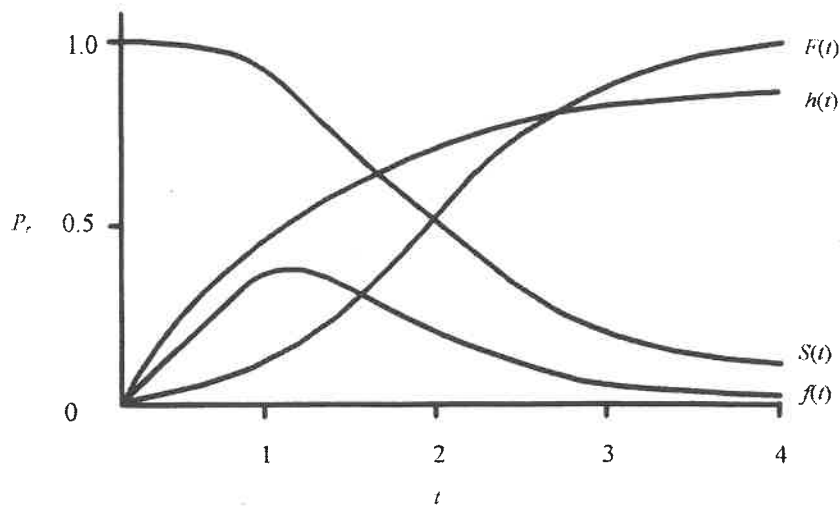
συνάρτηση «διακινδύνευσης» ή η αθροιστική συνάρτηση «διακινδύνευσης» - τότε οποιαδήποτε άλλη από αυτές μπορεί εύκολα να προκύψει. Οι μαθηματικές σχέσεις των παραπάνω συναρτήσεων είναι:

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

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

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

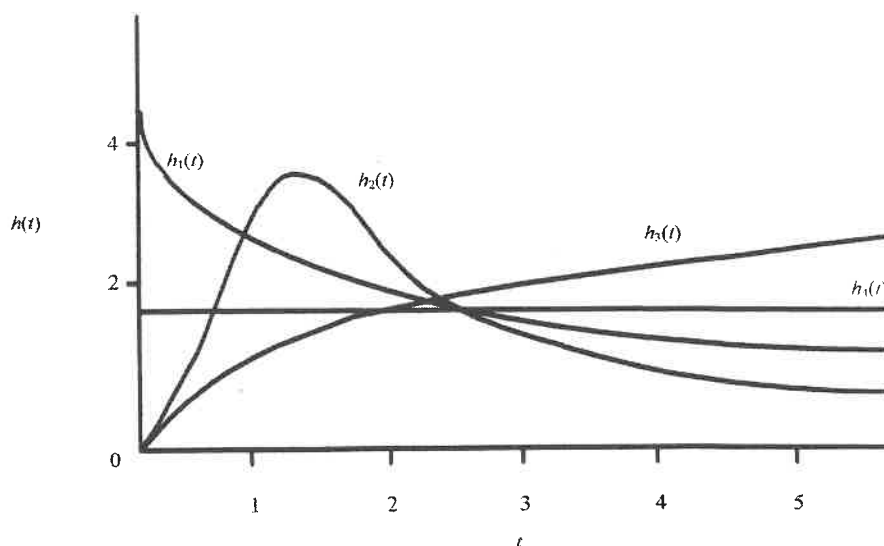
$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{d}{dt} H(t)$$



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

Γραφικά, οι συναρτήσεις «διακινδύνευσης», συνάρτηση πιθανότητας, αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας και η «επιβίωσης» παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Η κλίση της γραφικής παράστασης της συνάρτησης «διακινδύνευσης» οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα. Η κλίση αυτή αναπαριστά την εξάρτηση της πιθανότητας της έναρξης της χρονικής διάρκειας μιας δραστηριότητας ήτοι της εμφάνισης ρηγμάτωσης στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος, από το χρόνο που έχει ήδη περάσει μέχρι την έναρξη της δραστηριότητας ή της εμφάνισης ρηγμάτωσης στην επιφάνεια

ενός οδοστρώματος. Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζονται τέσσερις περιπτώσεις της συνάρτησης «διακινδύνευσης». Η συνάρτηση «διακινδύνευσης» $h_1(t)$, έχει ρυθμό μεταβολής (1^η παράγωγο, δηλαδή κλίση) $dh_1(t)/dt < 0$ για κάθε t . Η κλίση της συνάρτησης αυτής μειώνεται μονοτονικά σε συνάρτηση με το χρόνο. Η δεύτερη περίπτωση που αφορά τη 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 ($dh_4(t)/dt = 0$), δηλαδή έχει σταθερή κλίση, πράγμα που καταδεικνύει ότι η πιθανότητα «hazard» δεν εξαρτάται από τον χρόνο t .



Σχήμα 4.2: Γραφική παράσταση των τεσσάρων παραγόμενων συναρτήσεων «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) στην χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων ή στο χρόνο που χρειάζεται

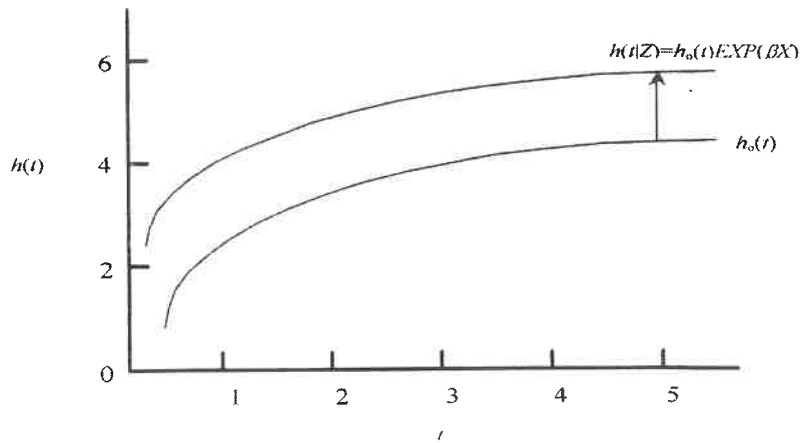
προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι δραστηριότητες αυτές, π.χ η έναρξη της εμφάνισης ρηγματώσης στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος .

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 στην χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων ή στον χρόνο που απαιτείται για την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος.

Τα αναλογικά πρότυπα «διακινδύνευσης» υποθέτουν ότι οι μεταβλητές οι οποίες αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν τη χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων ή τον χρόνο που απαιτείται για την εμφάνιση ρηγματώσης στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος, δρουν με πολλούς τρόπους σε κάποιες βασικές (underlying) συναρτήσεις «διακινδύνευσης». Αυτή η βασική συνάρτηση «διακινδύνευσης» («baseline hazard») συναντάται 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 την 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 «διακινδύνευσης» («hazard») αναπαριστάται γραφικά στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Γραφική παράσταση της αναλογικής συνάρτησης «διακινδύνευσης».

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» («accelerated lifetime») ξανά υποθέτουν ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές επηρεάζουν την χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων ή την έναρξη της εμφάνισης ρηγματώσεων στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος 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»

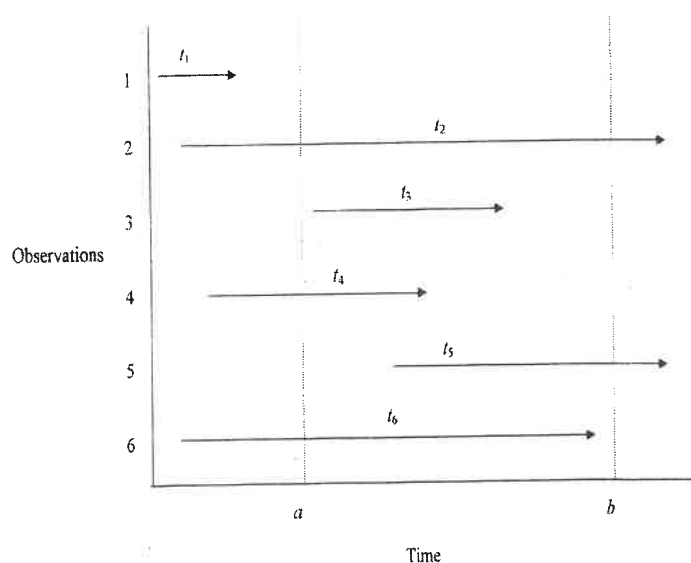
$$h(t|X) = h_0 [t \exp(\beta X)] \exp(\beta X) \quad (4.8)$$

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 Χαρακτηριστικά των Στοιχείων Χρονικής Διάρκειας

Στα στοιχεία χρονικής διάρκειας συχνά παρατηρείται το φαινόμενο αριστερής ή δεξιάς περικοπής των στοιχείων (left or right censoring). Σε ότι αφορά τα διαθέσιμα στοιχεία που είναι απαραίτητα, για παράδειγμα για την διερεύνηση του χρόνου εμφάνισης ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων

οδοστρωμάτων, υποθέτουμε ότι αφορούν μια συγκεκριμένη περίοδο η οποία έχει ως σημείο εκκίνησης την χρονική στιγμή a και λήξη τη χρονική στιγμή b . Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.4, η παρατήρηση 1 είναι εκτός του χρονικού διαστήματος a - b οπότε δεν μετέχει στις παρατηρήσεις που αφορούν τα στοιχεία της χρονικής διάρκειας. Στην παρατήρηση 2 τα στοιχεία είναι αριστερά και δεξιά περικεκομμένα αφού δεν είναι γνωστή η χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκίνησαν οι παρατηρήσεις (πριν την χρονική στιγμή a) αλλά ούτε και το πότε σταμάτησαν (μετά την χρονική στιγμή b). Η αρχή και το τέλος της παρατήρησης 3 βρίσκονται εντός του χρονικού διαστήματος a - b , οπότε δεν παρατηρείται το φαινόμενο της περικοπής των στοιχείων (censoring). Στις παρατηρήσεις 4 και 6 παρατηρείται αριστερή περικοπή στοιχείων ενώ στην παρατήρηση 5 παρατηρείται δεξιά περικοπή.



Σχήμα 4.4: Γραφική παράσταση των στοιχείων χρονικής διάρκειας.

Τα «hazard based» πρότυπα προσαρμόζονται κατάλληλα για δεξιά περικοπή (right censoring) στοιχείων. Με τα αριστερά περικεκομμένα (left censored) στοιχεία δημιουργείται μαθηματικό πρόβλημα στο να προσδιοριστεί η κατανομή των χρόνων έναρξης της χρονικής διάρκειας δραστηριοτήτων ή των χρόνων έναρξης της εμφάνισης ρηγματώσεων στην επιφάνεια των συγκεκριμένων, αριστερά περικεκομμένων, οδοστρωμάτων (και οι οποίοι είναι χρήσιμοι ώστε να προσδιοριστεί η κατανομή των «left censored» στοιχείων στην συνάρτηση πιθανοφάνειας του προτύπου).

Ένα άλλο θέμα το οποίο μπορεί να προκύψει όταν ένα πλήθος παρατηρήσεων που αφορούν στοιχεία χρονικής διάρκειας ξεκινούν την ίδια χρονική στιγμή, είναι το πρόβλημα των ισοδύναμων (tied) στοιχείων. Τα ισοδύναμα στοιχεία είναι πιθανό να προκύψουν όταν η συλλογή στοιχείων δεν είναι αρκετά ακριβής ώστε να αναγνωρίσει ακριβώς τους χρόνους έναρξης των στοιχείων της χρονικής διάρκειας (για παράδειγμα των ρηγματώσεων). Όταν τα εξαγόμενα στοιχεία χρονικής διάρκειας ομαδοποιούνται σε συγκεκριμένους χρόνους, η συνάρτηση πιθανότητας για τα «proportional hazard» και «accelerated lifetime» πρότυπα γίνεται αυξητικά πολύπλοκη.

4.2.4 Μη Παραμετρικά Πρότυπα

Η χρήση των μη παραμετρικών προτύπων δεν είναι ευρέως διαδεδομένη στον τομέα των μεταφορών και συγκοινωνιακής υποδομής, χωρίς αυτό όμως να σημαίνει ότι η μη παραμετρική προσέγγιση δεν είναι χρήσιμη. Οι μη παραμετρικές μέθοδοι παρέχουν την δυνατότητα για προτυποποίηση στοιχείων «επιβίωσης» («survival») και στοιχείων χρονικής διάρκειας χωρίς να βασίζονται σε συγκεκριμένες ή κατάλληλα προσαρμοσμένες στατιστικές κατανομές.

Υπάρχουν δύο συνήθεις προσεγγίσεις για την δημιουργία συναρτήσεων επιβίωσης, με βάση μη παραμετρικές μεθόδους, η μέθοδος «product limit» (PL) και η μέθοδος των «life tables». Η PL μέθοδος βασίζεται σε ατομικούς χρόνους επιβίωσης («survival times») ενώ η μέθοδος «life tables» ομαδοποιεί τους χρόνους επιβίωσης σε χρονικές περιόδους.

Μερικές παρατηρήσεις για την ανάλυση επιβίωσης είναι οι εξής: εάν το μεγαλύτερο μέρος των παρατηρήσεων είναι δεξιά περικεκομμένο, τότε η εκτίμηση PL είναι μη προσδιορίσιμη. Εάν το μεγαλύτερο μέρος των παρατηρήσεων δεν είναι δεξιά περικεκομμένο, τότε η εκτίμηση PL για τις παρατηρήσεις αυτές είναι ίση με μηδέν, γεγονός που, από μαθηματικής άποψης τουλάχιστον, είναι σωστό αφού δεν παρατηρούνται άλλοι μεγαλύτεροι χρόνοι επιβίωσης. Επιπλέον, οι μεσαίοι χρόνοι επιβίωσης δεν μπορούν να προσδιοριστούν εάν περισσότερο από το 50% των παρατηρήσεων είναι περικεκομμένες (censored) και η μεγαλύτερη παρατήρηση είναι επίσης περικεκομμένη.

Η μη παραμετρική μέθοδος εκτίμησης PL υποθέτει ότι το φαινόμενο της περικοπής στοιχείων (censoring) είναι ανεξάρτητο από τους χρόνους επιβίωσης. Εάν αυτό δεν ισχύει τότε η μέθοδος είναι ακατάλληλη.

4.2.5 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, κλπ.) και επίσης κάνουν μια παραμετρική υπόθεση για την συναρτησιακή μορφή της επιρροής των ανεξάρτητων μεταβλητών στην συνάρτηση «διακινδύνευσης» (συνήθως $\exp(\beta X)$ όπως αναφέρθηκε προηγουμένως). Τα ημι-παραμετρικά πρότυπα, αντιθέτως, είναι περισσότερο γενικά διότι δεν υποθέτουν κατανομή για τα στοιχεία της χρονικής διάρκειας δραστηριοτήτων ή μετακινήσεων, παρόλο που διατηρούν την υπόθεση των παραμετρικών προτύπων, δηλαδή της επιρροής των ανεξάρτητων 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 τη χρονική στιγμή t_i , δίνεται ως:

$$EXP(\beta X_i) / \sum_{j \in R_i} EXP(\beta X_j) \quad (4.9)$$

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 περικεκομμένων στοιχείων (censoring) δεν παρατηρείται σε καμιά από τις παρατηρήσεις, η μερική λογαριθμική συνάρτηση πιθανοφάνειας είναι:

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

Εάν καμιά από τις παρατηρήσεις δεν εμφανίζει το φαινόμενο των περικεκομμένων στοιχείων (censoring) και τα «tied» στοιχεία παρουσιάζονται με περισσότερες από μια 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

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

4.2.6 Παραμετρικά Πρότυπα

Με τα παραμετρικά πρότυπα, πολλές εναλλακτικές κατανομές για την συνάρτηση «διακινδύνευσης» έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία. Οι κατανομές αυτές είναι η γάμμα, η εκθετική, η Weibull, η λογαριθμολογιστική, η Gompertz και άλλες. Στον πίνακα 4.3 φαίνονται τα ονόματα και οι συναρτήσεις των κατανομών «διακινδύνευσης» (μαζί με τις παραμέτρους τους) για ένα πλήθος προτύπων χρονικής διάρκειας. Η επιλογή οποιασδήποτε από αυτές τις εναλλακτικές κατανομές για την συνάρτηση «διακινδύνευσης» στηρίζεται σε θεωρητικό υπόβαθρο ή σε στατιστική κατοχύρωση. Η επιλογή μιας συγκεκριμένης κατανομής είναι σημαντική όχι μόνο για το σχήμα της «baseline hazard» αλλά επίσης για την αποτελεσματικότητα και για την πιθανή μεροληψία των παραμέτρων που έχει προσδιοριστεί ότι επηρεάζει την χρονική διάρκεια διαφόρων δραστηριοτήτων ή του χρόνου μετακίνησης.

Το παρόν υποκεφάλαιο εξετάζει τρεις κατανομές: την εκθετική, την Weibull και την λογαριθμολογιστική. Η πιο απλή από τις προαναφερθείσες κατανομές είναι η εκθετική με παράμετρο $\lambda > 0$. Η συνάρτηση πιθανότητας της εκθετικής κατανομής είναι:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t), \quad (4.12)$$

με συνάρτηση «διακινδύνευσης»:

$$h(t) = \lambda. \quad (4.13)$$

Πίνακας 4.3: Μερικές Συχνά Χρησιμοποιούμενες Συναρτήσεις «διακινδύνευσης» για Παραμετρικά Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας.

Όνομα	Συνάρτηση «διακινδύνευσης», $h(t)$
Συνθετική εκθετική	$h(t) = \frac{P}{t + \frac{P}{\lambda_0}}$
Εκθετική	$h(t) = \lambda$
Εκθετική με γάμμα ετερογένεια	$h(t) = \frac{\lambda}{[1 + \theta \lambda t]}$
Gompertz	$h(t) = (P) EXP^{\lambda t}$
Gompertz – Makeham	$h(t) = \lambda_0 + \lambda_1 EXP^{\lambda_2 t}$
Λογαριθμολογιστική	$h(t) = \frac{(\lambda P)(\lambda t)^{P-1}}{[1 + (\lambda t)^P]}$
Weibull	$h(t) = (\lambda P)(\lambda t)^{P-1}$
Weibull με γάμμα ετερογένεια	$h(t) = \frac{(\lambda P)(\lambda t)^{P-1}}{[1 + \theta (\lambda t)^P]}$

Όπως γίνεται φανερό από την εξίσωση 4.13 η συνάρτηση «διακινδύνευσης» της εκθετικής κατανομής είναι σταθερή και το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από το σχήμα 4.2. Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα της έναρξης της χρονικής διάρκειας μιας δραστηριότητας ή της εμφάνισης ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων ή ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων είναι ανεξάρτητη από το χρόνο και δεν υπάρχει σχέση της πιθανότητας αυτής με την χρονική διάρκεια.

Η κατανομή Weibull είναι μια πιο γενική μορφή της εκθετικής κατανομής. Επιτρέπει θετική εξάρτηση της χρονικής διάρκειας με το χρόνο (η συνάρτηση «διακινδύνευσης» αυξάνεται μονοτονικά σε σχέση με τη χρονική διάρκεια και η

πιθανότητα της έναρξης της χρονικής διάρκειας μιας δραστηριότητας αυξάνει με το χρόνο), αρνητική εξάρτηση (η συνάρτηση «διακινδύνευσης» μειώνεται μονοτονικά σε σχέση με την χρονική διάρκεια και η πιθανότητα της έναρξης της χρονικής διάρκειας μιας δραστηριότητας μειώνεται με το χρόνο), ή καμία εξάρτηση της χρονικής διάρκειας με το χρόνο (η συνάρτηση «διακινδύνευσης» παραμένει σταθερή σε σχέση με την χρονική διάρκεια και η πιθανότητα της έναρξης της χρονικής διάρκειας δεν εξαρτάται από το χρόνο). Με παραμέτρους $\lambda > 0$ και $P > 0$, η κατανομή Weibull έχει συνάρτηση πιθανότητας:

$$h(t) = \lambda P (\lambda t)^{P-1} [S(t)]^\theta. \quad (4.14)$$

με συνάρτηση «διακινδύνευσης»:

$$h(t) = (\lambda P) (\lambda t)^{P-1} \quad (4.15)$$

Όπως γίνεται φανερό από την εξίσωση 4.15, εάν η παράμετρος P είναι μεγαλύτερη από 1 ($P > 1$), η συνάρτηση «διακινδύνευσης» αυξάνεται μονοτονικά με το χρόνο (βλ. $h_3(t)$ στο σχήμα 4.2), αν $P < 1$ η συνάρτηση «διακινδύνευσης» μειώνεται μονοτονικά με το χρόνο (βλ. $h_1(t)$ στο σχήμα 4.2) και αν $P = 1$ η συνάρτηση «διακινδύνευσης» είναι σταθερή σε σχέση με τη χρονική διάρκεια, και έτσι προκύπτει η εκθετική κατανομή της συνάρτησης «διακινδύνευσης» με εξίσωση $h(t) = \lambda$ (βλ. $h_4(t)$ στο σχήμα 4.2). Επειδή η κατανομή Weibull είναι μια πιο γενική μορφή της εκθετικής κατανομής, παρέχει ένα πιο ευέλικτο τρόπο για να αντιμετωπιστεί η εξάρτηση των στοιχείων χρονικής διάρκειας από τον χρόνο. Βέβαια, πρέπει να τονιστεί ότι η κατανομή Weibull είναι λιγότερο «γενική» από την λογαριθμολογιστική γιατί απαιτεί η συνάρτηση «διακινδύνευσης» να μεταβάλλεται μονοτονικά με το χρόνο.

Η λογαριθμολογιστική κατανομή επιτρέπει η συνάρτηση «διακινδύνευσης» να μην μεταβάλλεται μονοτονικά με το χρόνο και χρησιμοποιείται συχνά ως μια προσέγγιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Η λογαριθμολογιστική κατανομή με παραμέτρους $\lambda > 0$ και $P > 0$ έχει συνάρτηση πιθανότητας:

$$f(t) = \lambda P (\lambda t)^{P-1} \left[1 + (\lambda t)^P \right]^{-2}, \quad (4.16)$$

και συνάρτηση «διακινδύνευσης»:

$$h(t) = \frac{(\lambda P)(\lambda t)^{P-1}}{[1 + (\lambda t)^P]} \quad (4.17)$$

Από την εξίσωση 4.17 καταδεικνύεται ότι εάν $P < 1$ τότε η συνάρτηση «διακινδύνευσης» μειώνεται μονοτονικά με το χρόνο (βλ. $h_1(t)$ στο σχήμα 4.2), εάν $P > 1$ τότε η συνάρτηση «διακινδύνευσης» αυξάνεται με το χρόνο από μηδέν ως ένα σημείο, $t_i = (P-1)^{1/P} / \lambda$, και από αυτό το σημείο και μετά μειώνεται μέχρι να γίνει μηδέν (βλ. $h_2(t)$ στο σχήμα 4.2), εάν $P=1$ η συνάρτηση «διακινδύνευσης» μειώνεται μονοτονικά με το χρόνο από την παράμετρο λ .

4.2.7 Ετερογένεια

Προκειμένου για την μορφοποίηση αναλογικών προτύπων «διακινδύνευσης», γίνεται υπόθεση για την ομογένεια των παρατηρήσεων έτσι ώστε να μπορεί να γίνει ανάλυση επιβίωσης (survival). Η μεταβλητότητα στα στοιχεία χρονικής διάρκειας υποτίθεται ότι συνυπολογίζεται μαζί με τις ανεξάρτητες μεταβλητές X (covariate vector X). Το πρόβλημα ανακύπτει όταν κάποιος μη παρατηρούμενος παράγοντας, που δεν εμπεριέχονται στο άνυσμα X , επηρεάζουν τα στοιχεία χρονικής διάρκειας. Αυτό αναφέρεται ως μη παρατηρούμενη ετερογένεια (unobserved heterogeneity) και μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα σε ότι αφορά το σχήμα και τη μορφή της συνάρτησης «διακινδύνευσης».

Στα παραμετρικά πρότυπα χρονικής διάρκειας ο πιο συνηθισμένος τρόπος προσέγγισης, ο οποίος ακολουθείται προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ετερογένειας, είναι η εισαγωγή ενός όρου ετερογένειας, ο οποίος είναι σχεδιασμένος ώστε να μπορεί να προσδιορίσει τα μη παρατηρούμενα αποτελέσματα στον πληθυσμό του δείγματος και να δουλέψει με την προκύπτουσα υπό συνθήκη συνάρτηση επιβίωσης. Με όρο ετερογένειας ω , κατανομή του δείγματος $g(\omega)$ και υπό συνθήκη συνάρτηση επιβίωσης $S(t | \omega)$ η άνευ συνθήκης συνάρτηση επιβίωσης δίνεται από τη σχέση:

$$S(t) = \int S(t | \omega) g(\omega) d\omega \quad (4.18)$$

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο ο όρος της ετερογένειας εφαρμόζεται, θεωρείται η κατανομή Weibull με γάμμα ετερογένεια. Χωρίς να χαθεί η γενικότητα,

γίνεται η υπόθεση ότι η συνάρτηση Weibull έχει γάμμα κατανεμημένη ετερογένεια (ω) με μέσο όρο 1 και διασπορά $= 1/k$. Έτσι,

$$g(w) = \frac{k^k}{\Gamma(k)} e^{-kw} w^{k-1}. \quad (4.19)$$

Με την κατανομή Weibull και $S(t) = f(t)/h(t)$, οι εξισώσεις 4.17 και 4.18 δίνουν

$$S(t|w) = e^{-(w\lambda t)^p} \quad (4.20)$$

Η άνευ συνθήκη κατανομή επιβίωσης μπορεί τώρα να γραφεί ως (θεωρείται $\theta=1/k$):

$$S(t) = \int_0^{\infty} S(t|w)g(w)dw = \left[1 + \theta(\lambda t)^p\right]^{-1/\theta}, \quad (4.21)$$

με αποτέλεσμα η συνάρτηση «διακινδύνευσης» να διαμορφωθεί ως

$$h(t) = \lambda P(\lambda t)^{p-1} [S(t)]^\theta. \quad (4.22)$$

Σημειώνεται ότι, εάν $\theta=0$, η ετερογένεια δεν είναι παρούσα αφού η συνάρτηση «hazard» δίνεται από τη σχέση 4.17 και η διασπορά του όρου της ετερογένειας ω είναι μηδέν.

Η επιλογή της κατανομής ετερογένειας είναι ένα σημαντικό θέμα. Οι συνέπειες του λανθασμένου προσδιορισμού της κατανομής $g(\omega)$ του δείγματος είναι αρνητικές αφού μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς και λανθασμένες εκτιμήσεις. Ενώ η κατανομή γάμμα αποτελεί μια δημοφιλή προσέγγιση η οποία αντιμετωπίζει τα φαινόμενα ετερογένειας που μπορεί να εμφανίζονται στο δείγμα, είναι απαραίτητο να υπάρξει προσοχή σε ότι αφορά την επιλογή συγκεκριμένης παραμετρικής μορφής για την ετερογένεια. Ευτυχώς, σε ότι αφορά την επιλογή μεταξύ των κατανομών, έχει αποδειχτεί ότι εάν χρησιμοποιηθεί η σωστή κατανομή για την «baseline hazard» συνάρτηση ο προσδιορισμός των παραμέτρων δεν είναι εύκολο να επηρεαστεί από εναλλακτικές υποθέσεις κατανομών ετερογένειας. Επίσης, μία ομάδα ερευνητών προσπάθησε να δείξει ότι εάν η βασική συνάρτηση «διακινδύνευσης» είναι μη-παραμετρική (το «Cox proportional hazard» πρότυπο) τότε η επιλογή της κατανομής για τη συνάρτηση ετερογένειας μπορεί να είναι λιγότερο σημαντική λόγω του γεγονότος ότι τα προκύπτοντα αποτελέσματα εξαρτώνται ακόμα λιγότερο από την επιλογή της συναρτησιακής μορφής της κατανομής [2].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή Δεδομένων

5.1.1 Γενικά

Η επεξεργασία που εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία στηρίζεται σε ένα πλήθος στοιχείων τα οποία συλλέχθηκαν στα δύο χρόνια του ερευνητικού προγράμματος PARIS και στο οποίο η Ελλάδα συμμετείχε μέσω του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν τη βάση δεδομένων. Απαραίτητο στάδιο πριν τη διαδικασία αυτή αποτελεί ο καθορισμός των εξαρτημένων και ανεξάρτητων 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 κατασκευαστικά και τα κυκλοφοριακά δεδομένα για τα οδοστρωματικά τμήματα, στον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την

τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, τα συλλεγόμενα στοιχεία, που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία, θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά του φαινομένου που μελετάται, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση της εμφάνισης ρηγματώσεων στην επιφάνεια οδοστρωμάτων.

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

1. Η μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας (T_DAY)
2. Ο αριθμός των θερμών ημερών του έτους (W_DAY)
3. Ο αριθμός των ψυχρών ημερών του έτους (C_DAY)
4. Ο δείκτης παγετού (FREEZ)
5. Η μέση ετήσια βροχόπτωση (RAIN)
6. Ο τύπος οδοστρώματος (PAV_TYPE)
7. Το πάχος της ασφαλικής στρώσης (TH_BIT)
8. Το πάχος της δύσκαμπτης στρώσης (TH_RIG)
9. Το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό (TH_GRA)
10. Το πάχος της υπόβασης (TH_SUB)
11. Ο αριθμός των τυπικών αξονικών φορτίων ανά έτος (ESAL/Y)
12. Ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση (DVEH)
13. Το ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση (D%TRU)
14. Ο συνολικός αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα (LVEH)
15. Το συνολικό ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα (L%TRU)

Η διαδικασία με την οποία πραγματοποιήθηκε η συγκέντρωση όλων των παραπάνω πληροφοριών έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 3 (Το ερευνητικό πρόγραμμα PARIS).

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 εμφάνιση του οποίου

εξαρτάται και επηρεάζεται από εξωγενείς παράγοντες που αναφέρονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η εκτίμηση της επίδρασης των ανεξάρτητων μεταβλητών, όπως αυτές ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, στον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Δηλαδή, η εξαρτημένη μεταβλητή για την οποία θα διερευνηθεί η επιρροή των ανεξάρτητων μεταβλητών θα είναι η μεταβλητή AGE (pavement age), που εκφράζει τον αριθμό των ετών που έχουν περάσει από την κατασκευή ή την τελευταία επίστρωση ή την τελευταία επιφανειακή συντήρηση του τμήματος, μέχρι και την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής. Για τα τμήματα που δεν αστόχησαν μέχρι και το τέλος του PARIS, η τιμή αυτή δείχνει απλώς, πόσα χρόνια βρίσκεται το τμήμα σε λειτουργία.

5.1.4 Μορφοποίηση Δεδομένων

Την επιλογή των πληροφοριών, που χρειάζονται στην επεξεργασία, ακολουθεί η συγκέντρωση των στοιχείων σε ένα αρχείο excel και ο χαρακτηρισμός τους με κατάλληλα επιλεγόμενες ονομασίες στην αγγλική γλώσσα. Δηλαδή:

ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	
Η μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας (T_DAY)	Το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό (TH_GRA)
Ο αριθμός των θερμών ημερών του έτους (W_DAY)	Το πάχος της υπόβασης (TH_SUB)
Ο αριθμός των ψυχρών ημερών του έτους (C_DAY)	Ο αριθμός των τυπικών αξονικών φορτίων ανά έτος (ESAL/Y)
Ο δείκτης παγετού (FREEZ)	Ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση (DVEH)
Η μέση ετήσια βροχόπτωση (RAIN)	Το ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση (D%TRU)
Ο τύπος οδοστρώματος (PAV_TYPE)	Ο συνολικός αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα (LVEH)
Το πάχος της ασφαλτικής στρώσης (TH_BIT)	Το συνολικό ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα (L%TRU)
Το πάχος της δύσκαμπτης στρώσης (TH_RIG)	

Πίνακας 5.1: Ονομασία ανεξάρτητων μεταβλητών στο αρχείο της επεξεργασίας.

Σε δεύτερη φάση ακολουθεί η μορφοποίηση των δεδομένων, σε κάθε στήλη των οποίων έχει δοθεί ειδική ονομασία. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την εισαγωγή, για κάθε κατηγορία δεδομένων, αριθμητικών συμβόλων που αντιπροσωπεύουν κάθε κατηγορία ποιοτικής επιλογής ανάλογα με την φύση της μεταβλητής. Αποτελεί απαραίτητο στάδιο για την εφαρμογή του επιλεγόμενου στατιστικού προτύπου.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστεί το εύρος τιμών κάθε μεταβλητής:

1. Η μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας (T_DAY), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 1,7 °C έως 18 °C.
2. Ο αριθμός των θερμών ημερών του έτους (W_DAY), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 3 έως 132 ημέρες ανά έτος με μέγιστη θερμοκρασία πάνω από 25 °C.

3. Ο αριθμός των ψυχρών ημερών του έτους (C DAY), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 0 έως 200 ημέρες ανά έτος με ελάχιστη θερμοκρασία κάτω από 0 °C.
4. Ο δείκτης παγετού (FREEZ), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 0 h°C έως 31560 h °C
5. Η μέση ετήσια βροχόπτωση (RAIN), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 185mm έως 1850mm ανά έτος.
6. Ο τύπος οδοστρώματος, αν το οδόστρωμα είναι εύκαμπτο τότε η μεταβλητή αυτή λαμβάνει την τιμή 0. Αν το οδόστρωμα είναι ημιάκαμπτο τότε λαμβάνει την τιμή 1.
7. Το πάχος της ασφαλικής στρώσης (TH BIT), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 40mm έως 640mm.
8. Το πάχος της δύσκαμπτης στρώσης (TH RIG), κυμαίνεται από 0mm (στα εύκαμπτα οδοστρώματα) έως 240mm.
9. Το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό (TH GRA), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 0mm έως 1000mm.
10. Το πάχος της υπόβασης (TH SUB), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 0mm έως 1800mm.
11. Ο αριθμός των τυπικών αξονικών φορτίων ανά έτος (ESAL/Y), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 3650 έως 4073854 τυπικά αξονικά φορτία βάρους 10 τόνων (100kN) ανά έτος στο υπό μελέτη τμήμα.

12. Ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση (DVEH), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 120 έως 52756 οχήματα ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση στο υπό μελέτη τμήμα.
13. Το ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση (D%TRU), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 2 έως 29 % ποσοστό φορτηγών οχημάτων από το σύνολο των οχημάτων που διέρχονται από το υπό μελέτη τμήμα ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση.
14. Ο συνολικός αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα (LVEH), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 120 έως 52756 οχήματα ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση στο υπό μελέτη τμήμα.
15. Το συνολικό ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα (L%TRU), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 2 έως 100 % ποσοστό φορτηγών οχημάτων από το σύνολο των οχημάτων που διέρχονται από το υπό μελέτη τμήμα ανά ημέρα.

5.1.5 Στατιστική Επεξεργασία Δεδομένων

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 τη δημιουργία ενός κατάλληλου προτύπου για τον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Η ανάπτυξη αυτή μπορεί να γίνει με παραμετρικές και ημι-παραμετρικές μεθόδους. Ακολουθεί η αξιολόγηση της επίδρασης που διαπιστώνεται και ο εντοπισμός τυχόν διαφοροποιήσεων που οφείλονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε προτύπου και στους κανόνες επεξεργασίας που το καθένα ακολουθεί. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

5.1.5.1 Παραμετρική Μέθοδος

Με τα παραμετρικά πρότυπα, πολλές εναλλακτικές κατανομές για την συνάρτηση «διακινδύνευσης» χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία. Οι κατανομές αυτές είναι η γάμμα, η εκθετική, η Weibull, η λογαριθμολογιστική, η λογαριθμοκανονική και άλλες. Από αυτές τις κατανομές, αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για να βρεθεί η επιρροή των ανεξάρτητων μεταβλητών, που αναφέρθηκαν παραπάνω, στην εξαρτημένη μεταβλητή, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, είναι η Weibull, η εκθετική, η λογαριθμολογιστική και η λογαριθμοκανονική. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή αυτών των κατανομών με τη βοήθεια του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης LIMDEP παρουσιάζονται σε επόμενο υποκεφάλαιο.

Στην επόμενη φάση της επεξεργασίας, εξάγονται τα αποτελέσματα και με τη βοήθεια του στατιστικού ελέγχου t -statistic αξιολογείται το μέγεθος της επίδρασης κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη. Στην περίπτωση που μέσω του ελέγχου, εκτιμάται επίδραση ανεξάρτητης μεταβλητής μικρής στατιστικής σημαντικότητας πραγματοποιείται δεύτερο στάδιο επεξεργασίας με εξαίρεση της/ων συγκεκριμένης/ων μεταβλητής/ων.

5.1.5.2 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 ανεξάρτητων μεταβλητών στην συνάρτηση «διακινδύνευσης». Τα ημι-παραμετρικά πρότυπα, αντιθέτως, είναι περισσότερο γενικά διότι δεν υποθέτουν κατανομή για τα στοιχεία της χρονικής διάρκειας δραστηριοτήτων ή του χρόνου που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, παρ'όλο που διατηρούν την υπόθεση των παραμετρικών προτύπων, δηλαδή της επιρροής των ανεξάρτητων μεταβλητών στην συνάρτηση «hazard». Η στατιστική ανάλυση των στοιχείων με την χρήση ημι-παραμετρικών προτύπων

«hazard» γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης LIMDEP. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται σε υποκεφάλαιο που ακολουθεί.

Στην επόμενη φάση της επεξεργασίας, όπως και στις παραμετρικές μεθόδους, εξάγονται τα αποτελέσματα και με τη βοήθεια του στατιστικού ελέγχου t -statistic αξιολογείται το μέγεθος της επίδρασης κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη. Στην περίπτωση που μέσω του ελέγχου, εκτιμάται επίδραση ανεξάρτητης μεταβλητής μικρής στατιστικής σημαντικότητας πραγματοποιείται δεύτερο στάδιο επεξεργασίας με εξαίρεση της/ων συγκεκριμένης/ων μεταβλητής/ων.

5.1.6 Αποτελέσματα από τη Στατιστική Επεξεργασία

Σκοπός της στατιστικής επεξεργασίας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με τις παραμέτρους εκείνες που επηρεάζουν τον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Το μεγαλύτερο μέρος της στατιστικής επεξεργασίας επικεντρώνεται στον προσδιορισμό της σχέσης των ανεξάρτητων μεταβλητών, όπως είναι οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε τμήμα οδοστρώματος, τα κατασκευαστικά και τα κυκλοφοριακά δεδομένα για τα οδοστρωματικά τμήματα, με την εξαρτημένη μεταβλητή, δηλαδή τον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της στατιστικής επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκαν παραμετρικές και ημι-παραμετρικές μέθοδοι όπως περιγράφηκαν στις παραγράφους 5.1.5.1 και 5.1.5.2. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με τη μορφή πινάκων στους οποίους εμφανίζονται οι ανεξάρτητες και εξαρτημένες μεταβλητές, η μέθοδος που χρησιμοποιείται όπως επίσης και ο συντελεστής επίδρασης (coefficient estimate b) της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη και το επιτυγχανόμενο επίπεδο σημαντικότητας (t -statistic). Η t -τιμή ενός ελέγχου (t -statistic) είναι η οριακή τιμή του επιπέδου σημαντικότητας α για την οποία κρίνεται απορριπτέα η μηδενική υπόθεση H_0 . Αν $t > \alpha$, η μηδενική υπόθεση

απορρίπτεται και το αποτέλεσμα του ελέγχου κρίνεται σημαντικό. Η τιμή του μεγέθους t -statistic είναι ιδιαίτερα χρήσιμη διότι συμβάλει στο να εξαχθούν συμπεράσματα για το αν η επιρροή των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη είναι στατιστικώς σημαντική ή όχι. Στις περιπτώσεις που εξετάζονται παρακάτω λαμβάνεται τιμή του επιπέδου σημαντικότητας $\alpha=0,10$. Σημειώνεται ότι από το σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών που εξετάζονται γίνονται αποδεκτές εκείνες με επίπεδο εμπιστοσύνης $(1-\alpha)\%:90\%$.

5.1.6.1 Αποτελέσματα από τη Στατιστική Επεξεργασία των Στοιχείων με Παραμετρικά Πρότυπα

Στους πίνακες 5.2, 5.3, 5.4 και 5.5 και τα σχήματα 5.1(α), 5.1(β), 5.2(α), 5.2(β), 5.3(α), 5.3(β), 5.4(α), 5.4(β) που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση παραμετρικών προτύπων για τη συνάρτηση «διακινδύνευσης» και τη συνάρτηση «επιβίωσης» όπου εξαρτημένη μεταβλητή είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων και ανεξάρτητες μεταβλητές είναι η μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας (T_DAY), ο αριθμός των θερμών ημερών (W_DAY), ο αριθμός των ψυχρών ημερών (C_DAY), ο δείκτης παγετού (FREEZ), η μέση ετήσια βροχόπτωση (RAIN), ο τύπος οδοστρώματος (PAV_TYPE), το πάχος της ασφαλικής στρώσης (TH_BIT), το πάχος της δύσκαμπτης στρώσης (TH_RIG), το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό (TH_GRA), το πάχος της υπόβασης (TH_SUB), ο αριθμός των τυπικών αξονικών φορτίων βάρους 10 τόνων που διέρχονται από το υπό μελέτη τμήμα στη διάρκεια ενός έτους (ESAL/Y), ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος (DVEH), το ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος (D%TRU), ο συνολικός αριθμός οχημάτων ανά ημέρα στο υπό μελέτη τμήμα (LVEH) και το συνολικό ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα στο υπό μελέτη τμήμα (L%TRU).

Από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης παρατηρείται ότι, σε ότι αφορά τον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια

εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, οι ανεξάρτητες μεταβλητές έχουν διαφορετική επιρροή στην εξαρτημένη. Πιο συγκεκριμένα, για τις επί μέρους κατανομές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της επιρροής των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη, παρατηρήθηκαν τα εξής:

Κατανομή Weibull

Υποθέτοντας την κατανομή Weibull εξήχθησαν δύο πρότυπα χρόνου, τα οποία ονομάζονται Weibull 1 και Weibull 2 (πίνακας 5.2 και σχήματα 5.1(α), 5.1(β)). Η μεταβλητή που περιγράφει τον αριθμό των ψυχρών ημερών του έτους εμφανίζεται ως η λιγότερο στατιστικά σημαντική (με τιμή t -statistic = 1,3 και t -statistic = 1,4 αντίστοιχα). Οι τιμές αυτές εμφανίζουν, επίσης, αρνητικό πρόσημο πράγμα που σημαίνει ότι ο αριθμός των ψυχρών ημερών ως μεταβλητή ασκεί αρνητική επιρροή στο χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Δηλαδή, αν ο αριθμός των ψυχρών ημερών αυξηθεί, με την προϋπόθεση ότι οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές, τότε ο χρόνος που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων μειώνεται κατά ένα ποσοστό πολλαπλασιασμένο με το συντελεστή της συγκεκριμένης μεταβλητής της θεωρούμενης κατανομής.

Στατιστικά σημαντική μεταβλητή για τα δύο αυτά πρότυπα είναι και ο τύπος οδοστρώματος. Το αρνητικό πρόσημο για τη συγκεκριμένη μεταβλητή σημαίνει ότι ο χρόνος που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων είναι μικρότερος για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

Σε ότι αφορά τις υπόλοιπες μεταβλητές που θεωρούνται στατιστικά σημαντικές για τις συγκεκριμένες κατανομές, παρατηρείται ότι ο αριθμός των τυπικών αξονικών φορτίων ανά έτος, ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος και το συνολικό ποσοστό των φορτηγών στο υπό μελέτη τμήμα, έχουν αρνητική επιρροή στον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την

τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Δηλαδή, αυτό σημαίνει ότι αύξηση στις μεταβλητές αυτές (μιας μεταβλητής κάθε φορά με τις υπόλοιπες να παραμένουν σταθερές), συνεπάγεται μείωση του χρόνου. Το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό, αντίθετα, έχει θετική επιρροή στον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων και συνεπώς αύξηση αυτού προκαλεί αύξηση του χρόνου.

Επίσης, για τις συγκεκριμένες κατανομές Weibull, ο χρόνος που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων θεωρείται στατιστικά ανεξάρτητος από τις υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων κατανομής Weibull

Σε αυτό το σημείο της παρούσης διπλωματικής εργασίας κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων ως προς την επιρροή των διαφόρων ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη, σύμφωνα με όσα είναι γνωστά στο πεδίο των εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων από εμπειρικές ή/και εργαστηριακές έρευνες.

Έτσι, σε ότι αφορά τον αριθμό των ψυχρών ημερών του έτους (C_DAY) η ανάλυση, όπως προαναφέρθηκε, έδειξε ότι ασκεί αρνητική επιρροή στο χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Αυτό είναι λογικό γιατί όταν ένα οδόστρωμα βρίσκεται σε περιοχή που επικρατεί θερμοκρασία υπό του μηδενός για πολλές ημέρες το χρόνο, γίνεται πολύ ψαθυρό και μειώνεται η αντοχή του. Συνεπώς, η αύξηση των ψυχρών ημερών του έτους επιταχύνει την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων.

Ο τύπος του οδοστρώματος (PAV_TYPE) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο ως προς τον χρόνο εμφάνισης ρηγματώσεων σε ένα οδόστρωμα και μάλιστα τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα αναμένεται να ρηγματωθούν πιο αργά από τα εύκαμπτα. Αυτό συμβαίνει διότι στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα το μέτρο ελαστικότητας των στρώσεων από αμμοχάλικα κατεργασμένα με τσιμέντο είναι πολύ μεγαλύτερο των αντίστοιχων της ασφαλτικής στρώσης και των στρώσεων από μη κατεργασμένα υλικά (ΠΤΠ Ο 150 και Ο 155) και της στρώσης έδρασης. Γι'αυτό τα κρίσιμα σημεία του οδοστρώματος, όπου αναπτύσσεται εντατική κατάσταση που θα επιφέρει την κόπωση του οδοστρώματος, δεν είναι η κατώτερη επιφάνεια των ασφαλτικών στρώσεων (κρίσιμο μέγεθος: οριζόντια εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση) ούτε η επιφάνεια της στρώσεως έδρασης (κρίσιμο μέγεθος: κατακόρυφη ανηγμένη παραμόρφωση), όπως στα εύκαμπτα οδοστρώματα, αλλά η εφελκυστική τάση στην κάτω ίνα των κατεργασμένων στρώσεων [26]. Όλα τα παραπάνω ισχύουν στην περίπτωση που εξασφαλίζεται η πλήρης συνεργασία μεταξύ της ασφαλτικής στρώσεως και της της κατεργασμένης στρώσεως. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να αναπτυχθεί εφελκυσμός στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης με ανηγμένη παραμόρφωση και το οδόστρωμα να ρηγματωθεί.

Η αύξηση του πάχους της βάσης από κοκκώδες υλικό (TH_GRA) είναι λογικό να ασκεί θετική επιρροή στη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος αφού οδηγεί σε γρηγορότερη μείωση των τάσεων που ασκούνται στην επιφάνεια του οδοστρώματος σε σχέση με το βάθος.

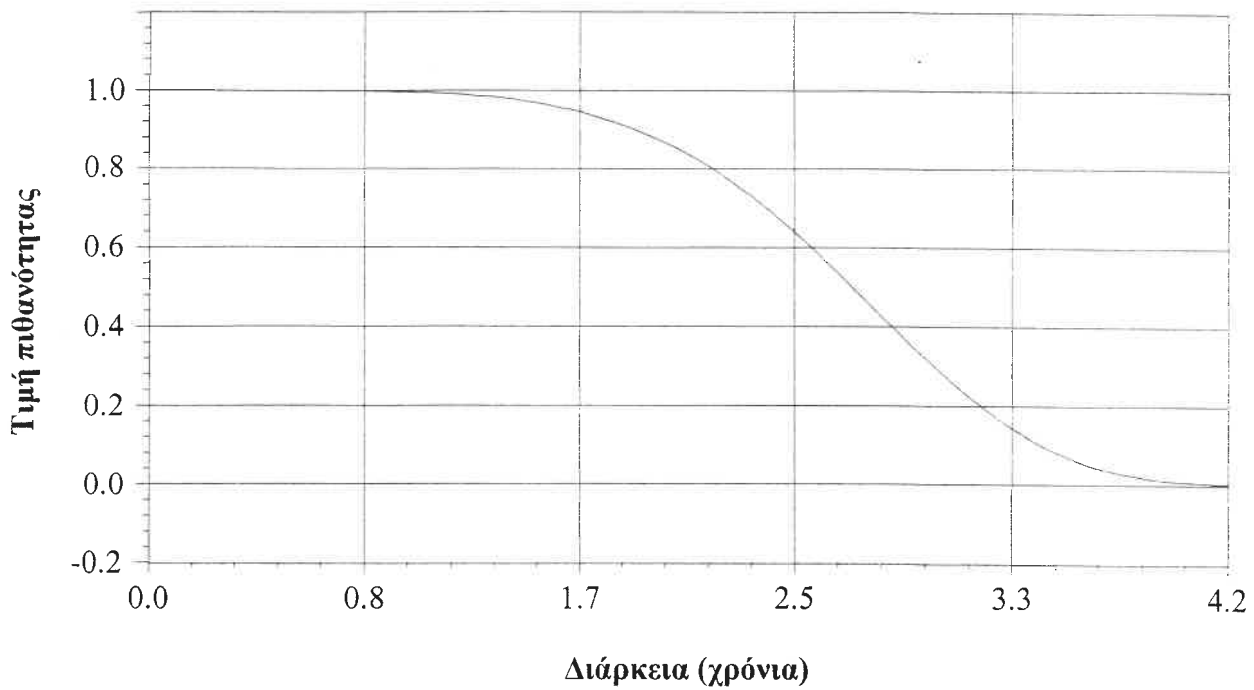
Είναι αυτονόητο ότι η αύξηση του αριθμού των τυπικών αξονικών φορτίων (ESAL/Y), ασκεί αρνητική επιρροή στη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος. Αυτό συμβαίνει διότι οι τάσεις που μεταβιβάζονται από τα φορτία των τροχών στην επιφάνεια του οδοστρώματος αυξάνονται και κατά συνέπεια αυξάνονται και οι κρίσιμες εφελκυστικές τάσεις, που ευθύνονται για την αστοχία λόγω κοπώσεως, στην βάση της ασφαλτικής στρώσης. Ομοίως και για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα, αυξάνονται οι κρίσιμες εφελκυστικές τάσεις στην κάτω ίνα των κατεργασμένων στρώσεων.

Η αύξηση του ποσοστού των φορτηγών (L%TRU) σε ένα οδόστρωμα συνεπάγεται τη μείωση της διάρκειας ζωής του και την γρηγορότερη αστοχία του λόγω κόπωσης.

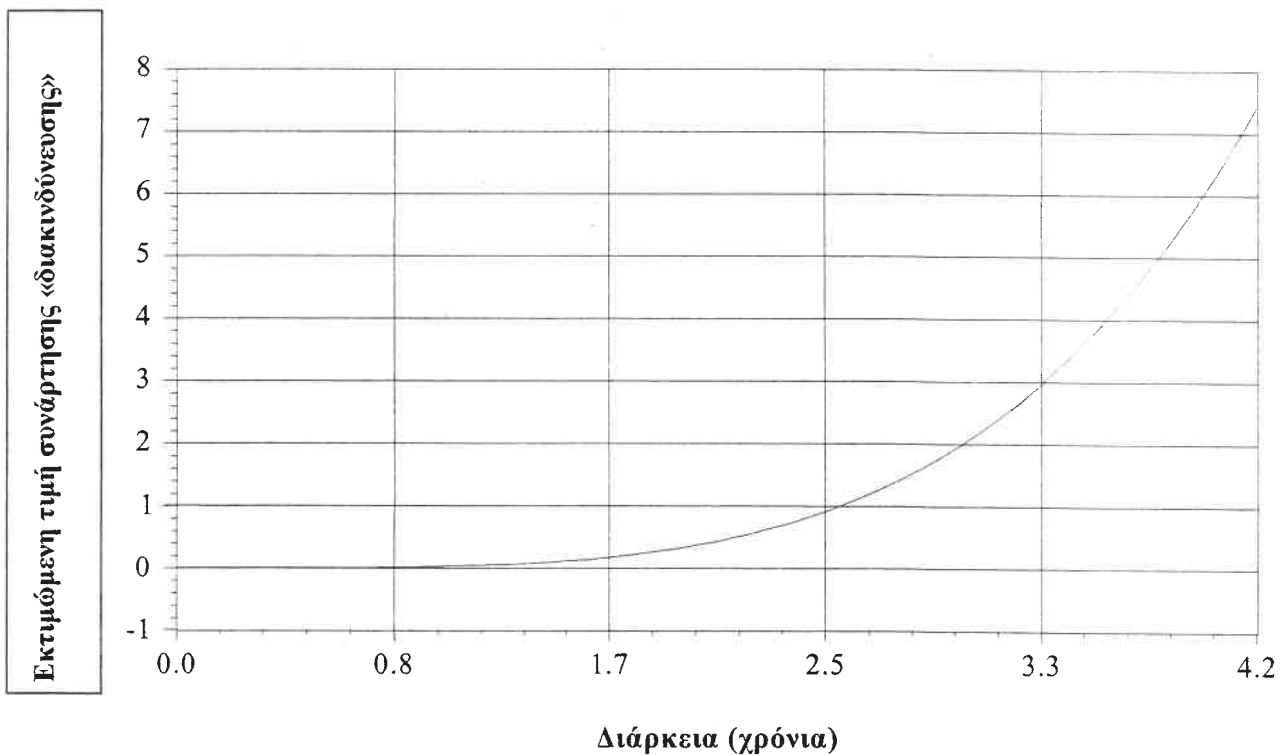
Αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό αφού τα βαρύτερα οχήματα προκαλούν μεγαλύτερες φορτίσεις σε ένα οδόστρωμα από όλους τους άλλους τύπους οχημάτων με αποτέλεσμα να μεταβιβάζουν μεγαλύτερες τάσεις σε αυτό και να το οδηγούν σε ταχύτερη αστοχία.

Σε ότι αφορά τον αριθμό των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος (DVEH), η αύξηση αυτού επιφέρει τα ίδια αποτελέσματα με την αύξηση του αριθμού των τυπικών αξονικών φορτίων ανά έτος.

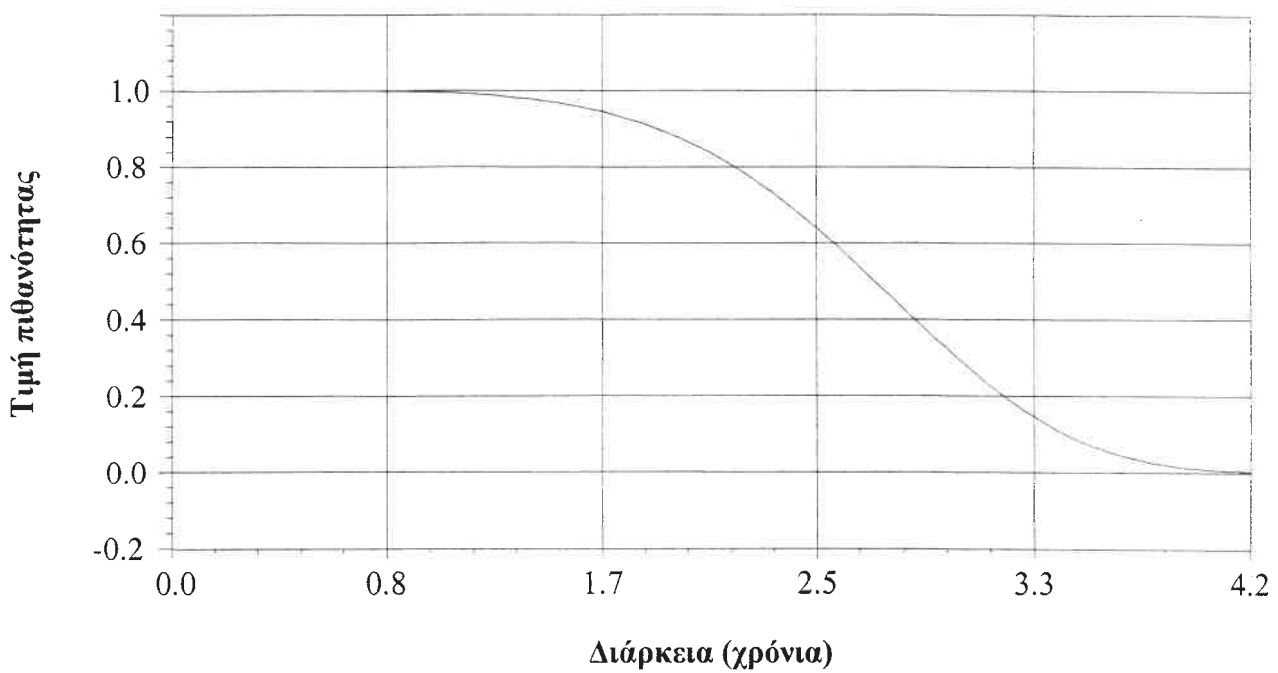
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα της Επεξεργασίας της Ανεξάρτητης Μεταβλητής (Χρόνος μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εδκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων) με την Παραμετρική Μέθοδο Weibull	Weibull 1		Weibull 2	
	Συντελεστής (Coefficient)	Σημαντικότητα (t-statistic)	Συντελεστής (Coefficient)	Σημαντικότητα (t-statistic)
ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ				
Σταθερά	1,196	50,407	1,211	47,002
Μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας	-	-	-	-
Αριθμός θεριμών ημερών	-	-	-	-
Αριθμός ψυχρών ημερών	-0,630	-1,304	-0,689	-1,400
Δείκτης παγετού	-	-	-	-
Μέση ετήσια βροχόπτωση	-	-	-	-
Τύπος οδοστρώματος	-0,147	-6,357	-0,158	-6,787
Πάχος ασφαλικτής στρώσης	-	-	-	-
Πάχος δυσκαμπτής στρώσης	-	-	-	-
Πάχος βάσης	0,159	2,395	0,137	2,066
Πάχος υπόβασης	-	-	-	-
Αριθμός τυπικών αξονικών φορτίων ανά έτος	-0,879	-4,635	-	-
Αριθμός οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση	-	-	-0,330	-2,700
Ποσοστό φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση	-	-	-	-
Συνολικός αριθμός οχημάτων ανά ημέρα	-	-	-	-
Συνολικό ποσοστό φορτηγών ανά ημέρα	-0,270	-4,343	-0,273	-4,376
Παράμετρος 1	0,196	31,753	0,197	31,827
Παράμετρος 2	-	-	-	-



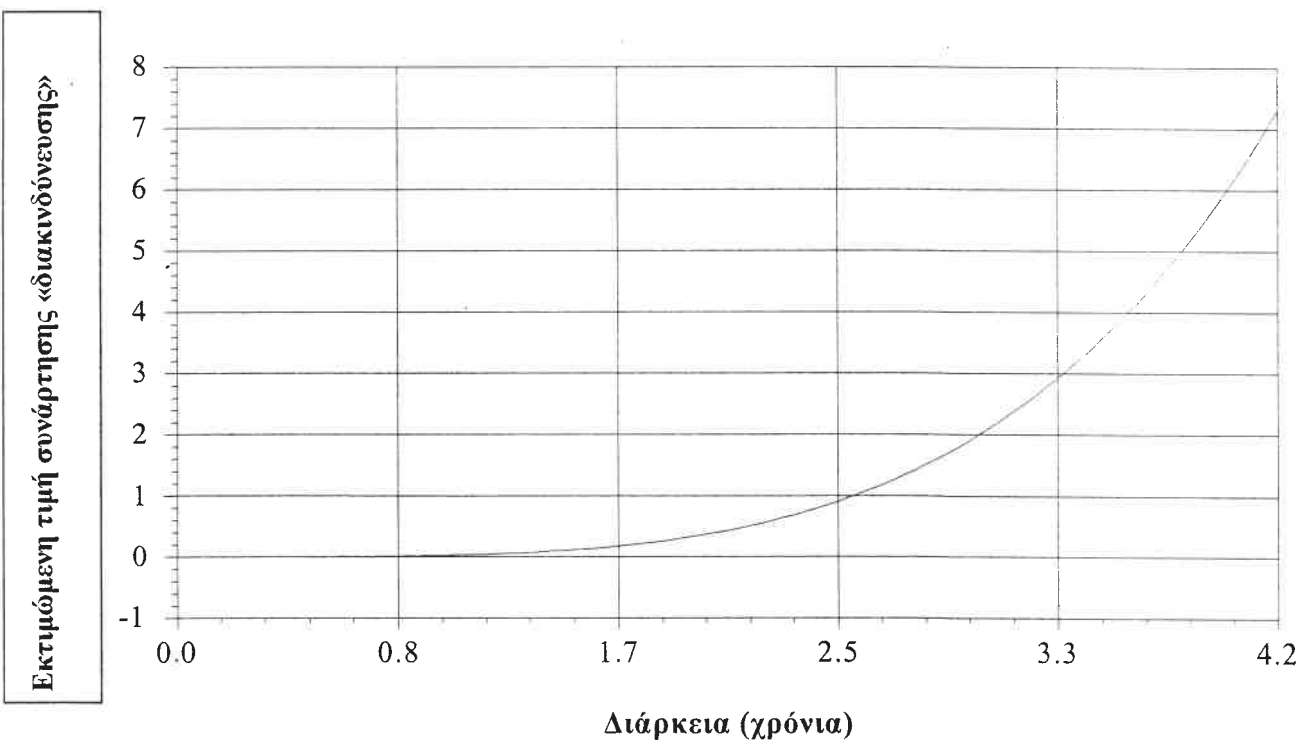
Σχήμα 5.1(α): Γραφική παράσταση της κατανομής «επιβίωσης» για την παραμετρική μέθοδο Weibull και το πρότυπο 1



Σχήμα 5.1(β): Γραφική παράσταση της κατανομής «διακινδύνευσης» για την παραμετρική μέθοδο Weibull και το πρότυπο 1.



Σχήμα 5.2(α): Γραφική παράσταση της κατανομής «επιβίωσης» για την παραμετρική μέθοδο Weibull και το πρότυπο 2.



Σχήμα 5.2(β): Γραφική παράσταση της κατανομής «διακινδύνευσης» για την παραμετρική μέθοδο Weibull και το πρότυπο 2.

Λογαριθμοκανονική κατανομή

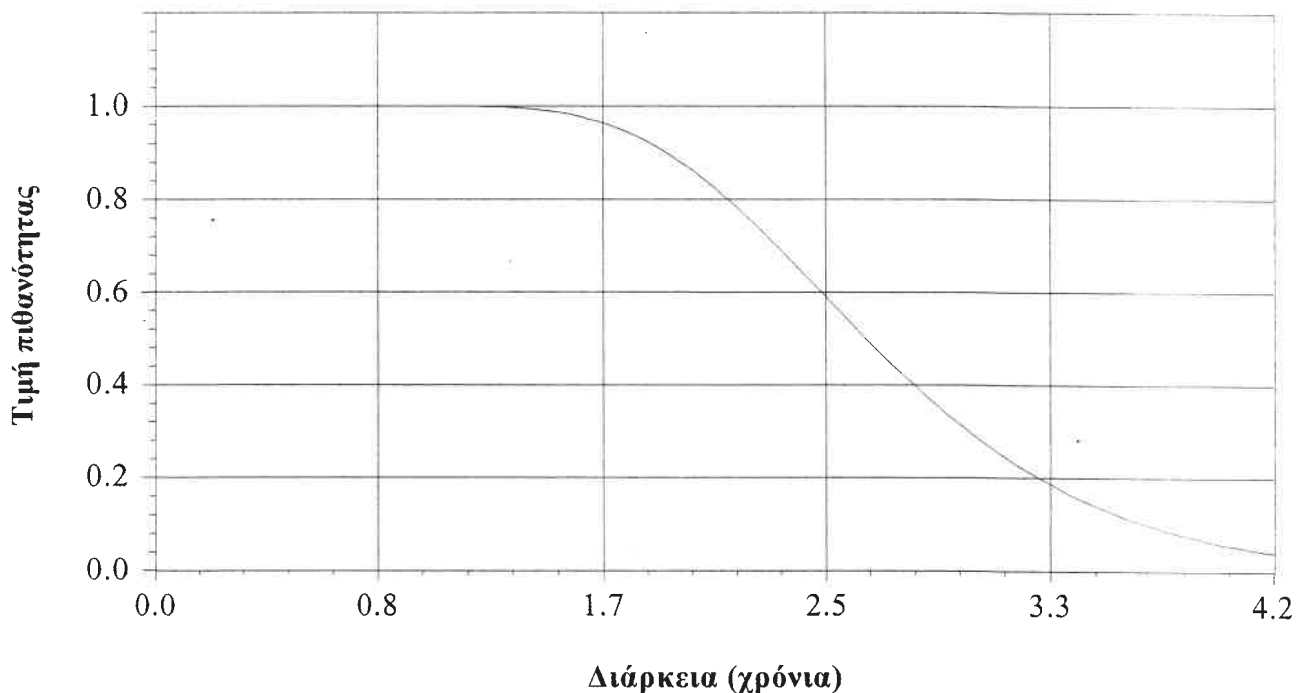
Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των στοιχείων με την λογαριθμοκανονική κατανομή παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3 και στα σχήματα 5.2(α), 5.2(β). Παρατηρείται ότι οι στατιστικά σημαντικές μεταβλητές που επηρεάζουν τον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρώματων, είναι ο αριθμός των ψυχρών ημερών του έτους, ο τύπος οδοστρώματος, το ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση και ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος. Και οι τέσσερις μεταβλητές ασκούν αρνητική επιρροή στην εξαρτημένη μεταβλητή και συνεπώς κάθε αύξηση αυτών (μιας μεταβλητής κάθε φορά με σταθερές όλες τις υπόλοιπες) προκαλεί μείωση του χρόνου που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρώματων. Όσον αφορά τη μεταβλητή που αναφέρεται στον τύπο του οδοστρώματος ισχύουν αυτά που αναφέρθηκαν στην κατανομή Weibull.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων λογαριθμοκανονικής κατανομής

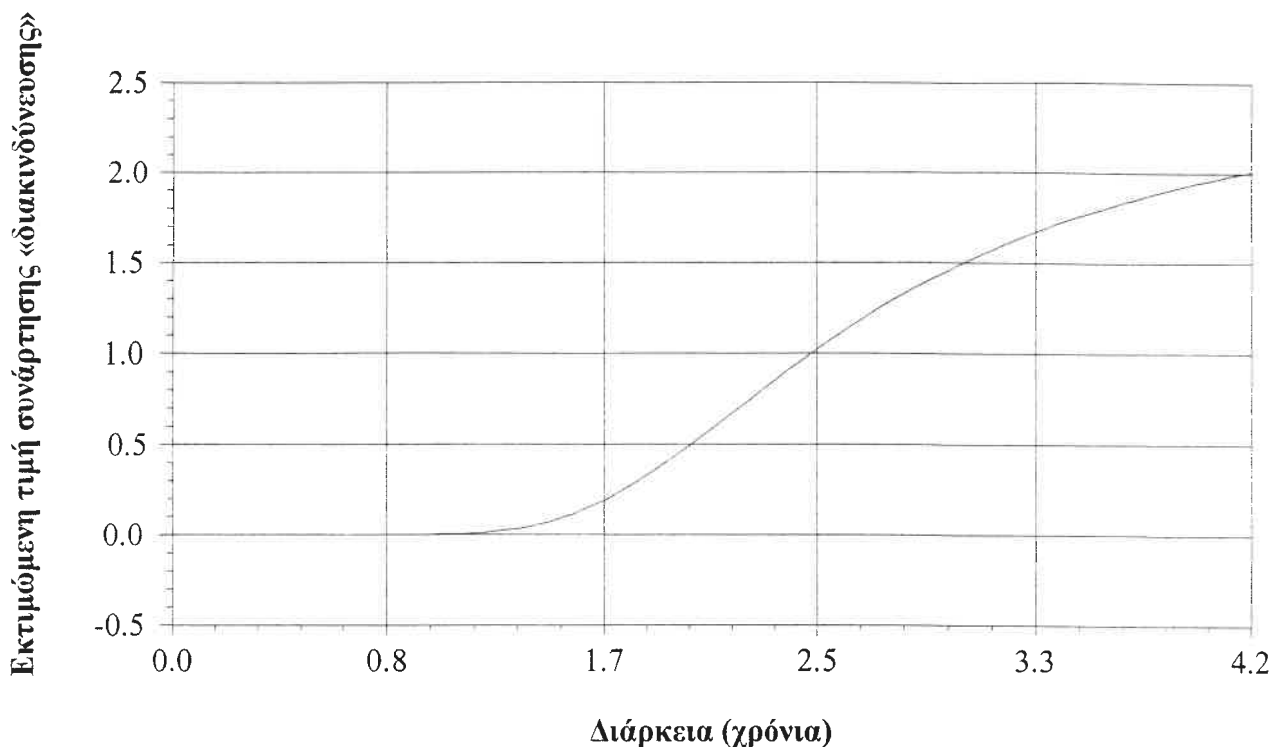
Στο πρότυπο αυτό οι ανεξάρτητες μεταβλητές του αριθμού των ψυχρών ημερών του έτους, του τύπου οδοστρώματος, του ποσοστού των φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση και του αριθμού των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος συμπεριφέρονται ακριβώς κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στο πρότυπο Weibull.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα της Επεξεργασίας της Ανεξάρτητης Μεταβλητής (Χρόνος μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων) με την Λογαριθμοκανονική Παραμετρική Μέθοδο

ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	Λογαριθμοκανονική	
	Συντελεστής (Coefficient)	Σημαντικότητα (t-statistic)
Σταθερά	1,143	29,975
Μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας	-	-
Αριθμός θερμών ημερών	-	-
Αριθμός ψυχρών ημερών	-0,114	-2,051
Δείκτης παγετού	-	-
Μέση ετήσια βροχόπτωση	-	-
Τύπος οδοστρώματος	-0,157	-4,495
Πάχος ασφαλτικής στρώσης	-	-
Πάχος δύσκαμπτης στρώσης	-	-
Πάχος βάσης	-	-
Πάχος υπόβασης	-	-
Αριθμός τυπικών αξονικών φορτίων ανά έτος	-	-
Αριθμός οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση	-	-
Ποσοστό φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση	-0,257	-5,471
Συνολικός αριθμός οχημάτων ανά ημέρα	-0,815	-2,985
Συνολικό ποσοστό φορτηγών ανά ημέρα	-	-
Παράμετρος 1	0,257	43,416
Παράμετρος 2	-	-



Σχήμα 5.2(α): Γραφική παράσταση της κατανομής «επιβίωσης» για την λογαριθμοκανονική παραμετρική μέθοδο.



Σχήμα 5.2(β): Γραφική παράσταση της κατανομής «διακινδύνευσης» για την λογαριθμοκανονική παραμετρική μέθοδο.

Εκθετική κατανομή

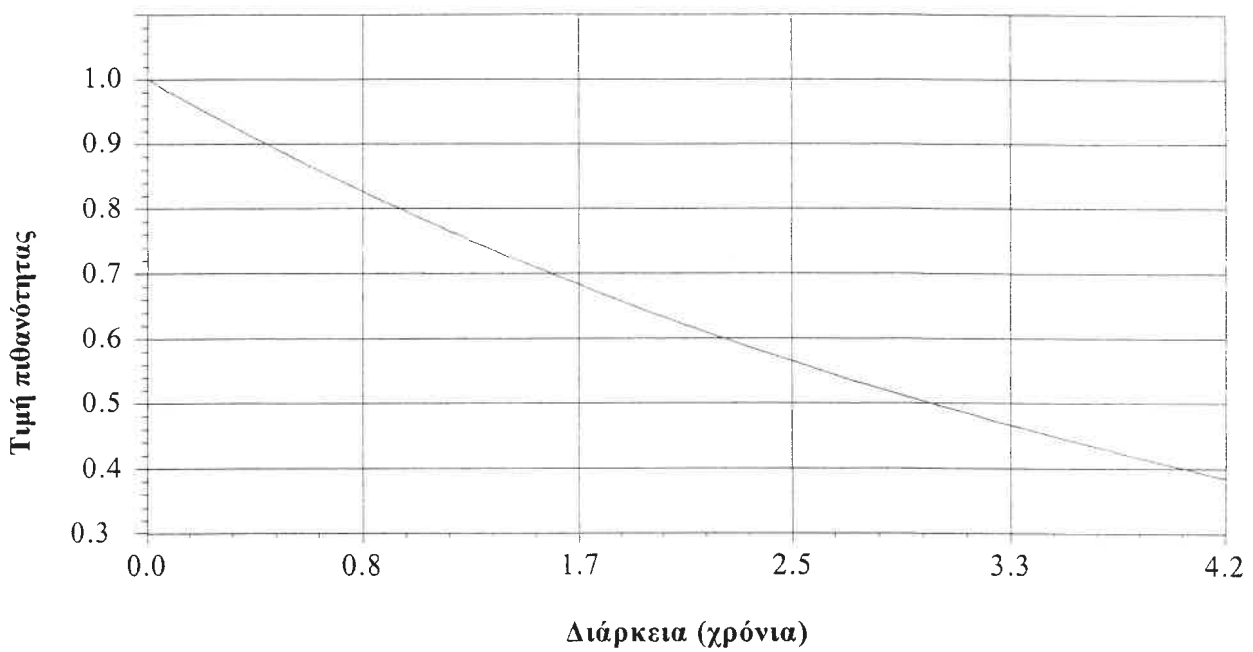
Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των στοιχείων με την εκθετική κατανομή παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4 και στα σχήματα 5.3(α), 5.3(β). Παρατηρείται ότι οι στατιστικά σημαντικές μεταβλητές που επηρεάζουν τον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, είναι ο αριθμός των ψυχρών ημερών του έτους, το ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση και ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος. Και οι τρεις μεταβλητές ασκούν αρνητική επιρροή στην εξαρτημένη μεταβλητή και συνεπώς κάθε αύξηση αυτών (μιας μεταβλητής κάθε φορά με σταθερές όλες τις υπόλοιπες) προκαλεί μείωση του χρόνου που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων εκθετικής κατανομής

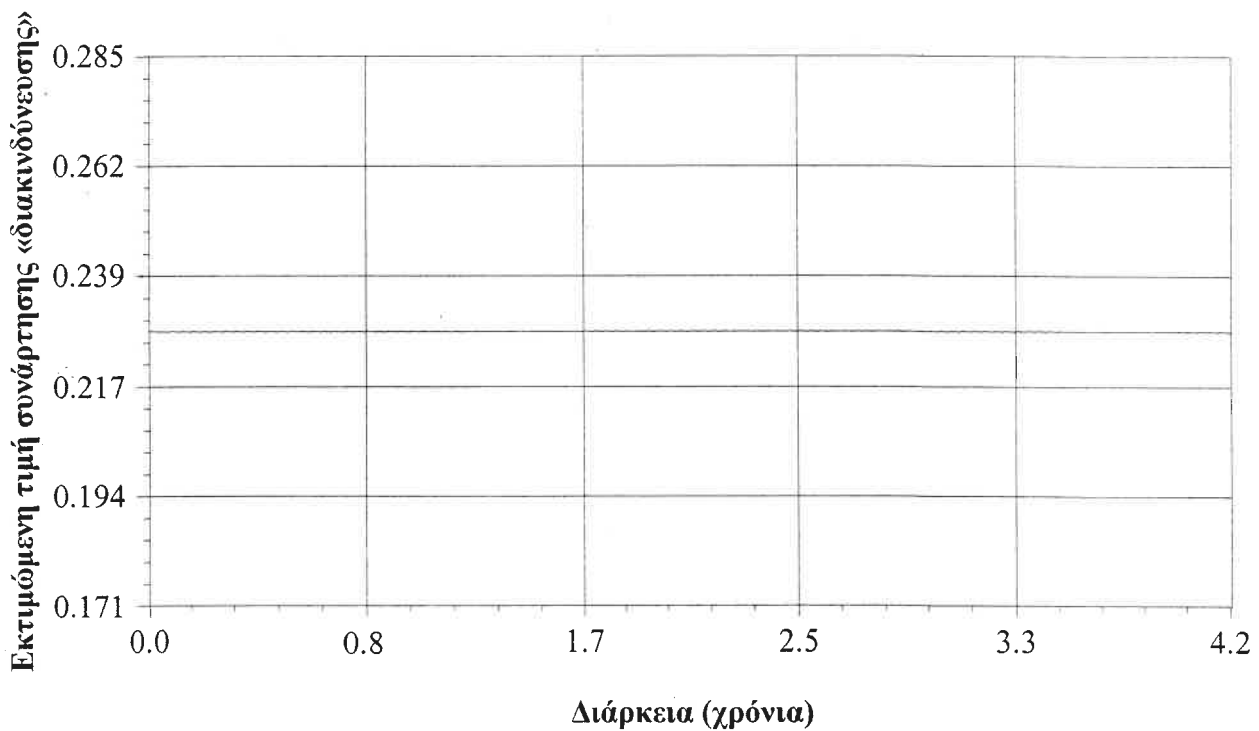
Και σε αυτό το πρότυπο οι ανεξάρτητες μεταβλητές του αριθμού των ψυχρών ημερών του έτους, του ποσοστού των φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση και του αριθμού των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος συμπεριφέρονται ακριβώς κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στο πρότυπο Weibull.

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα της Επεξεργασίας της Ανεξάρτητης Μεταβλητής (Χρόνος μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρώματων) με την Εκθετική Παραμετρική Μέθοδο

ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	Εκθετική	
	Συντελεστής (Coefficient)	Σημαντικότητα (t-statistic)
Σταθερά	1,535	20,450
Μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας	-	-
Αριθμός θερμών ημερών	-	-
Αριθμός ψυχρών ημερών	-0,473	-1,759
Δείκτης παγετού	-	-
Μέση ετήσια βροχόπτωση	-	-
Τύπος οδοστρώματος	-	-
Πάχος ασφαλτικής στρώσης	-	-
Πάχος δύσκαμπτης στρώσης	-	-
Πάχος βάσης	-	-
Πάχος υπόβασης	-	-
Αριθμός τυπικών αξονικών φορτίων ανά έτος	-	-
Αριθμός οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση	-	-
Ποσοστό φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση	-0,133	-3,725
Συνολικός αριθμός οχημάτων ανά ημέρα	-0,336	-1,629
Συνολικό ποσοστό φορτηγών ανά ημέρα	-	-
Παράμετρος 1	-	-
Παράμετρος 2	-	-



Σχήμα 5.3(α): Γραφική παράσταση της κατανομής «επιβίωσης» για την εκθετική παραμετρική μέθοδο.



Σχήμα 5.3(β): Γραφική παράσταση της κατανομής «διακινδύνευσης» για την εκθετική παραμετρική μέθοδο.

Λογαριθμολογιστική κατανομή

Όπως και στην περίπτωση της στατιστικής επεξεργασίας των στοιχείων με την κατανομή Weibull, έτσι και κατά την ανάλυση με την λογαριθμολογιστική κατανομή εξήχθησαν δύο πρότυπα πρόβλεψης του χρόνου που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των στοιχείων με την λογαριθμολογιστική κατανομή παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5 και στα σχήματα 5.4(α), 5.4(β). Παρατηρείται ότι οι στατιστικά σημαντικές μεταβλητές που επηρεάζουν τον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, για την λογαριθμολογιστική 1, είναι ο αριθμός των ψυχρών ημερών του έτους, ο τύπος του οδοστρώματος, ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος και το συνολικό ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα στο υπό μελέτη τμήμα. Για την λογαριθμολογιστική 2 οι στατιστικά σημαντικές μεταβλητές είναι, είναι ο αριθμός των ψυχρών ημερών του έτους, ο τύπος του οδοστρώματος, το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό και ο συνολικός αριθμός οχημάτων ανά ημέρα στο υπό μελέτη τμήμα. Για την επιρροή όλων των παραπάνω μεταβλητών ισχύουν αυτά που έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα πρότυπα.

Ερμηνεία αποτελεσμάτων λογαριθμολογιστικής κατανομής

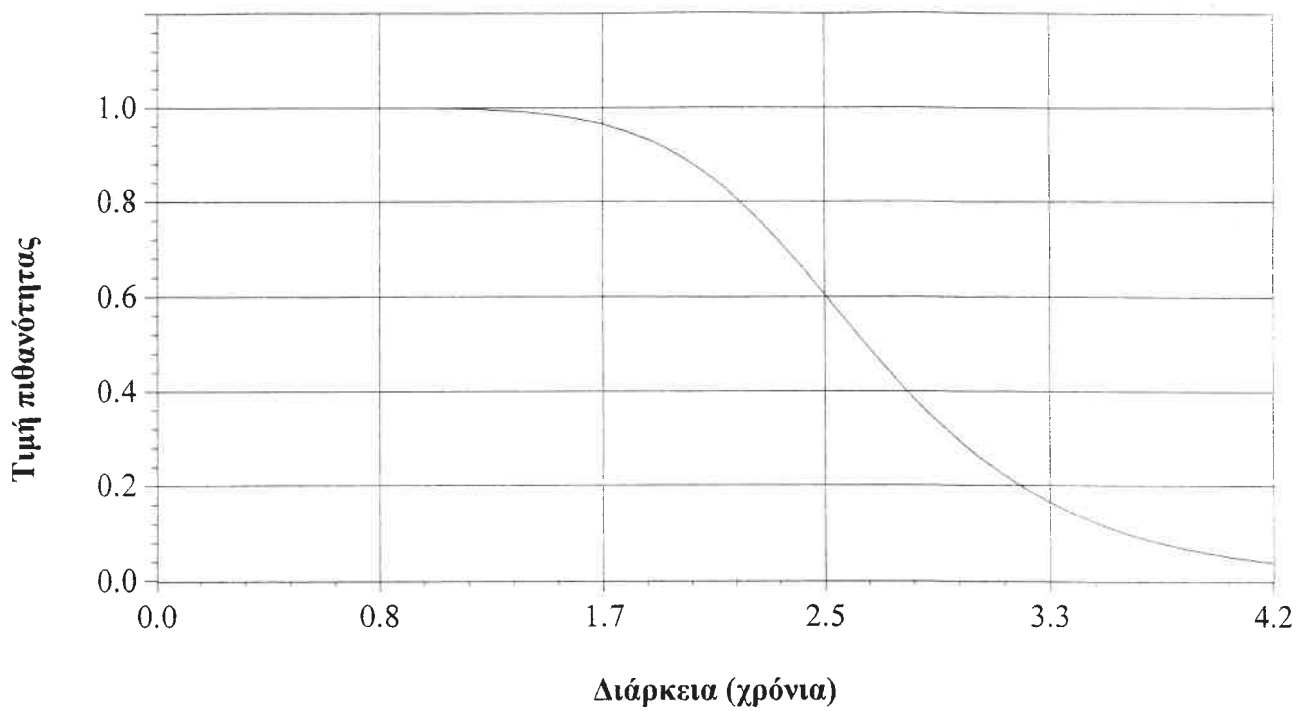
Και σε αυτό το πρότυπο οι ανεξάρτητες μεταβλητές του αριθμού των ψυχρών ημερών του έτους, του τύπου οδοστρώματος, του αριθμού των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος, του πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό και συμπεριφέρονται ακριβώς κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στο πρότυπο Weibull.

Τα πρότυπα που εξήχθησαν με τη χρήση της λογαριθμοκανονικής κατανομής περιέχουν ως ανεξάρτητες μεταβλητές και το συνολικό ποσοστό των φορτηγών ανά ημέρα στο υπό μελέτη τμήμα, καθώς και τον συνολικό αριθμό οχημάτων ανά ημέρα στο υπό μελέτη τμήμα. Οι μεταβλητές αυτές συμπεριφέρονται ακριβώς κατά τον ίδιο τρόπο με τις μεταβλητές του ποσοστού των φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση

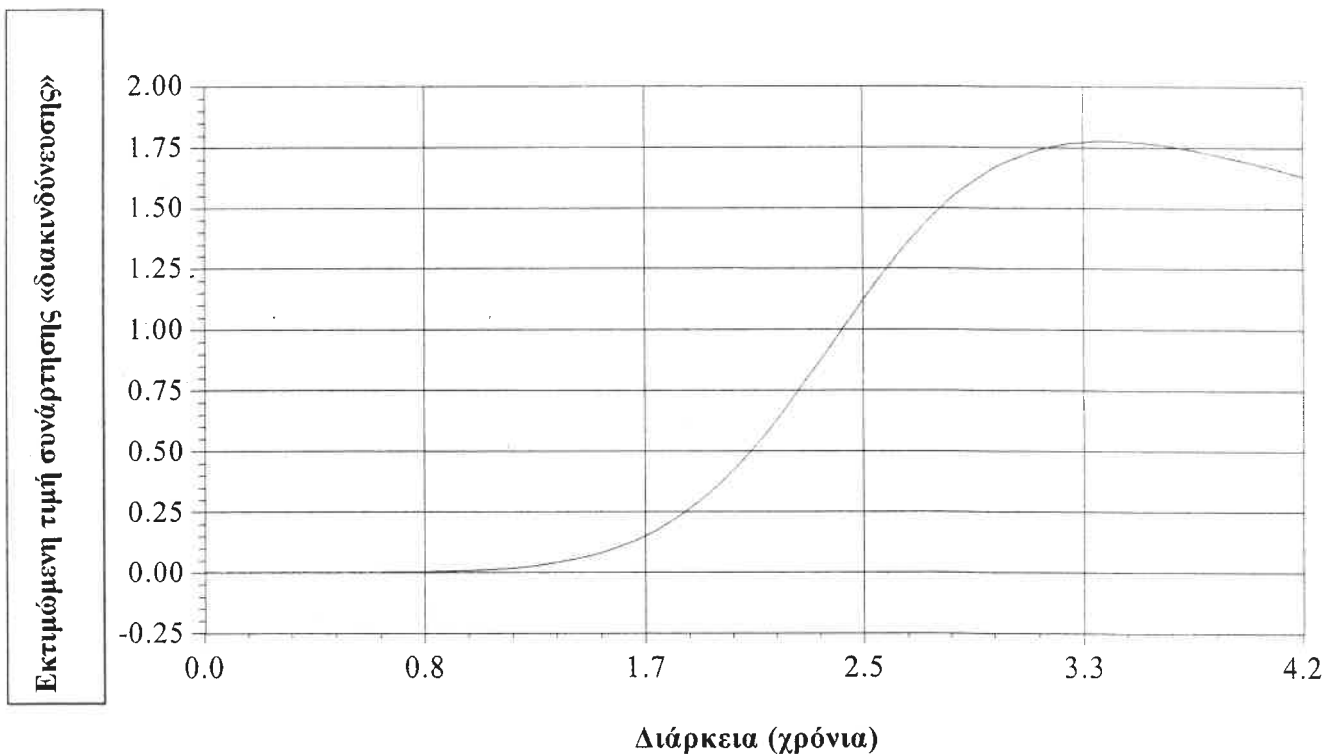
του υπό μελέτη τμήματος, καθώς και του αριθμού των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος αντίστοιχα.

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα της Επεξεργασίας της Ανεξάρτητης Μεταβλητής (Χρόνος μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εβόκαμπων και ημιάκαμπτων οδοντωμάτων) με την Λογαριθμολογιστική Παραμετρική Μέθοδο

ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	Λογαριθμολογιστική 1		Λογαριθμολογιστική 2	
	Συντελεστής (Coefficient)	Σημαντικότητα (t-statistic)	Συντελεστής (Coefficient)	Σημαντικότητα t-statistic
Σταθερά	1,146	34,491	1,179	32,182
Μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας	-	-	-	-
Αριθμός θερμών ημερών	-	-	-	-
Αριθμός ψυχρών ημερών	-0,961	-2,054	-0,785	-1,614
Δείκτης παγετού	-	-	-	-
Μέση ετήσια βροχόπτωση	-	-	-	-
Τύπος οδοστρώματος	-0,170	-5,236	-0,209	-5,355
Πάχος ασφαλτικής στρώσης	-	-	-	-
Πάχος δύσκαμπτης στρώσης	-	-	-	-
Πάχος βάσης	-	-	0,136	1,552
Πάχος υπόβασης	-	-	-	-
Αριθμός τυπικών αξονικών φορτίων ανά έτος	-0,813	-3,080	-	-
Αριθμός οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση	-	-	-	-
Ποσοστό φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση	-0,253	-5,315	-	-
Συνολικός αριθμός οχημάτων ανά ημέρα	-	-	-0,900	-3,675
Συνολικό ποσοστό φορτηγών ανά ημέρα	-	-	-	-
Παράμετρος 1	0,141	33,359	0,141	33,206
Παράμετρος 2	-	-	-	-

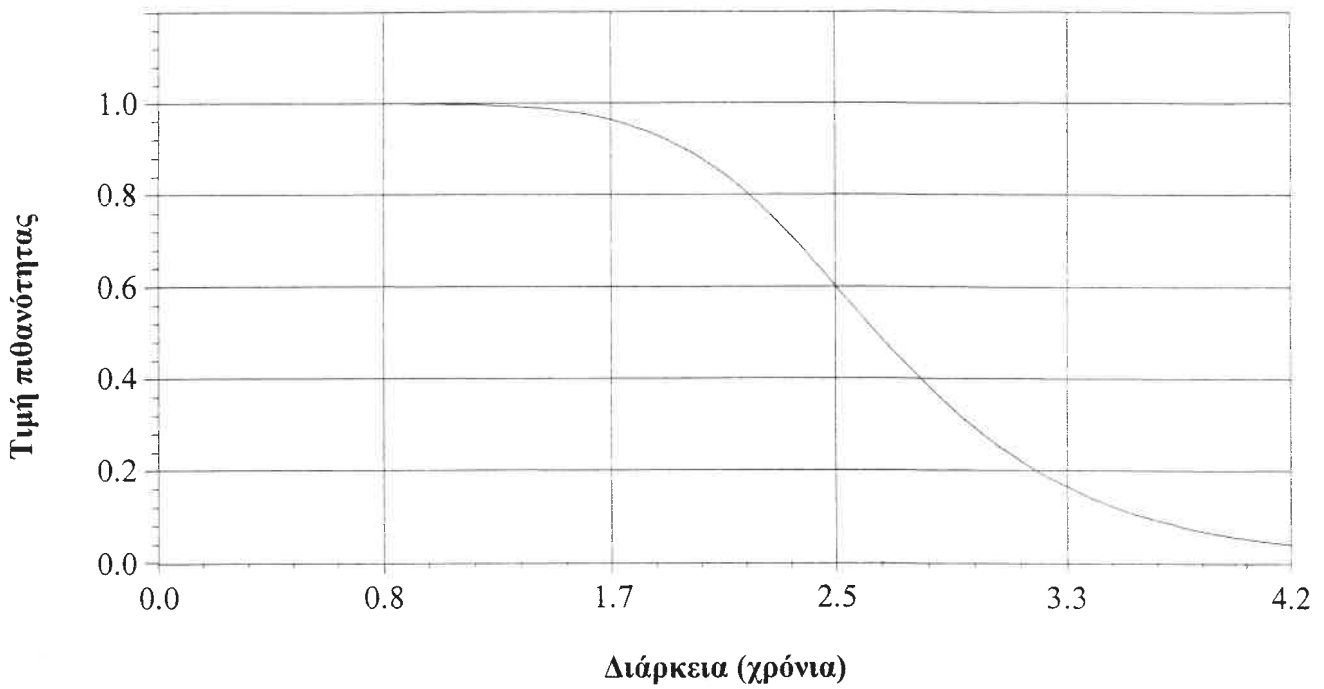


Σχήμα 5.4(α): Γραφική παράσταση της κατανομής «επιβίωσης» για την λογαριθμολογιστική παραμετρική μέθοδο και το πρότυπο 1.

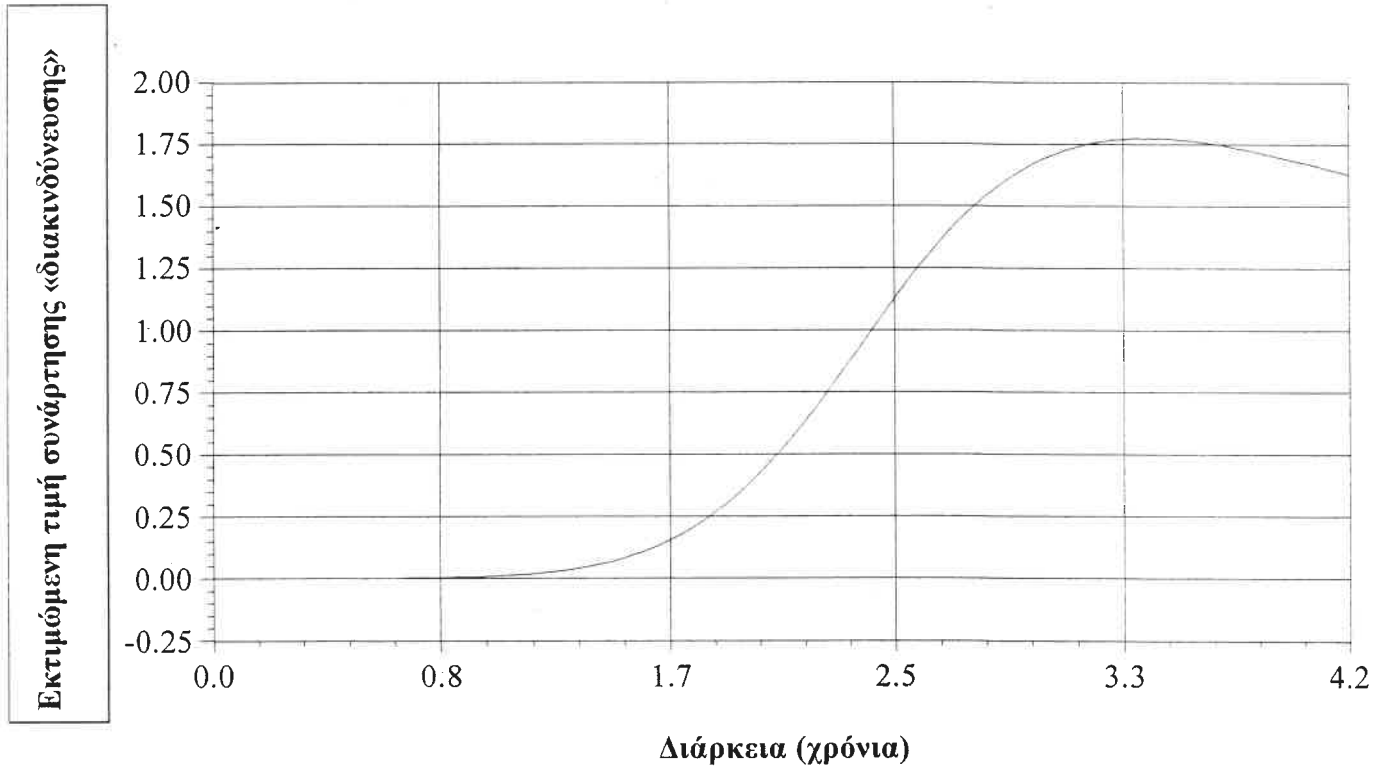


Σχήμα 5.4(β): Γραφική παράσταση της κατανομής «διακινδύνευσης» για την λογαριθμολογιστική παραμετρική μέθοδο και το πρότυπο

1.



Σχήμα 5.5(α): Γραφική παράσταση της κατανομής «επιβίωσης» για την λογαριθμολογιστική παραμετρική μέθοδο και το πρότυπο 2.



Σχήμα 5.5(β): Γραφική παράσταση της κατανομής «διακινδύνευσης» για την λογαριθμολογιστική παραμετρική μέθοδο και το πρότυπο.

5.1.6.2 Αποτελέσματα από τη Στατιστική Επεξεργασία των Στοιχείων με Ημι-παραμετρικά Πρότυπα

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας κρίνεται απαραίτητο να γίνει στατιστική ανάλυση του χρόνου που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, όχι μόνο με παραμετρικές μεθόδους αλλά και με ημι- παραμετρικές. Έτσι χρησιμοποιείται το ημι- παραμετρικό πρότυπο τύπου Cox.

Στην επόμενη φάση της επεξεργασίας, εξάγονται τα αποτελέσματα και με τη βοήθεια του στατιστικού ελέγχου *t*-statistic αξιολογείται το μέγεθος της επίδρασης κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη. Στην περίπτωση που μέσω του ελέγχου εκτιμάται επίδραση ανεξάρτητης μεταβλητής μικρής στατιστικής σημαντικότητας, πραγματοποιείται δεύτερο στάδιο επεξεργασίας με εξαίρεση της/ων συγκεκριμένης/ων μεταβλητής/ων. Τα αποτελέσματα που παρατίθενται παρακάτω έχουν προκύψει από το δεύτερο στάδιο της επεξεργασίας όπου η στατιστική ανάλυση έγινε με την εξαίρεση των μη στατιστικά σημαντικών μεταβλητών.

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί εύκολα από τον πίνακα 5.6 οι μεταβλητές που επηρεάζουν αρνητικά τον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση και ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος. Δηλαδή, η αύξηση των μεταβλητών αυτών (μία κάθε φορά με τις υπόλοιπες σταθερές) προκαλεί μείωση του χρόνου και το οδόστρωμα αναμένεται να ρηγματωθεί πιο γρήγορα. Αντίθετα, όλες οι μεταβλητές που αφορούν κατασκευαστικά δεδομένα για τα οδοστρωματικά τμήματα επηρεάζουν θετικά τον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Δηλαδή, η αύξηση των μεταβλητών αυτών (μία κάθε φορά με τις υπόλοιπες σταθερές) προκαλεί αύξηση του χρόνου και το οδόστρωμα αναμένεται να ρηγματωθεί πιο αργά. Στη συνέχεια

ακολουθεί και η γραφική παράσταση της συνάρτησης «επιβίωσης» του ημι-παραμετρικού προτύπου (σχήμα 5.7).

Ερμηνεία αποτελεσμάτων του ημι-παραμετρικού προτύπου

Η αύξηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (RAIN), δηλαδή η αύξηση της υγρασίας σε ένα οδόστρωμα, είναι λογικό να επηρεάζει αρνητικά τον χρόνο μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Και αυτό διότι επηρεάζει δυσμενώς κυρίως τη συμπεριφορά των εδαφικών υλικών στη βάση ενός οδοστρώματος, με την ταυτόχρονη μείωση του μέτρου παραμορφώσεώς τους. Επίσης είναι σημαντική η επίδρασή της στην ολική παραμένουσα παραμόρφωση [26]. Συνεπώς, παρά το ότι τα ασφαλομίγματα και τα σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά δεν επηρεάζονται γενικά από την περιεχόμενη υγρασία, όταν αυτή αυξάνεται οι στρώσεις των υλικών αυτών αναλαμβάνουν μεγαλύτερες τάσεις εκ των φορτίων από την κυκλοφορία. Δηλαδή οι στρώσεις αυτές καταπονούνται περισσότερο με αποτέλεσμα να μειώνεται η διάρκεια ζωής τους λόγω κόπωσης.

Σε ότι αφορά το πάχος της ασφαλικής στρώσης (TH_BIT), είναι γνωστό ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι απαιτήσεις της κυκλοφορίας (π.χ αυτοκινητόδρομοι) τόσο μεγαλύτερο είναι το απαιτούμενο πάχος των ασφαλικών στρώσεων διότι διαφορετικά η αναπτυσσόμενη εντατική κατάσταση στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων (κρίσιμο σημείο στα εύκαμπτα οδοστρώματα για την αστοχία λόγω κοπώσεως του ασφαλομίγματος) και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (κρίσιμο σημείο στα εύκαμπτα οδοστρώματα για την αστοχία –παραμορφωσιμότητα της στρώσης έδρασης) είναι τόσο δυσμενής που καθορίζει μικρή διάρκεια ζωής του οδοστρώματος [26]. Έτσι, η αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης συνεπάγεται αύξηση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος.

Σε ότι αφορά το πάχος της δύσκαμπτης στρώσης (TH_RIG) στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το μέτρο ελαστικότητας των στρώσεων από αμμοχάλικα κατεργασμένα με τσιμέντο είναι πολύ μεγαλύτερο των αντίστοιχων της ασφαλικής στρώσης και των στρώσεων από μη κατεργασμένα υλικά (ΠΤΠ Ο 150 και Ο 155) και της στρώσης έδρασης. Γι'αυτό τα κρίσιμα σημεία

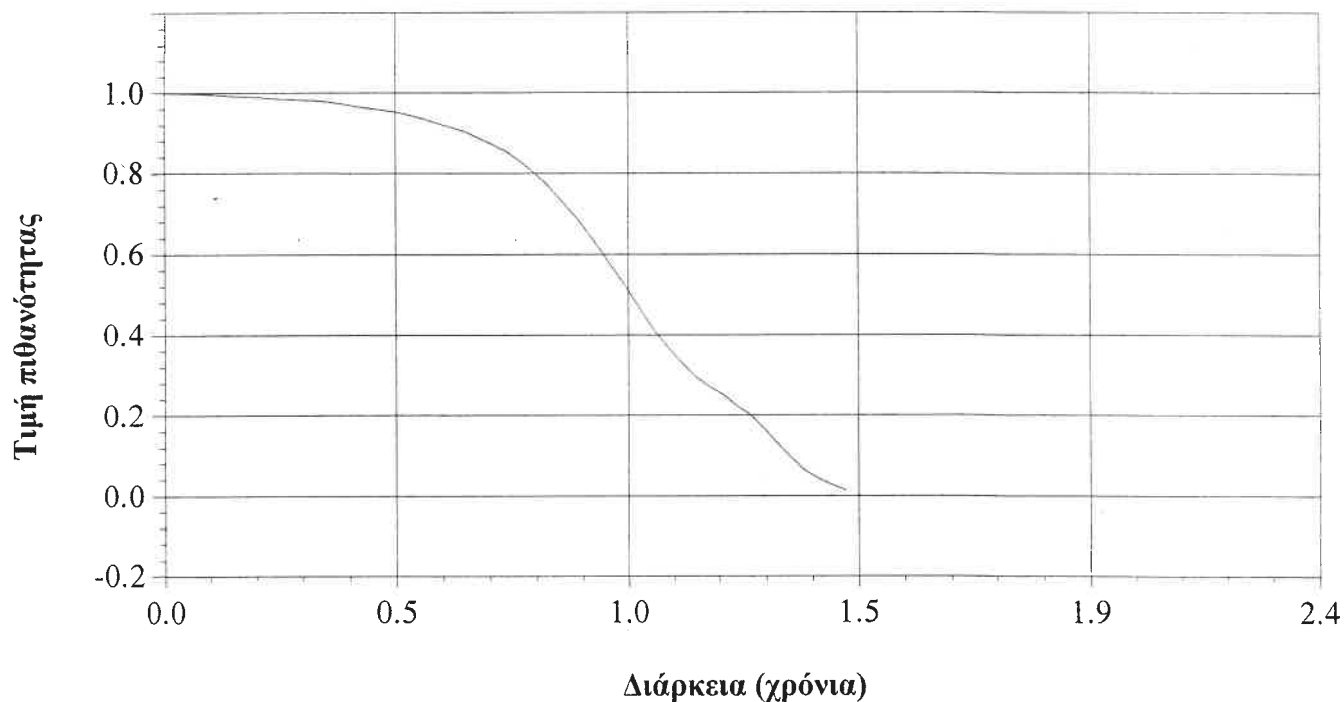
του οδοστρώματος, όπου αναπτύσσεται εντατική κατάσταση, δεν είναι η κατώτερη επιφάνεια των ασφαλικών στρώσεων ούτε η επιφάνεια της στρώσης έδρασης, όπως στα εύκαμπτα οδοστρώματα, αλλά η εφελκυστική τάση στην κάτω ίνα των κατεργασμένων στρώσεων. Όλα τα παραπάνω ισχύουν στην περίπτωση που εξασφαλίζεται η πλήρης συνεργασία μεταξύ της ασφαλικής στρώσεως και της της κατεργασμένης στρώσεως. Σε αντίθετη περίπτωση θα αναπτυχθεί εφελκυσμός στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης με ανηγμένη παραμόρφωση. Έτσι, αν και οι οριζόντιες κρίσιμες τάσεις στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης επηρεάζονται πολύ λίγο από το πάχος και σημαντικά από το μέτρο ελαστικότητας της δύσκαμπτης στρώσης, η αύξηση του πάχους αυτού έχει θετική επιρροή στη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, γιατί μειώνονται οι εφελκυστικές τάσεις στην κάτω ίνα των κατεργασμένων στρώσεων.

Η αύξηση του πάχους της βάσης από κοκκώδες υλικό και η αύξηση του πάχους της υπόβασης, ασκεί θετική επιρροή στη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος αφού οδηγεί σε γρηγορότερη μείωση των τάσεων που ασκούνται στην επιφάνεια του οδοστρώματος σε σχέση με το βάθος.

Η αύξηση του συνολικού αριθμού των οχημάτων ανά ημέρα στο υπό μελέτη τμήμα επιφέρει τα ίδια αποτελέσματα με αυτά που έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα πρότυπα.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα της επεξεργασίας της ανεξάρτητης μεταβλητής (Χρόνος μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων) με Ημι- παραμετρικά Πρότυπα

ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	Συντελεστής (Coefficient)	Σημαντικότητα (t- statistic)
Μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας	-	-
Αριθμός θερμών ημερών	-	-
Αριθμός ψυχρών ημερών	-	-
Δείκτης παγετού	-	-
Μέση ετήσια βροχόπτωση	-0,991	-2,597
Τύπος οδοστρώματος	-	-
Πάχος ασφαλτικής στρώσης	0,343	4,906
Πάχος δύσκαμπτης στρώσης	0,917	5,507
Πάχος βάσης	0,775	2,288
Πάχος υπόβασης	0,374	5,321
Αριθμός τυπικών αξονικών φορτίων ανά έτος	-	-
Αριθμός οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση	-	-
Ποσοστό φορτηγών ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση	-	-
Συνολικός αριθμός οχημάτων ανά ημέρα	-0,227	-1,851
Συνολικό ποσοστό φορτηγών ανά ημέρα	-	-



Σχήμα 5.7: Γραφική παράσταση της κατανομής «επιβίωσης» για την ημι-παραμετρική μέθοδο.

5.1.6.3 Σύγκριση μεταξύ Παραμετρικών και Ημι- παραμετρικών Μεθόδων

Η επιλογή μεταξύ ημι- παραμετρικών και παραμετρικών μεθόδων για τον προσδιορισμό προτύπων χρονικής διάρκειας είναι μια διαδικασία πολύπλοκη. Όταν υπάρχει έλλειψη πληροφόρησης για την κατανομή του δείγματος παράλληλα με το μικρό μέγεθος του δείγματος ή δεν υπάρχει θεωρία που να προτείνει συγκεκριμένη κατανομή τότε το κατάλληλο πρότυπο είναι το μη- παραμετρικό. Στην περίπτωση που η κατανομή του δείγματος είναι γνωστή ή μπορεί να στηριχθεί θεωρητικά τότε επιλέγεται η παραμετρική μέθοδος. Τα ημι- παραμετρικά πρότυπα μπορούν επίσης να είναι μια καλή επιλογή όταν λίγα είναι γνωστά για την κατανομή «διακινδύνευσης».

Η σύγκριση ανάμεσα στις κατανομές «διακινδύνευσης» των παραμετρικών μεθόδων είναι εξίσου δύσκολη και σημαντική στο συγκεκριμένο σημείο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Μια ανεπίσημη μέθοδος (για την ιστορική αναδρομή του θέματος) προτεινόμενη από τους Cox και Oakes (1984) είναι η χρήση των γραφικών παραστάσεων των κατανομών «hazard» και «επιβίωσης» οι οποίες μπορούν να προκύψουν με τη χρήση παραμετρικών μεθόδων και να οδηγήσουν στην επιλογή της παραμετρικής κατανομής. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει μια οπτική προσέγγιση από το σχήμα και τα χαρακτηριστικά (σημεία αλλαγής της κλίσης, κλίση) των καμπυλών «επιβίωσης» και «διακινδύνευσης» η οποία μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή της κατάλληλης παραμετρικής κατανομής.

Σε ότι αφορά την διαφορά μεταξύ της Weibull και της εκθετικής μπορεί να προσεγγιστεί από τη σημαντικότητα της παραμέτρου της κατανομής Weibull αλλά και με τη χρήση των συναρτήσεων μέγιστης πιθανοφάνειας των δύο κατανομών (βλ. σχέση 5.2) και με τη βοήθεια του ελέγχου χ^2 με 1 βαθμό ελευθερίας

$$-2(LL(\beta_e) - LL(\beta_w)) \quad (5.2)$$

Όπου $LL(\beta_e)$ είναι η τιμή της συνάρτησης μέγιστης πιθανοφάνειας για την εκθετική κατανομή και $LL(\beta_w)$ η τιμή της συνάρτησης μέγιστης πιθανοφάνειας για την κατανομή Weibull.

Γενικά, η σύγκριση μεταξύ της Weibull και της εκθετικής δεν είναι η πιο δύσκολη περίπτωση. Το πρόβλημα δημιουργείται όταν η σύγκριση είναι απαραίτητο να γίνει για παράδειγμα μεταξύ της Weibull και της λογαριθμοκανονικής. Αυτό μπορεί να γίνει με τη σύγκριση των συναρτήσεων μέγιστης πιθανοφάνειας ως εξής:

$$-2(LL(0) - LL(\beta_c)) \quad (5.3)$$

Όπου $LL(0)$ είναι η συνάρτηση μέγιστης πιθανοφάνειας χωρίς ανεξάρτητες μεταβλητές (με όλες τις παραμέτρους ίσες με το μηδέν) και $LL(\beta_c)$ είναι η συνάρτηση μέγιστης πιθανοφάνειας με όλες τις στατιστικά σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές. Αυτός ο έλεγχος γίνεται με τον στατιστικό έλεγχο χ^2 με βαθμούς ελευθερίας όσοι είναι οι παράμετροι του προτύπου. Επίσης κάποιος θα μπορούσε να επιλέξει ως καταλληλότερη κατανομή, την κατανομή εκείνη η οποία παρέχει το υψηλότερο επίπεδο σημαντικότητας για τον συγκεκριμένο έλεγχο.

Πίνακας 5.7: Τιμή συνάρτησης μέγιστης πιθανοφάνειας για διάφορες συναρτησιακές μορφές	
ΤΙΜΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΦΑΝΕΙΑΣ	
ΣΥΝΑΡΤΗΣΙΑΚΗ ΜΟΡΦΗ	Χρόνος που μεσολαβεί από την κατασκευή, την τελευταία επιφανειακή συντήρηση ή την τελευταία επίστρωση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων
Λογαριθμολογιστική 1	-255,3979
Weibull 1	-258,8512
Weibull 2	-259,3486
Λογαριθμολογιστική 2	-265,5933
Λογαριθμοκανονική	-267,9381
Εκθετική	-1078,882

Σύμφωνα με τα παραπάνω, και με τη βοήθεια του πίνακα όπου εμφανίζονται οι τιμές της συνάρτησης μέγιστης πιθανοφάνειας για τις εφαρμοζόμενες κατανομές (της παραμετρικής μεθόδου), την μεγαλύτερη τιμή για την συνάρτηση μέγιστης πιθανοφάνειας την εμφανίζει η Λογαριθμολογιστική κατανομή 1 η οποία, όπως προκύπτει και από τα προηγούμενα αποτελέσματα, παρέχει το υψηλότερο επίπεδο σημαντικότητας για στον στατιστικό έλεγχο ο οποίος γίνεται. Επομένως η κατανομή που περιγράφει καλύτερα τον συνολικό χρόνο μετακίνησης και τις συνιστώσες του είναι η Λογαριθμολογιστική κατανομή 1, τα αποτελέσματα της οποίας εμφανίζονται στον πίνακα 5.7.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε και στο τρίτο κεφάλαιο, τα δεδομένα που πάρθηκαν από κάποιες χώρες (Σουηδία, Ολλανδία) ήταν πολύ περισσότερα από των άλλων χωρών (π.χ Ισπανία, Δανία) και συνεπώς πιθανότατα αυτά να καθορίζουν και την τελική μορφή των προτύπων.

5.1.7 Συμπεράσματα

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

- Μεγάλη σημασία έχουν οι κυκλοφοριακές και κατασκευαστικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα οδόστρωμα αφού μεταβλητές, που ανήκουν στις κατηγορίες αυτές, υπεισέρχονται σε όλα τα πρότυπα. Επιπλέον, σημαντική επίδραση φαίνεται να έχουν και οι κλιματολογικές συνθήκες για τον ίδιο λόγο.
- Η ίδια ανεξάρτητη μεταβλητή έχει διαφορετικό βαθμό επιρροής στην πιθανότητα να πραγματοποιηθεί έναρξη ρηγματώσεων, ανάλογα με το πρότυπο στο οποίο υπεισέρχεται. Αυτό σημαίνει ότι σε κάποιο πρότυπο ο παράγοντας αυτός είναι σημαντικότερος σε σχέση με τους υπόλοιπους ενώ, σε άλλο πρότυπο έχει μικρότερη σημασία.
- Ο αριθμός αξονικών διελεύσεων ανά έτος έχει σημαντική επίδραση στην πιθανότητα ρηγμάτωσης όπως, επίσης, και το ποσοστό των βαρέων οχημάτων.
- Πολύ μεγάλη επίδραση στην πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων έχει ο τύπος του οδοστρώματος, με τα ημιάκαμπτα να αναμένεται να ρηγματωθούν πιο αργά από τα εύκαμπτα.
- Αύξηση των ψυχρών ημερών, παρ'όλο 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 ρηγματώνεται απευθείας στην επιφάνειά του. Η ψαθυρή αυτή συμπεριφορά μπορεί να οφείλεται είτε σε αύξηση των ψυχρών ημερών είτε σε υπερβολικά χαμηλές θερμοκρασίες ακόμα και κατά την διάρκεια μιας μόνον ημέρας.

- Σε ό,τι αφορά στα πάχη των στρώσεων, τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι αύξηση στα πάχη οδηγεί σε μείωση της πιθανότητας για ρηγματώση. Ειδικότερα, αν και δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση της επιρροής δύο ανεξάρτητων μεταβλητών που υπεισέρχονται σε διαφορετικά πρότυπα, ενδεικτικά αναφέρεται ότι η αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης έχει μεγαλύτερη επίδραση στην πιθανότητα αυτή, σε σχέση με το πάχος της υπόβασης. Το παραπάνω είναι λογικό καθώς οι ρηγματώσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια στο ίχνος των τροχών (κατά μήκος ρηγματώσεις) επηρεάζονται σαφώς περισσότερο από το πάχος της ασφαλικής στρώσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρήθηκε να αναπτυχθούν πρότυπα του χρόνου που μεσολαβεί από την κατασκευή, τελευταία επίστρωση ή τελευταία επιφανειακή συντήρηση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιώντας στοιχεία επιτόπου μετρήσεων αποκλειστικά, 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 έναρξης ρηγματώσεων του PARIS περιείχαν μόνο δύο ανεξάρτητες μεταβλητές, τη μέση ετήσια κυκλοφορία (ESAL/year) και την αντοχή οδοστρώματος (που εκφράστηκε με τον δείκτη SCI₃₀₀), 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 «κυκλοφορία» αδυνατεί να περιγράψει πλήρως το φαινόμενο της εμφάνισης ρηγματώσεων, ακόμη και σε συνδυασμό με την μεταβλητή «αντοχή». Πρακτικά, για τον μελετητή/διαχειριστή του οδοστρώματος, αυτό σημαίνει ότι έχει στα χέρια του ένα πρότυπο με μόνη μεταβλητή την κυκλοφορία, επομένως θα είναι αρκετά δύσκολο να καθορίσει την στρατηγική για να είναι αυτό πάντα λειτουργικό, καθώς απλά δε θα μπορεί να περιορίσει την κυκλοφορία των οχημάτων, που το πρότυπο δηλώνει ότι είναι η μοναδική αιτία ρηγματώσεων!

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, της οποίας η περιγραφή έγινε στο κεφαλαίο 5, πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης LIMDEP. Συγκεκριμένα το LIMDEP χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή των παραμετρικών και του ημι-παραμετρικού προτύπου ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τον χρόνο που μεσολαβεί από την κατασκευή, τελευταία επίστρωση ή τελευταία επιφανειακή συντήρηση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Σκοπός της επεξεργασίας ήταν να διερευνηθεί και να προτυποποιηθεί ο χρόνος αυτός καθώς και να αξιολογηθεί ο βαθμός επιρροής των παραμέτρων που σύμφωνα με θεωρητικές πηγές, αρχικά, βρέθηκε ότι τον επηρεάζουν.

Μετά από αρκετές δοκιμές και συνδυάζοντας διαφορετικές κάθε φορά ανεξάρτητες μεταβλητές, προέκυψαν από την ανάλυση επτά διαφορετικά πρότυπα του χρόνου που μεσολαβεί από την κατασκευή, τελευταία επίστρωση ή τελευταία επιφανειακή συντήρηση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Τα παραπάνω πρότυπα περιέχουν επιπλέον μεταβλητές, όπως πάχη στρώσεων, αριθμό ψυχρών ημερών, βροχόπτωση, συνολικό αριθμό οχημάτων ανά ημέρα στο υπό μελέτη τμήμα, και ποσοστό φορτηγών. Τα εν λόγω πρότυπα είναι «ευέλικτα» σε ό,τι αφορά 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 τη 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 τη βάση δεδομένων του PARIS αφού αφαιρέθηκαν τμήματα που είχαν πρόβλημα ή ελλιπή στοιχεία.

- Η δημιουργία προτύπων πρόβλεψης του χρόνου που μεσολαβεί από την κατασκευή, τελευταία επίστρωση ή τελευταία επιφανειακή συντήρηση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων αποτέλεσε αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας και πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη νέα βάση δεδομένων και το πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης LIMDEP.
- Έπειτα από το πέρας της στατιστικής επεξεργασίας δημιουργήθηκαν επτά πρότυπα, τα οποία είναι πιθανοτικά, γεγονός που σημαίνει ότι υπολογίζουν την πιθανότητα για εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων συναρτήσει διάφορων ανεξάρτητων μεταβλητών.
- Σε ότι αφορά την επιρροή των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη τα αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα, σύμφωνα με αυτά που ισχύουν από εμπειρικές ή εργαστηριακές έρευνες.
- Η ίδια ανεξάρτητη μεταβλητή έχει διαφορετικό βαθμό επιρροής στην πιθανότητα να εμφανιστεί ρηγματώση, ανάλογα με το πρότυπο στο οποίο υπαισέρχεται.
- Τα πρότυπα που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας περιλαμβάνουν σαφώς μαγαλύτερο αριθμό ανεξάρτητων μεταβλητών από αυτά που εξήχθησαν μετά το πέρας του ερευνητικού προγράμματος PARIS, γεγονός που τα καθιστά πιο αξιόπιστα.
- Φυσικά, πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι τα νέα πρότυπα είναι πρότυπα χρονικής διάρκειας και συνεπώς είναι δυνατό να προβλέψουν απευθείας τη χρονική στιγμή που θα αστοχήσει ένα οδόστρωμα. Αντίθετα, με τη χρήση προτύπων του PARIS δεν μπορεί κανείς να προβλέψει απευθείας τον χρόνο αυτό, αλλά μέσω του υπολογισμού του αριθμού των επιτρεπόμενων αξονικών διελεύσεων ανά έτος (ESAL/year) και της αντοχής του οδοστρώματος (ελάχιστο όριο του δείκτη καμπυλότητας SCI), μπορεί να τον προσδιορίσει κατά προσέγγιση.
- Συνεπώς το πιο σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία είναι ότι τα νέα πρότυπα είναι πολύ πιο εύχρηστα από τα πρότυπα του PARIS και είναι ρεαλιστική, αλλά και επιθυμητή, η εφαρμογή τους κατά τη διαχείριση οδοστρωμάτων. Και τούτο διότι, τα νέα

πρότυπα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον διαχειριστή ενός δικτύου ώστε να καταστρώσει το καλύτερο δυνατό επενδυτικό πρόγραμμα, αφού προγραμματίσει τη χρονική στιγμή που θα χρειαστεί συντήρηση ή πλήρης αποκατάσταση του οδοστρώματος, καθώς και να συλλέξει χρήσιμες πληροφορίες και πρακτικές οδηγίες σε ότι αφορά το σκέλος του 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 διερεύνηση της επαλήθευσης των προτύπων του χρόνου που μεσολαβεί από την κατασκευή, τελευταία επίστρωση, ή τελευταία επιφανειακή συντήρηση μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, χρησιμοποιώντας στοιχεία από τη βάση δεδομένων του ερευνητικού προγράμματος PARIS.
- Προτείνεται, επίσης, η εφαρμογή των συγκεκριμένων προτύπων σε διαφορετική βάση δεδομένων για να διαπιστωθεί η εγκυρότητα τους, αλλά και η εφαρμοσιμότητά τους σε διαφορετικές συνθήκες (κλιματολογικές ή κυκλοφοριακές). 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 προτύπων τόσο για κάθε τύπο οδοστρώματος ξεχωριστά όσο και για άλλους τύπους αστοχιών (π.χ. αυλάκωση).
- Ενδιαφέρον θα είχε, επίσης, η προσπάθεια για δημιουργία ενός συνδυαστικού προτύπου, που θα έχει τη δυνατότητα να προβλέπει τόσο έναρξη όσο και εξέλιξη της αστοχίας.

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] H. Ali, S. Tayabji, and F. La Torre, "*Calibration of a Mechanistic – Empirical Rutting Model for In-Service Pavements*", 77th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 1998.
- [10] Kuo S. et al., "*Development of Flexible Performance Prediction Model based on Pavement Data*", TRB 2003, Annual Meeting, 2002.
- [11] Ahmed A. Eltahan and Robert L. Lytton, "*Mechanistic – Empirical Approach for Modeling Reflection Cracking*", Transportation Research Record 1730, 2000.

- [12] Hyung Bae Kim, Neeraj Buch, and Dong-Yeob Park, "*Mechanistic – Empirical Rut Prediction Model for In-Service Pavements*", Transportation Research Record 1730, 2000.
- [13] Guy Dore, Jean-Marie Konrad, and Marius Roy, "*Deterioration Model for Pavements in Frost Condition*"s, Transportation Research Record 1655, 1999.
- [14] Thomas Van Dam and James Bildilli, "*Performance Trends for Portland Cement Concrete General Aviation Pavements in Illinois*", Transportation Research Record 1524, 1996.
- [15] Abdullah Al-Mansour, Saleh Al-Swailmi, and Swailem Al-Swailem, "*Development of Pavement Performance Models for Riyadh Street Network*", Transportation Research Record 1655, 1999.
- [16] W. Greene, "*Econometric Analysis*", Macmillan Publishong Co., New York, 1993.
- [17] Sammer Madanat and Hee Cheol Shin, "*Development of Distress Progression Models Using Panel Data Sets of In-Service Pavements*", Transportation Research Record 1643, 1998.
- [18] 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.
- [19] Stefan A. Romanoschi and John B. Metcalf, "*Evaluation of Probability Distribution Function for the Life of Pavement Structures*", Transportation Research Record 1730, 2000.
- [20] *The AASHTO Road Test, Report 5, Pavement Research*, Special Report 61E, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1962.
- [21] Jorge A. Prozzi and Samer Madanat, "*Using Duration Models to Analyze Experimental Pavement Failure Data*", Transportation Research Record 1699, 2000.
- [22] PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure) FINAL REPORT, 30 November 1998.
- [23] Γ. Κοκολάκης και Ι. Σπηλιώτης, "Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική", Εκδόσεις Συμείων, Έκδοση 3^η, 1999.
- [24] (α) Bhat C., "*A hazard-based duration model of shopping activity with nonparametric baseline specification and nonparametric control for unobserved heterogeneity*", Pergamon, Transportation Research, Vol. 30, 1996.

(β) Kharoufeh J. and Goulias K., "*Nonparametric identification of daily activity durations using kernel density estimators*", Pergamon, Transportation Research Part B, Vol 36, 2002.

- [25] Han A. and Hausman J.A., "*Flexible parametric estimation of duration and competing risk models*", Journal of Applied Econometrics, Vol.5, 1990.
- [26] Σ. Κόλιας - Α. Λοΐζος, "*Σημειώσεις Οδοστρωμάτων*", Ε.Μ.Π, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Αθήνα, 1999.