



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Επιβλέποντες:

Α. ΛΟΪΖΟΣ & Μ. ΚΑΡΛΑΥΤΗΣ

ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ

ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Διπλωματική εργασία

ΓΡΗΓΟΡΗΣ ΡΕΤΣΙΝΗΣ
ΜΙΧΑΛΗΣ ΣΑΒΟΥΡΔΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2003



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Επιβλέποντες:

Α. ΛΟΪΖΟΣ & Μ. ΚΑΡΛΑΥΤΗΣ

ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ

ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Διπλωματική εργασία

ΓΡΗΓΟΡΗΣ ΠΕΤΣΙΝΗΣ

ΜΙΧΑΛΗΣ ΣΑΒΟΥΡΔΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2003

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες τόσο στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ανδρέα Λοΐζο όσο και στον Λέκτορα κ. Ματθαίο Καρλαύτη για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αλλά και για την πολύτιμη καθοδήγησή τους σε όλα τα στάδια της επιστημονικής έρευνας.

Ευχαριστούμε, επίσης, όλους όσους συνέβαλαν είτε συμβολικά είτε παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες στην ολοκλήρωση της εν λόγω Διπλωματικής Εργασίας.

Αθήνα, Νοέμβριος 2003

Γρηγόρης Ρετσίνης
Μιχάλης Σαβούρδος

ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια να δημιουργηθούν πρότυπα πρόβλεψης έναρξης ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιώντας στοιχεία επιτόπου μετρήσεων. Για το σκοπό αυτό, επελέγη η βάση δεδομένων του ερευνητικού προγράμματος PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure), το οποίο πραγματοποιήθηκε με την συμμετοχή δεκαπέντε ευρωπαϊκών χωρών. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων περιείχε έναν αρκετό μεγάλο αριθμό στοιχείων, όπως κατασκευαστικά, ιστορικά, κλιματολογικά, στοιχεία αστοχιών κ.ά, που κάλυπταν ένα χρονικό διάστημα της τάξης των δέκα ετών περίπου. Με την βοήθεια ενός μη γραμμικού προτύπου (Λογιστική Παλινδρόμηση), επιχειρήθηκε η ανάπτυξη ενός πιθανοτικού προτύπου που να υπολογίζει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων στην επιφάνεια οδοστρωμάτων συναρτήσει ορισμένων ανεξάρτητων μεταβλητών, που φαίνεται να προκαλούν έναρξη του φαινομένου. Η ανάλυση έδειξε ότι σημαντικό ρόλο παίζουν τα πάχη των στρώσεων, η κυκλοφορία, η ηλικία του οδοστρώματος και οι επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες. Τέλος, πραγματοποιήθηκε επαλήθευση των προτύπων σε οδικά τμήματα από τη βάση δεδομένων και αποδείχτηκε ότι τα πρότυπα αποδίδουν εκτιμήσεις σε ικανοποιητικό βαθμό.

ABSTRACT

In the present Diploma Thesis, investigation was made in order to develop models predicting the initiation of cracking on the surface of flexible pavements using data from surveys. To achieve this purpose, the database from the PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure) project was chosen, which was carried out by fifteen European countries. The specific database included a vast number of data, such as construction, historical, climate, distress data etc, which covered a period of ten years approximately. The modelling of crack initiation was done with the use of a probabilistic non linear statistical model (Logistic Regression), which included the independent variables that seemed to provoke crack initiation. The analysis showed that thicknesses of layers, traffic, age of pavements and climate are important. In the end, validation of models was conducted with the use of data from sections included in the database. The results showed that the predicted values using the models are significant.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Αναφορά σε προηγούμενες έρευνες.....	8
2.3 Αναλυτική παρουσίαση ερευνών.....	9
2.3.1 Εισαγωγή.....	9
2.3.2 Έρευνες.....	10
2.4 Συμπεράσματα.....	15
3. ΤΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PARIS.....	19
3.1 Εισαγωγή.....	19
3.2 Στόχοι & βήματα.....	20
3.3 Προέλευση των δεδομένων.....	23
3.4 Κανονικοποίηση των δεδομένων.....	29
3.5 Η βάση δεδομένων.....	30

3.5.1	Εισαγωγή.....	30
3.5.2	Στοιχεία ALT.....	30
3.5.3	Στοιχεία RLT.....	31
3.6	Μεθοδολογία ανάλυσης.....	34
3.6.1	Εισαγωγή.....	34
3.6.2	Έναρξη ρηγματώσεων (initiation of cracking).....	35
3.6.3	Εξέλιξη αστοχιών (distress propagation).....	37
3.7	Συναρτησιακή μορφή της εξέλιξης αστοχιών.....	37
3.8	Πρότυπα έναρξης ρηγματώσεων (cracking initiation models).....	39
3.8.1	Εισαγωγή.....	39
3.8.2	Ρηγματώσεις στο ίχνος (wheel path cracking).....	39
3.8.2.1	Εύκαμπτα οδοστρώματα (flexible pavements).....	39
3.8.2.2	Ημιάκαμπτα οδοστρώματα (semi-rigid pavements).....	41
3.8.3	Εγκάρσια ανακλαστική ρηγμάτωση (transverse reflection cracking).....	43
3.8.4	Σχόλια.....	43
3.9	Πρότυπα εξέλιξης αστοχιών (distress propagation models).....	44
3.9.1	Εισαγωγή.....	44
3.9.2	Ρηγμάτωση.....	44
3.9.2.1	Ρηγμάτωση στο ίχνος.....	44
3.9.2.2	Εγκάρσια ανακλαστική ρηγμάτωση.....	47
3.9.2.3	Σχόλια.....	48
3.9.3	Αυλάκωση.....	48
3.9.3.1	Ανάλυση Αυλάκωσης.....	48
3.9.3.2	Σχόλια.....	50
3.9.4	Ομαλότητα κατά μήκος.....	50
3.9.5	Αποκόλληση ασφαλτικού υλικού.....	52
3.10	Επαλήθευση.....	53
3.10.1	Εισαγωγή.....	53
3.10.2	Έναρξη αστοχιών.....	54
3.10.3	Εξέλιξη αστοχιών.....	56
3.11	Συμπεράσματα.....	57

4. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	60
4.1 Εισαγωγή.....	60
4.2 Οργάνωση της βάσης δεδομένων.....	60
4.3 Αξιολόγηση των προτύπων του PARIS.....	68
4.4 Συμπεράσματα.....	71
5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	88
5.1 Εισαγωγή.....	88
5.2 Στατιστική επεξεργασία.....	88
5.2.1 Συσχέτιση μεταβλητών (variable correlation).....	88
5.2.2 Λογιστική παλινδρόμηση (logistic regression).....	91
5.3 Αποτελέσματα από την στατιστική επεξεργασία.....	93
5.3.1 Εισαγωγή.....	93
5.3.2 Αποτελέσματα λογιστικής παλινδρόμησης.....	94
5.3.3 Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	97
5.3.3.1 Εισαγωγή.....	97
5.3.3.2 Επεξήγηση 1 ^{ου} προτύπου.....	97
5.3.3.3 Επεξήγηση 2 ^{ου} προτύπου.....	101
5.3.3.4 Επεξήγηση 3 ^{ου} προτύπου.....	104
5.3.3.5 Επεξήγηση 4 ^{ου} προτύπου.....	106
5.3.3.6 Επεξήγηση 5 ^{ου} προτύπου.....	108
5.3.4 Σχόλια.....	111

6. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ.....	114
6.1 Εισαγωγή.....	114
6.2 1 ^ο Στάδιο επαλήθευσης.....	115
6.3 2 ^ο Στάδιο επαλήθευσης.....	117
6.4 Συμπεράσματα.....	119
7. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	122
7.1 Τελικά συμπεράσματα.....	122
7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	126
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	127

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σωστή διαχείριση καθώς και η συντήρηση οδοστρωμάτων, απασχολεί εδώ και πολλά χρόνια τους υπεύθυνους διαχειριστές των έργων. Για να μπορέσουν να γίνουν ορθολογικές ενέργειες πρέπει να απαντηθούν δύο βασικά ερωτήματα: Πρώτον, το πώς συμπεριφέρονται τα οδοστρώματα κάτω από διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος και φορτίσεων και, δεύτερον, οι λόγοι για τους οποίους εμφανίζουν τέτοια συμπεριφορά.

Οι αποφάσεις που αφορούν στη διαχείριση οδοστρωμάτων βασίζονται σε διάφορα δεδομένα, όπως ο διαθέσιμος προϋπολογισμός, το κόστος και η αποτελεσματικότητα των διάφορων συντηρήσεων καθώς και τα υπάρχοντα και προβλεπόμενα επίπεδα χρησιμοποίησης του δικτύου. Εκτός από αυτά, εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η συμπεριφορά των οδοστρωμάτων του δικτύου. Όσον αφορά στην τελευταία, υπάρχουν δύο είδη πληροφοριών που χρησιμοποιούνται προκειμένου να ληφθεί ορθότερη απόφαση για τη συντήρηση και την αποκατάστασή τους. Πληροφορίες για την υπάρχουσα κατάσταση των οδοστρωμάτων, οι οποίες συλλέγονται με επιτόπου μετρήσεις, και πληροφορίες για τη μελλοντική κατάστασή τους, η οποία προβλέπεται χρησιμοποιώντας τα πρότυπα* πρόβλεψης αστοχιών. Αυτά παρέχουν προβλέψεις για την κατάσταση των οδοστρωμάτων σε συνάρτηση με το χρόνο, η οποία είναι απαραίτητο στοιχείο για την κατάστρωση σχεδίου διαχείρισης και αποκατάστασης του δικτύου.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι τα πρότυπα πρόβλεψης δημιουργίας και εξέλιξης αστοχιών διαδραματίζουν έναν πολύ σημαντικό ρόλο στα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων. Καταρχήν, επιτρέπουν στο διαχειριστή να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια τη χρονική στιγμή που θα αστοχήσει για πρώτη φορά το οδόστρωμα. Έτσι, έχει το πλεονέκτημα να γνωρίζει το πότε θα χρειαστεί να γίνει συντήρηση ή αποκατάσταση του οδοστρώματος και να εκτιμήσει σε βάθος χρόνου πότε θα χρειαστούν τα απαραίτητα χρήματα, αλλά και πόσα, ώστε να πραγματοποιήσει καλύτερη διαχείριση των οικονομικών του πόρων.

Τα πρότυπα πρόβλεψης αστοχιών, όμως, δεν προβλέπουν μόνο έναρξη της αστοχίας αλλά και εξέλιξη αυτής. Επομένως, ο διαχειριστής είναι δυνατό να προβλέψει για ένα οδόστρωμα το οποίο έχει ήδη αστοχήσει, το πώς θα εξελιχθεί η αστοχία αλλά και τη σοβαρότητα και έκταση αυτής. Έτσι, είναι σε θέση να εκτιμήσει τον τρόπο με τον οποίο θα καταστεί το οδόστρωμα πάλι λειτουργικό, αν δηλαδή αυτό θα χρειαστεί απλώς συντήρηση ή πλήρη αποκατάσταση. Γίνεται συνεπώς πιο εύκολο να υπολογιστεί το ποσό των χρημάτων που θα χρειαστεί για τις επισκευές του οδοστρώματος.

Τα παραπάνω πρότυπα μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία πρακτικών οδηγιών και διαδικασιών που αφορούν στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων. Ο μελετητής, με βάση τις παραμέτρους σχεδιασμού του υπό κατασκευή οδοστρώματος και γνωρίζοντας τον κύκλο ζωής του έργου, μπορεί να διαπιστώσει αν με το συγκεκριμένο σχεδιασμό το οδόστρωμα θα αστοχήσει πριν ή μετά το χρόνο ζωής του έργου. Με αυτόν τον τρόπο, αν κριθεί απαραίτητο, μπορεί να αλλάξει παραμέτρους του σχεδιασμού και να καταλήξει στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Στην προσπάθεια να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα αυτά, ως πρώτο βήμα είναι η συλλογή στοιχείων από οδοστρώματα τα οποία βρίσκονται σε λειτουργία (in service pavements). Συλλέγονται κλιματολογικά δεδομένα (θερμοκρασίες περιβάλλοντος, βροχοπτώσεις, υγρασία κ.τ.λ.), κυκλοφοριακά δεδομένα (αριθμός ετήσιων διελεύσεων τυπικών αξόνων, ποσοστό φορτηγών κ.τ.λ.), κατασκευαστικά δεδομένα (πάχη υπόβασης - βάσης - ασφαλτικών κ.τ.λ.) και ιστορικά δεδομένα (έτος κατασκευής οδοστρωμάτων, χρονολογίες μετέπειτα συντηρήσεων ή αποκαταστάσεων κ.τ.λ.). Επίσης, εντοπίζεται το είδος και το μέγεθος των ρωγμών που προϋπήρχαν ή εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης στα οδοστρώματα καθώς και ό,τι άλλο κρίνεται ότι θα μπορούσε να φανεί χρήσιμο στη μετέπειτα επεξεργασία. Έτσι, δημιουργείται μια βάση δεδομένων η οποία αφού υποστεί κατάλληλη επεξεργασία, τα αποτελέσματά της καταδεικνύουν με ικανοποιητική ακρίβεια ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων, καθώς και το μέγεθος της επιρροής αυτής. Όλα τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την πιο πάνω μελέτη, μπορούν να βοηθήσουν το διαχειριστή ενός οδικού δικτύου να προβλέψει πιο σωστά τον τρόπο συντήρησής του.

Ο σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι:

- Να γίνει εκτεταμένη μελέτη του ερευνητικού προγράμματος PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure) και της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε από τους μελετητές για να δημιουργήσουν τα πρότυπα έναρξης και εξέλιξης ρηγματώσεων. Στη συνέχεια, να μελετηθούν οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στη στατιστική επεξεργασία της βάσης, ώστε να προκύψουν τα ανωτέρω πρότυπα.
- Να δημιουργηθεί μια νέα βάση δεδομένων, χρησιμοποιώντας επιλεγμένα στοιχεία από τη βάση του PARIS, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια.
- Να γίνει αξιολόγηση των προτύπων του PARIS χρησιμοποιώντας τη νέα βάση δεδομένων και να εξαχθούν αποτελέσματα ως προς την αξιοπιστία αυτών, υπολογίζοντας το μέσο απόλυτο σφάλμα σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα.
- Να πραγματοποιηθεί νέα στατιστική επεξεργασία χρησιμοποιώντας την καινούργια βάση δεδομένων, ώστε να δημιουργηθούν καινούργια πρότυπα έναρξης ρηγματώσεων, τα οποία θα περιέχουν περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές. Έτσι, αναμένεται ότι θα μειωθεί το μέσο απόλυτο σφάλμα σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα.
- Τέλος, θα γίνει αξιολόγηση των νέων προτύπων ώστε να εξεταστεί αν αυτά μπορούν να κάνουν καλύτερες προβλέψεις σε σχέση με τα αντίστοιχα του PARIS.

Όλα τα ανωτέρω παρουσιάζονται αναλυτικά στα κεφάλαια που ακολουθούν. Έτσι, στο **δεύτερο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές αναφορές οι οποίες είναι σχετικές με τα παραπάνω αντικείμενα. Στο **τρίτο κεφάλαιο** γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση του ερευνητικού προγράμματος PARIS και εμφανίζονται ο σκοπός για τον οποίο έγινε και τα αποτελέσματα που τελικώς προέκυψαν. Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται ο τρόπος προετοιμασίας της νέας βάσης δεδομένων καθώς και η αξιολόγηση των προτύπων του PARIS, αλλά και τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν. Στο **πέμπτο κεφάλαιο** αναλύεται η στατιστική επεξεργασία της νέας βάσης καθώς και τα πρότυπα που δημιουργήθηκαν, ενώ γίνεται και αναλυτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στο **έκτο κεφάλαιο** γίνεται αξιολόγηση των καινούργιων προτύπων και τέλος, στο **έβδομο κεφάλαιο** αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

* Σημείωση: Ο όρος «πρότυπα» αναφέρεται επίσης και στον όρο «προσομοιώματα». Η ακριβής απόδοση, όμως, του αγγλικού όρου «models» είναι «πρότυπα». Επομένως, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο όρος «πρότυπα».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Το προηγούμενο κεφάλαιο κατέδειξε την χρησιμότητα και αξία την οποία 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 μελετών 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 κατασκευαστικής και λειτουργικής απόδοσης. Κατασκευαστική απόδοση είναι η ικανότητα της κατασκευής να φέρει τα φορτία σχεδιασμού, ενώ η λειτουργική απόδοση 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.

Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι τα τελευταία χρόνια βρίσκεται σε εξέλιξη ένας αρκετά μεγάλος αριθμός ερευνών σχετικά με το αντικείμενο της προτυποποίησης των αστοχιών οδοστρωμάτων από δεδομένα επιτόπου μετρήσεων. Παρόλα αυτά, η ανεύρεση παρόμοιων διερευνήσεων, που να έχουν ολοκληρωθεί, κατέστη αρκετά δύσκολη καθώς τα αποτελέσματά τους δεν έχουν ακόμη δημοσιευθεί, επομένως δεν ήταν διαθέσιμες ούτε από το διαδίκτυο ούτε από περιοδικά ή άλλα συγγράμματα.

2.2 Αναφορά σε προηγούμενες έρευνες

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

Τα **Highway and Design Models (HDM) (Paterson 1987)** προβλέπουν την έναρξη και την εξέλιξη διαφόρων τύπων αστοχιών, όπως ρηγμάτωση, αυλάκωση, δημιουργία λακκουβών, αποκόλληση ασφαλικού υλικού και ομαλότητα. 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 **ARE (Butler et al. 1985)** ανέπτυξε πρότυπα για αστοχία και λειτουργικότητα οδοστρωμάτων σε συνάρτηση με διάφορες ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι τύποι αστοχιών που προτυποποιήθηκαν στη συγκεκριμένη έρευνα ήταν η ρηγμάτωση (cracking), αποκόλληση ασφαλικού 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.

Το πρότυπο **EAROMAR (Markov και Brademeyer 1981)** προβλέπει την συμπεριφορά οδοστρωμάτων καθώς και το κόστος για μετέπειτα συντήρηση ή αποκατάσταση. Το συγκεκριμένο πρότυπο διαφέρει από το πρότυπο 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 (Queiroz 1981)** 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.

Η ομάδα RITM2 (Hodges et al. 1975, Peirsly και Robinson 1982) 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.

Οι παραπάνω έρευνες παρήγαγαν πρότυπα που κάνουν προβλέψεις βασισμένα στην αναμενόμενη τιμή της μελλοντικής κατάστασης ενός οδοστρώματος. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, το **Τμήμα Μεταφορών της Arizona (Arizona Department of Transportation)** ανέπτυξε πρότυπα (Golabi et al. 1982) 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 οδόστρωμα. Οι μεταβλητές που περιγράφουν την παρούσα κατάσταση ενός οδοστρώματος είναι η ομαλότητα, η ρηγμάτωση, η αλλαγή της ρηγμάτωσης τα προηγούμενα χρόνια και ο δείκτης της πρώτης ρηγμάτωσης.

2.3 Αναλυτική παρουσίαση ερευνών

2.3.1 Εισαγωγή

Παρακάτω θα παρουσιαστούν ορισμένες έρευνες που επελέγησαν 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

Το 1995 η ομάδα των **Madanat, et al.** έθεσαν το ζήτημα της εγκυρότητας των προτύπων που υπάρχουν στην βιβλιογραφία με το σκεπτικό ότι «πάσχουν» από «μεροληψία επιλογής» («selectivity bias»). 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. Επελέγησαν 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:

Μοντέλο έναρξης

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

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

Z_i^*	=	μεταβλητή που εκφράζει την έναρξη της αστοχίας
Z_i	=	δείκτης μεταβλητής
u	=	συντελεστές προς υπολογισμό
w	=	ανεξάρτητες μεταβλητές
u_i	=	σταθερός όρος

Μοντέλο εξέλιξης

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

Y_i	=	εξαρτημένη μεταβλητή που εκφράζει την έκταση της αστοχίας
β	=	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 (Greene 1993), 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 ασφαλικής 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 (Pindyck και Rubinfeld 1991) (Madanat S. et al., Journal of Infrastructure Systems, 1995).

Επεκτείνοντας την παραπάνω έρευνα, οι **Madanat και Shin (1998)** εξέτασαν την ενδεχόμενη εμφάνιση μη παρατηρούμενης ετερογένειας στα πρότυπα, που σχετίζεται με την επιλογή και χρησιμοποίηση ορισμένων στοιχείων για την δημιουργία των προτύπων. 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 e_i του προτύπου εξέλιξης, η επιρροή της ετερογένειας θα έχει έμμεσο αντίκτυπο και στο πρότυπο εξέλιξης ρηγμάτωσης. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την χρησιμοποίηση προτύπων τυχαίων επιπτώσεων (Madanat S. et al., Transportation Research Record 1643, 1998).

Οι **Thomas et al. (1996)** ασχολήθηκαν με την δημιουργία προτύπων αστοχιών για την περιοχή της Βιρτζίνια (Virginia). Ειδικά, η εργασία είχε τους εξής σκοπούς: α) αναγνώριση των κυριότερων παραγόντων που επηρεάζουν τα οδοστρώματα του οδικού δικτύου της Βιρτζίνια, β) πειραματισμός ως προς διάφορες συναρτησιακές μορφές προτύπων για να διαπιστωθεί ποια 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, ημιεύκαμπτα με μία επανεπίστρωση, ημιεύκαμπτα 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 εδαφολογικές 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 ημιεύκαμπτα 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 που βρίσκονταν τα οδικά τμήματα.

Το επόμενο βήμα ήταν να διαπιστωθούν 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 το AGE που αντιστοιχεί στην τιμή DMR που παρατηρήθηκε από τις μετρήσεις. Οι μελλοντικές προβλέψεις γίνονται κατόπιν θεωρώντας ότι αυτή είναι η παρατηρούμενη τιμή του AGE. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί έναν διορθωτικό συντελεστή, που είναι ο λόγος της αρχικής και θεωρητικής πτώσης του DMR. Και οι δύο μέθοδοι φάνηκε να αποδίδουν το ίδιο (Sadek A et al., Transportation Research Record 1524, 1996).

Στην εργασία των **Kuo et al. (2002)** σκοπός ήταν να αναπτυχθεί ένα πρότυπο που να προβλέπει την μελλοντική κατάσταση του οδικού δικτύου της περιοχής 5 (district 5) της Φλόριντα (Florida) από πλευράς βαθμού αστοχίας. 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 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 προγράμματος SAS (Statistical Analysis System), κατέληξε στο εξής πρότυπο:

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

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 (Kuo S. et al., TRB 2003 Annual Meeting, 2002).

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 οδοστρώματων 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 3ο

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 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. 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 επαλήθευση (validation) των εν λόγω προτύπων.

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 ότι 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 ότι 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 πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης έρευνας σε ό,τι αφορά στη διαχείριση οδοστρωμάτων (pavement management) έχουν ως εξής: Τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν είναι άμεσα εφαρμόσιμα σε καθημερινή βάση. Απαιτούν μόνο παραμέτρους εισαγωγής (input parameters) που είναι άμεσα διαθέσιμες στον διαχειριστή οδοστρωμάτων (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 κάθε φορά σωστές αποφάσεις για το οδικό του δίκτυο.

3.2 Στόχοι & βήματα

Ο αντικειμενικός σκοπός του PARIS ήταν η ανάπτυξη προτύπων αστοχιών για αξιοποίηση από τα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων (pavement management systems). Οι επιμέρους στόχοι του εν λόγω προγράμματος καθορίστηκαν ως εξής:

- Ανάπτυξη ενιαίων ορισμών, συστημάτων συλλογής δεδομένων και μεθόδων ανάλυσης για την κατανόηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων (pavement performance).
- Ανάπτυξη κεντρικής βάσης δεδομένων με στοιχεία από τα οδικά τμήματα των χωρών που συμμετείχαν στο πρόγραμμα.

- Ανάπτυξη κατανοητών προτύπων αστοχιών, που να εφαρμόζονται ακόμη και όταν επικρατούν διαφορετικές κυκλοφοριακές, κλιματολογικές και εδαφικές συνθήκες. Τα πρότυπα θα βασίζονται σε στοιχεία προερχόμενα από οδικά τμήματα, που βρίσκονται σε λειτουργία, των συμμετεχόντων χωρών καθώς και επιπλέον δεδομένα από δοκιμές επιταχυνόμενης φόρτισης (Accelerated Loading Tests ALT) σε εργαστήρια μεγάλης κλίμακας.
- Επαλήθευση των προτύπων.
- Προτάσεις για εφαρμογή των προτύπων στην πράξη.
- Συσχέτιση του προγράμματος με άλλες παρόμοιες δραστηριότητες.

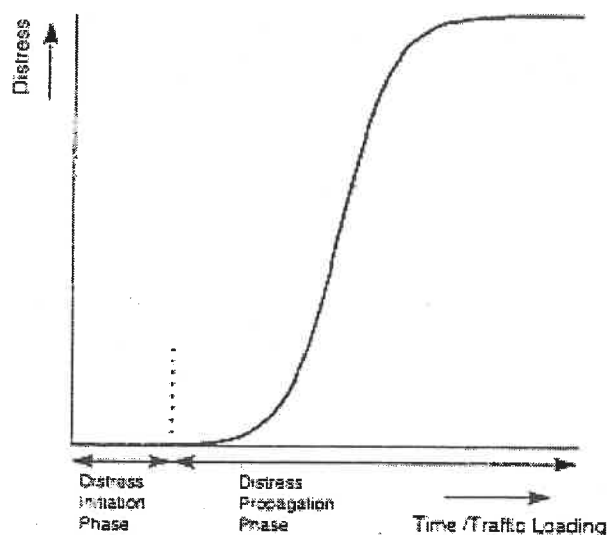
Η ανάπτυξη των προτύπων βασίστηκε στην ανάλυση της εξέλιξης αστοχιών σε έναν μεγάλο αριθμό τμημάτων (test sections) στην Ευρώπη και αξιολογώντας τα αποτελέσματα από διάφορα τμήματα ALT. Το πρόγραμμα επικεντρώθηκε στους εξής τύπους αστοχιών:

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

Οι παραπάνω τέσσερις τύποι αστοχίας οδοστρωμάτων επιλέγησαν για δύο λόγους. Κατά πρώτον γιατί 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 (Πηγή PARIS, 1998).

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. 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.

3.3 Προέλευση των δεδομένων

Τα πρότυπα αστοχιών που αναπτύχθηκαν στο PARIS βασίζονται σε παρατηρήσεις που αφορούσαν σε έναν μεγάλο αριθμό οδικών τμημάτων στην Ευρώπη. Τα περισσότερα τμήματα βρίσκονται στο εθνικό οδικό δίκτυο και υποβάλλονται σε φορτίσεις λόγω κυκλοφορίας αλλά και περιβάλλοντος. Αυτά τα τμήματα ονομάζονται Πραγματικού Χρόνου (Real-Time Loading Testing RLT) και οι αστοχίες που μετρήθηκαν είναι περιορισμένης σοβαρότητας ή/και έκτασης, διότι οι αρχές έχουν φροντίσει να γίνονται ενέργειες συντήρησης/αποκατάστασης όταν φτάνουν σε ένα δεδομένο επίπεδο αστοχίας. Για να μπορέσουν να παρατηρηθούν και αστοχίες σε πιο δυσχερές επίπεδο, συλλέχθηκαν στοιχεία από ειδικά κατασκευασμένα τμήματα στα οποία εφαρμόζονται μεγαλύτερες από το κανονικό φορτίσεις από κυκλοφορία (heavy wheel loads), τα επονομαζόμενα Επιταχυνόμενης Φόρτισης (Accelerated Loading Testing ALT).

Επειδή η εξέλιξη των αστοχιών στο κανονικό οδικό δίκτυο συμβαίνει με σχετικά αργό ρυθμό και δεδομένου ότι το πρόγραμμα θα διαρκούσε δύο χρόνια, για την δημιουργία των προτύπων έπρεπε να ληφθούν υπόψη τα τμήματα εκείνα που είχαν επαρκή δεδομένα. Για το λόγο αυτό, συμφωνήθηκε να συμπεριληφθούν στην ανάλυση τα τμήματα στα οποία πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον δύο επιτόπου μετρήσεις πριν την έναρξη του προγράμματος. Με βάση το παραπάνω κριτήριο, ο συνολικός αριθμός των τμημάτων των έντεκα χωρών από τις δεκαπέντε που επελέγησαν να συμπεριληφθούν στην έρευνα, έφτασε στο 720. Τα στοιχεία των υπολοίπων τεσσάρων χωρών που δεν ικανοποιούσαν το κριτήριο, χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των προτύπων. Επιπλέον, έγινε διαχωρισμός ως προς εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Εύκαμπτα (flexible) οδοστρώματα ορίστηκαν οι κατασκευές με μία ή περισσότερες ασφατικές στρώσεις (asphalt layers) που εδράζονται πάνω σε βάση από κοκκώδες υλικό (granular base) και εν συνεχεία πάνω σε εδαφικό υλικό (subgrade). Εύκαμπτα ορίστηκαν και τα οδοστρώματα στα οποία δεν παρεμβαλλόταν βάση. Ημιάκαμπτα (semi-rigid) ορίστηκαν εκείνα που η ασφατική στρώση εδραζόταν πάνω σε ειδικά κατεργασμένη (είτε με τσιμέντο είτε υδραυλικά) βάση με ή χωρίς υπόβαση πάνω από το έδαφος έδρασης. Παρακάτω ακολουθούν πίνακες και γραφήματα με τον καταμερισμό των τμημάτων ανά χώρα και κατηγορία.

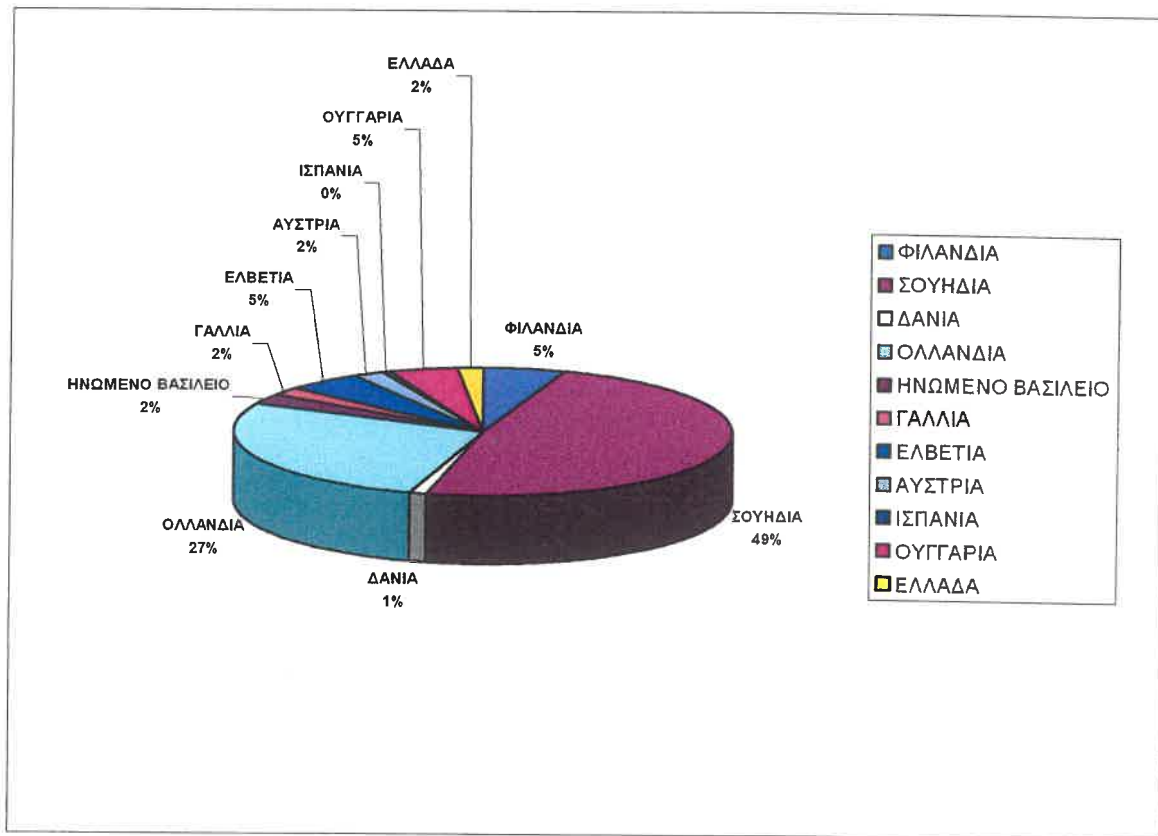
ΧΩΡΑ	ΕΥΚΑΜΠΤΑ	ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΑ	ΣΥΝΟΛΟ
ΦΙΛΑΝΔΙΑ	33	0	33
ΣΟΥΗΔΙΑ	296	0	296
ΔΑΝΙΑ	7	0	7
ΟΛΛΑΝΔΙΑ	168	37	205
ΗΝΩΜΕΝΟ ΒΑΣΙΛΕΙΟ	15	13	28
ΓΑΛΛΙΑ	12	10	22
ΕΛΒΕΤΙΑ	31	5	36
ΑΥΣΤΡΙΑ	12	0	12
ΙΣΠΑΝΙΑ	3	7	10
ΟΥΓΓΑΡΙΑ	28	33	61
ΕΛΛΑΔΑ	10	0*	10
ΣΥΝΟΛΟ	615	105	720

Πίνακας 3.1: Αριθμός τμημάτων RLT ανά χώρα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των προτύπων (Πηγή PARIS, 1998).

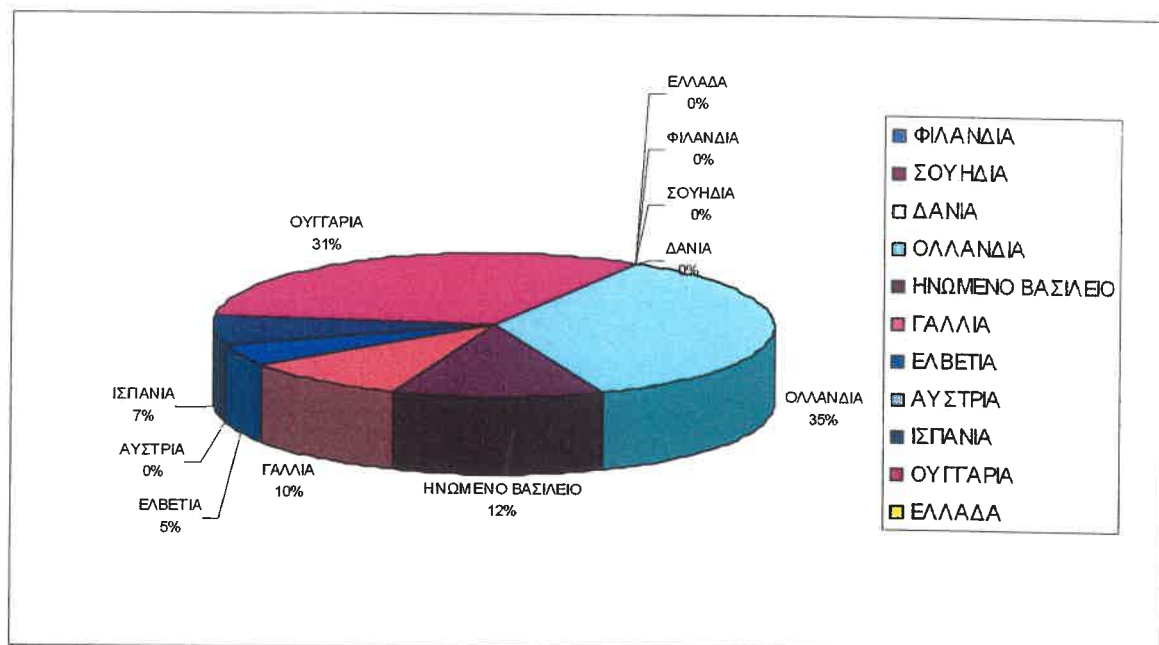
* Σημείωση: Ημιάκαμπτα οδοστρώματα υπάρχουν στην Ελλάδα, αλλά δεν διατέθηκαν στο πρόγραμμα αντίστοιχα οδικά τμήματα

ΧΩΡΑ	ΕΥΚΑΜΠΤΑ	ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΑ	ΣΥΝΟΛΟ
ΒΕΛΓΙΟ	41	25	66
ΙΡΛΑΝΔΙΑ	25	0	25
ΠΟΡΤΟΓΑΛΙΑ	45	6	51
ΣΛΟΒΕΝΙΑ	54	0	54
ΣΥΝΟΛΟ	165	31	196

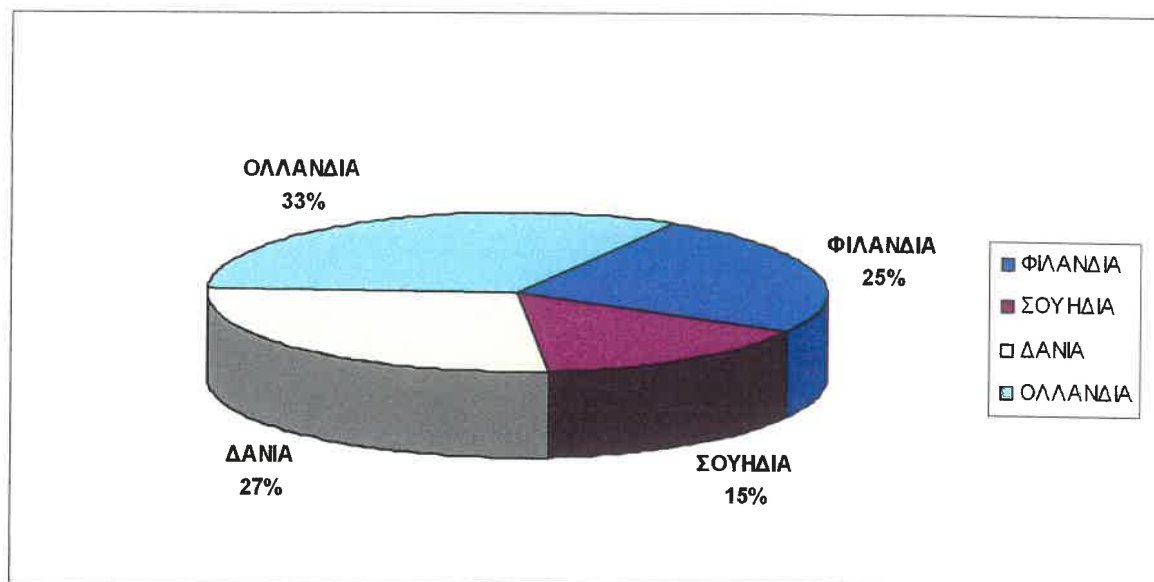
Πίνακας 3.2: Αριθμός τμημάτων RLT ανά χώρα που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των προτύπων (Πηγή PARIS, 1998).



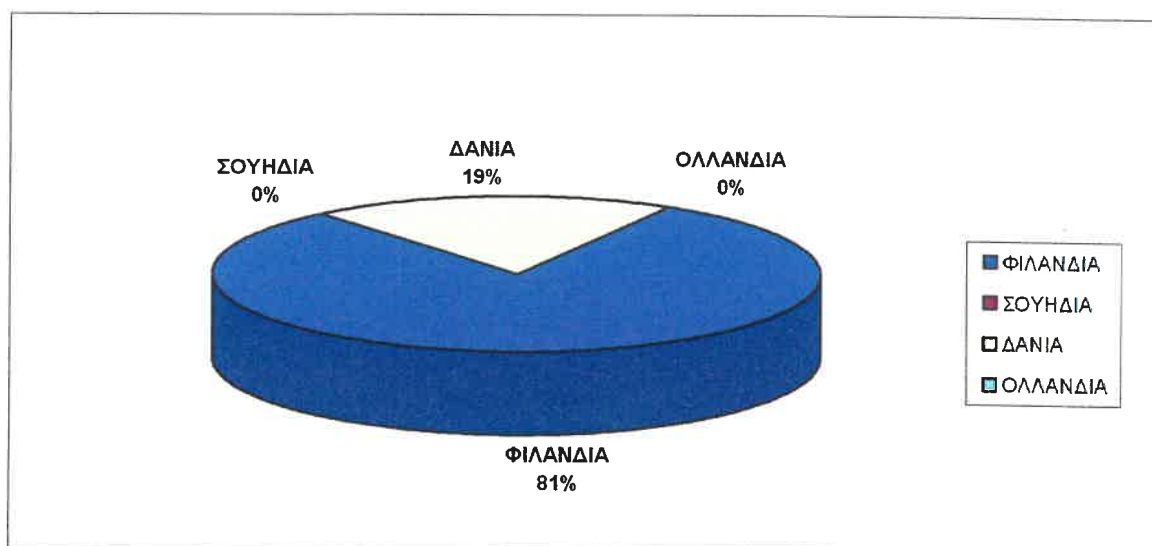
Γράφημα 3.1: Εύκαμπτα οδοστρώματα για την δημιουργία των προτύπων.



Γράφημα 3.2: Ημιάκαμπτα οδοστρώματα για την δημιουργία των προτύπων.



Γράφημα 3.3: Εύκαμπτα οδοστρώματα για την επαλήθευση των προτύπων.

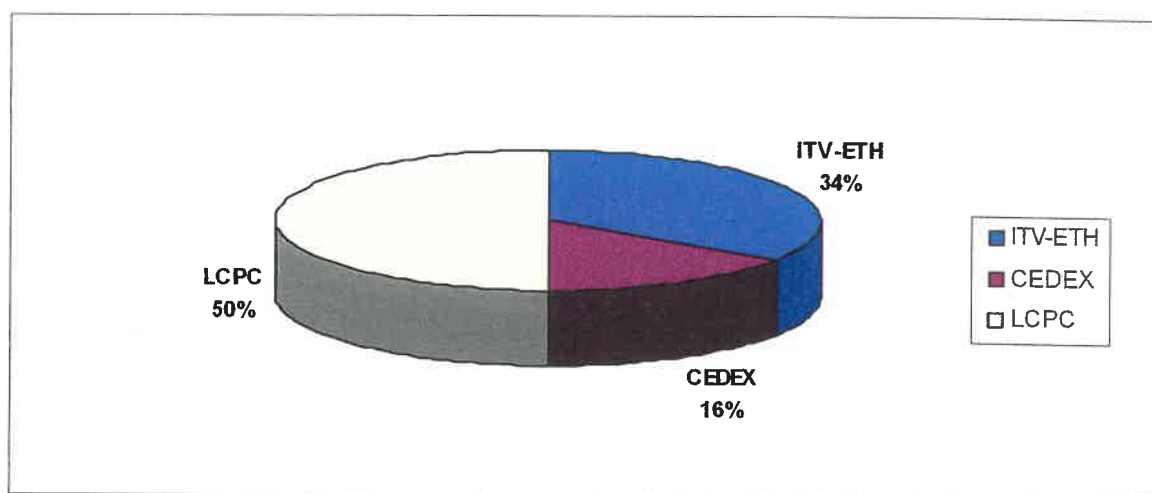


Γράφημα 3.4: Ημιάκαμπτα οδοστρώματα για την επαλήθευση των προτύπων.

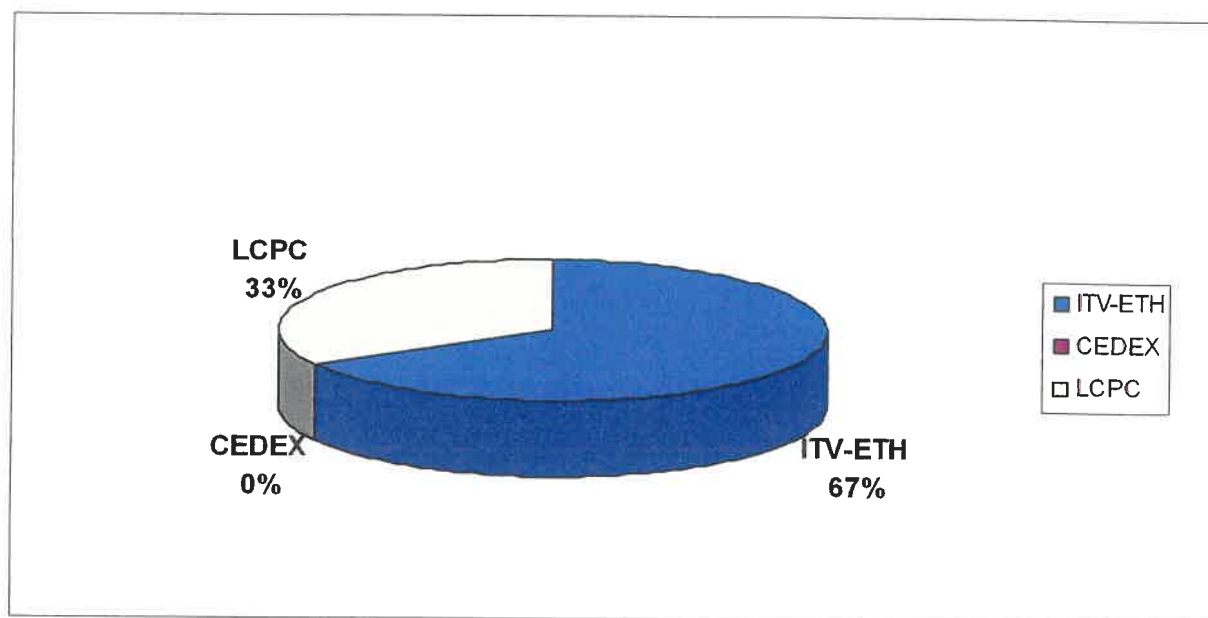
Επιπρόσθετα με τα τμήματα RLT, αποτελέσματα από εγκαταστάσεις ALT χρησιμοποιήθηκαν επίσης στην ανάλυση. Σε αυτά οι αστοχίες έφτασαν σε πολύ υψηλότερο βαθμό μέχρις του σημείου της ολοκληρωτικής καταστροφής των τμημάτων. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν βοήθησαν στο να επιλεγεί η συναρτησιακή μορφή των προτύπων αστοχιών (functional form of models). Οι χώρες που παρείχαν τέτοιου είδους στοιχεία ήταν η Ελβετία (Ζυρίχη), Ισπανία (Μαδρίτη) και η Γαλλία (Ναντ). Οι κωδικοί των εγκαταστάσεων έχουν ως εξής αντίστοιχα: IVT-ETH, CEDEX και LCPC. Παρακάτω ακολουθούν επίσης πίνακες και γραφήματα αντίστοιχα των τμημάτων RLT.

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΕΥΚΑΜΠΤΑ	ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΑ	ΣΥΝΟΛΟ
IVT-ETH	13	4	17
CEDEX	6	0	6
LCPC	19	2	21
ΣΥΝΟΛΟ	38	6	44

Πίνακας 3.3: Αριθμός τμημάτων ALT ανά εγκατάσταση (Πηγή PARIS, 1998).



Γράφημα 3.5: Εύκαμπτα οδοστρώματα ALT.



Γράφημα 3.6: Ημιάκαμπα οδοστρώματα ALT.

Στα τμήματα RLT, τρεις κατηγορίες στοιχείων συλλέχθηκαν, οι οποίοι 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 είναι στοιχεία που αφορούν στην σοβαρότητα και την έκταση 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.

3.4 Κανονικοποίηση των 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.

3.5 Η βάση δεδομένων

3.5.1 Εισαγωγή

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. Παρακάτω παρουσιάζεται σε γενικές γραμμές η διάρθρωση και η μορφή των δεδομένων.

3.5.2 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 ασφαλτικών στρώσεων
 - Πάχος δύσκαμπτων στρώσεων
 - Πάχος βάσης από κοκκώδη υλικά
- Στοιχεία βάθους αυλάκωσης

Εφόσον μετρήθηκε το βάθος της αυλάκωσης (μετρημένο σε mm), παρουσιάζεται σε διαγράμματα η εξέλιξη αυτού σε συνάρτηση με τον ισοδύναμο αριθμό διελεύσεων αξόνων 100 kN (ESALs 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 αλλιγοτορική ρηγμάτωση (alligator cracking ACR). Όπως και για την αυλάκωση, παρουσιάζεται η εξέλιξη του αθροίσματος των τριών επιμέρους τύπων ρηγματώσεων συναρτήσει των ESALs 100 kN.

3.5.3 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 ασφαλτικών στρώσεων
- Πάχος δύσκαμπτων στρώσεων
- Πάχος βάσης από κοκκώδες υλικό
- Πάχος υπόβασης
- Τύπος δύσκαμπτων στρώσεων
- Τύπος εδαφικού υλικού

- Στοιχεία υποχωρήσεων

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

- Ισοδύναμοι άξονες ανά έτος
- Αριθμός οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση
- Αριθμός οχημάτων ανά ημέρα
- Ποσοστό % φορτηγών ανά κατεύθυνση
- Ποσοστό % φορτηγών

- 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

3.6 Μεθοδολογία ανάλυσης

3.6.1 Εισαγωγή

Για τους δύο τύπους προτύπων ακολουθήθηκε διαφορετική προσέγγιση. Το ίδιο συνέβη και για τα στοιχεία ALT σε σχέση με τα στοιχεία RLT. Για τα στοιχεία RLT η ανάλυση είχε να κάνει με την αναγνώριση των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών, ανάλυση των μεταβλητών ανεξάρτητα (univariate analysis), ανάλυση ζευγαριών μεταβλητών για έλεγχο συσχέτισης τους (bivariate analysis) και προσέγγιση του τύπου του προτύπου.

Ανάλογα με τον τύπο του προτύπου (έναρξης ή εξέλιξης αστοχιών) έγινε και η επιλογή των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών. Ο πίνακας 3.4 δείχνει τις ανεξάρτητες και εξαρτημένες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση προτύπου για έναρξη και εξέλιξη των διαφόρων αστοχιών. Ο πίνακας 3.4 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.

ΤΥΠΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΣΤΟΙΧΕΙΑ RLT	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ALT	ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ
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 ασφαλικών, κλίμα, αντοχή & πάχος δύσκαμπτων στρώσεων

Πίνακας 3.4: Εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την προτυποποίηση της έναρξης ρηγμάτωσης (Πηγή PARIS, 1998).

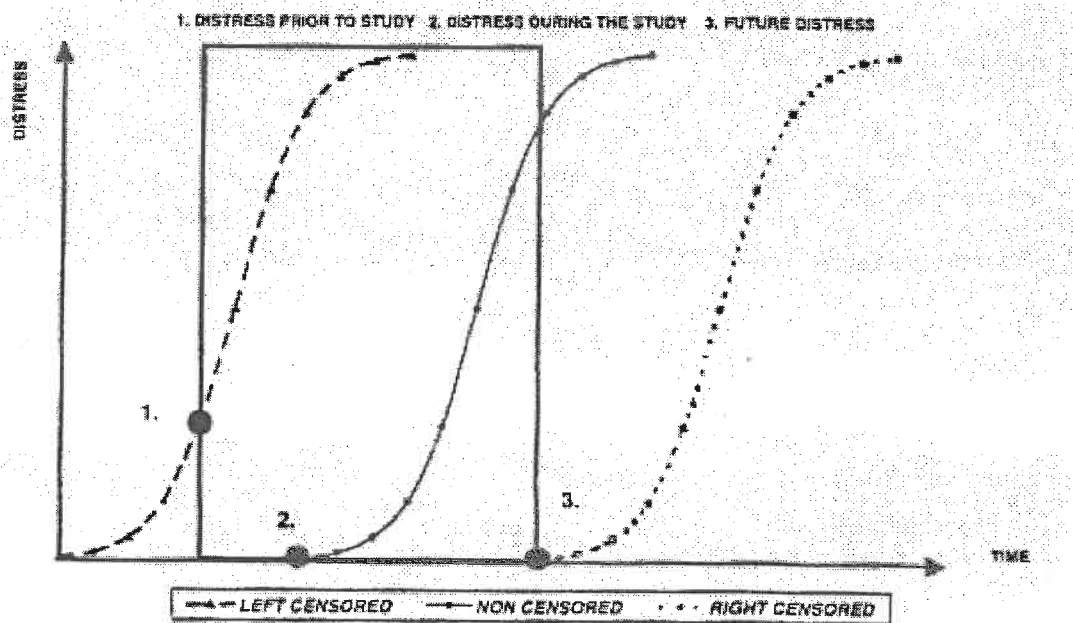
Τα πρότυπα έναρξης ρηγματώσεως προβλέπουν τον συνολικό αριθμό αξόνων ή τα έτη μέχρι την πρώτη εμφάνιση ρωγμής στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η εμφάνιση ρηγματώσεων στο ίχνος θεωρείται ότι προκαλείται κυρίως λόγω κυκλοφοριακού φορτίου. Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα, οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι τα 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 ρηγματώσεως 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 φανέρωσαν ότι το κλίμα ήταν αιτία ρηγματώσεως σε ελάχιστα τμήματα, γι' αυτό και η τελευταία επιλογή εγκαταλείφθηκε.

3.6.2 Έναρξη ρηγματώσεων (initiation of cracking)

Χρησιμοποιώντας στατιστική ορολογία, ο χρόνος αστοχίας μπορεί να ορισθεί 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 πρώτης εμφάνισης στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Το σχήμα 3.2 παρουσιάζει την σύλληψη 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 (Πηγή PARIS, 1998).

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 δεξιής 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)

3.6.3 Εξέλιξη αστοχιών (distress propagation)

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.

3.7 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.

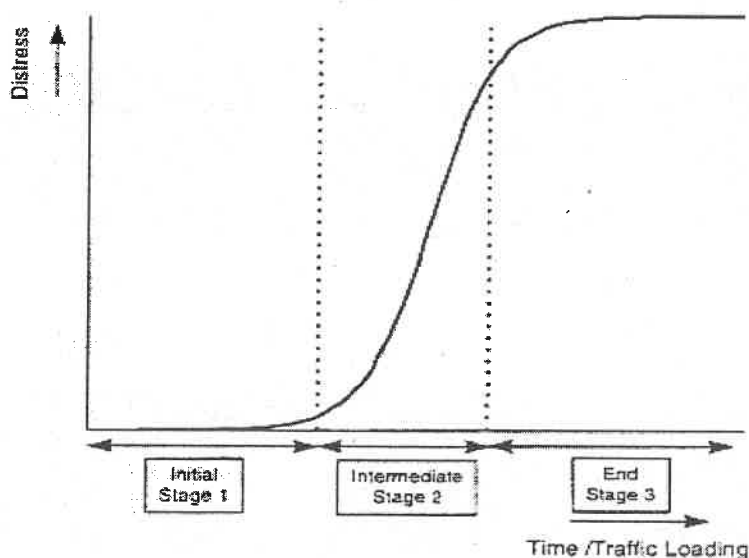
Κατά την προτυποποίηση της ρηγμάτωσης και αυλάκωσης, ο συνολικός αριθμός των ισοδύναμων τυπικών αξόνων (ESALs) ήταν η ανεξάρτητη μεταβλητή. Οι εξαρτημένες ήταν για τη ρηγμάτωση το ποσοστό του συνολικού μήκους του τμήματος που εμφάνισε ρηγματώσεις και για την αυλάκωση ήταν το βάθος της αυλάκωσης. Στο 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 παράγοντες που επηρεάζουν την έναρξη των παραπάνω αστοχιών, η γήρανση (ageing) του οδοστρώματος, δεν συμβαίνει στις μικρές 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 (Πηγή PARIS, 1998).

3.8 Πρότυπα έναρξης ρηγματώσεων (cracking initiation models)

3.8.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με την προτυποποίηση της έναρξης ρηγματώσεων στο ίχνος και την έναρξη κάθετων ανακλαστικών ρηγματώσεων στα ημιάκαμπα οδοστρώματα. Η έναρξη ρηγματώσεων στο ίχνος ορίζεται ως η πρώτη εμφάνιση (ελάχιστο μήκος 0.5 m) κατά μήκος (longitudinal), εγκάρσιας (transverse) ή αλλιγατορικής (alligator) ρωγμής. Η έναρξη ρηγματώσεων στο ίχνος (οφειλόμενη μόνο στην κυκλοφορία) αναλύθηκε ξεχωριστά για εύκαμπα και ημιάκαμπα οδοστρώματα. Στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία μόνο από τμήματα δρόμου χωρίς συντήρηση στην επιφάνεια, γιατί η κατάσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος πριν την εφαρμογή των ενεργειών αυτών δεν ήταν γνωστή.

3.8.2 Ρηγματώσεις στο ίχνος (wheel path cracking)

3.8.2.1 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. 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

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

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:

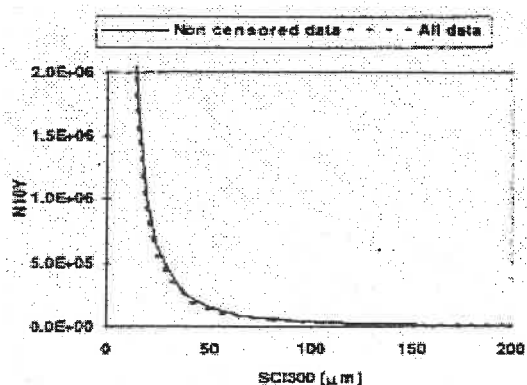
Ελάχιστο όριο εφαρμογής προτύπου για μη περικομμένα στοιχεία

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

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 στιβαρή, τότε υπάρχουν άλλοι παράγοντες που φαίνεται να περιγράφουν την έναρξη ρηγματώσεων.



Σχήμα 3.4: Κατώτερα όρια για εφαρμογή των προτύπων έναρξης ρηγματώσης σε εύκαμπτα οδοστρώματα (Πηγή PARIS, 1998).

3.8.2.2 Ημιάκαμπτα οδοστρώματα (semi-rigid pavements)

Τα στοιχεία εδώ προέρχονται από τμήματα τα οποία 20 είναι αριστερής περικοπής, 36 δεξιάς περικοπής και 33 μη περικομμένα. Η προτυποποίηση έγινε με τον ίδιο τρόπο όπως στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η ανεξάρτητη μεταβλητή που περιγράφει την έναρξη ρηγματώσεων στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα είναι

ο δείκτης SCI_{900} . Η διαφορά του με τον SCI_{300} είναι ότι τώρα λαμβάνεται η διαφορά των υποχωρήσεων σε απόσταση 900 mm ($d_0 - d_{900}$). 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

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

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

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

3.8.3 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 ασφαλτικής 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.

3.8.4 Σχόλια

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

- Τα πρότυπα πρόβλεψης έναρξης ρηγματώσεων για εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα είναι στατιστικώς σημαντικά.
- Για τα εύκαμπτα, 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 ρηγμάτωσης είναι μεγαλύτερες χρησιμοποιώντας την ανάλυση για όλα τα στοιχεία

σε σύγκριση με την ανάλυση για μη περικομμένα στοιχεία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα στοιχεία περιείχαν τμήματα που δεν είχαν εμφανίσει ρηγματώσεις (στοιχεία δεξιάς περικοπής).

- Τα πρότυπα μπορούν να προβλέψουν πόσες διελεύσεις αξονικών φορτίων μπορεί να αντέξει ένα οδόστρωμα μέχρι να εμφανίσει στην επιφάνειά του ρωγμή. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι υπάρχουν περιορισμοί στην εφαρμογή των προτύπων που έχουν να κάνουν με την συσχέτιση του δείκτη SCI με την ετήσια κυκλοφορία σε άξονες.

3.9 Πρότυπα εξέλιξης αστοχιών (distress propagation models)

3.9.1 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.

3.9.2 Ρηγμάτωση

3.9.2.1 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 :

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

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	=	αλλιγοτορική 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) αλλιγοτορικής 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 συμπεριλήφθηκαν 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. Βασισμένοι στο παραπάνω, η συναρτησιακή μορφή που επελέγη είναι η εξής:

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

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 ESALs και γραμμική όταν ήταν η ηλικία οδοστρώματος. 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 οδοστρώματων.

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:

ΤΥΠΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	$\log_{10}(CI_{\text{slope,ESAL}}) = \text{function} (\log_{10}(CR_{\text{ESAL}}))$	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} (Πηγή PARIS, 1998).

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

Πίνακας 3.6: Πρότυπα για τον υπολογισμό της κλίσης του Δείκτη Ρηγμάτωσης, ανά χρόνο, συναρτήσει του CR_{age} (Πηγή PARIS, 1998).

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

CR_{ESAL}	=	Cracking Relationship με μεταβλητή ESAL
CR_{age}	=	Cracking Relationship με μεταβλητή age
CI_{last}	=	Δείκτης Ρηγμάτωσης κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση
$MESAL_{\text{last}}$	=	συνολικός αριθμός ESALs (σε εκατομμύρια) από την κατασκευή ή την συντήρηση της επιφάνειας, κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση
age_{last}	=	ηλικία επιφάνειας οδοστρώματος κατά την τελευταία επιτόπου μέτρηση, από την κατασκευή ή την ανακατασκευή της επιφάνειας

3.9.2.2 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. Παρόλο που εξετάστηκαν αρκετές μεταβλητές για να διαπιστωθεί ποιες 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.

3.9.2.3 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.

3.9.3 Αυλάκωση

3.9.3.1 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 οδοστρωμάτων δεν επηρεάζουν την εξέλιξη των

αυλακώσεων συν τω χρόνω. Η ανάλυση 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:

ΤΥΠΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	$\log_{10}(RD_{\text{slope,ESAL}}) = \text{function} (\log_{10}(RR_{\text{ESAL}}))$	R^2
Εύκαμπτα	$y = 0.05 + 0.93x$	0.89
Ημιάκαμπτα	$y = 0.02 + 0.86x$	0.86
Όλα τα οδοστρώματα	$y = 0.04 + 0.90x$	0.88

Πίνακας 3.7: Πρότυπα για τον υπολογισμό του λογαρίθμου της κλίσης του Βάθους Αυλάκωσης, ανά MESALs, συναρτήσει του λογαρίθμου του RR_{ESAL} , για διαφορετικούς τύπους οδοστρωμάτων (Πηγή PARIS, 1998).

ΤΥΠΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	$RD_{\text{slope,age}} = \text{function} (RR_{\text{age}})$	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 οδοστρωμάτων (Πηγή PARIS, 1998).

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

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

3.9.3.2 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).

3.9.4 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.

ΧΩΡΑ	ΕΥΚΑΜΠΤΑ	ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΑ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΑ ΧΩΡΑ
ΦΙΛΑΝΔΙΑ	33	0	100 %
ΣΟΥΗΔΙΑ	296	0	100 %
ΔΑΝΙΑ	7	0	100 %
ΟΛΛΑΝΔΙΑ	167	37	99 %
ΗΝΩΜΕΝΟ ΒΑΣΙΛΕΙΟ	15	12	96 %
ΓΑΛΛΙΑ	7	2	41 %
ΕΛΒΕΤΙΑ	0	0	0 %
ΑΥΣΤΡΙΑ	10	0	83 %
ΙΣΠΑΝΙΑ	0	0	0 %
ΟΥΓΓΑΡΙΑ	24	26	82 %
ΕΛΛΑΔΑ	9	0	90 %
ΣΥΝΟΛΟ	568	77	88 %

Πίνακας 3.9: Αριθμός τμημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση για την κατά μήκος ομαλότητα (Πηγή PARIS, 1998).

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:

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

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.

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

3.9.5 Αποκόλληση ασφαλτικού υλικού

Η αποκόλληση ασφαλτικού υλικού από την επιφάνεια οδοστρωμάτων με ασφατικές στρώσεις 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, μπορεί να σχηματιστούν λακκούβες με τις γνωστές συνέπειες.

Υπάρχουν τρία επίπεδα σοβαρότητας (low, medium, high) που περιγράφουν το φαινόμενο της αποκόλλησης και εκφράζουν το ποσοστό ασφαλτικού υλικού που έχει αποκολληθεί. Η έκταση μετράται σε μέτρα ανά 100 μέτρα μήκους δρόμου, επομένως η μέγιστη τιμή που μπορεί να υπάρξει είναι 100 μέτρα (συνολικά και από τα τρία επίπεδα σοβαρότητας).

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

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

y	=	συνολική έκταση αποκόλλησης ασφαλικού 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.

3.10 Επαλήθευση

3.10.1 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. 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. Ο βασικός στόχος της διαδικασίας επαλήθευσης 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 επαλήθευση.

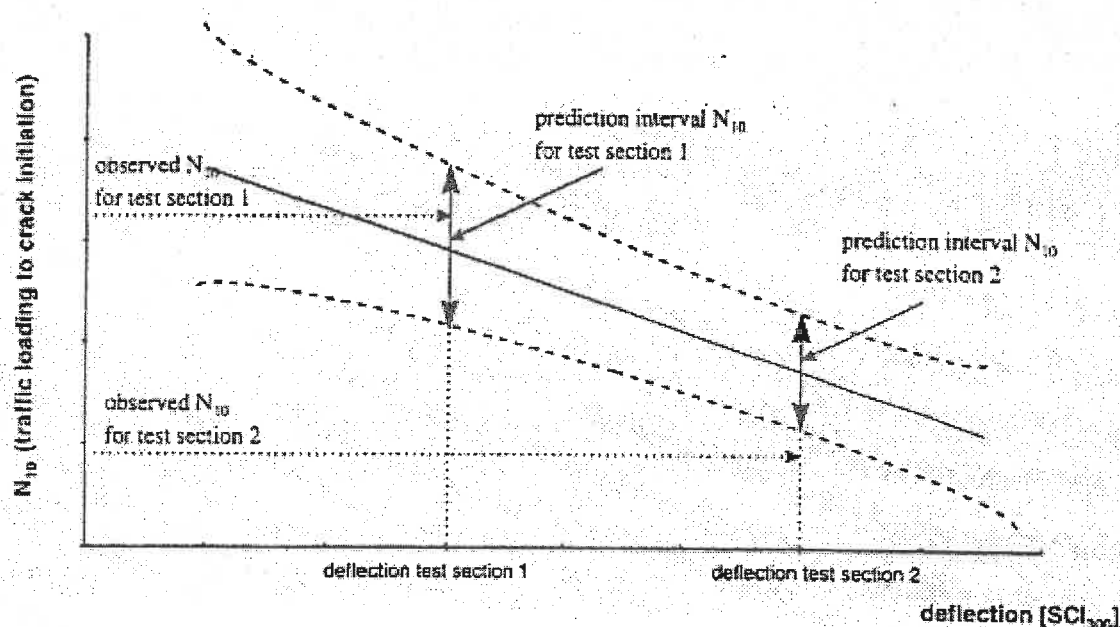
3.10.2 Έναρξη αστοχιών

Στην ανάλυση για την ανάπτυξη των προτύπων έναρξης ρηγμάτωσης, το έτος εμφάνισης πρώτης ρωγμής καθορίστηκε από την χρονοσειρά δεδομένων για ρηγμάτωση. Επειδή τα στοιχεία των τμημάτων των τεσσάρων χωρών δεν κάλυπταν ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, αποφασίστηκε να συμπεριληφθούν επιπλέον τμήματα τα οποία βρίσκονταν στη φάση έναρξης ρηγμάτωσης. Τα αδύνατο σημείο ήταν η επιλογή των τμημάτων από τον μηχανικό που θα βρίσκονταν στην φάση έναρξης. Το βασικό κριτήριο για εκείνον ήταν οι ρηγματώσεις να είχαν μήκος μικρότερο από 0.5 m. Μετά την επιλογή, ακολούθησαν μετρήσεις υποχωρήσεων και κυκλοφορίας. Αρχικά επελέγη ένας μεγάλος αριθμός τμημάτων, αλλά με τους περιορισμούς εφαρμογής των προτύπων, τελικά χρησιμοποιήθηκαν για επαλήθευση τα τμήματα του παρακάτω πίνακα.

ΧΩΡΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΜΗΜΑΤΩΝ		ΕΥΡΟΣ ΚΥΚΛ.ΦΟΡΤΟΥ	ΕΥΡΟΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ
	ΕΥΚΑΜΠΤΑ	ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΑ	[ESALs/year]	[SCI ₃₀₀]
ΒΕΛΓΙΟ	0	0	800 - 4000	40 - 322
ΙΡΛΑΝΔΙΑ	16	-	67000 - 290000	71 - 230
ΠΟΡΤΟΓΑΛΙΑ	24	-	9000 - 750000	28 - 268
ΣΛΟΒΕΝΙΑ	15	-	10000 - 210000	47 - 205
ΣΥΝΟΛΟ	55	0	800 - 750000	28 - 322

Πίνακας 3.10: Τελική επιλογή τμημάτων για επαλήθευση των προτύπων έναρξης (Πηγή PARIS, 1998).

Η βασική αρχή για να επαληθευτούν τα πρότυπα έναρξης ρηγματώσης 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 3.5 δείχνει ακριβώς τη λογική.



Σχήμα 3.5: Παρουσίαση της αρχής της διαδικασίας επαλήθευσης (Πηγή PARIS, 1998).

Το παραπάνω σχήμα δείχνει τη σχέση της ανεξάρτητης μεταβλητής SCI_{300} και της εξαρτημένης μεταβλητής N_{10} . Η δεύτερη ανεξάρτητη μεταβλητή $ESAL/y$ δεν λαμβάνεται υπόψη, που σημαίνει ότι το πρότυπο στο σχήμα είναι έγκυρο μόνο για ένα συγκεκριμένο επίπεδο $ESAL/y$. 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 επαλήθευση 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.

3.10.3 Εξέλιξη αστοχιών

Για την επαλήθευση των προτύπων εξέλιξης αστοχιών απαιτήθηκαν χρονοσειρές δεδομένων, επομένων δεν συμπεριλήφθηκαν επιπλέον τμήματα αφού δεν μπορούσαν να αποκτηθούν χρονοσειρές κατά τη διάρκεια του προγράμματος για νέα τμήματα. Ο πίνακας 3.11 εμφανίζει τα τμήματα που χρησιμοποιήθηκαν για επαλήθευση ανά χώρα και τα οποία διέθεταν χρονοσειρές δεδομένων για κάποια χρονική περίοδο.

ΧΩΡΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ
ΒΕΛΓΙΟ	23	11
ΙΡΛΑΝΔΙΑ	7	0
ΠΟΡΤΟΓΑΛΙΑ	20	6
ΣΛΟΒΕΝΙΑ	13	0
ΣΥΝΟΛΟ	63	17

Πίνακας 3.11: Αριθμός τμημάτων με διαθέσιμα στοιχεία (Πηγή PARIS, 1998).

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 επαλήθευση.

ΤΥΠΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΜΗΜΑΤΩΝ	ΧΩΡΑ
Ρηγμάτωση	13	Πορτογαλία
Αυλάκωση	51	Βέλγιο, Ιρλανδία, Πορτογαλία, Σλοβενία
Ομαλότητα κατά μήκος	25	Βέλγιο, Ιρλανδία, Σλοβενία
Αποκόλληση ασφαλτικού υλικού	2	Ιρλανδία

Πίνακας 3.12: Αριθμός τμημάτων που ικανοποιούσαν τα κριτήρια για να εισαχθούν στη διαδικασία της επαλήθευσης των προτύπων εξέλιξης για εύκαμπτα οδοστρώματα (Πηγή PARIS, 1998).

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 τιμές των κλίσεων ήταν ανάμεσα στις καμπύλες ανοχής (prediction interval) του αρχικού προτύπου.

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

3.11 Συμπεράσματα

- Παρόλο 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 εμπεριστατωμένα, ειδικά όταν αφορά σε ποιοτικά οδοστρώματα της Ευρώπης.
- Για την αποκόλληση ασφαλικού υλικού, το λογιστικό πρότυπο φάνηκε να περιγράφει καλύτερα την εξέλιξη του φαινομένου συν τω χρόνω. Παρόλα 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. 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

4. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας περιελάμβανε την οργάνωση της βάσης δεδομένων του PARIS. Πρόκειται για μια μεγάλου μεγέθους βάση, η οποία περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία τα οποία συλλέχθηκαν στα δύο χρόνια μελέτης του προγράμματος. Η βάση είχε δημιουργηθεί σε μορφή ACCESS και περιείχε πάρα πολλούς πίνακες, καθένας από τους οποίους είχε στοιχεία από αντίστοιχες μετρήσεις. Σκοπός ήταν να γίνει έλεγχος των στοιχείων και να κρατηθούν αυτά που θα χρησίμευαν για την περαιτέρω επεξεργασία που θα πραγματοποιείτο. Η βάση θα δημιουργείτο σε μορφή EXCEL και θα περιείχε τέσσερις πίνακες. Οι δύο θα είχαν στοιχεία για τα εύκαμπτα οδοστρώματα και οι άλλοι δύο για τα ημιάκαμπτα. Μετά τη δημιουργία της θα γινόταν αρχικώς αξιολόγηση των προτύπων του PARIS, που αφορούσαν στη ρηγμάτωση, τόσο για τα εύκαμπτα όσο και για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Στη συνέχεια, εφόσον οι προβλέψεις των προτύπων παρουσίαζαν μεγάλο σφάλμα σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα, θα χρησιμοποιούνταν τα στοιχεία της νέας βάσης για να δημιουργηθούν εκ νέου πρότυπα πρόβλεψης έναρξης ρηγματώσεων.

4.2 Οργάνωση της βάσης δεδομένων

Αρχικά έγινε ο διαχωρισμός των τμημάτων των οδοστρωμάτων σε εύκαμπτα και ημιάκαμπτα. Στη βάση δεδομένων του PARIS όλα τα υπό μελέτη τμήματα είχαν τοποθετηθεί μαζί σε έναν πίνακα και αυτό δεν διευκόλυνε την μετέπειτα επεξεργασία. Κάθε τμήμα ενός οδοστρώματος σημειωνόταν με έναν κωδικό της μορφής 121001. Τα

δύο πρώτα ψηφία αντιπροσωπεύουν τον κωδικό της χώρας από την οποία προέρχεται το αντίστοιχο τμήμα. Έτσι αναλυτικότερα ήταν:

ΚΩΔΙΚΟΣ ΧΩΡΑΣ	ΧΩΡΑ
11	ΦΙΛΑΝΔΙΑ
12	ΣΟΥΗΔΙΑ
13	ΔΑΝΙΑ
14	ΟΛΛΑΝΔΙΑ
15	ΑΓΓΛΙΑ
16	ΙΡΛΑΝΔΙΑ
17	ΒΕΛΓΙΟ
18	ΓΑΛΛΙΑ
19	ΕΛΒΕΤΙΑ
20	ΑΥΣΤΡΙΑ
21	ΙΣΠΑΝΙΑ
22	ΠΟΡΤΟΓΑΛΙΑ
23	ΣΛΟΒΕΝΙΑ
24	ΟΥΓΓΑΡΙΑ
25	ΕΛΛΑΔΑ

Πίνακας 4.1: Κωδικοί χωρών.

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 έγινε διαχωρισμός στα δύο είδη οδοστρωμάτων και δημιουργήθηκαν έτσι δύο πίνακες: Ένας για τα εύκαμπτα και ένας για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

Στη συνέχεια εξετάστηκε ποια από τα ανωτέρω τμήματα χαρακτηρίζονταν ως αριστερής περικοπής, δεξιάς περικοπής και ποια ως μη περικομμένα. Όπως είναι γνωστό και από το κεφάλαιο 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. Τα τελικά αποτελέσματα διαχωρίστηκαν όσον αφορά τα εύκαμπτα και τα ημιάκαμπτα τμήματα και τοποθετήθηκαν στους αντίστοιχους πίνακες.

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 wheelpath) 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 wheelpath) μαζί με τους ίδιους δείκτες σοβαρότητας. Τέλος, τα ACR_L, ACR_M, ACR_H είναι τα μήκη (σε μέτρα) της αλλιγατορικής 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.

PARIS_ID	DATE	LWP_L	LWP_M	LWP_H	TWP_L	TWP_M	TWP_H	ACR_L	ACR_M	ACR_H	SUM_LWP	SUM_TWP	SUM_ACR	TOT_WP
121016	8/14/1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
121016	11/4/1992	0.4	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	2.0
121016	10/27/1993	0.4	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	2.0
121016	10/25/1994	0.0	0.6	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	3.0
121016	11/9/1995	0.0	2.2	8.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0	11.0
121016	11/5/1996	2.0	3.2	12.8	0.2	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	1.0	0.0	19.0
121016	5/21/1997	0.6	6.0	14.4	0.0	0.2	0.8	0.0	0.0	0.0	21.0	1.0	0.0	22.0
121017	8/14/1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
121017	11/4/1992	3.8	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	7.0
121017	10/27/1993	13.2	24.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.0	0.0	0.0	38.0
121017	10/25/1994	8.2	32.8	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	41.0	0.0	3.0	44.0
121017	11/9/1995	0.4	8.6	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	37.0	0.0	8.0	45.0
121017	11/5/1996	1.6	10.8	17.6	0.4	1.6	0.0	9.0	4.0	8.0	30.0	2.0	21.0	53.0
121017	5/21/1997	0.8	8.6	21.6	0.4	1.8	0.8	9.0	4.0	8.0	31.0	3.0	21.0	55.0
121018	8/29/1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
121018	10/22/1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
121018	11/19/1992	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
121018	10/28/1993	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
121018	10/24/1994	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
121018	11/24/1995	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
121018	11/21/1996	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
121018	8/29/1997	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
121018	5/18/1998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Πίνακας 4.2: Απόσπασμα από τη βάση δεδομένων του PARIS, όπου παρουσιάζονται οι επιμέρους ρηγματώσεις για ορισμένα οδικά τμήματα.

Η εργασία του PARIS ξεκίνησε την 1 Οκτωβρίου 1996 και ολοκληρώθηκε στις 30 Σεπτεμβρίου 1998. 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 περικομμένα (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. 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. Για να γίνει λοιπόν σωστά η αξιολόγηση των προτύπων έπρεπε να γίνει ο ανωτέρω διαχωρισμός.

Από αυτό το σημείο άρχισε να γίνεται και ο πρώτος έλεγχος της νέας βάσης. Μέσα στον προηγούμενο πίνακα της βάσης του PARIS υπήρχαν τμήματα σε διάφορες χώρες τα οποία, ενώ σε κάποια επιτόπου μέτρηση εμφάνιζαν ρηγμάτωση, στην αμέσως επόμενη η ρηγμάτωση αυτή είχε εξαφανιστεί χωρίς να έχει γίνει συντήρηση ή αποκατάσταση του συγκεκριμένου τμήματος! Τέτοια τμήματα αφαιρέθηκαν από τη νέα βάση θεωρώντας ότι υπάρχει λάθος είτε στην επιτόπου μέτρηση είτε αριθμητικό λάθος στη βάση δεδομένων του PARIS αφού, είναι αδύνατο, μεγάλης έκτασης ρωγμές να εξαφανιστούν λόγω συστολοδιαστολής του οδοστρώματος εξαιτίας θερμοκρασιακών μεταβολών.

Αφού αφαιρέθηκαν τα προβληματικά τμήματα, στη συνέχεια έγινε προσθήκη στη νέα βάση όλων των δεδομένων του PARIS 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). Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως CONSTR.

- Η χρονιά της τελευταίας επίστρωσης (year of latest overlay), εάν είχε γίνει. Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως OVERLAY.
- Η χρονιά της τελευταίας επιφανειακής συντήρησης (year of latest surface treatment), εάν είχε γίνει. Στη νέα βάση συμβολίστηκε 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 ημερήσια θερμοκρασία (average yearly day temperature) σε °C. Στη νέα βάση συμβολίστηκε 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. Στη νέα βάση συμβολίστηκε 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. Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως C_DAY.
- Ο Δείκτης Παγετού σε h°C. Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως FREEZ.
- Η μέση ετήσια βροχόπτωση (average yearly rainfall) σε mm. Στη νέα βάση συμβολίστηκε 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 ασφαλικής στρώσης (thickness bituminous layers) σε mm. Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως TH_BIT.
- Το πάχος της δύσκαμπτης στρώσης (thickness rigid layers) σε mm. Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως TH_RIG.

- Το πάχος της βάσης από κοκκώδες υλικό (thickness granular layers) σε mm. Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως TH_GRA.
- Το πάχος της υπόβασης (thickness sub-base layers) σε mm. Στη νέα βάση συμβολίστηκε 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). Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως ESAL/Y.
- Ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα και ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος (veh/day in direction of test section). Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως DVEH.
- Το ποσοστό των φορτηγών ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος (% of trucks in direction of test section). Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως D%TRU.
- Ο αριθμός των οχημάτων ανά ημέρα στο υπό μελέτη τμήμα (veh/day at test section). Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως LVEH.
- Το ποσοστό των φορτηγών στο υπό μελέτη τμήμα (% of trucks at test section). Στη νέα βάση συμβολίστηκε 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 παραμορφωσίμετρο 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 0mm από την κεφαλή της συσκευής (D0) σε mm. Στη νέα βάση συμβολίστηκε ως D0.
- Η υποχώρηση σε απόσταση 300mm από την κεφαλή της συσκευής (D300) σε mm. Η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε μόνο για τα εύκαμπτα οδοστρώματα και στη νέα βάση συμβολίστηκε 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 στη νέα βάση συμβολίστηκε ως D900.

Αφού ετοιμάστηκε η νέα βάση, με όσα στοιχεία τελικώς πάρθηκαν από το PARIS, έγινε ένας δεύτερος έλεγχος των τμημάτων και αφαιρέθηκαν αυτά, 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.

Έχοντας πλέον την τελική μορφή της νέας βάσης δεδομένων, δημιουργήθηκε μια καινούργια στήλη στους πίνακες του EXCEL και εκεί τοποθετήθηκε το έτος κατά το οποίο εμφανίστηκε η πρώτη ρωγμή σε κάθε τμήμα. Αυτό μπορούσε εύκολα να προκύψει 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) θεωρήθηκε σαν έτος «αστοχίας» το 1998 (έτος λήξης του προγράμματος). Η στήλη αυτή ονομάστηκε PAV_DIS (pavement distress).

Στη συνέχεια έγινε προσθήκη μίας επιπλέον στήλης με την ονομασία PAV AGE (pavement age). Η στήλη αυτή δημιουργήθηκε για να υπολογιστεί πόσα χρόνια είχαν περάσει από την κατασκευή ή την τελευταία συντήρηση του τμήματος, μέχρι και την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής. Για να γίνει αυτό, αφαιρέθηκε από το έτος που έκανε την εμφάνιση της η πρώτη ρωγμή (pavement distress), 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 έδειχνε απλώς, πόσα χρόνια βρίσκεται το τμήμα σε λειτουργία.

Το τελευταίο στοιχείο που απαιτείτο ήταν ο Δείκτης Επιφανειακής Καμπυλότητας 300 (Surface Curvature Index 300 ή SCI₃₀₀) 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.

Με την ολοκλήρωση όλων των παραπάνω βημάτων η νέα βάση απέκτησε την τελική της μορφή και ήταν πλέον έτοιμη για την περαιτέρω επεξεργασία που θα ακολουθούσε. Στο τεύχος 2 (παράρτημα Α) γίνεται αναλυτική παρουσίαση της βάσης, τόσο για τα εύκαμπτα όσο και για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την αξιολόγηση των προτύπων του PARIS χρησιμοποιώντας την παραπάνω βάση.

4.3 Αξιολόγηση των προτύπων του PARIS

Για να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση των προτύπων του PARIS έπρεπε πρώτα να γίνει έλεγχος των αποτελεσμάτων που δίνουν. Αφού λοιπόν θα υπολογιζόταν αρχικά ο αριθμός των αξονικών διελεύσεων που προβλέπουν τα πρότυπα ότι μπορούν να πραγματοποιηθούν μέχρι την έναρξη της ρηγμάτωσης, θα γινόταν σύγκριση με τον πραγματικό αριθμό αξονικών διελεύσεων που πραγματοποιήθηκαν μέχρι και την έναρξη της ρηγμάτωσης, ο οποίος θα υπολογιζόταν από τα δεδομένα της βάσης, και έτσι θα προέκυπτε το ποσοστό του σφάλματος.

Αρχικά υπολογίστηκε ο προβλεπόμενος αριθμός αξονικών διελεύσεων σε εύκαμπτα οδοστρώματα με τμήματα που έχουν χαρακτηριστεί ως μη περικομμένα. Χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο:

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

Οι τιμές των SCI_{300} και $N_{10}Y$ υπήρχαν έτοιμες στη βάση ανά τμήμα οπότε πολύ εύκολα έγινε πρόβλεψη για κάθε τμήμα ξεχωριστά. Να σημειωθεί ότι το $N_{10}Y$ είναι η μέση ετήσια κυκλοφορία στην περίοδο μελέτης (ESAL/Y). Τα αποτελέσματα τοποθετήθηκαν σε νέα στήλη, στον αντίστοιχο πίνακα, με την ονομασία $N_{10}(m)$.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο προβλεπόμενος αριθμός αξονικών διελεύσεων σε εύκαμπτα οδοστρώματα με όλα πλέον τα τμήματα, ανεξαρτήτως του πως είχαν χαρακτηριστεί (all data). Χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο:

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

Οι τιμές των SCI_{300} και $N_{10}Y$ ήταν και πάλι γνωστές ανά τμήμα. Τα αποτελέσματα τοποθετήθηκαν στον αντίστοιχο πίνακα.

Τελειώνοντας με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, στη συνέχεια έγινε ο υπολογισμός του προβλεπόμενου αριθμού αξονικών διελεύσεων σε ημιάκαμπτα οδοστρώματα, με τμήματα που έχουν χαρακτηριστεί ως μη περικομμένα. Χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο:

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

Και εδώ οι τιμές των SCI_{900} και $N_{10}Y$ ήταν υπολογισμένες στη βάση, οπότε άμεσα προέκυψε το ζητούμενο αποτέλεσμα. Τα αποτελέσματα τοποθετήθηκαν στον αντίστοιχο πίνακα.

Τέλος υπολογίστηκε ο προβλεπόμενος αριθμός αξονικών διελεύσεων σε ημιάκαμπτα οδοστρώματα με όλα τα τμήματα, ανεξαρτήτως του πως είχαν χαρακτηριστεί (all data). Χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο:

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

Οι τιμές των SCI_{900} και $N_{10}Y$ ομοίως ήταν γνωστές και τα αποτελέσματα τοποθετήθηκαν στον αντίστοιχο πίνακα.

Στη συνέχεια, έπρεπε να υπολογιστεί ο πραγματικός αριθμός αξονικών διελεύσεων σε κάθε τμήμα, από την ημερομηνία κατασκευής του (ή την αντίστοιχη ημερομηνία της τελευταίας επίστρωσης ή συντήρησης), μέχρι και την ημερομηνία που εμφανίστηκε η πρώτη ρωγμή (initiation of cracking). Εφόσον υπήρχε η τιμή ESAL/Y (μέση ετήσια κυκλοφορία), αν πολλαπλασιαζόταν επί την τιμή PAV AGE (έτη λειτουργίας του τμήματος από την κατασκευή του ή την τελευταία του συντήρηση μέχρι και την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής) θα προέκυπτε τελικά ο κυκλοφοριακός φόρτος του τμήματος μέχρι και την αστοχία. Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε για τα τμήματα που είχαν χαρακτηριστεί ως αριστερής περικοπής και μη περικομμένα αφού τα δεξιάς περικοπής, μέχρι και το τέλος του προγράμματος, δεν είχαν αστοχήσει. Τα αποτελέσματα τοποθετήθηκαν σε νέα στήλη με την ονομασία $N_{10}(ob)$ σε όλους τους πίνακες.

Έχοντας πλέον τον αριθμό των αξονικών διελεύσεων, που προέβλεψαν τα πρότυπα του PARIS, αλλά και τον πραγματικό αριθμό των αξονικών διελεύσεων που προέκυψαν από τη μέση ετήσια κυκλοφορία, έγιναν άμεσα συγκρίσεις των δύο αυτών αποτελεσμάτων. Για να γίνει όμως περισσότερο εμφανής η διαφορά, υπολογίστηκε και το μέσο απόλυτο επί τοις εκατό σφάλμα μεταξύ των δύο τιμών και τοποθετήθηκαν τα αποτελέσματα σε νέα

στήλη μέσα σε όλους τους πίνακες. Η ονομασία της στήλης είναι ERROR%. Για τον υπολογισμό του μέσου απόλυτου σφάλματος χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$\text{Μέσο απόλυτο σφάλμα} = \left| \frac{N_{10}(ob) - N_{10}(m)}{N_{10}(m)} \cdot 100 \right| (\%)$$

Το σφάλμα αυτό δείχνει το ποσοστό που απέχει η τιμή του προτύπου από την πραγματική τιμή. Επιπλέον θεωρήθηκε ότι, ένα ικανοποιητικό ποσοστό σφάλματος θα ήταν το πολύ μέχρι 30%. Έτσι δημιουργήθηκε μια στήλη στη βάση με την ονομασία 0.1 όπου, το 0 τοποθετήθηκε σε τμήματα με μέσο απόλυτο σφάλμα μεγαλύτερο από 30% ενώ το 1 σε τμήματα με σφάλμα μικρότερο ή το πολύ ίσο με 30%. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν και γραφήματα με τις τιμές των πραγματικών (μετρημένων) και των προβλεπόμενων (εκτιμώμενων) διελεύσεων, ώστε να μπορεί να γίνει εύκολα και οπτική σύγκριση. Επίσης, έγιναν και παρουσιάζονται τα γραφήματα με το μέσο απόλυτο επί τοις εκατό σφάλμα ανά τμήμα καθώς και δύο γραφήματα που δείχνουν τα ποσοστά των τμημάτων που βρίσκονται εντός του ορίου 30% (ένα για εύκαμπτα και ένα για ημιάκαμπτα οδοστρώματα). Τα εν λόγω γραφήματα υπάρχουν στο τέλος του κεφαλαίου.

4.4 Συμπεράσματα

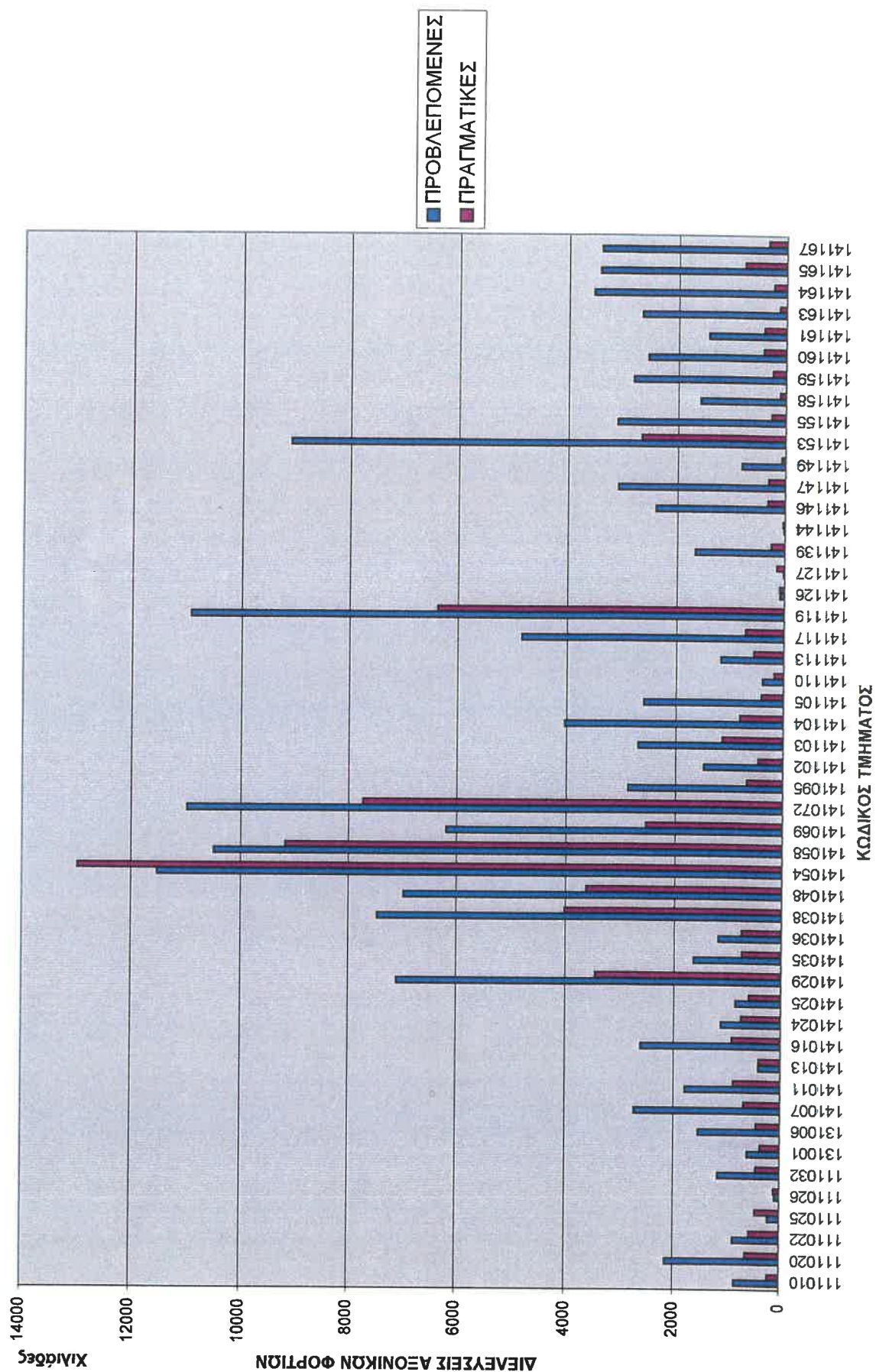
Παρατηρώντας, τόσο τις τιμές που προέκυψαν μέσα στη βάση, όσον αφορά τον αριθμό των πραγματικών και των προβλεπόμενων αξονικών διελεύσεων μέχρι την αστοχία, όσο και τα τελικά γραφήματα, εξάγονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα:

- Γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι, ο αριθμός των αξόνων που προβλέπουν τα πρότυπα του PARIS τόσο στα εύκαμπτα όσο και στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα, διαφέρει αισθητά σε σχέση με τις πραγματικές τιμές των αξόνων που πέρασαν μέχρι να επέλθει αστοχία. Αυτό θέτει σοβαρές αμφιβολίες ως προς το αν τα συγκεκριμένα πρότυπα μπορούν να δώσουν αξιόπιστες προβλέψεις χρησιμοποιώντας τα

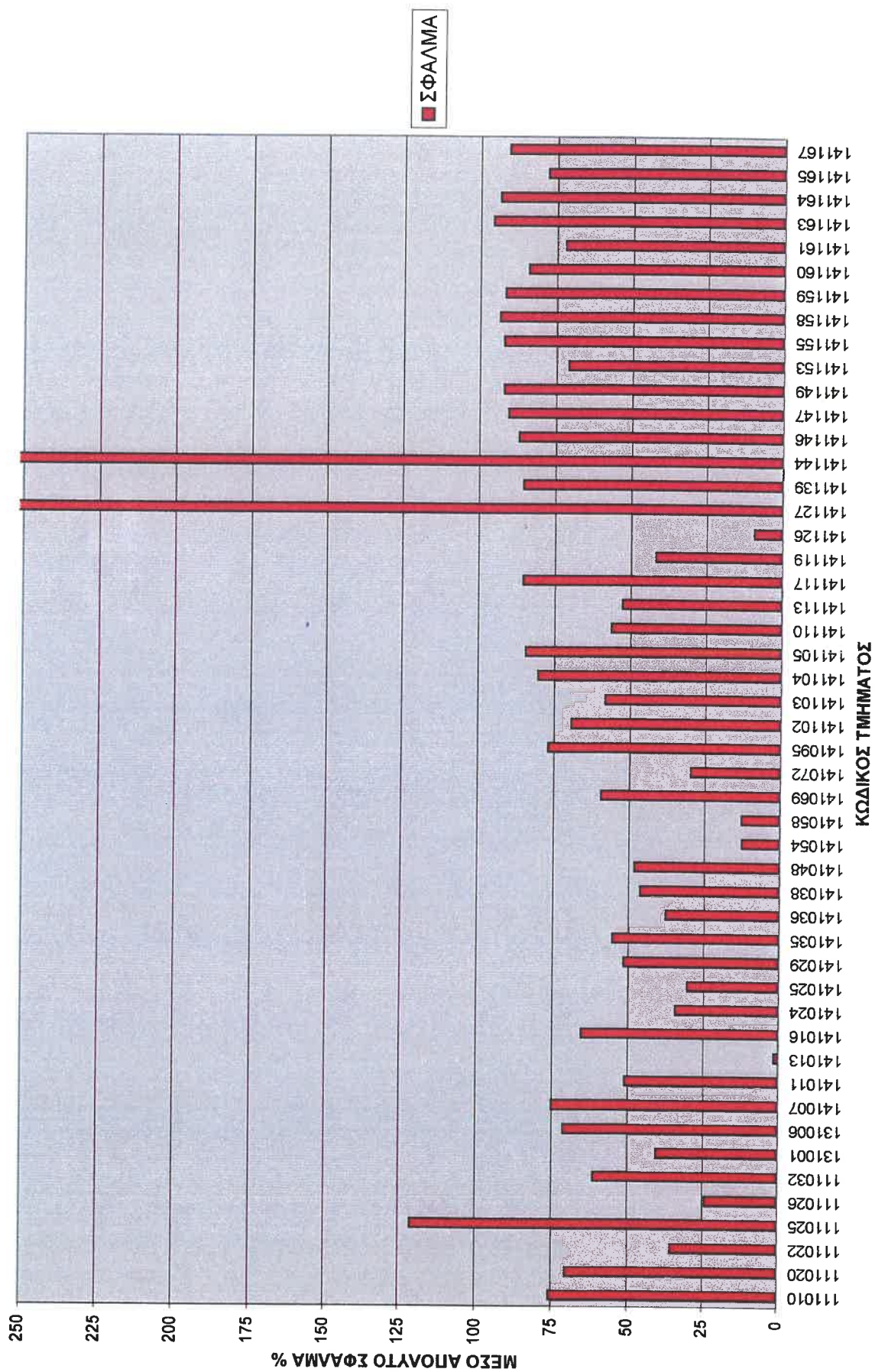
δεδομένα μιας άλλης χώρας, τη στιγμή που δεν μπορούν να επαληθεύσουν τα δεδομένα από τα οποία δημιουργήθηκαν.

- Κάτι ακόμα που προκαλεί εντύπωση είναι το γεγονός ότι, τα πρότυπα στη συντριπτική πλειοψηφία των τμημάτων, τόσο των ευκάμπτων όσο και των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, υπερεκτιμούν τον αριθμό των διελεύσεων σε σχέση με τις πραγματικές. Σχεδόν πάντα προβλέπουν πολύ μεγαλύτερο αριθμό αξονικών διελεύσεων μέχρι την αστοχία σε σχέση με την πραγματική τιμή, ενώ σε πολύ λίγες περιπτώσεις προβλέπουν μικρότερο αριθμό. Αυτό, στον διαχειριστή του δικτύου δημιουργεί τεράστιο πρόβλημα, όταν προσπαθεί να υπολογίσει το πότε θα απαιτηθούν χρήματα για επισκευές, αφού είναι προτιμότερο να περιμένει την αστοχία νωρίτερα από ό,τι αυτή θα εκδηλωθεί τελικώς, παρά αργότερα.
- Τέλος, αμέσως φαίνεται ότι, τα συγκεκριμένα πρότυπα, περιέχουν πολύ μικρό αριθμό ανεξάρτητων μεταβλητών, κάτι που δημιουργεί αμφιβολίες για το αν μπορούν να δώσουν σωστές προβλέψεις. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, όπου αναζητήθηκαν παρόμοιες μελέτες, συνήθως χρησιμοποιούνταν επιπλέον μεταβλητές όπως ο Δείκτης Παγετού, τα πάχη της υπόβασης-βάσης-ασφαλτικού κ.α. ώστε να μπορούν να εξαχθούν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

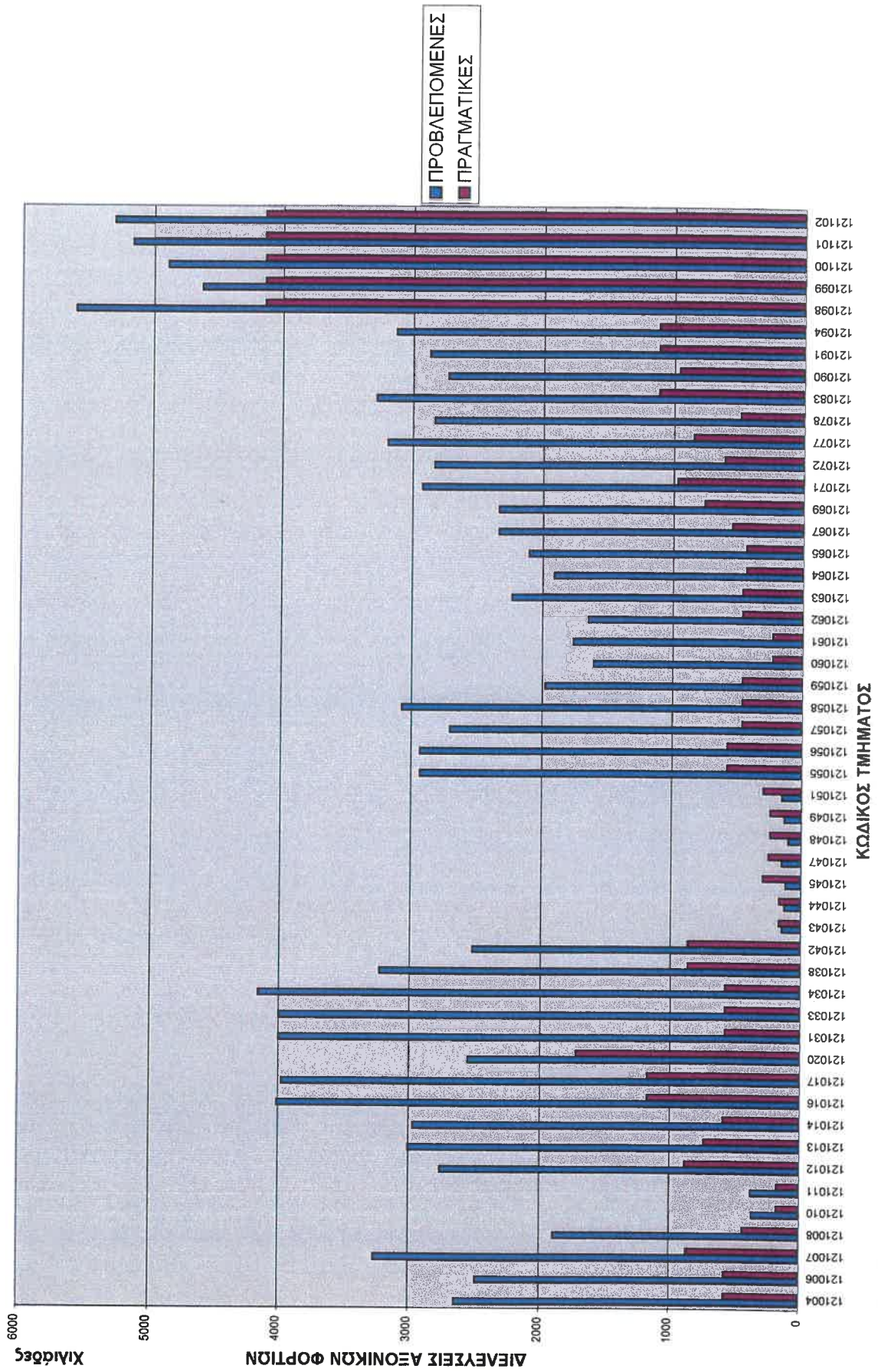
Από τα παραπάνω φαίνεται ότι, τα πρότυπα του PARIS, δεν μπορούν να δώσουν αποτελέσματα, τα οποία να εμφανίζουν μικρό σφάλμα σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Έτσι, λοιπόν, αποφασίστηκε να γίνει εκμετάλλευση της νέας βάσης δεδομένων που δημιουργήθηκε και να κατασκευαστούν νέα πρότυπα, τα οποία θα περιέχουν περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές, ώστε να μπορούν να πραγματοποιούν προβλέψεις οι οποίες θα εμφανίζουν, όσο το δυνατό, μικρό ποσοστό σφάλματος σε σχέση με τις πραγματικές.



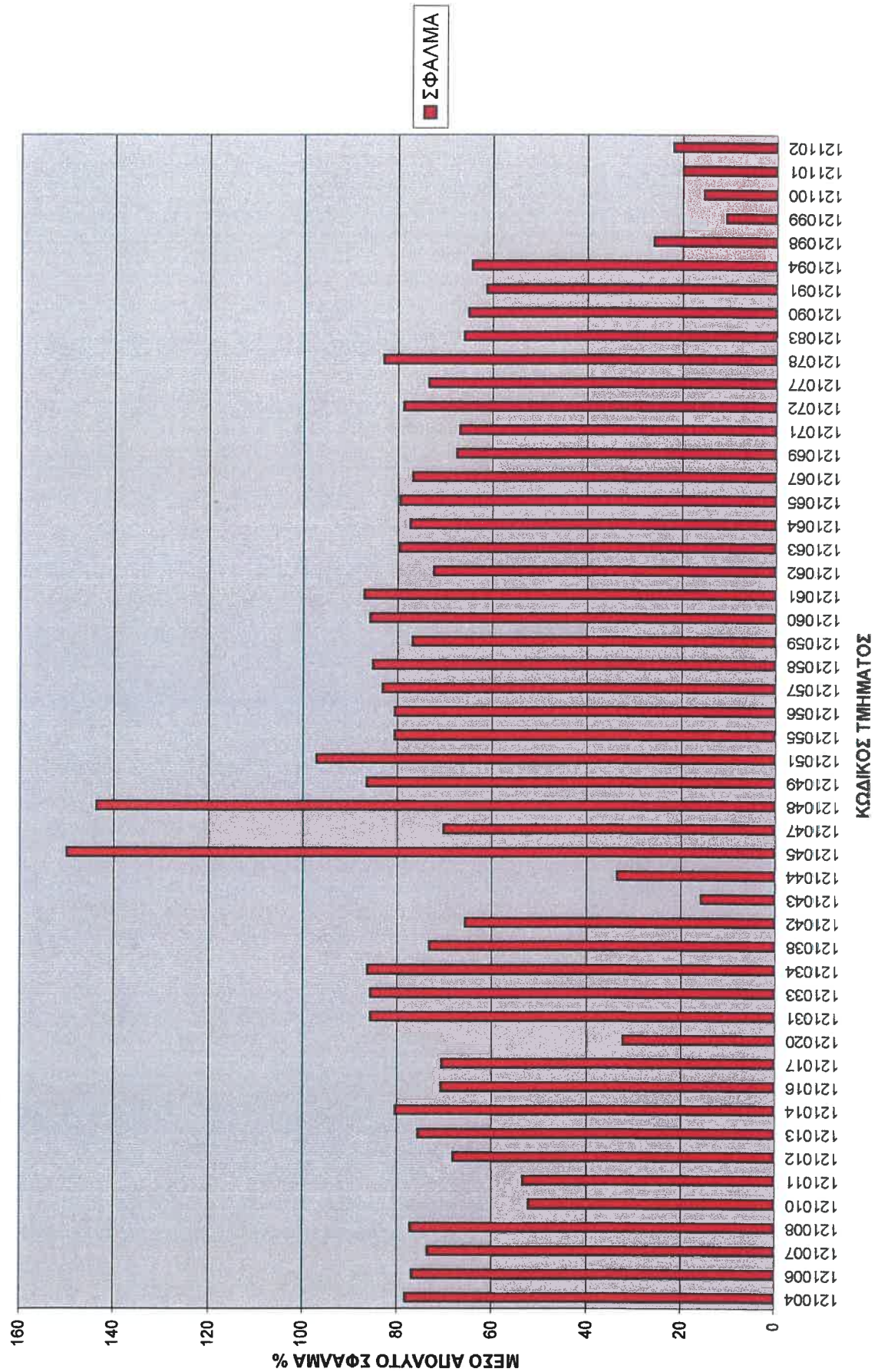
Γράφημα 1: Σύγκριση προβλεπόμενων - πραγματικών διελεύσεων αξονικών φορτίων για τις χώρες 11, 13 και 14 (εύκαμπτα οδοστρώματα).



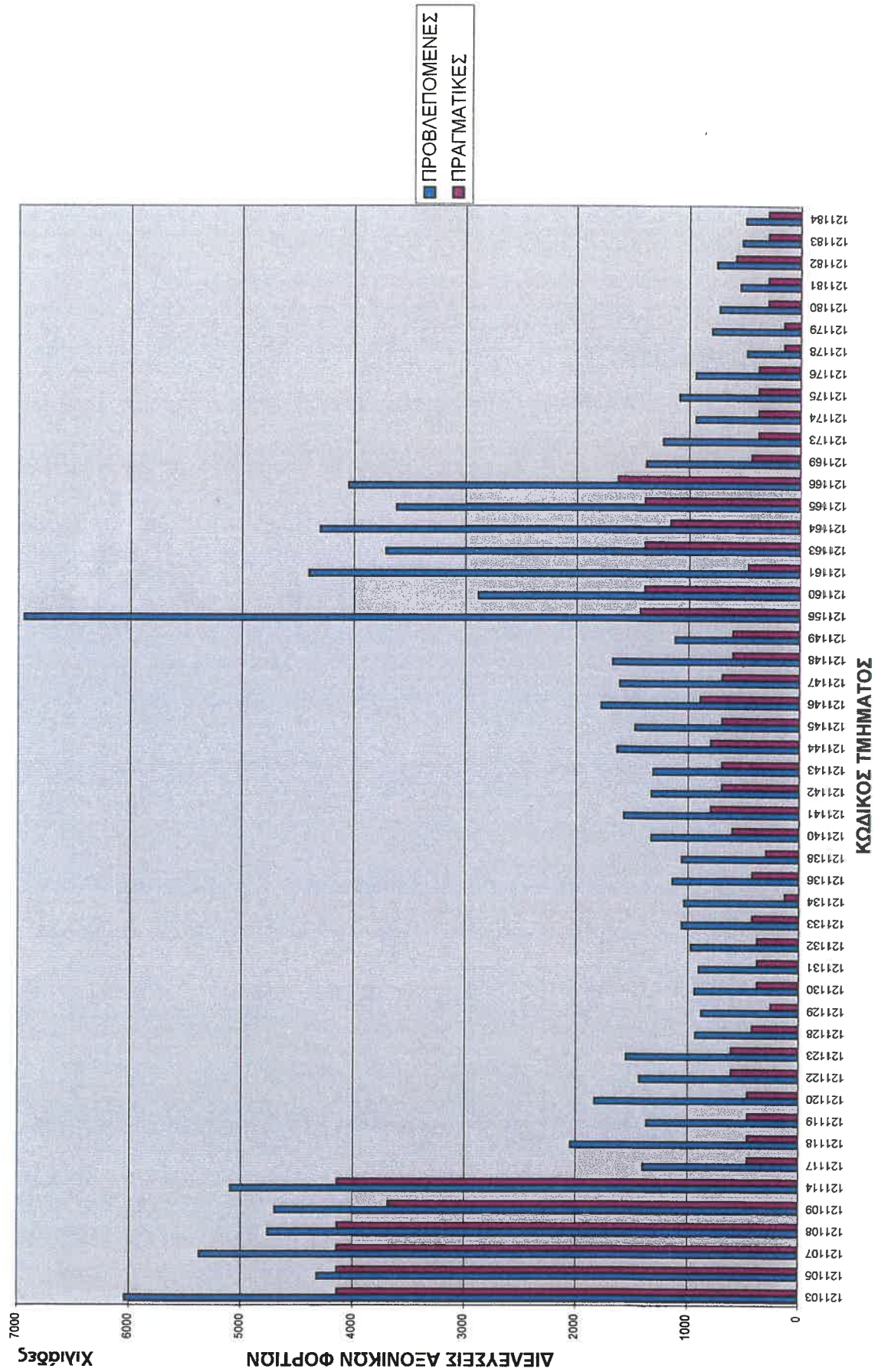
Γράφημα 2: Μέσο απόλυτο σφάλμα % για τις χώρες 11, 13 και 14 (εύκαμπτα οδοστρώματα).



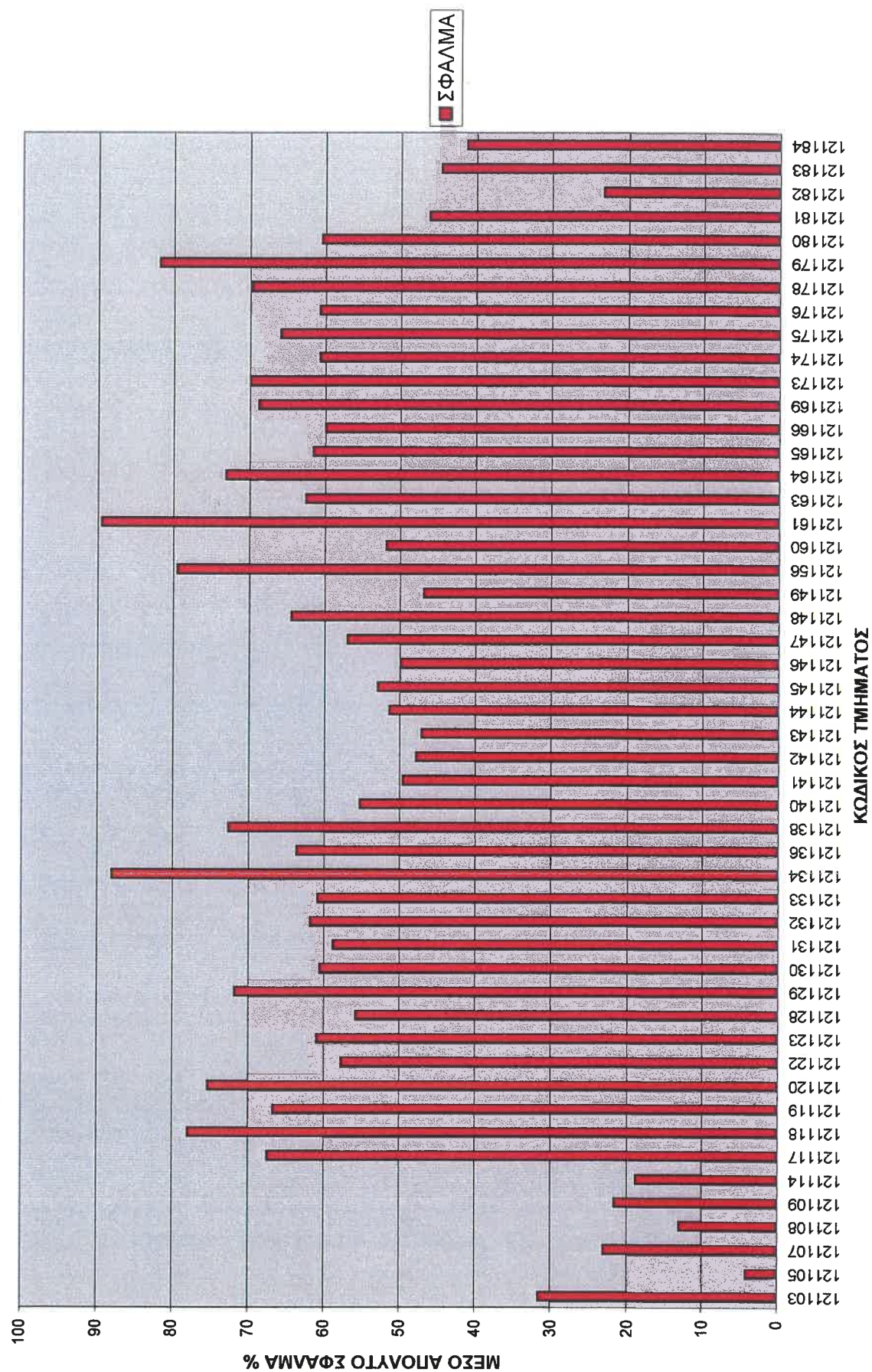
Γραφημα 3: Σύγκριση προβλεπόμενων - πραγματικών διελεύσεων αξονικών φορτίων για τη χώρα 12 (μέρος α) (εύκαμπτα οδοστρώματα).



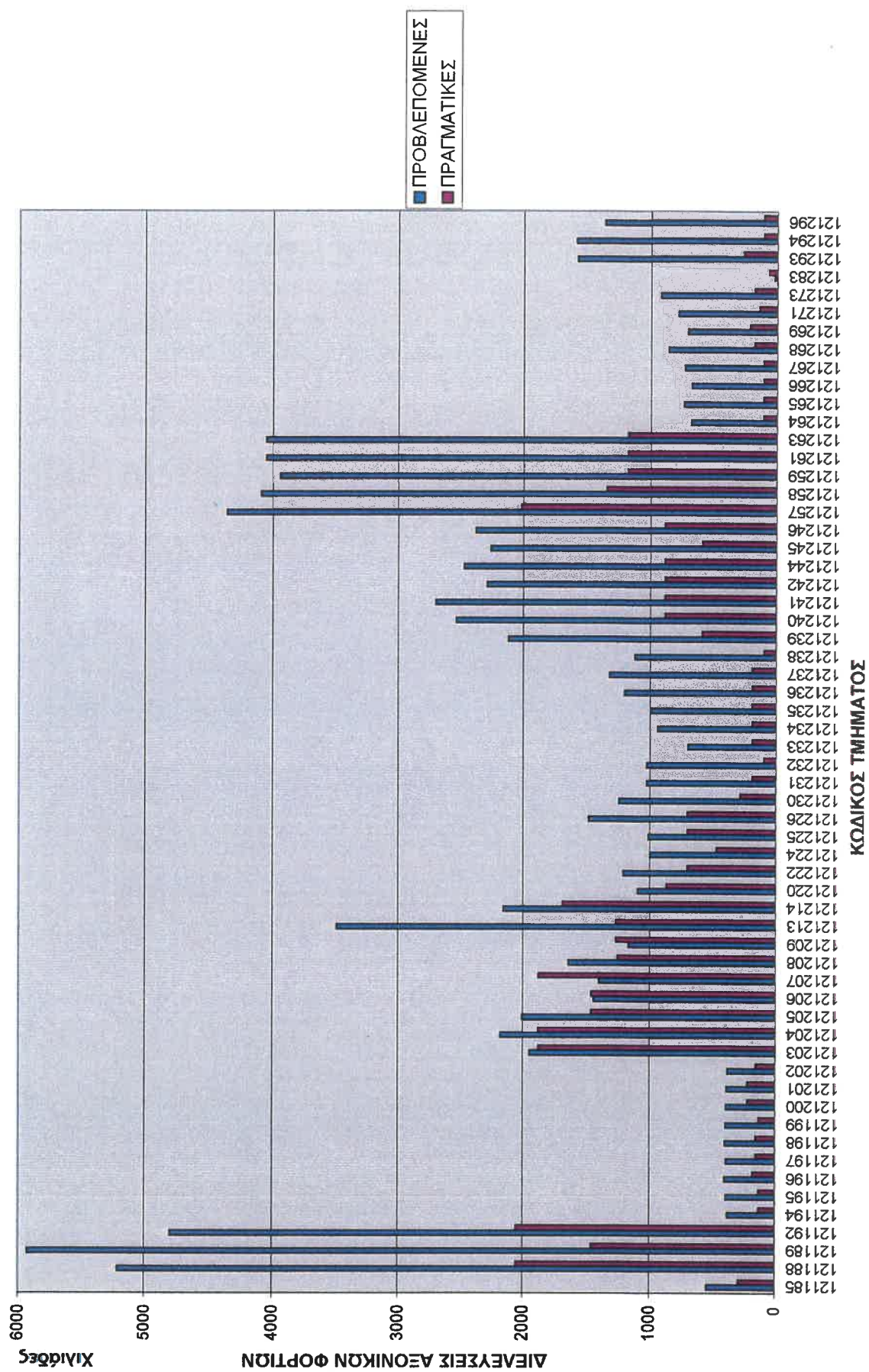
Γράφημα 4: Μέσο απόλυτο σφάλμα % για τη χώρα 12 (μέρος α) (εύκαμπτα οδοστρώματα).



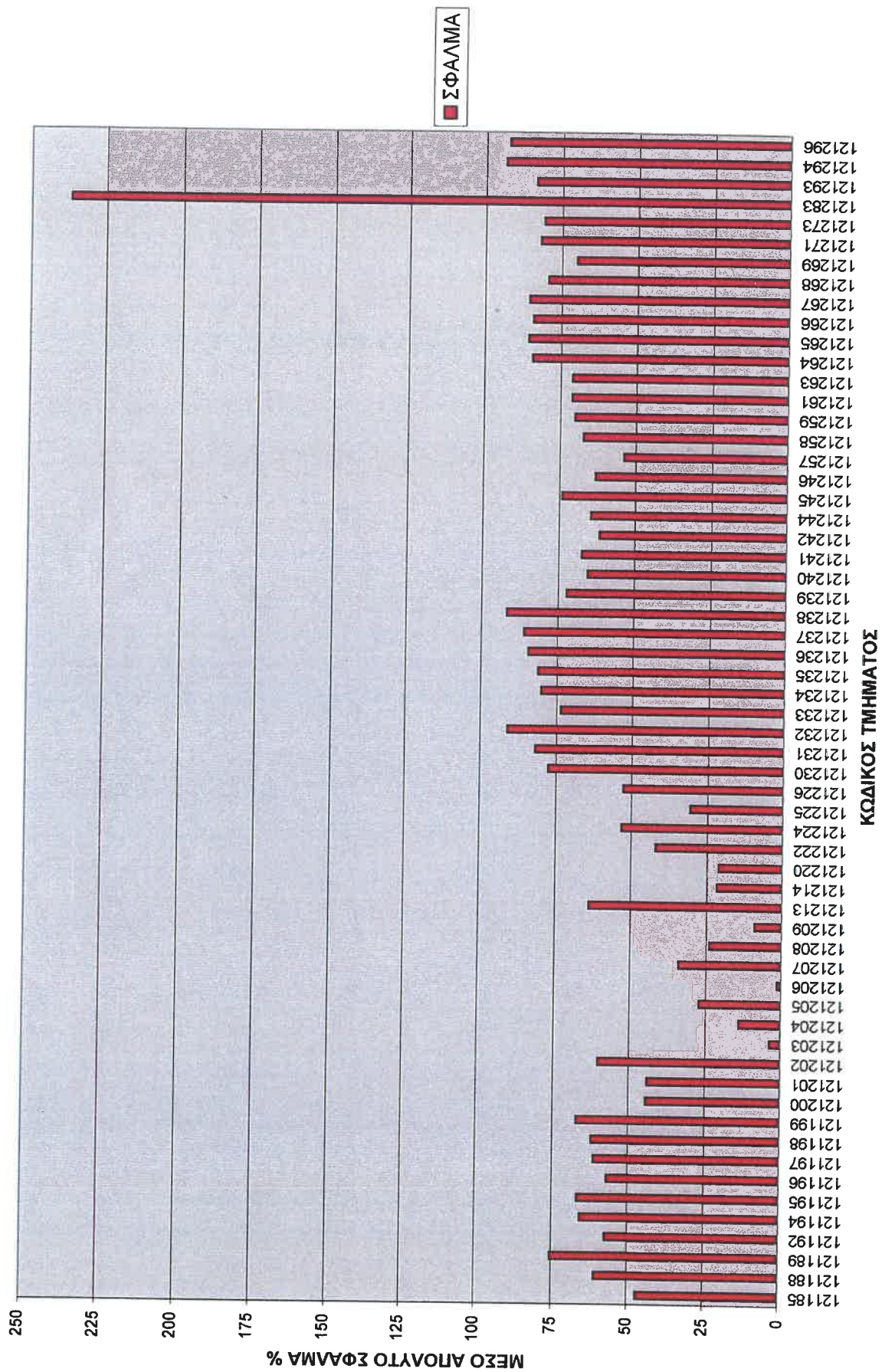
Γράφημα 5: Σύγκριση προβλεπόμενων - πραγματικών διελεύσεων αξονικών φορτίων για τη χώρα 12 (μέρος β) (εύκαμπτα οδοστρώματα).



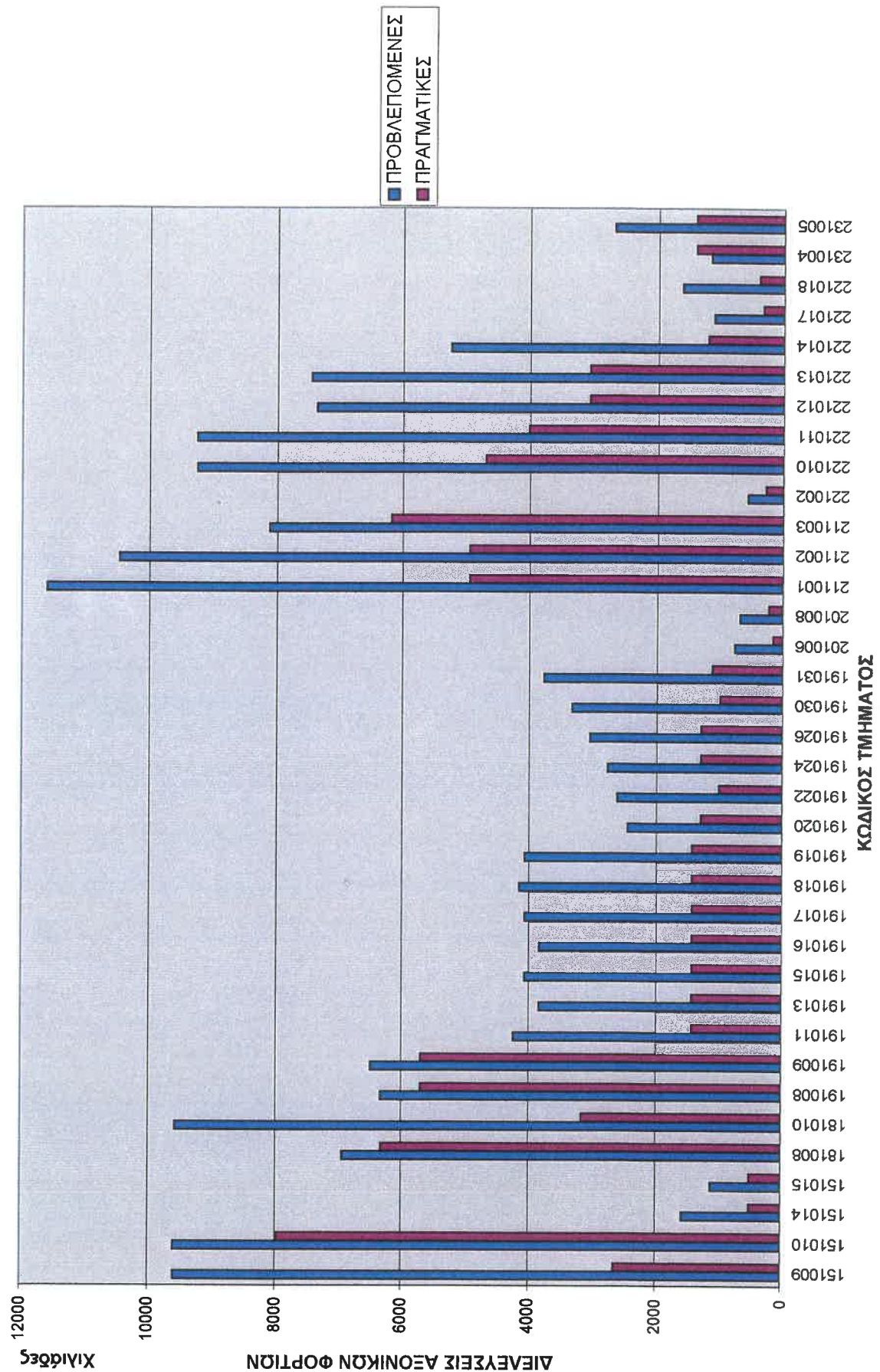
Γράφημα 6: Μέσο απόλυτο σφάλμα % για τη χώρα 12 (μέρος β) (εύκαμπτα οδοστρώματα).



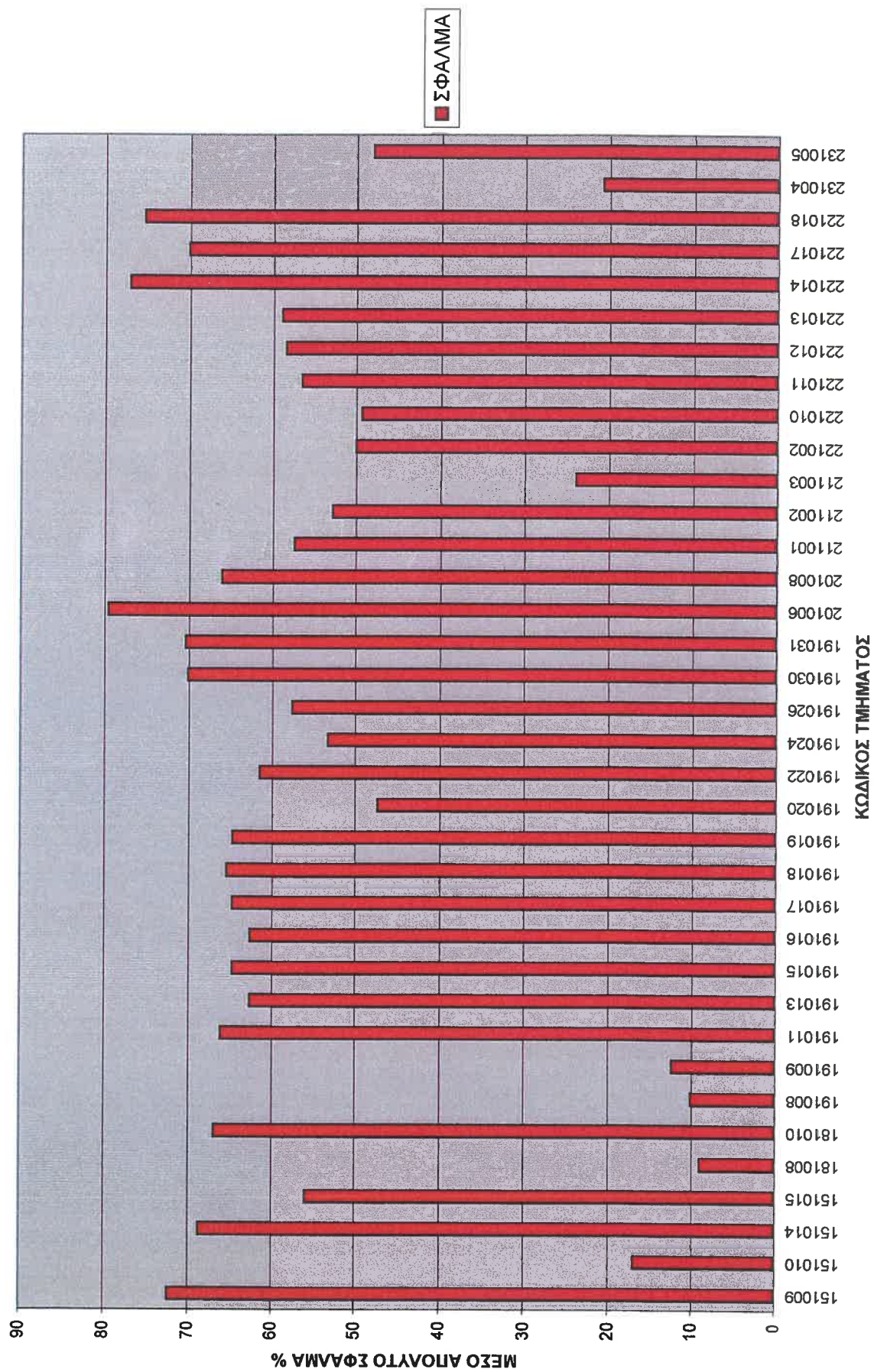
Γράφημα 7: Σύγκριση προβλεπόμενων - πραγματικών διελεύσεων αξονικών φορτίων για τη χώρα 12 (μέρος γ) (εύκαμπτα οδοστρώματα).



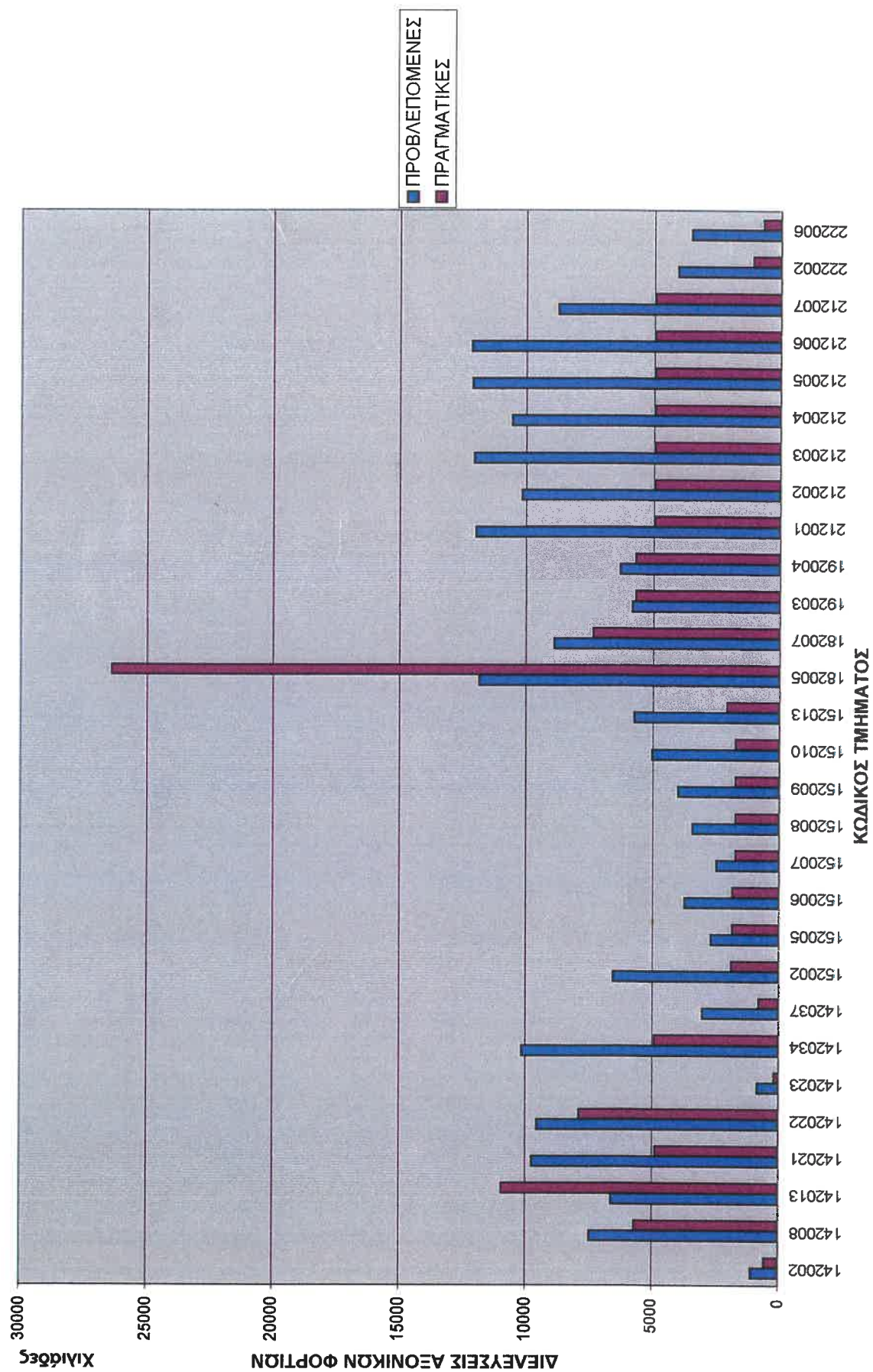
Γράφημα 8: Μέσο απόλυτο σφάλμα % για τη χώρα 12 (μέρος γ) (εύκαμπτα οδοστρώματα).



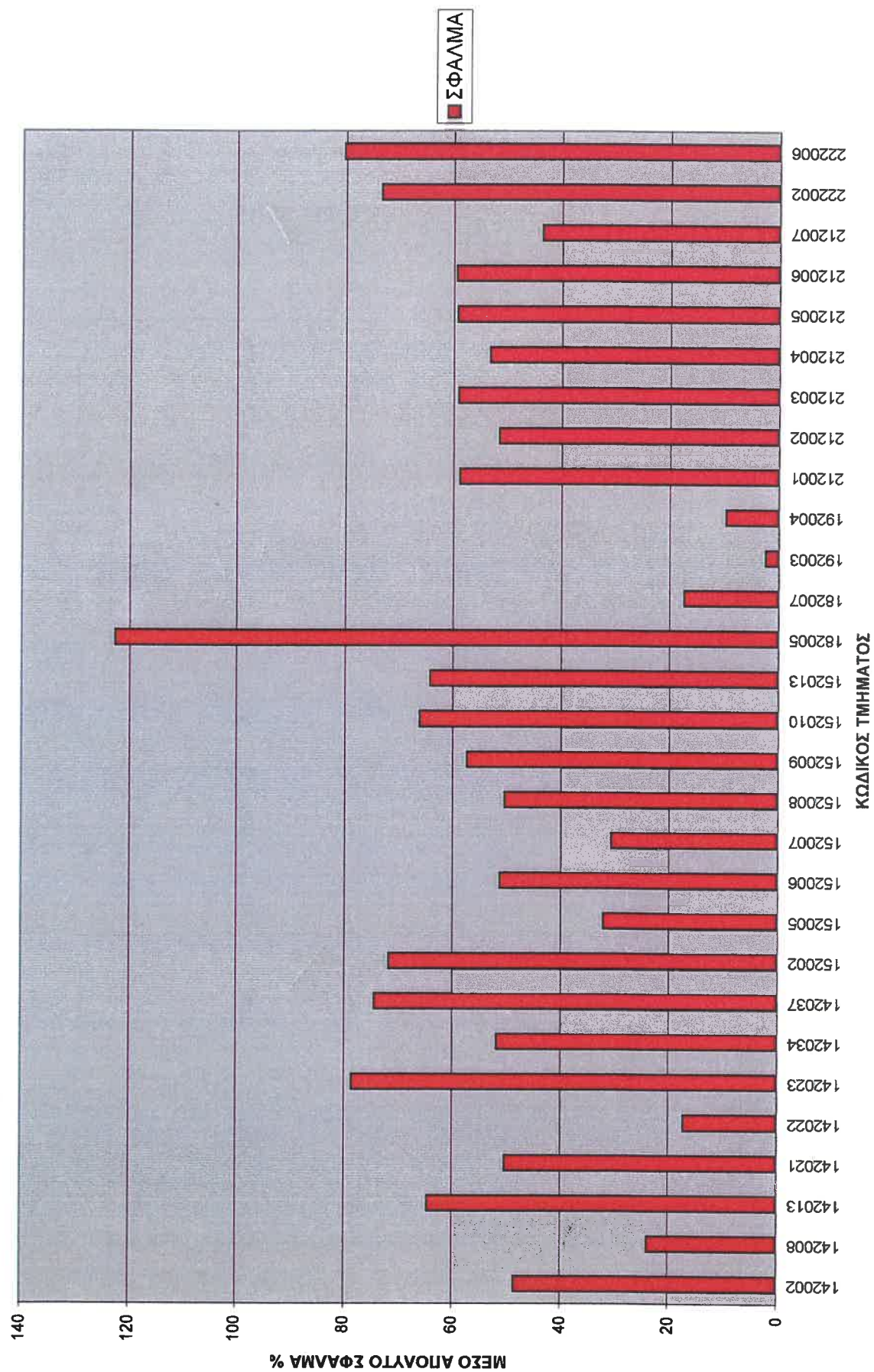
Γράφημα 9: Σύγκριση προβλεπόμενων - πραγματικών διελεύσεων αξονικών φορτίων για τις χώρες 15, 18, 19, 20, 21, 22 και 23 (εύκαμπτα οδοστρώματα).



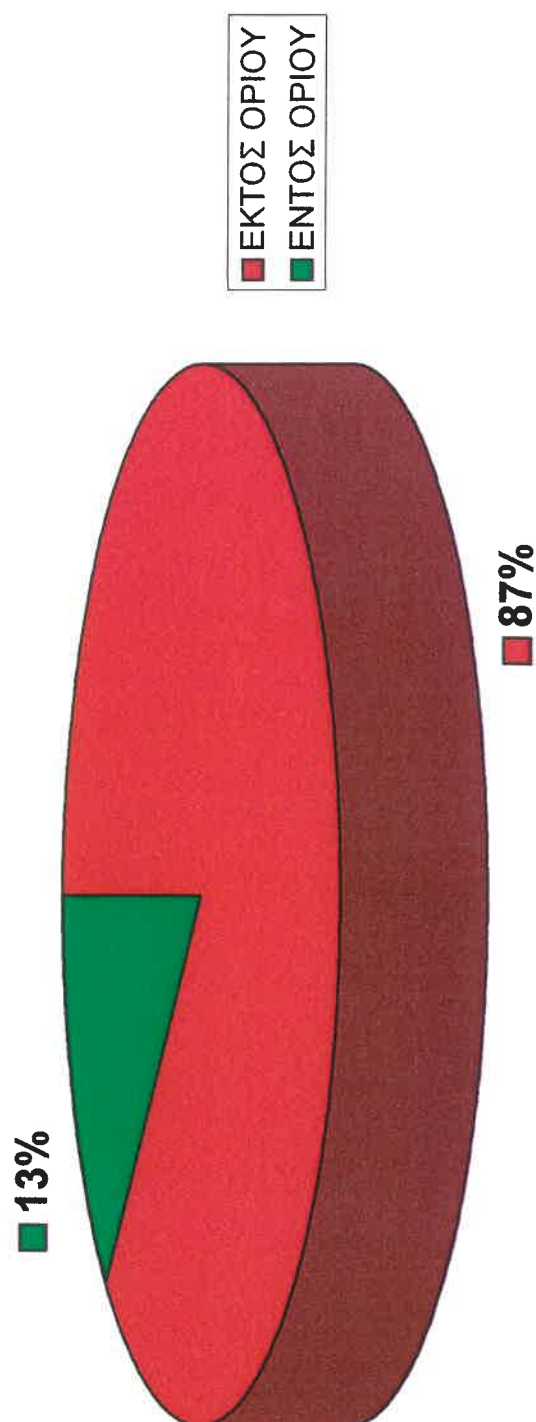
Γράφημα 10: Μέσο απόλυτο σφάλμα % για τις χώρες 15, 18, 19, 20, 21, 22 και 23 (εύκαμπτα οδοστρώματα).



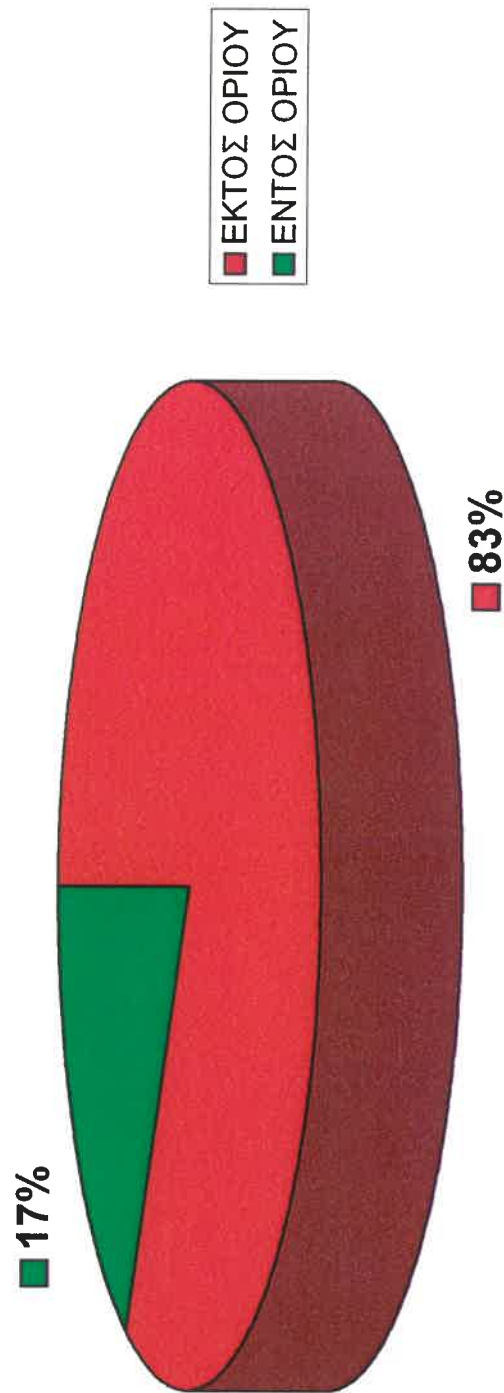
Γράφημα 11: Σύγκριση προβλεπόμενων - πραγματικών διελεύσεων αξονικών φορτίων για τις χώρες 14, 15, 18, 19, 21 και 22 (ημέρακαμπτα οδοστρώματα).



Γράφημα 12: Μέσο απόλυτο σφάλμα % για τις χώρες 14, 15, 18, 21 και 22 (ημιάκαμπα οδοστρώματα).



Γράφημα 13: Ποσοστά οδικών τμημάτων επί του συνόλου των τμημάτων που έχουν μέσο απόλυτο σφάλμα εντός και εκτός του ορίου 30% (εύκαμπτα οδοστρώματα).



Γράφημα 14: Ποσοστά οδικών τμημάτων επί του συνόλου των τμημάτων που έχουν μέσο απόλυτο σφάλμα εντός και εκτός του ορίου 30% (ημιάκαμπτα οδοστρώματα).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε, ώστε να πραγματοποιηθεί η στατιστική επεξεργασία της νέας βάσης δεδομένων, η δημιουργία της οποίας έγινε όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Σκοπός είναι να δημιουργηθούν νέα πρότυπα που να προβλέπουν με σχετική ακρίβεια πότε γίνεται έναρξη ρηγματώσεως (initiation of cracking). Για τη στατιστική ανάλυση των στοιχείων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, Version 11.5).

Η επεξεργασία των στοιχείων με το SPSS βασίζεται σε ένα αρχείο δεδομένων (data file), το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι η νέα βάση δεδομένων, στην τελική της μορφή. Στη συνέχεια γίνεται η στατιστική ανάλυση των στοιχείων. Τέλος, βάσει του αρχείου δεδομένων, εξάγονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε μορφή αρχείου αποτελεσμάτων (output).

5.2 Στατιστική επεξεργασία

5.2.1 Συσχέτιση μεταβλητών (Variable Correlation)

Αρχικά θα ήταν χρήσιμο να δοθεί το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στη συσχέτιση μεταβλητών (Variable Correlation). Από τη θεωρία των πιθανοτήτων είναι γνωστό ότι ο συντελεστής συσχέτισης ρ μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών X και Y εκφράζει τον βαθμό στον οποίο μπορούμε να προβλέψουμε την τιμή μιας τυχαίας μεταβλητής όταν

γνωρίζουμε την τιμή της άλλης. Έτσι, όταν $\rho = 0$ η τιμή της τυχαίας μεταβλητής X δεν υποβοηθάει καθόλου στην πρόβλεψη της Y , ενώ αντίθετα όταν $|\rho| = 1$ γνωρίζοντας την τιμή τυχαίας μεταβλητής X γνωρίζουμε με βεβαιότητα και την τιμή της Y (Κοκολάκης Γ. και Σπηλιώτης Ι., 1991).

Όταν ο συντελεστής συσχέτισης ρ είναι άγνωστος, όπως συνήθως συμβαίνει στην πράξη, θα πρέπει να εκτιμηθεί ο δειγματικός (γραμμικός) συντελεστής συσχέτισης r από ζεύγη παρατηρήσεων (x_i, y_i) όπου $i=1, \dots, n$. Από την ανισότητα Cauchy-Schwarz αποδεικνύεται, όπως και για το ρ , ότι $-1 \leq r \leq 1$ και ιδιαίτερα ότι οι ακραίες τιμές ± 1 προκύπτουν όταν και μόνο όταν τα σημεία (x_i, y_i) όπου $i=1, \dots, n$ βρίσκονται πάνω σε ευθεία γραμμή.

Το διάγραμμα διασποράς, δηλαδή η παρουσίαση των σημείων (x_i, y_i) όπου $i=1, \dots, n$ σε ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων υποβοηθάει στη διερεύνηση της ύπαρξης ή όχι γραμμικής εξάρτησης μεταξύ των μεταβλητών X και Y . Όταν ο συντελεστής συσχέτισης r έχει τιμή κοντά στο 1, υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών και η κλίση της ευθείας είναι θετική ενώ, όταν έχει τιμή κοντά στο -1, υπάρχει και πάλι μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών, αλλά η κλίση της ευθείας είναι αρνητική. Όταν έχει τιμή κοντά στο 0 δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών (Κοκολάκης Γ. και Σπηλιώτης Ι., 1991).

Στη νέα βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε, μερικές από τις μεταβλητές είναι διακριτές, άρα δεν μπορεί να γίνει λόγος για γραμμική αναλογία. Η συσχέτιση υπολογίζεται με τη βοήθεια του **συντελεστή συσχέτισης Spearman** (Spearman Rank Coefficient) και χρησιμοποιείται για μεταβλητές με τιμές κατάταξης και όχι καθαρά αριθμητικές. Επίσης, για την εύρεση του συντελεστή συσχέτισης Spearman δεν απαιτείται η κανονικότητα στην κατανομή των μεταβλητών. Ο τύπος υπολογισμού του είναι ο εξής:

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \text{SUM}(D^2)}{n(n^2 - 1)}$$

όπου D είναι η διαφορά κατάταξης στα ζεύγη των συγκρινόμενων μεταβλητών (difference in rank of pairs X and Y) (Πηγή 1 από το διαδίκτυο).

Οι συντελεστές συσχέτισης υποδεικνύουν τη σχέση που μπορεί να υπάρχει ανάμεσα σε δύο διαφορετικές μεταβλητές και δίνουν μια αίσθηση αναλογίας ή ανεξαρτησίας ανάμεσα στα μεγέθη που εξετάζονται. Το θετικό πρόσημο έχει την έννοια της θετικής συσχέτισης, δηλαδή αυξανόμενου του ενός μεγέθους αυξάνεται και το άλλο. Το αντίθετο συμβαίνει με την ένδειξη του αρνητικού προσήμου, το οποίο περιγράφει μια σχέση αντιστρόφως ανάλογη. Για μεγάλα δείγματα ($n > 30$) σημαντικοί θεωρούνται οι συντελεστές συσχέτισης όταν $r_s > 0.60$, οπότε είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί στη στατιστική επεξεργασία μια εκ των δύο συσχετισμένων μεταβλητών (Πηγή 1 από το διαδίκτυο). Παρόλα αυτά, στη δική μας ανάλυση θεωρήσαμε ότι υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών όταν $r_s > 0.7$.

Με το στατιστικό πρόγραμμα SPSS εξετάστηκε η συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών της βάσης δεδομένων. Τα αποτελέσματα της παραπάνω μεθόδου παρατίθενται αναλυτικά στο τεύχος 2 (παράρτημα Β) και δείχνουν την ύπαρξη σημαντικής συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών που φαίνονται στον πίνακα 5.1.

ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ r_s		ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ r_s
	C_DAY	FREEZ		L%TRU
T_DAY	-0,903	-0,836	D%TRU	0,944
	T_DAY	FREEZ		DVEH
C_DAY	-0,903	0,779	LVEH	0,996
	T_DAY	C_DAY		D%TRU
FREEZ	-0,836	0,779	L%TRU	0,994
	SCI₃₀₀			TH_BIT
TH_BIT	-0,768		SCI₃₀₀	-0,768
	LVEH			
DVEH	0,996			

Πίνακας 5.1: Συντελεστής συσχέτισης ανάμεσα στις ανεξάρτητες μεταβλητές για εύκαμπτα οδοστρώματα.

Για την περίπτωση των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων, παρόλο που πραγματοποιήθηκε έλεγχος συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών της βάσης δεδομένων, η λογιστική παλινδρόμηση που ακολούθησε δεν έδωσε στατιστικώς σημαντικά αποτελέσματα, πράγμα που οφείλεται στον μικρό αριθμό των οδικών τμημάτων της βάσης δεδομένων. Επομένως, καμία περαιτέρω ανάλυση δεν ακολουθεί για ό,τι σχετίζεται με ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

5.2.2 Λογιστική παλινδρόμηση (Logistic Regression)

Οι μέθοδοι παλινδρόμησης αποτελούν μέρος οποιασδήποτε στατιστικής ανάλυσης δεδομένων που αφορά στην περιγραφή μιας εξαρτημένης μεταβλητής συναρτήσει μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου παλινδρόμησης καθορίζεται από το είδος της εξαρτημένης μεταβλητής. Στην πλειοψηφία των μεθόδων παλινδρόμησης που χρησιμοποιούνται συνήθως, γίνεται η υπόθεση ότι η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχής. Στην περίπτωση που η εξαρτημένη μεταβλητή είναι διακριτή, δεν εφαρμόζονται οι συνήθεις μέθοδοι παλινδρόμησης, αλλά αναζητούνται πρότυπα διακριτής επιλογής (Mendehall W. and Sincich T., 1996).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για τη στατιστική επεξεργασία της βάσης δεδομένων επιλέχθηκε η μέθοδος της Λογιστικής Παλινδρόμησης όπως αυτή εφαρμόζεται στο στατιστικό πρόγραμμα SPSS. Η Λογιστική Παλινδρόμηση είναι μια τεχνική ανάλυσης προβλημάτων όπου μία ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές καθορίζουν το αποτέλεσμα, το οποίο έχει μόνο δύο πιθανά εναλλακτικά ενδεχόμενα: (1), (0). Εκείνο που προκύπτει από τη Λογιστική Παλινδρόμηση δεν είναι μια ακριβής αριθμητική τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής, αλλά η πιθανότητα το ενδεχόμενο που εξάγεται να δηλώνει το ένα γεγονός ή το εναλλακτικό του. Επομένως, απαιτείται η κατηγοριοποίηση των εξαρτημένων μεταβλητών σε ζεύγη τιμών (0, 1) (Πηγή 3 από το διαδίκτυο).

Στη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης η εξαρτημένη μεταβλητή y εκφράζεται από το φυσικό λογάριθμο του λόγου της πιθανότητας P_i να συμβεί το ένα γεγονός προς την πιθανότητα $(1-P_i)$ να συμβεί το εναλλακτικό του και μαθηματικά αποδίδεται από τον εξής τύπο:

$$y = \log\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = a + b_i \cdot x_i$$

όπου a σταθερά (constant) και b_i οι συντελεστές (coefficient estimate) των ανεξάρτητων μεταβλητών x_i , όπου $i=1, \dots, n$ το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών. Επισημαίνεται ότι ενώ η πιθανότητα P παίρνει τιμές από 0 έως 1, ο φυσικός λογάριθμος $\log(P/(1-P))$ κυμαίνεται μεταξύ μείον άπειρο και συν άπειρο (Πηγή 4 από το διαδίκτυο).

Με απλό μετασχηματισμό της παραπάνω σχέσης, προκύπτει:

$$\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = e^{a+b_i \cdot x_i} = e^a \cdot e^{b_i \cdot x_i}$$

Όταν η τιμή μιας ανεξάρτητης μεταβλητής x_i αυξάνεται κατά μια μονάδα, ενώ όλες οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές, τότε ο νέος λόγος πιθανοτήτων $[P_i/(1-P_i)]^*$ προκύπτει ως εξής:

$$\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)^* = e^a \cdot e^{b_i \cdot (x_i+1)} = e^a \cdot e^{b_i \cdot x_i} \cdot e^{b_i} = \left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) \cdot e^{b_i}$$

Δηλαδή όταν η τιμή μιας ανεξάρτητης μεταβλητής x_i αυξάνεται κατά μια μονάδα ενώ όλες οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές, ο λόγος των πιθανοτήτων $P_i/(1-P_i)$ πολλαπλασιάζεται με τον όρο e^{b_i} ή $\exp(b_i)$. Ο παράγοντας e^{b_i} ονομάζεται λόγος πιθανοτήτων (odds ratio, OR) και λαμβάνει τιμές από μηδέν έως άπειρο.

Με τη θεώρηση ότι P_i είναι η πιθανότητα να συμβεί το γεγονός (1), ενώ $1-P_i$ είναι η πιθανότητα να συμβεί το γεγονός (0), από τη σχέση:

$$\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)^* = \left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) \cdot e^{b_i}$$

προκύπτει ότι όταν το OR είναι μεγαλύτερο της μονάδας, είναι περισσότερο πιθανό να συμβεί το γεγονός (1), ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι περισσότερο πιθανό να συμβεί το γεγονός (0).

Για την εφαρμογή της λογιστικής παλινδρόμησης στα στοιχεία της νέας βάσης δεδομένων, επελέγη ως εξαρτημένη μεταβλητή η ρηγματώση (cracking), αλλά με τη μορφή κατηγοριοποιημένης μεταβλητής σε ζεύγος τιμών (0,1). Η κατηγοριοποίηση αφορούσε στην εμφάνιση ή όχι ρηγματώσεων στα υπό μελέτη τμήματα, δηλαδή η εξαρτημένη μεταβλητή έπαιρνε την τιμή 1 όταν πραγματοποιείτο έναρξη ρηγματώσεων και την τιμή 0 όταν τα τμήματα δεν εμφάνιζαν καθόλου ρηγματώσεις στην επιφάνεια. Επομένως, εκείνο που θα υπολογίζει το πρότυπο θα είναι η πιθανότητα να εμφανίζονται στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ρηγματώσεις, οι οποίες θα έχουν ικανό μήκος, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται έναρξη του φαινομένου.

5.3 Αποτελέσματα από την στατιστική επεξεργασία

5.3.1 Εισαγωγή

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της στατιστικής επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Λογιστικής Παλινδρόμησης, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2.2. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με τη μορφή πινάκων στους οποίους εμφανίζονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές όπως επίσης και ο συντελεστής επίδρασης (coefficient estimate b) της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη, το επιτυγχανόμενο επίπεδο σημαντικότητας (p -value) και ο παράγοντας $\exp(b)$. Η p -τιμή ενός ελέγχου (p -value) είναι η οριακή τιμή του επιπέδου σημαντικότητας α για την οποία κρίνεται απορριπτέα η μηδενική υπόθεση H_0 . Αν $p < \alpha$, η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται

και το αποτέλεσμα του ελέγχου κρίνεται σημαντικό. Η τιμή του μεγέθους p-value είναι ιδιαίτερα χρήσιμη διότι συμβάλλει στο να εξαχθούν συμπεράσματα για το αν η επιρροή των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη μεταβλητή είναι στατιστικώς σημαντική ή όχι. Στις περιπτώσεις που εξετάζονται στις επόμενες παραγράφους λαμβάνεται τιμή του επιπέδου σημαντικότητας $\alpha=0.10$. Σημειώνεται ότι από το σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών που εξετάζονται γίνονται αποδεκτές εκείνες που ανήκουν σε επίπεδο εμπιστοσύνης $(1-\alpha)\% = 90\%$.

5.3.2 Αποτελέσματα λογιστικής παλινδρόμησης

Μετά την εφαρμογή της μεθόδου της λογιστικής παλινδρόμησης δημιουργήθηκαν αρχικά τρία πρότυπα καθένα από τα οποία περιείχε το μεγαλύτερο δυνατό αριθμό ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν όλες στην πρώτη δύναμη και χωρίς να πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους. Στα πρότυπα που δημιουργήθηκαν έγινε ανάλυση και διαπιστώθηκε ότι, τα αποτελέσματα που έδιναν δεν συμφωνούσαν με όσα είναι γνωστά για τις παραμέτρους που επηρεάζουν την αντοχή ενός οδοστρώματος. Έτσι, τα πρότυπα αυτά απορρίφθηκαν και η διαδικασία έγινε πάλι από την αρχή. Τη δεύτερη φορά χρησιμοποιήθηκαν ανεξάρτητες μεταβλητές τόσο στην πρώτη δύναμη όσο και στο τετράγωνο καθώς και γινόμενα δύο μεταβλητών μεταξύ τους. Σκοπός ήταν η βελτιστοποίηση των προτύπων. Έτσι δημιουργήθηκαν πέντε διαφορετικά πρότυπα, τα οποία εμφανίζονται στους πίνακες 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 και 5.6 (αναλυτική παρουσίαση των προτύπων υπάρχει στο τεύχος 2, παράρτημα Γ). Εκεί παρουσιάζονται μόνον οι ανεξάρτητες μεταβλητές που ήταν στατιστικώς σημαντικές, δηλαδή είχαν p-value μικρότερο από το επίπεδο σημαντικότητας α , που ορίστηκε εξ αρχής ίσο με 0.10.

ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	Ρηγμάτωση (Cracking)		
ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	Συντελεστής (coefficient estimate b)	Λόγος Πιθανότητας (odd ratio exp(b))	Κριτήριο p (p-value)
Σταθερά	2.7299	15.3318	0.0001
Αριθμός ψυχρών ημερών (C_DAY)	-0.0051	0.9949	0.0792
Μέση ετήσια βροχόπτωση (RAIN)	0.0026	1.0027	0.0001
Αριθμός αξόνων ανά έτος (ESALY)	$7.43 \cdot 10^{-7}$	1.0001	0.0330
Ηλικία οδοστρώματος (PAV AGE)	0.1086	1.1030	0.0016
Δείκτης Επιφανειακής Καμπυλότητας (SCI ₃₀₀)	0.0053	1.0053	0.0135

Πίνακας 5.2: 1^ο πρότυπο έναρξης ρηγματώσεων.

ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	Ρηγμάτωση (Cracking)		
ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	Συντελεστής (coefficient estimate b)	Λόγος Πιθανότητας (odd ratio exp(b))	Κριτήριο p (p-value)
Σταθερά	5.4768	239.0996	$2.63 \cdot 10^{-8}$
Μέση ετήσια βροχόπτωση (RAIN)	0.0037	1.0038	$9.6 \cdot 10^{-7}$
Δείκτης Παγετού (FREEZ)	$6.8 \cdot 10^{-5}$	1.0001	0.0024
{Αριθμός αξόνων ανά έτος (ESALY)}* {Δείκτης Επιφανειακής Καμπυλότητας (SCI ₃₀₀)}	$8.1 \cdot 10^{-8}$	1.0001	$6.3 \cdot 10^{-7}$
Ηλικία οδοστρώματος (PAV AGE)	0.1413	1.1319	0.0003
Ποσοστό φορτηγών ανά κατεύθυνση (D%TRU)	0.1002	1.0955	0.2457
{Ποσοστό φορτηγών ανά κατεύθυνση (D%TRU)} ²	-0.0063	0.9937	0.0114

Πίνακας 5.3: 2^ο πρότυπο έναρξης ρηγματώσεων.

ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	Ρηγμάτωση (Cracking)		
ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	Συντελεστής (coefficient estimate b)	Λόγος Πιθανότητας (odd ratio exp(b))	Κριτήριο p (p-value)
Σταθερά	2.8952	18.088	$1.6 \cdot 10^{-5}$
Πάχος ασφαλικής στρώσης (TH_BIT)	-0.0046	0.9954	0.3079
{Πάχος ασφαλικής στρώσης (TH_BIT)} ²	$1.6 \cdot 10^{-5}$	1.0001	0.1355
Μέση ετήσια βροχόπτωση (RAIN)	0.0028	1.0029	$2.9 \cdot 10^{-5}$
Ηλικία οδοστρώματος (PAV AGE)	0.1227	1.1156	0.0002
Ποσοστό φορτηγών (L%TRU)	0.0324	1.0320	0.1453
{Ποσοστό φορτηγών (L%TRU)} ²	-0.0003	0.9997	0.1478

Πίνακας 5.4: 3^ο πρότυπο έναρξης ρηγματώσεων.

ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	Ρηγμάτωση (Cracking)		
ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	Συντελεστής (coefficient estimate b)	Λόγος Πιθανότητας (odd ratio exp(b))	Κριτήριο p (p-value)
Σταθερά	2.2219	9.2255	0.0002
Πάχος ασφαλικής στρώσης (TH_BIT)	-0.0041	0.9959	0.3290
{Πάχος ασφαλικής στρώσης (TH_BIT)} ²	$1.4 \cdot 10^{-5}$	1.0001	0.1395
Μέση ετήσια βροχόπτωση (RAIN)	0.0025	1.0026	0.0001
Ηλικία οδοστρώματος (PAV AGE)	0.1126	1.1066	0.0005

Πίνακας 5.5: 4^ο πρότυπο έναρξης ρηγματώσεων.

ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	Ρηγμάτωση (Cracking)		
ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	Συντελεστής (coefficient estimate b)	Λόγος Πιθανότητας (odd ratio exp(b))	Κριτήριο p (p-value)
Σταθερά	0.3137	1.3685	0.4795
Πάχος βάσης (TH_GRA)	-0.0027	0.9973	0.1282
{Πάχος βάσης (TH_GRA)} ²	5.4*10 ⁻⁶	1.0001	0.0358
Αριθμός ψυχρών ημερών (C_DAY)	-0.0048	0.9952	0.0462
Ηλικία οδοστρώματος (PAV AGE)	0.1069	1.1015	0.0012
Ποσοστό φορτηγών (L%TRU)	0.0176	1.0175	0.0188

Πίνακας 5.6: 5^ο πρότυπο έναρξης ρηγματώσεων.

5.3.3 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

5.3.3.1 Εισαγωγή

Μετά την επεξεργασία προέκυψαν πέντε διαφορετικά πρότυπα. Σε καθ' ένα από αυτά υπεισέρχονται διάφορες ανεξάρτητες μεταβλητές, δίνοντας στο μελετητή/διαχειριστή του οδικού τμήματος την ευελιξία να επιλέγει κάθε φορά εκείνο το πρότυπο που «ταιριάζει» στα στοιχεία που διαθέτει ή πρόκειται να μετρήσει επιτόπου. Για παράδειγμα, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τις υποχωρήσεις (ώστε να προκύψει ο δείκτης SCI), ο μελετητής/διαχειριστής μπορεί να επιλέξει εκείνα τα πρότυπα που έχουν ως μεταβλητές πάχη στρώσεων. Παρακάτω ακολουθεί η επεξήγηση των πέντε προτύπων.

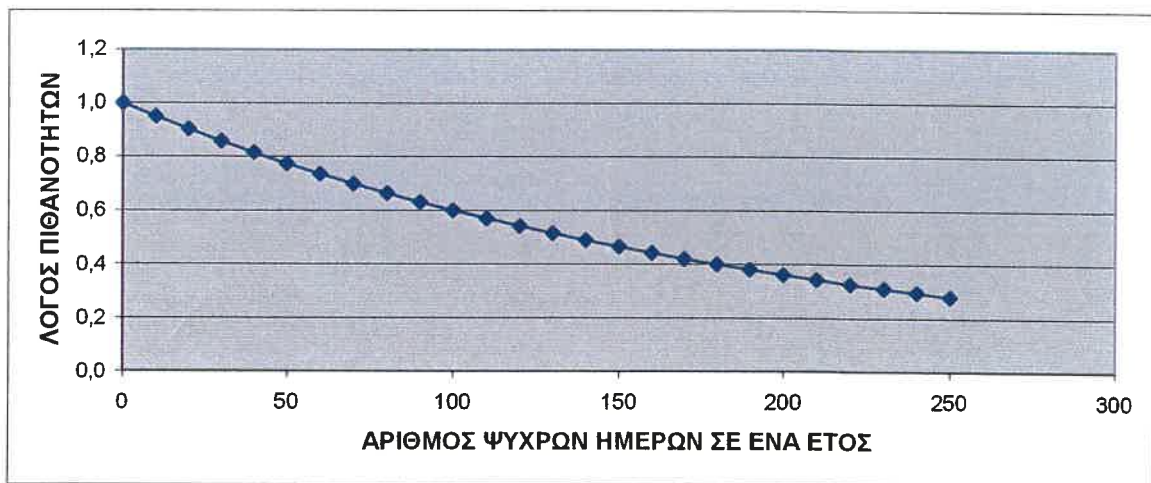
5.3.3.2 Επεξήγηση 1^{ου} προτύπου

Το 1^ο πρότυπο αποτελείται από πέντε ανεξάρτητες μεταβλητές οι οποίες είναι: Ο αριθμός ψυχρών ημερών ανά έτος, η μέση ετήσια βροχόπτωση, ο αριθμός αξονικών διελεύσεων ανά έτος, η ηλικία του οδοστρώματος και ο δείκτης επιφανειακής καμπυλότητας 300.

Η πρώτη ανεξάρτητη μεταβλητή είναι ο αριθμός ψυχρών ημερών ανά έτος που με βάση την τιμή $\exp(b)$ που προέκυψε, ισχύει:

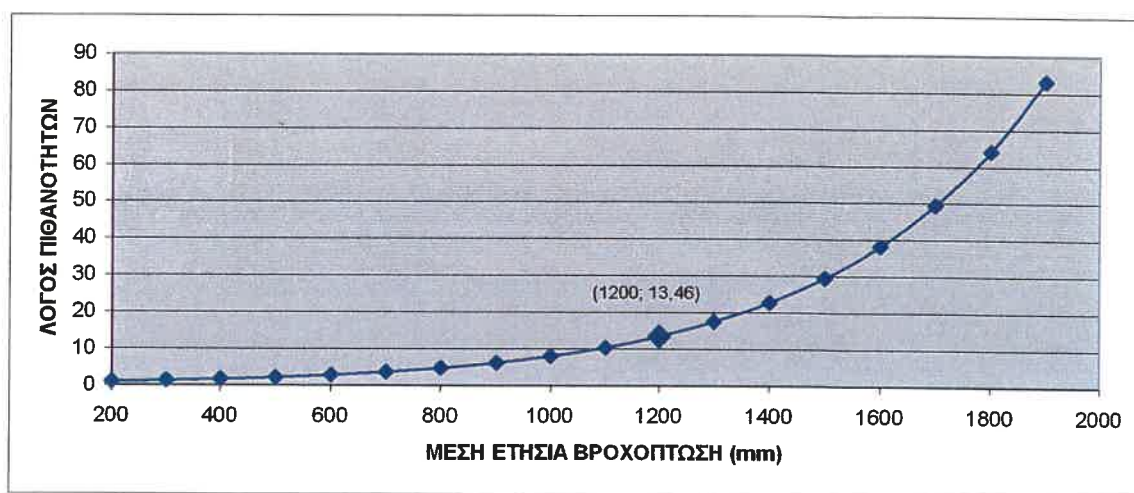
$$\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)^* = \left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) \cdot e^{b_i} = \left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) \cdot e^{-0.0051} = 0.995 \cdot \left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)$$

Δηλαδή αύξηση κατά μία ημέρα των ψυχρών ημερών ανά έτος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πιθανότητας να εμφανιστεί ρηγμάτωση στην επιφάνεια του οδοστρώματος κατά 0.5%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν ένα οδόστρωμα βρίσκεται σε περιοχή που επικρατεί θερμοκρασία υπό του μηδενός για πολλές ημέρες ανά έτος, αυτό γίνεται πιο δύσκαμπτο άρα αποκτά μεγαλύτερη αντοχή. Βέβαια, αυτό δε σημαίνει ότι σε χώρες με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες τα οδοστρώματα αστοχούν πολύ δυσκολότερα, καθώς υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες όπως ο πάγος ή το χιόνι που επιδρούν αρνητικά στην αντοχή των οδοστρωμάτων. Επίσης, από κάποιον αριθμό ψυχρών ημερών ανά έτος και πάνω το οδόστρωμα γίνεται πολύ ψαθυρό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ρωγμές στην επιφάνεια οι οποίες δεν είναι λόγω κόπωσης, αλλά λόγω της μεγάλης ψαθυρότητας.



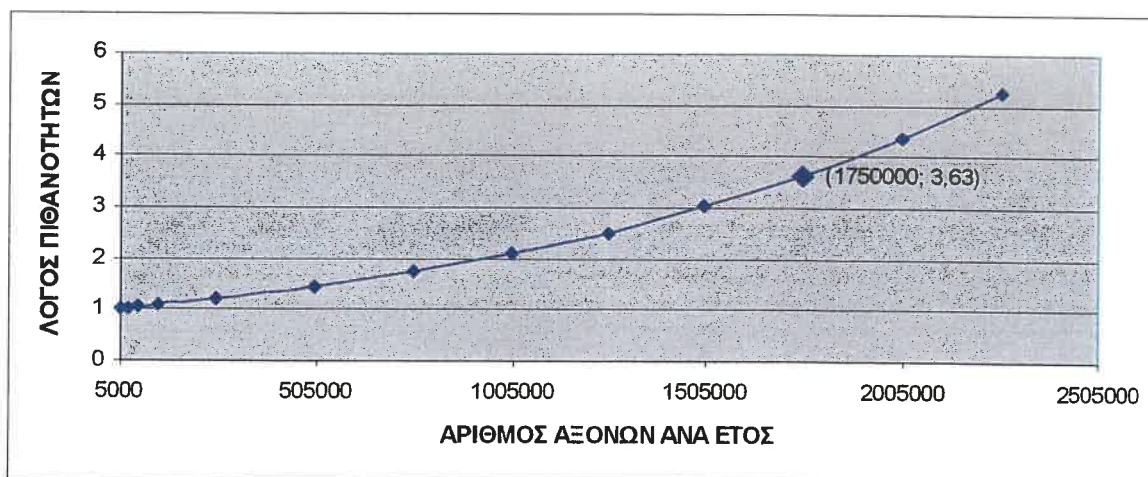
Σχήμα 5.1: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγμάτωσης ανάλογα με τον αριθμό των ψυχρών ημερών ανά έτος.

Η δεύτερη ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση που από τα αποτελέσματα αποδεικνύεται ότι έχει αρνητική επίδραση σε ό,τι αφορά στην αντοχή του οδοστρώματος. Η διάβρωση που προκαλείται από την διήθηση του βρόχινου νερού στις εσωτερικές στρώσεις καθιστά το οδόστρωμα πιο ευάλωτο στην αστοχία. Θεωρώντας ότι η τιμή της μονάδας για την μεταβλητή RAIN αντιστοιχεί σε 200 mm, υπολογίστηκε στο σχήμα 5.2 ο λόγος πιθανοτήτων για αύξηση αυτής. Έτσι, όπως φαίνεται σε αυτό, σε μία χώρα με μέση ετήσια βροχόπτωση 1200 mm υπάρχει 13.46 φορές μεγαλύτερη πιθανότητα να πραγματοποιηθεί έναρξη ρηγματώσεων σε σχέση με τη χώρα που έχει 200 mm μέση ετήσια βροχόπτωση.



Σχήμα 5.2: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγματώσεων ανάλογα με την μέση ετήσια βροχόπτωση.

Ο αριθμός αξόνων ανά έτος προφανώς αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων καθώς αποτελεί το βασικότερο παράγοντα αστοχίας οδοστρωμάτων λόγω κόπωσης. Για παράδειγμα, ένα τμήμα δρόμου με ετήσια κυκλοφορία 1.750.000 άξονες θα έχει 3.63 φορές μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανίσει ρωγμές από ένα τμήμα δρόμου με κυκλοφορία 5.000 άξονες. Εκ πρώτης όψεως, η διαφορά αυτή φαίνεται να είναι αρκετά μικρή σε σχέση με αυτό που αναμενόταν, αλλά μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι υπήρχε πολύ μεγάλη διασπορά τιμών στους αριθμούς αξόνων των τμημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση (από 5.000 έως 2.000.000).



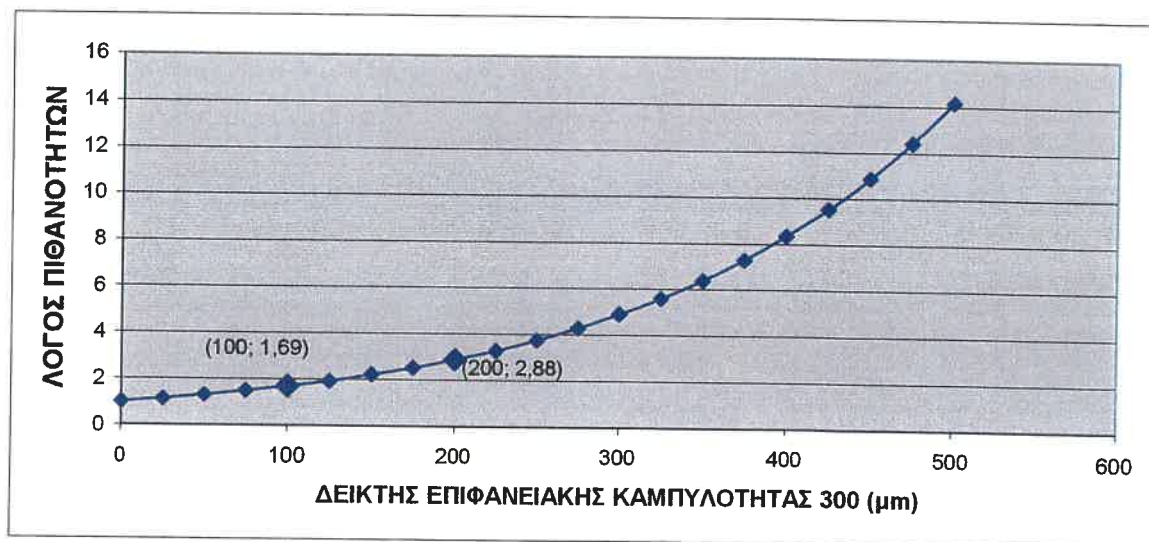
Σχήμα 5.3: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγματώσεως ανάλογα με τον αριθμό αξόνων ανά έτος.

Σε ό,τι αφορά στην ηλικία του οδοστρώματος, αυτή φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς αύξηση κατά ένα έτος αυξάνει την πιθανότητα έναρξης ρηγματώσεων κατά περίπου 10% ($\exp(b)=1.103$). Επιπλέον, απ' το σχήμα 5.4 ένα οδόστρωμα με ηλικία 15 ετών έχει 3 φορές ($e^{0.1086 \cdot 10} = 2,96$) μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανίσει τις πρώτες ρηγματώσεις στην επιφάνειά του σε σχέση με ένα άλλο οδόστρωμα που η ηλικία του είναι στα 5 έτη.



Σχήμα 5.4: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγματώσεως ανάλογα με την ηλικία οδοστρώματος.

Η αύξηση του δείκτη SCI_{300} , που εκφράζει την αντοχή της επιφανειακής στρώσης του οδοστρώματος, οδηγεί επίσης σε αύξηση της πιθανότητας για έναρξη ρηγματώσεων. Για παράδειγμα, ένα οδόστρωμα με δείκτη SCI_{300} ίσο με 200 έχει σχεδόν 2 φορές ($e^{0.0053 \cdot 100} = 1,7$) μεγαλύτερη πιθανότητα απ' ό,τι ένα οδόστρωμα με δείκτη SCI_{300} ίσο με 100.



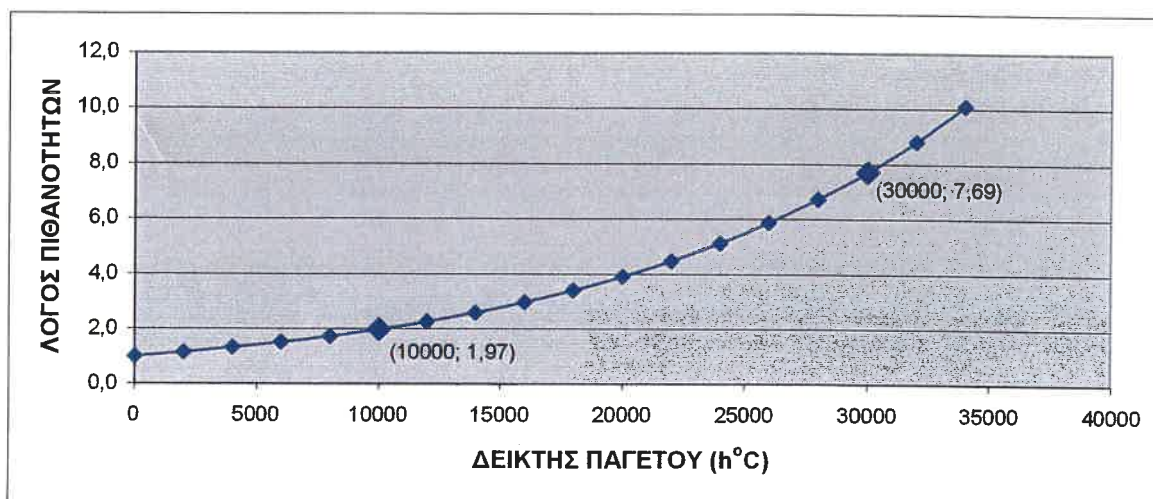
Σχήμα 5.5: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγματώσης ανάλογα με τον δείκτη επιφανειακής καμπυλότητας 300 (SCI_{300}).

5.3.3.3 Επεξήγηση 2^{ου} προτύπου

Το 2^ο πρότυπο αποτελείται από έξι ανεξάρτητες μεταβλητές οι οποίες είναι: Η μέση ετήσια βροχόπτωση, ο δείκτης παγετού, το γινόμενο του αριθμού των αξόνων ανά έτος επί το δείκτη επιφανειακής καμπυλότητας 300, η ηλικία του οδοστρώματος και το ποσοστό των φορτηγών ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος. Στη συνέχεια αναλύονται ξεχωριστά.

Ο Δείκτης παγετού φαίνεται από τον πίνακα 5.3 ότι αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων στο οδόστρωμα. Έτσι, ένα οδόστρωμα με Δείκτη παγετού $30000h^{\circ}C$ έχει περίπου τετραπλάσια πιθανότητα ($e^{0.000068 \cdot 20000} = 3.89$) να εμφανίσει ρηγματώσεις σε σχέση με κάποιο που έχει Δείκτη Παγετού $10000h^{\circ}C$. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού, όπως είναι γνωστό, ο παγετός επιδρά αρνητικά στην αντοχή της ασφαλικής στρώσης με

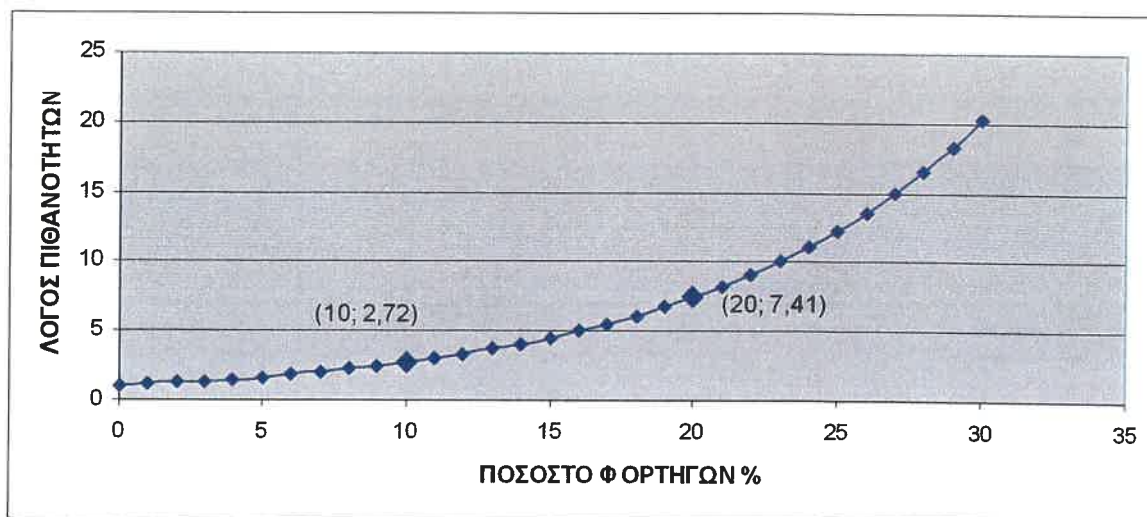
αποτέλεσμα, όσο αυξάνονται οι ώρες που επικρατεί παγετός μέσα σε ένα έτος, να αυξάνεται και η πιθανότητα να ρηγματωθεί το οδόστρωμα.



Σχήμα 5.6: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγμάτωσης ανάλογα με τον Δείκτη παγετού.

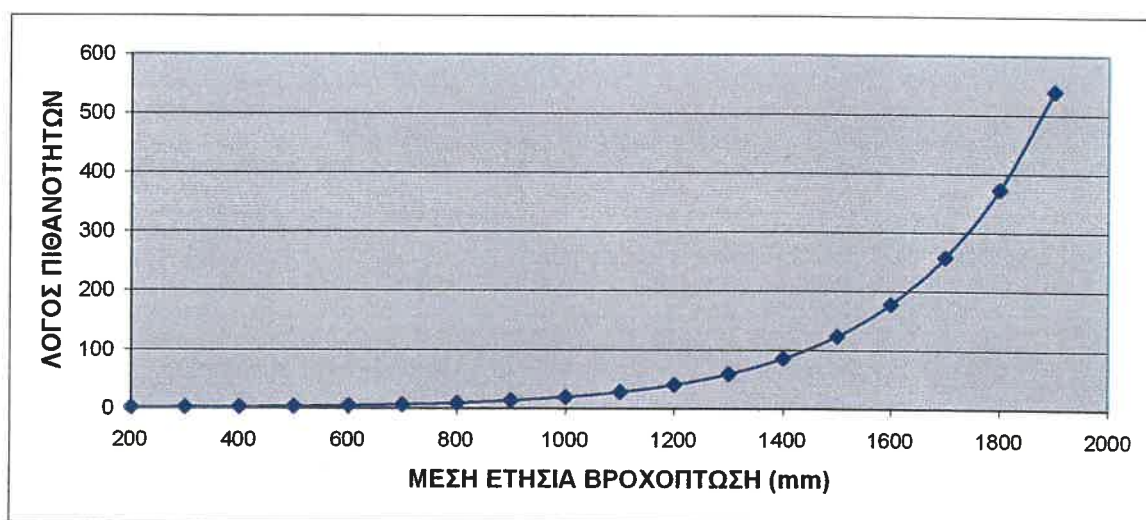
Το γινόμενο του αριθμού των αξόνων ανά έτος επί το δείκτη επιφανειακής καμπυλότητας 300 δημιουργήθηκε λόγω της αλληλεξάρτησης των δύο μεταβλητών. Εκεί που υπήρχε μεγάλος αριθμός αξόνων τα οδοστρώματα ήταν πιο δύσκαμπτα και συνεπώς εμφάνιζαν μικρό δείκτη επιφανειακής καμπυλότητας 300. Το αντίθετο ίσχυε σε τμήματα με μικρό αριθμό αξόνων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε τελικά το γινόμενο των δύο αυτών μεταβλητών και με τον τρόπο αυτό αυξήθηκε η συνολική ακρίβεια του προτύπου.

Το ποσοστό των φορτηγών ανά κατεύθυνση του υπό μελέτη τμήματος χρησιμοποιήθηκε στο πρότυπο τόσο στην πρώτη δύναμη όσο και στο τετράγωνο. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.7, αύξηση του ποσοστού των φορτηγών ανά κατεύθυνση οδηγεί σε αύξηση της πιθανότητας να ρηγματωθεί το οδόστρωμα. Αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό αφού τα βαρύτερα οχήματα προκαλούν μεγαλύτερες φορτίσεις στο οδόστρωμα με αποτέλεσμα την ταχύτερη αστοχία του. Συνεπώς, ένα τμήμα με 20% ποσοστό φορτηγών ανά κατεύθυνση έχει περίπου τριπλάσια πιθανότητα ($e^{0.1002 \cdot 10} = 2.72$) να εμφανίσει ρηγματώσεις σε σχέση με κάποιο που έχει 10% ποσοστό φορτηγών ανά κατεύθυνση.

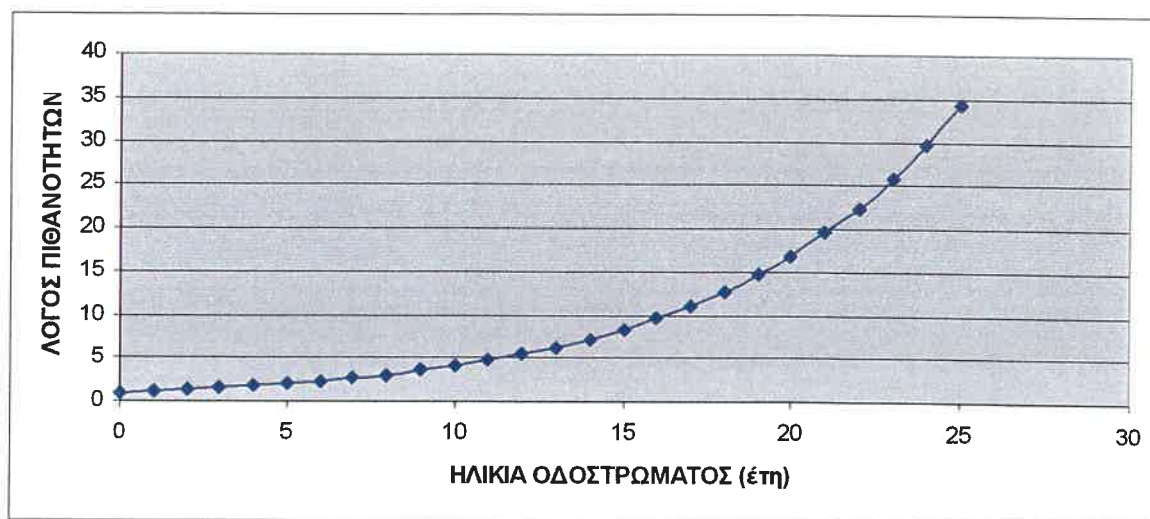


Σχήμα 5.7: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγμάτωσης ανάλογα με το ποσοστό % των φορτηγών ανά κατεύθυνση.

Όσον αφορά στη μέση ετήσια βροχόπτωση καθώς και στην ηλικία του οδοστρώματος, οι ανεξάρτητες αυτές μεταβλητές συμπεριφέρονται κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στο προηγούμενο πρότυπο. Το μόνο που αλλάζει είναι ο βαθμός επιρροής της κάθε μιας στην τελική πιθανότητα να εμφανιστεί ρηγμάτωση. Έτσι, στα σχήματα 5.8 και 5.9 παρουσιάζεται ο λόγος πιθανοτήτων για τις δύο αυτές μεταβλητές.



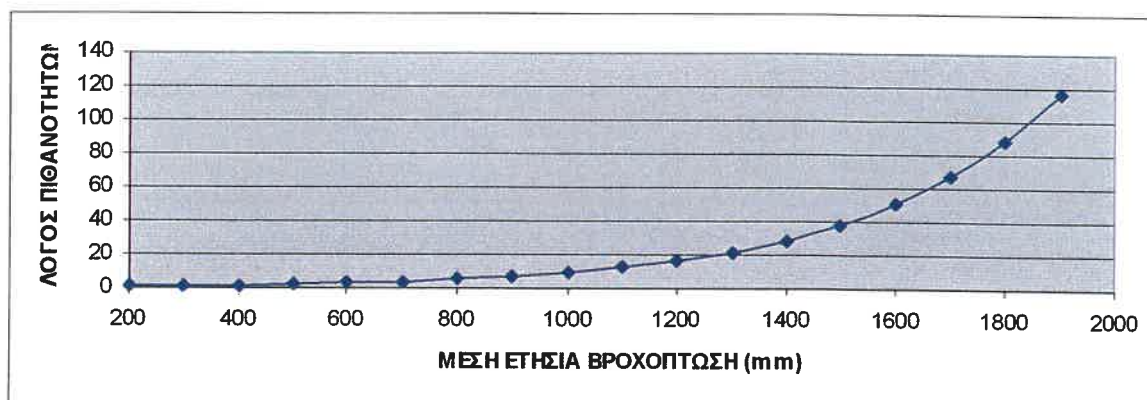
Σχήμα 5.8: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγμάτωσης ανάλογα με την μέση ετήσια βροχόπτωση.



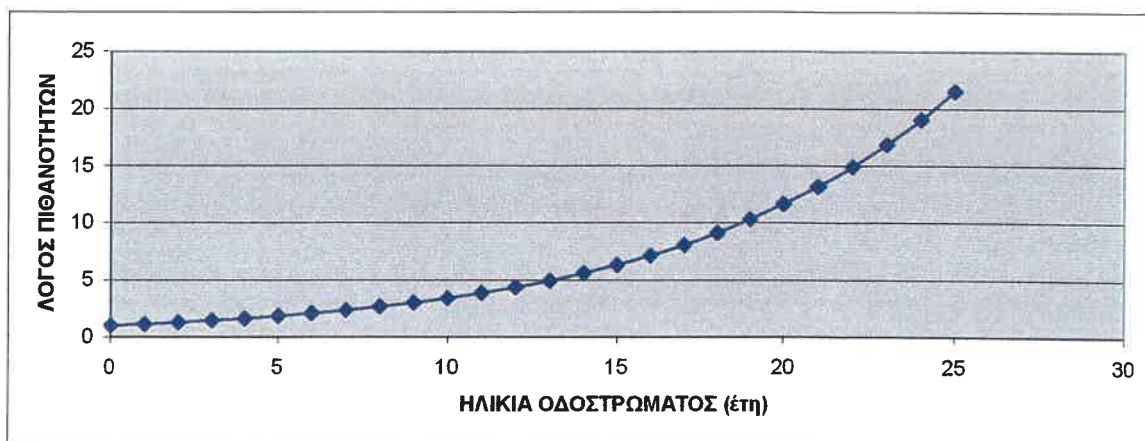
Σχήμα 5.9: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγμάτωσης ανάλογα με την ηλικία οδοστρώματος.

5.3.3.4 Επεξήγηση 3^{ου} προτύπου

Το 3^ο πρότυπο περιέχει ως μεταβλητή το πάχος της ασφαλτικής στρώσης. Οι υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές που υπεισέρχονται στο πρότυπο είναι το ποσοστό των φορτηγών στο υπό μελέτη τμήμα, η μέση ετήσια βροχόπτωση και η ηλικία του οδοστρώματος. Οι δύο τελευταίες μεταβλητές, εφόσον συμπεριφέρονται και σε αυτό το πρότυπο με παρόμοιο τρόπο όπως στα δύο προηγούμενα (ο βαθμός επίδρασης μόνο διαφοροποιείται), δεν απαιτούν περαιτέρω επεξήγηση, παρά μόνον παρατίθενται τα διαγράμματα του λόγου πιθανοτήτων στα σχήματα 5.10, και 5.11.

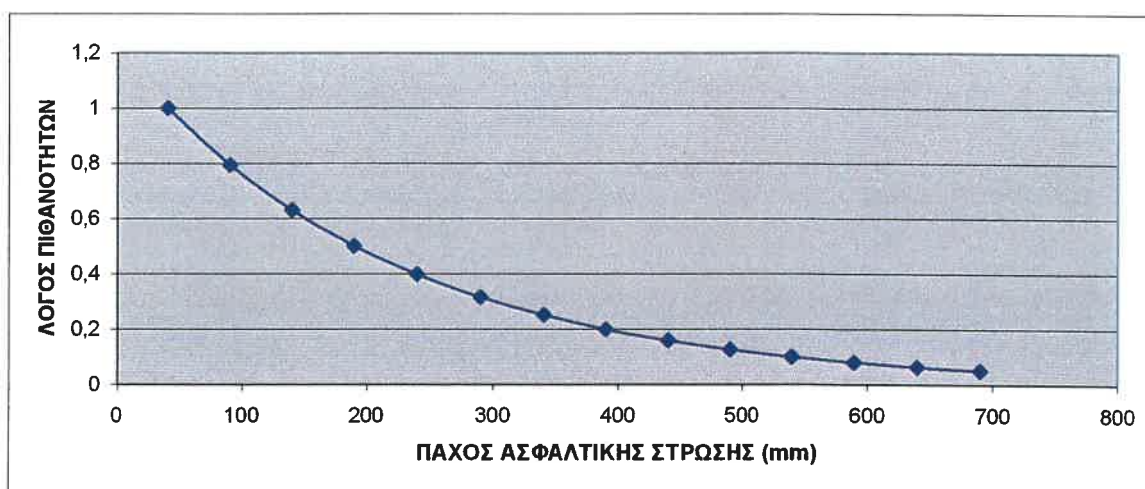


Σχήμα 5.10: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγμάτωσης ανάλογα με τη μέση ετήσια βροχόπτωση.



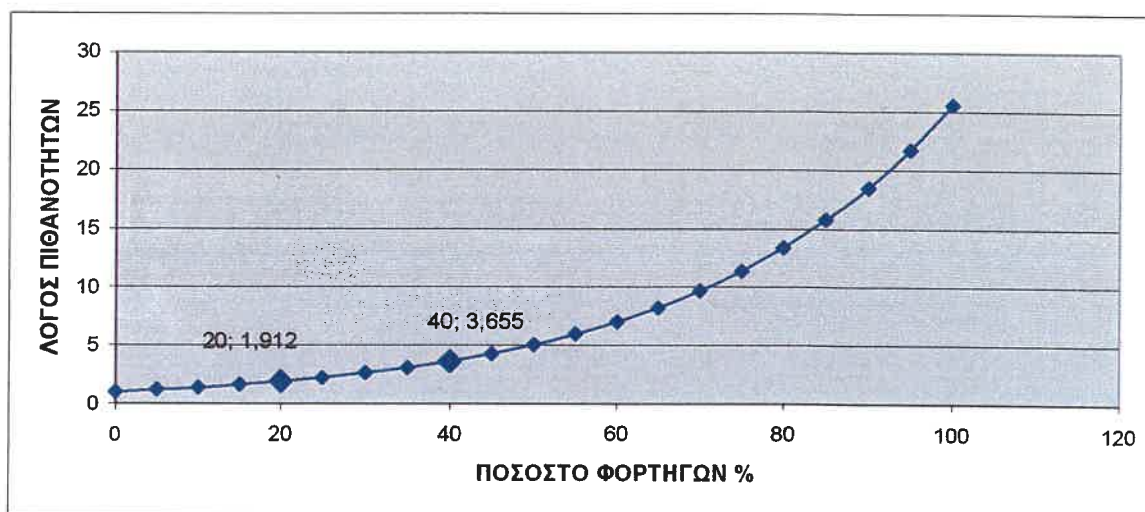
Σχήμα 5.11: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγματώσεως ανάλογα με την ηλικία οδοστρώματος.

Όσον αφορά στην ανεξάρτητη μεταβλητή του πάχους της ασφαλικής στρώσης, η οποία δεν έχει αναλυθεί σε κανένα από τα προηγούμενα πρότυπα, γίνεται εμφανές από τον πίνακα 5.4 και το σχήμα 5.12 ότι αύξηση του πάχους οδηγεί σε μείωση της πιθανότητας για ρηγματώση. Όταν αυξάνεται η ασφαλική στρώση, έχουμε μεγαλύτερη απομείωση των τάσεων που ασκούνται στο οδόστρωμα με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων αφού, όπως είναι γνωστό, οι ρωγμές ξεκινάνε από τη διεπιφάνεια του κοκκώδους υλικού της βάσης και της ασφαλικής στρώσης.



Σχήμα 5.12: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγματώσεως ανάλογα με το πάχος της ασφαλικής στρώσης οδοστρώματος.

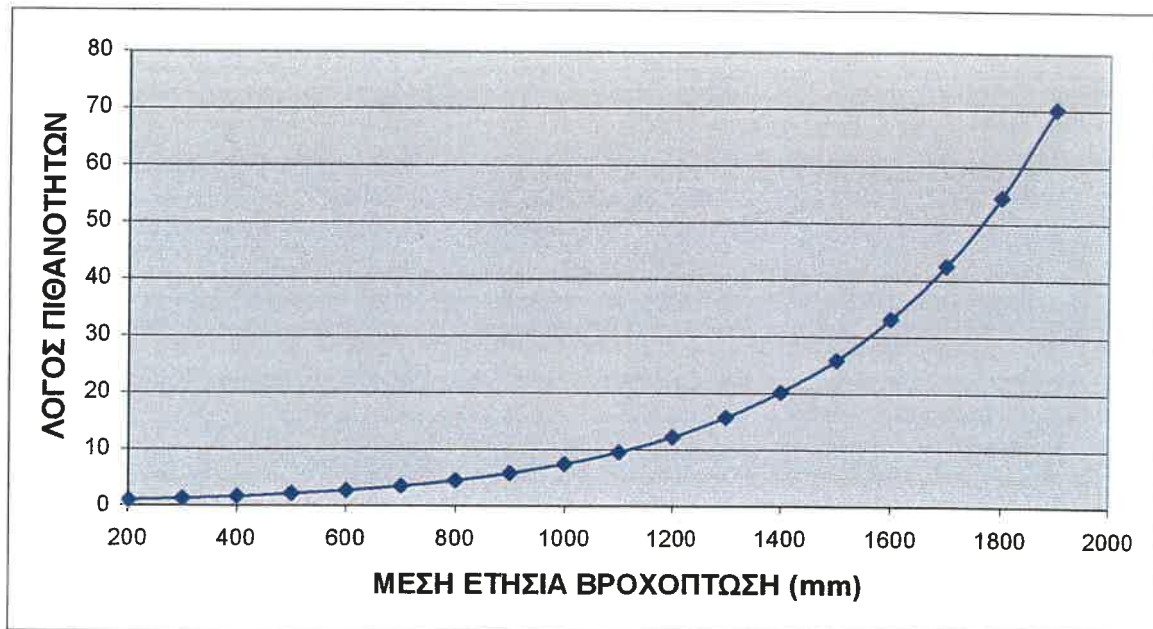
Τέλος, το ποσοστό των φορτηγών στο υπό μελέτη τμήμα επηρεάζει την πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών όπως φαίνεται στο σχήμα 5.13. Είναι εμφανές ότι αύξηση του ποσοστού των φορτηγών οδηγεί σε αύξηση της πιθανότητας του να εμφανιστούν ρωγμές. Αναλυτικότερα, ένα τμήμα οδοστρώματος με 40% ποσοστό φορτηγών έχει περίπου διπλάσια πιθανότητα ($e^{0.0324 \cdot 20} = 1.912$) να πραγματοποιηθεί έναρξη ρηγματώσεων σε σχέση με ένα τμήμα που έχει 20% ποσοστό φορτηγών. Αυτό όπως αναλύθηκε και παραπάνω είναι λογικό αφού, αύξηση των βαρέων οχημάτων οδηγεί το οδόστρωμα ταχύτερα σε αστοχία.



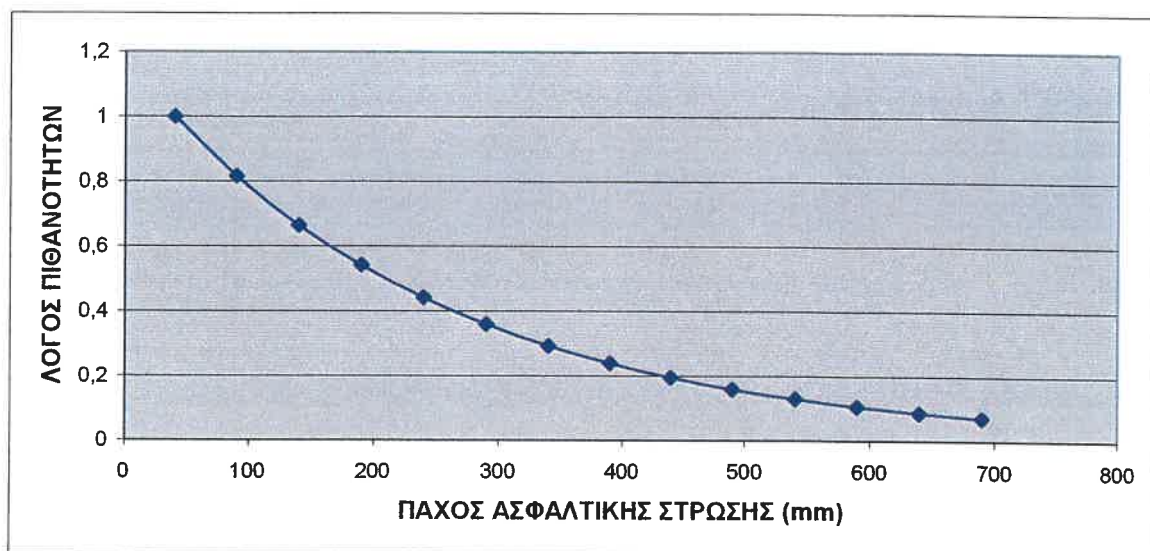
Σχήμα 5.13: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγματώσεων ανάλογα με το ποσοστό % των φορτηγών στο υπό μελέτη τμήμα.

5.3.3.5 Επεξήγηση 4^{ου} προτύπου

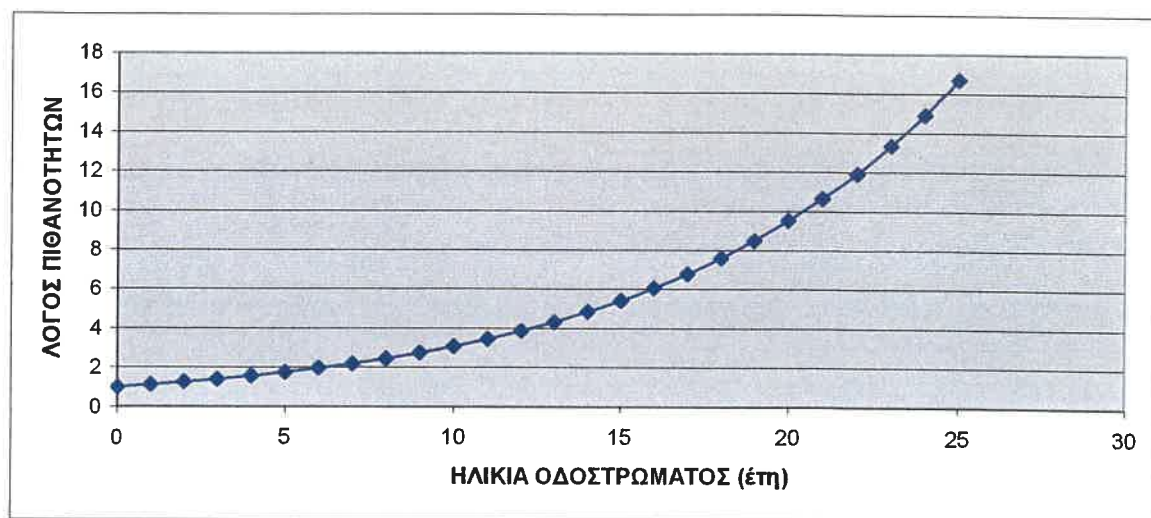
Το 4^ο πρότυπο είναι παρόμοιο με το προηγούμενο, με τη μόνη διαφορά ότι δεν περιλαμβάνει ως ανεξάρτητη μεταβλητή το ποσοστό των φορτηγών ανά τμήμα. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που υπεισέρχονται είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση, το πάχος της ασφαλικής στρώσης καθώς και η ηλικία του οδοστρώματος. Το μόνο που αλλάζει σε αυτό το πρότυπο σε σχέση με το προηγούμενο είναι ο βαθμός επίδρασης της κάθε μιας ανεξάρτητης μεταβλητής στη συνολική πιθανότητα να πραγματοποιηθεί έναρξη ρηγματώσεων. Έτσι, παρακάτω παρατίθενται απλά τα διαγράμματα του λόγου πιθανοτήτων της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής.



Σχήμα 5.14: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγμάτωσης ανάλογα με τη μέση ετήσια βροχόπτωση.



Σχήμα 5.15: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγμάτωσης ανάλογα με το πάχος της ασφαλτικής στρώσης οδοστρώματος.

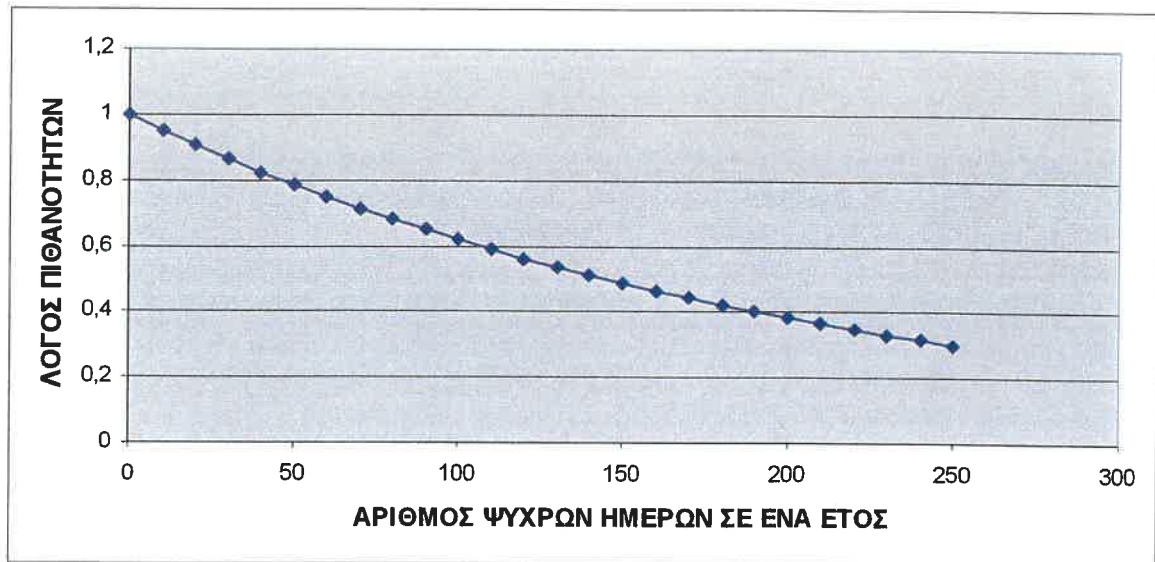


Σχήμα 5.16: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγμάτωσης ανάλογα με την ηλικία οδοστρώματος.

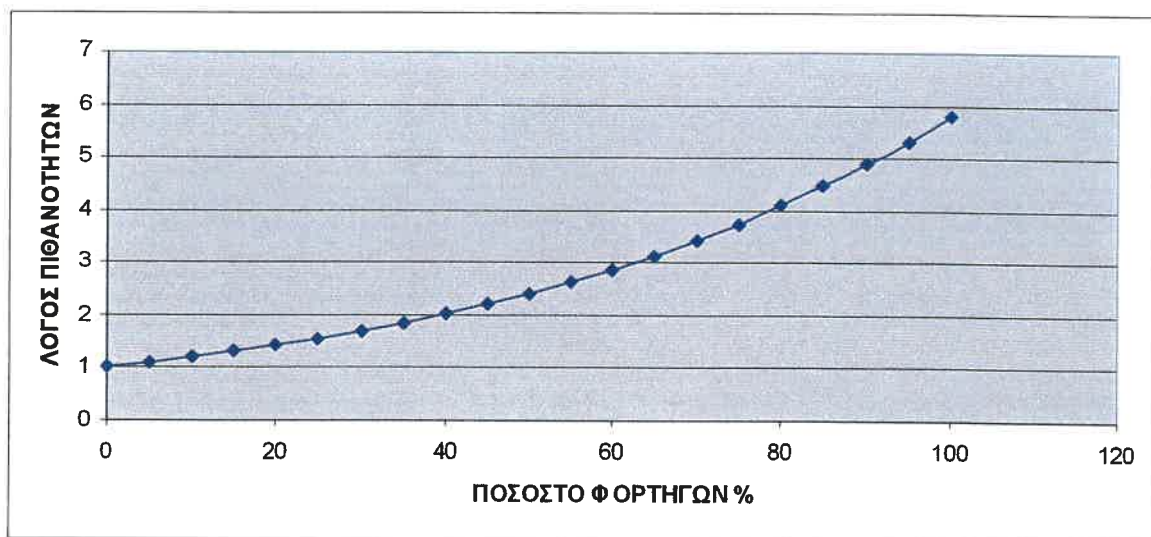
5.3.3.5 Επεξήγηση 5^{ου} προτύπου

Το τελευταίο πρότυπο αποτελείται από τέσσερις ανεξάρτητες μεταβλητές: Τον αριθμό των ψυχρών ημερών ανά έτος, το πάχος του κοκκώδους υλικού της υπόβασης, το ποσοστό των φορτηγών στο υπό μελέτη τμήμα και τέλος την ηλικία του οδοστρώματος.

Και σε αυτό το πρότυπο οι ανεξάρτητες μεταβλητές του αριθμού των ψυχρών ημερών ανά έτος, του ποσοστού των φορτηγών στο υπό μελέτη τμήμα και της ηλικίας του οδοστρώματος συμπεριφέρονται κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στα παραπάνω πρότυπα. Αλλάζει και εδώ ο βαθμός επίδρασής τους και για το λόγο αυτό δίνονται τα διαγράμματα του λόγου πιθανοτήτων της κάθε μεταβλητής στα σχήματα 5.17, 5.18 και 5.19.



Σχήμα 5.17: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγμάτωσης ανάλογα με τον αριθμό των ψυχρών ημερών ανά έτος.



Σχήμα 5.18: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγμάτωσης ανάλογα με το ποσοστό % των φορτηγών στο υπό μελέτη τμήμα.



Σχήμα 5.19: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγματώσεως ανάλογα με την ηλικία οδοστρώματος.

Η τελευταία ανεξάρτητη μεταβλητή είναι το πάχος του κοκκώδους υλικού της υπόβασης. Η συγκεκριμένη μεταβλητή δεν έχει ξαναεμφανιστεί σε προηγούμενα πρότυπα. Από το σχήμα 5.20 φαίνεται ότι αύξηση του πάχους του υλικού της υπόβασης οδηγεί σε μείωση της πιθανότητας να πραγματοποιηθεί έναρξη ρηγματώσεων. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού, αύξηση του πάχους του υλικού της υπόβασης οδηγεί σε γρηγορότερη μείωση των τάσεων που ασκούνται στην επιφάνεια του οδοστρώματος σε σχέση με το βάθος. Έτσι μειώνεται η πιθανότητα να αστοχήσει το οδόστρωμα.



Σχήμα 5.20: Λόγος πιθανοτήτων (odd ratio) εμφάνισης ρηγματώσεως ανάλογα με το πάχος του κοκκώδους υλικού της υπόβασης (mm).

5.3.4 Σχόλια

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

- Μεγάλη σημασία έχουν οι κλιματολογικές συνθήκες, αφού μεταβλητές που ανήκουν στην κατηγορία αυτή υπεισέρχονται και στα πέντε πρότυπα, καθώς και η ηλικία του οδοστρώματος για τον ίδιο λόγο. Επιπλέον, σημαντική επίδραση φαίνεται να έχουν οι κυκλοφοριακές και κατασκευαστικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα οδόστρωμα.
- 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, αφού υπάρχουν μεταβλητές που επηρεάζουν περισσότερο την πιθανότητα ρηγματώσεων.
- Ο αριθμός αξονικών διελεύσεων ανά έτος δεν φαίνεται να επιδρά τόσο πολύ στην πιθανότητα ρηγματώσεων, κάτι που μπορεί να οφείλεται στη μεγάλη διασπορά των τιμών αξονικών διελεύσεων της βάσης δεδομένων. Από την άλλη, το ποσοστό των βαρέων οχημάτων φαίνεται να επηρεάζει αρκετά την πιθανότητα.
- Πολύ μεγάλη επίδραση στην πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων έχει η μέση ετήσια βροχόπτωση. Η πιθανότητα, όμως, αυξάνεται πολύ λόγω του μεγάλου εύρους τιμών, σε χιλιοστά βροχής, που υπάρχει από χώρα σε χώρα.
- Αύξηση των ψυχρών ημερών, παρόλο που θεωρητικά καθιστά το οδόστρωμα πιο άκαμπτο και άρα με μειωμένη πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων (όπως δείχνουν τα αντίστοιχα διαγράμματα), 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 επίδραση του πάχους της ασφαλικής στρώσης έχει μεγαλύτερη επίδραση στην πιθανότητα σε σχέση με το πάχος της υπόβασης. Το παραπάνω είναι λογικό καθώς οι επιφανειακές ρηγματώσεις επηρεάζονται σαφώς περισσότερο από το πάχος της ασφαλικής στρώσης.

- Η ηλικία οδοστρώματος παίζει σημαντικό ρόλο λόγω του γεγονότος ότι με το πέρασμα του χρόνου το οδόστρωμα φθείρεται, τόσο επιφανειακά όσο και σε βάθος, υπό την επίδραση της κυκλοφορίας και των κλιματολογικών συνθηκών. Επομένως, η ηλικία έχει να κάνει κυρίως με την κόπωση του οδοστρώματος.
- Τέλος, ο Δείκτης Επιφανειακής Καμπυλότητας SCI, όταν λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, πράγμα που σημαίνει μειωμένη αντοχή, έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη πιθανότητα για εμφάνιση ρηγματώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

6. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Μετά την επεξεργασία της βάσης δεδομένων και την δημιουργία νέων προτύπων πρόβλεψης έναρξης αστοχιών στην επιφάνεια εύκαμπτων οδοστρωμάτων, σειρά είχε η επαλήθευση των προτύπων χρησιμοποιώντας εκ νέου τα στοιχεία της βάσης δεδομένων, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτά δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Η διαδικασία της επαλήθευσης πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια.

Κατά το πρώτο στάδιο υπολογίστηκαν οι πιθανότητες για έναρξη ρηγματώσεων σε κάθε τμήμα ξεχωριστά και για κάθε πρότυπο. Το όριο για έναρξη ρηγματώσεων ορίστηκε ως 0.5, δηλαδή εάν η πιθανότητα ενός οδικού τμήματος, που προέκυπτε με βάση το πρότυπο, ήταν μεγαλύτερη από 0.5, τότε το τμήμα αυτό θεωρείται ότι είχε ήδη ρηγματωθεί. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν η πιθανότητα ήταν μικρότερη από 0.5, τότε θεωρείτο ότι δεν είχε εμφανίσει ρηγματώσεις στην επιφάνειά του. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την πραγματική κατάσταση των οδοστρωμάτων, όπως αυτή περιγράφεται από τους δείκτες 0 και 1 τη στήλης «cracking» της βάσης δεδομένων. Η διαδικασία αυτή έγινε αυτόματα από το πρόγραμμα SPSS.

Κατά το δεύτερο στάδιο ακολουθήθηκε η ίδια λογική με τη μόνη διαφορά ότι εφαρμόστηκε ένα ποσοστό ανοχής $\pm 10\%$ επί του ορίου πιθανότητας που χρησιμοποιήθηκε κατά το 1^ο στάδιο επαλήθευσης. Επισημαίνεται ότι το όριο αυτό ορίστηκε ίσο με 0.5, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Επομένως, θεωρώντας ποσοστό ανοχής 10%, προκύπτει ότι ο διαχωρισμός των οδοστρωμάτων γίνεται πλέον με βάση το εύρος τιμών πιθανοτήτων που ισούται από 0.45 έως 0.55 ($(\pm 10\% \cdot 0.5) + 0.5$) λαμβάνοντας, όμως, ταυτόχρονα υπόψη και την πραγματική κατάσταση του οδοστρώματος. Δηλαδή, οδοστρώματα με πιθανότητα κάτω από 0.45 θεωρούνται μη ρηγματωμένα, άνω του 0.55 ρηγματωμένα και οδοστρώματα με πιθανότητα από 0.45 έως 0.55 κατατάσσονται λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική

κατάσταση τους. Αυτό μπορεί να γίνει σαφές με το ακόλουθο παράδειγμα: Για ένα τμήμα που στην πραγματικότητα ρηγματώθηκε (δηλαδή είχε τιμή 1), εάν το πρότυπο προβλέπει πιθανότητα ίση με 0.46, τότε παρόλο που αρχικά θα κατατασσόταν ως οδόστρωμα που δεν εμφάνισε ρωγμές (με βάση το όριο 0.5), με την υπόθεση της ανοχής στην εκτίμηση των προτύπων αυτό κατατάσσεται ως ρηγματωμένο, επομένως το πρότυπο εκτίμησε σωστά την πραγματική του κατάσταση. Αντίστοιχα, ένα τμήμα που δεν ρηγματώθηκε (τιμή «cracking» ίση με 0) και το πρότυπο εκτίμησε πιθανότητα ίση με 0.53, παρόλο που αρχικά θα κατατασσόταν ως ρηγματωμένο, λαμβάνοντας υπόψη την ανοχή κατά 10% μπορεί να καταταχθεί ως μη ρηγματωμένο. Με αυτό τον τρόπο αναμένεται να βελτιωθούν αισθητά οι εκτιμήσεις των προτύπων. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για τα δύο στάδια της επαλήθευσης για τα πέντε πρότυπα που δημιουργήθηκαν.

6.2 1^ο Στάδιο επαλήθευσης

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, η διαδικασία αυτή έγινε απευθείας από το πρόγραμμα SPSS. Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει έναν πίνακα στον οποίο εμφανίζονται αναλυτικά το ποσοστό σωστών εκτιμήσεων τόσο για τα τμήματα που δεν εμφάνισαν καθόλου ρηγματώσεις (που είχαν δηλαδή τιμή 0 ως cracking) όσο και για τα τμήματα που εμφάνισαν ρηγματώσεις (που είχαν τιμή 1 ως cracking). Επιπλέον, υπολογίζει τα ποσοστά εμφάνισης των συνδυασμών ρηγμάτωσης 0-1 και 1-0, δηλαδή τα ποσοστά των τμημάτων που το πρότυπο αδυνατούσε να εκτιμήσει σωστά. Το ποσοστό που ενδιαφέρει είναι το συνολικό ποσοστό του πίνακα (overall percentage correct), καθώς από αυτό φαίνεται εάν το πρότυπο αποδίδει σωστές εκτιμήσεις. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό τόσο καλύτερες προβλέψεις κάνει το συγκεκριμένο πρότυπο. Σημειώνεται ότι το πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει μόνο τα τμήματα που είχαν στοιχεία για όλες τις μεταβλητές που υπεισέρχονται στο πρότυπο κάθε φορά. Τα τμήματα που δεν είχαν μέτρηση για μία τουλάχιστον μεταβλητή αποκλείονταν. Έτσι, τα ποσοστά αντιστοιχούν στα τμήματα που διέθεταν μετρήσεις για όλες τις μεταβλητές, δίνοντας με αυτό τον τρόπο πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Παρακάτω παρουσιάζονται σε μορφή πινάκων τα αποτελέσματα του προγράμματος SPSS σε ό,τι αφορά στα προαναφερθέντα ποσοστά.

Μετρημένη (observed)		Εκτιμώμενη (predicted)		
		Ρηγμάτωση		Ποσοστά επαλήθευσης (percentage correct)
		0	1	
Ρηγμάτωση	0	155	92	62.8
	1	79	160	66.9
Συνολικό ποσοστό (overall percentage)				64.8

Πίνακας 6.1: Ποσοστά 1^{ου} σταδίου επαλήθευσης για το 1^ο πρότυπο.

Μετρημένη (observed)		Εκτιμώμενη (predicted)		
		Ρηγμάτωση		Ποσοστά επαλήθευσης (percentage correct)
		0	1	
Ρηγμάτωση	0	118	74	61.5
	1	47	154	76.6
Συνολικό ποσοστό (overall percentage)				69.2

Πίνακας 6.2: Ποσοστά 1^{ου} σταδίου επαλήθευσης για το 2^ο πρότυπο.

Μετρημένη (observed)		Εκτιμώμενη (predicted)		
		Ρηγμάτωση		Ποσοστά επαλήθευσης (percentage correct)
		0	1	
Ρηγμάτωση	0	163	100	62.0
	1	93	152	62.0
Συνολικό ποσοστό (overall percentage)				62.0

Πίνακας 6.3: Ποσοστά 1^{ου} σταδίου επαλήθευσης για το 3^ο πρότυπο.

Μετρημένη (observed)		Εκτιμώμενη (predicted)		
		Ρηγμάτωση		Ποσοστά επαλήθευσης (percentage correct)
		0	1	
Ρηγμάτωση	0	192	85	69.3
	1	105	140	57.1
Συνολικό ποσοστό (overall percentage)				63.6

Πίνακας 6.4: Ποσοστά 1^{ου} σταδίου επαλήθευσης για το 4^ο πρότυπο.

Μετρημένη (observed)		Εκτιμώμενη (predicted)		
		Ρηγμάτωση		Ποσοστά επαλήθευσης (percentage correct)
		0	1	
Ρηγμάτωση	0	132	109	54.8
	1	81	158	66.1
Συνολικό ποσοστό (overall percentage)				60.4

Πίνακας 6.5: Ποσοστά 1^{ου} σταδίου επαλήθευσης για το 5^ο πρότυπο.

6.3 2^ο Στάδιο επαλήθευσης

Στο υποκεφάλαιο 6.1 δόθηκε η λογική που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση του 2^{ου} σταδίου επαλήθευσης των προτύπων. Με το πρόγραμμα SPSS υπολογίστηκαν για κάθε οδικό τμήμα οι πιθανότητες εμφάνισης ρηγματώσεων στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων (οι πιθανότητες για κάθε οδικό τμήμα ανά πρότυπο παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα Δ). Κατόπιν, λαμβάνοντας υπόψη την ανοχή 10% στην εκτίμηση του προτύπου και την πραγματική κατάσταση των οδοστρωμάτων έγινε νέος διαχωρισμός στα τμήματα (τμήματα με ρηγμάτωση 0 και 1) (ο πίνακας που περιγράφει τη

διαδικασία εμφανίζεται αναλυτικά στο τεύχος 2, παράρτημα Δ). Παρακάτω παρουσιάζονται τα νέα ποσοστά υπό μορφή πινάκων και για τα πέντε πρότυπα.

<i>Μετρημένη (observed)</i>		<i>Εκτιμώμενη (predicted)</i>		
		Ρηγμάτωση		Ποσοστά επαλήθευσης (percentage correct)
		0	1	
Ρηγμάτωση	0	188	59	76.1
	1	58	181	75.7
Συνολικό ποσοστό (overall percentage)				75.9

Πίνακας 6.6: Ποσοστά 2^{ου} σταδίου επαλήθευσης για το 1^ο πρότυπο.

<i>Μετρημένη (observed)</i>		<i>Εκτιμώμενη (predicted)</i>		
		Ρηγμάτωση		Ποσοστά επαλήθευσης (percentage correct)
		0	1	
Ρηγμάτωση	0	144	43	77.0
	1	43	158	78.6
Συνολικό ποσοστό (overall percentage)				77.8

Πίνακας 6.7: Ποσοστά 2^{ου} σταδίου επαλήθευσης για το 2^ο πρότυπο.

<i>Μετρημένη (observed)</i>		<i>Εκτιμώμενη (predicted)</i>		
		Ρηγμάτωση		Ποσοστά επαλήθευσης (percentage correct)
		0	1	
Ρηγμάτωση	0	209	54	79.4
	1	57	188	76.7
Συνολικό ποσοστό (overall percentage)				78.1

Πίνακας 6.8: Ποσοστά 2^{ου} σταδίου επαλήθευσης για το 3^ο πρότυπο.

Μετρημένη (observed)	Εκτιμώμενη (predicted)		
	Ρηγμάτωση		Ποσοστά επαλήθευσης (percentage correct)
	0	1	
Ρηγμάτωση 0	230	47	83.0
1	79	166	67.7
Συνολικό ποσοστό (overall percentage)			75.8

Πίνακας 6.9: Ποσοστά 2^{ου} σταδίου επαλήθευσης για το 4^ο πρότυπο.

Μετρημένη (observed)	Εκτιμώμενη (predicted)		
	Ρηγμάτωση		Ποσοστά επαλήθευσης (percentage correct)
	0	1	
Ρηγμάτωση 0	180	61	74.6
1	43	196	82.0
Συνολικό ποσοστό (overall percentage)			78.3

Πίνακας 6.10: Ποσοστά 2^{ου} σταδίου επαλήθευσης για το 5^ο πρότυπο.

6.4 Συμπεράσματα

Με το πέρας του σταδίου της επαλήθευσης, τα ακόλουθα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν αναφορικά με την αποτελεσματικότητα των προτύπων:

- Ήδη από το πρώτο στάδιο επαλήθευσης τα πρότυπα αποδίδουν σωστές εκτιμήσεις σε ποσοστό άνω του 60%, αρκετά ικανοποιητικό συγκριτικά με τα αντίστοιχα του PARIS, αν και δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση λόγω των διαφορετικών εκτιμήσεων που πραγματοποιούν τα πρότυπα (αριθμό αξόνων μέχρι έναρξη

ρηγματώσεων για το PARIS και πιθανότητα έναρξης ρηγματώσεων για τα πρότυπα της παρούσης διπλωματικής εργασίας).

- Η υπόθεση του ποσοστού ανοχής βελτίωσε σε μεγάλο βαθμό τις προβλέψεις, με αποτέλεσμα το ποσοστό σωστών εκτιμήσεων να ξεπεράσει αρκετά το 75%. Η ανοχή που ελήφθη υπόψη είναι μικρή, επομένως δεν αλλοιώνει τα ποσοστά σωστών εκτιμήσεων σε τέτοιο βαθμό που να μετατρέπει ένα μη αποτελεσματικό πρότυπο σε αποτελεσματικό. Επιπλέον, είναι και λογική καθώς πρέπει με κάποιο τρόπο να ληφθεί υπόψη και η πραγματική κατάσταση του οδοστρώματος όταν η πιθανότητα προκύπτει αρκετά κοντά στο όριο του 50% ώστε να γίνει ο διαχωρισμός σε ρηγματωμένο η μη οδόστρωμα.
- Από τα παραπάνω διαφαίνεται ότι τα πρότυπα είναι αποτελεσματικά σε μεγάλο βαθμό, κάτι που αποδεικνύεται από τις αρκετά ικανοποιητικές εκτιμήσεις που πραγματοποιούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο

7. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

7.1 Τελικά συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρήθηκε να αναπτυχθούν πρότυπα έναρξης ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιώντας στοιχεία επιτόπου μετρήσεων αποκλειστικά, χωρίς την βοήθεια μεγεθών μηχανικής (όπως μέτρα ελαστικότητας και τάσεις – παραμορφώσεις). Για το σκοπό αυτό ως βάση υπήρξε το πρόγραμμα PARIS και η βάση δεδομένων αυτού, που αποτελεί μία από τις πλέον ολοκληρωμένες προσπάθειες σε ό,τι αφορά στα πρότυπα έναρξης και εξέλιξης αστοχιών στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημιιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Αφού μελετήθηκε εκτεταμένα η συγκεκριμένη έρευνα, κατόπιν διερευνήθηκε κατά πόσο τα πρότυπα του PARIS αποδίδουν ικανοποιητικές εκτιμήσεις. Τα αποτελέσματα μετά από σύγκριση του αριθμού των εκτιμώμενων διελεύσεων των αξονικών φορτίων μέχρι την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια και του αριθμού των μετρημένων (πραγματικών) διελεύσεων αξονικών φορτίων που προκύπτουν από τη βάση δεδομένων, έδειξαν ότι υπάρχουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους. Αυτό για το μελετητή/διαχειριστή σημαίνει μεγάλη αβεβαιότητα για το πότε θα αστοχήσει το οδόστρωμα του οδικού άξονα που διαχειρίζεται, με αποτέλεσμα να μην έχει σωστή εκτίμηση αφενός του ποσού των χρημάτων που θα απαιτηθούν για να καταστεί και πάλι λειτουργικό και αφετέρου του πότε θα είναι απαραίτητες οποιεσδήποτε διορθωτικές ενέργειες (συντήρηση ή/και πλήρη αποκατάσταση).

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 SCI_{300}), 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 έναρξης 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 έναρξης ρηγματώσεων που να αποδίδουν καλύτερες εκτιμήσεις, αλλά και να περιέχουν επιπλέον ανεξάρτητες μεταβλητές ήταν το αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Μετά από εκτεταμένη επεξεργασία της βάσης δεδομένων του PARIS, ώστε να εντοπιστούν ελλείψεις μετρήσεις και να αποκλειστούν τα αντίστοιχα οδικά τμήματα, δημιουργήθηκε νέα διορθωμένη βάση δεδομένων, η οποία και χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των νέων προτύπων έναρξης ρηγματώσεων. Ακολούθησε ανάλυση για να εντοπιστούν τόσο οι ανεξάρτητες μεταβλητές που συσχετίζονται μεταξύ τους, ώστε να μην εισαχθούν στο πρότυπο μεταβλητές συσχετισμένες όσο και αυτές που φαίνεται να περιγράφουν το φαινόμενο έναρξης ρηγματώσεων.

Μετά από αρκετές δοκιμές και συνδυάζοντας διαφορετικές κάθε φορά ανεξάρτητες μεταβλητές, προέκυψαν από την ανάλυση πέντε διαφορετικά πρότυπα έναρξης ρηγματώσεων. Τα παραπάνω πρότυπα περιέχουν επιπλέον μεταβλητές, όπως πάχη στρώσεων, ηλικία οδοστρώματος, βροχόπτωση, αριθμό ψυχρών ημερών 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. Για παράδειγμα, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τις υποχωρήσεις (ώστε να προκύψει ο δείκτης SCI), ο μελετητής/διαχειριστής μπορεί να επιλέξει εκείνα τα πρότυπα που έχουν ως μεταβλητές πάχη στρώσεων

Για να διαπιστωθεί η εγκυρότητα των νέων προτύπων, πραγματοποιήθηκε επαλήθευση, τα αποτελέσματα της οποίας έδειξαν ότι τα συγκεκριμένα πρότυπα ^{αποδίδουν} εκτιμήσεις καλύτερες από εκείνες των προτύπων του PARIS (αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6). Επομένως, είναι ρεαλιστική η αξιοποίησή τους σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης ^{οδικών αξόνων}.

Συνοπτικά οι βασικές διαπιστώσεις της παρούσας εργασίας είναι:

- Η νέα 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 επαλήθευση που έγινε στα πρότυπα του PARIS, χρησιμοποιώντας τη νέα βάση δεδομένων, έδειξε ότι τα αποτελέσματα δεν είναι καθόλου ικανοποιητικά. Το μέσο απόλυτο σφάλμα σε κάθε τμήμα συνήθως, είναι πολύ μεγαλύτερο του 30% που ορίστηκε ως μέγιστο ποσοστό σφάλματος, κάτω του οποίου θεωρήθηκε ότι προκύπτουν ικανοποιητικές προβλέψεις. Επιπλέον, τα πρότυπα σχεδόν πάντα υπερεκτιμούν τον προβλεπόμενο αριθμό αξονικών διελεύσεων σε σχέση με τον πραγματικό.
- Η δημιουργία προτύπων πρόβλεψης έναρξης ρηγματώσεων σε εύκαμπτα οδοστρώματα αποτέλεσε αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας και πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη νέα βάση δεδομένων και το στατιστικό πρόγραμμα SPSS. Σκοπός ήταν τα νέα πρότυπα να δίνουν ικανοποιητικές εκτιμήσεις.
- Στην πρώτη προσπάθεια που πραγματοποιήθηκε δημιουργήθηκαν τρία πρότυπα τα οποία περιείχαν όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές στην πρώτη δύναμη. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν όμως δεν ήταν ικανοποιητικά και έτσι τα πρότυπα αυτά απορρίφθηκαν.
- Στη δεύτερη προσπάθεια δημιουργήθηκαν πέντε πρότυπα στα οποία υπήρχαν ανεξάρτητες μεταβλητές στην πρώτη δύναμη, στο τετράγωνο καθώς και γινόμενα δύο ανεξάρτητων μεταβλητών. Αυτό ανέβασε το φόρτο εργασίας κατά πολύ αφού οι συνδυασμοί ήταν πρακτικά άπειροι.

- τα τελικά πρότυπα είναι πιθανοτικά, πράγμα που σημαίνει ότι υπολογίζουν την πιθανότητα για εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων οδοστρωμάτων συναρτήσει διάφορων ανεξάρτητων μεταβλητών.
- Μεγάλη σημασία στην πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών αποδείχθηκε ότι έχουν οι κλιματολογικές συνθήκες, καθώς και η ηλικία του οδοστρώματος. Σημαντική επίδραση έχουν οι κυκλοφοριακές και κατασκευαστικές συνθήκες.
- Η επαλήθευση των προτύπων έγινε σε δύο στάδια χρησιμοποιώντας στοιχεία από οδοστρώματα σε λειτουργία. Κατά το πρώτο στάδιο υπολογίστηκε η πιθανότητα για έναρξη ρηγματώσεων σε κάθε τμήμα χωριστά και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με την πραγματική κατάσταση των οδοστρωμάτων. Στο δεύτερο στάδιο εφαρμόστηκε ποσοστό ανοχής 10% (σύμφωνα με τη διαδικασία επαλήθευσης που ακολουθήθηκε στο PARIS) και λήφθηκε υπόψη και η πραγματική κατάσταση των οδοστρωμάτων. Και εδώ οι εκτιμήσεις συγκρίθηκαν με την πραγματική κατάσταση των οδοστρωμάτων.
- Τα συνολικά ποσοστά των σωστών προβλέψεων ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αφού κατά την πρώτη επαλήθευση ξεπέρασαν το 60% ενώ κατά τη δεύτερη άγγιξαν το 80%.
- Το γεγονός ότι τα πρότυπα που δημιουργήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία αποδίδουν καλύτερα συγκριτικά με τα πρότυπα του PARIS έγκειται στο ότι τα πρώτα περιέχουν αφενός περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές και άρα το φαινόμενο της ρηγματώσης στην επιφάνεια περιγράφεται καλύτερα, αφετέρου ορισμένες μεταβλητές υψώθηκαν στο τετράγωνο, αλλά σχηματίστηκαν και γινόμενα μεταξύ δύο ανεξάρτητων μεταβλητών, βελτιώνοντας τελικά την ακρίβεια των προτύπων. Αντίθετα, τα πρότυπα του PARIS ήταν απλές γραμμικές σχέσεις που περιείχαν μόλις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές, με αποτέλεσμα να υστερούν σημαντικά σε ακρίβεια προβλέψεων.

7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

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

- Προτείνεται η εφαρμογή των προτύπων έναρξης ρηγματώσεων σε διαφορετική βάση δεδομένων για να διαπιστωθεί η εγκυρότητα των προτύπων, 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 άλλους τύπους οδοστρωμάτων (ημιάκαμπα, δύσκαμπα) 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 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Κοκολάκης Γ. και Σπηλιώτης Ι., **“Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική”**, Συμμεών, 1991.

Kuo S., Mahgoub H. and Hoffman L., **“Development of Flexible Pavement Performance Prediction Model Based on Pavement Data”**, TRB 2003 Annual Meeting, 2002.

Madanat S., Bulusu S. and Mahmoud A., **“Estimation of Infrastructure Distress Initiation and Progression Models”**, Journal of Infrastructure Systems, 1995.

Madanat S. and Shin H., **“Development of Distress Progression Models Using Panel Data Sets of In-Service Pavements”**, Transportation Research Record 1643, 1998.

Mendehall W. and Sincich T., **“A Second Course in Statistics, Regression Analysis”**, Prentice Hall, 1996.

PARIS (Performance analysis of road infrastructure) **“FINAL REPORT”**, 1998

PARIS (Performance analysis of road infrastructure) **“PAVEMENT DETERIORATION MODELS”**, 1998

Sadek A, Freeman T. and Demetsky M., **“Deterioration Prediction Modeling of Virginia’s Interstate Highway System”**, Transportation Research Record 1524, 1996.

Πηγές από το διαδίκτυο:

1. Spearman Rank Coefficient:

http://www.kelcom.igs.net/~nhodgins/spearman_rank_research_analysis.htm

2. Spearman Rank Coefficient:

http://www.netnam.vn/unescocourse/statistics/13_6.htm

3. Logistic Regression:

<http://www.medcalc.be/manual/mpage06-04d.html>

4. Logistic Regression:

<http://www.ex.ac.uk/~SEGLea/multvar2/disclogi.html>

Transportation Research Board (TRB)

<http://www.trb.org>

American Society of Civil Engineers (ASCE)

<http://www.asce.org>

TRIS Online

<http://ntl.bts.gov/tris/>

