



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Διπλωματική Εργασία

*Στατιστική Προσέγγιση για την Αξιολόγηση Στρατηγικών
Συντήρησης & Αποκατάστασης Έργων Υποδομής*

Επιβλέπων:

Μ. Γ. Καρλαύτης

Μπαρδάκα Ελένη

Αθήνα, Ιούλιος 2010



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Διπλωματική Εργασία
*Στατιστική Προσέγγιση για την Αξιολόγηση Στρατηγικών
Συντήρησης & Αποκατάστασης Έργων Υποδομής*

Επιβλέπων:

Μ. Γ. Καρλαύτης

Μπαρδάκα Ελένη

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Ματθαίο Γ. Καρλαύτη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και την ιδιαίτερα πολύτιμη καθοδήγησή του και συνεργασία σε όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Ευχαριστώ θερμά την Δρ. Χριστίνα Πλατή, Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τις χρήσιμες παρατηρήσεις και το ενδιαφέρον της. Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τους Καθηγητές κκ. Σταθόπουλο και Λοΐζο τόσο για τις παρατηρήσεις τους στη διπλωματική όσο και για τα ιδιαίτερα χρήσιμα θέματα που μας δίδαξαν στα μαθήματα των Ποσοτικών Μεθόδων και των Οδοστρωμάτων και Ειδικών Θεμάτων Οδοστρωμάτων.

Μπαρδάκα Ελένη

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Σύνοψη

Τίτλος: «Στατιστικές Προσεγγίσεις για την Αξιολόγηση Στρατηγικών Συντήρησης και Αποκατάστασης Έργων Υποδομής»

Όνομα: Ελένη Μπαρδάκα

Επιβλέπων: Ματθαίος Καρλαύτης

Αθήνα, Ιούλιος 2010.

Η αποτελεσματική συντήρηση και αποκατάσταση οδικών έργων υποδομής βασίζεται στην ορθή επιλογή στρατηγικών συντήρησης και στην πρόβλεψη της εναπομένουσας ζωής του οδοστρώματος μετά από συντήρηση. Στοιχεία από τη μελέτη “Specific Pavement Study 5” του προγράμματος Long Term Pavement Performance χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων (Probit, Random effects probit, Multivariate probit) για την πρόβλεψη της έναρξης αλιγοτορικών ρηγματώσεων σε οδοστρώματα στα οποία είχαν εφαρμοστεί διαφορετικές στρατηγικές συντήρησης. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης και στη συνέχεια κάθε διαδικασία συντήρησης διερευνήθηκε ξεχωριστά για να προσδιοριστούν οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το κλίμα, η κυκλοφορία και τα κατασκευαστικά στοιχεία επηρεάζουν την εμφάνιση αλιγοτορικών ρηγματώσεων σε οδοστρώματα μετά από συντήρηση. Η χρήση νέου ασφαλτομίγματος ως επίστρωση μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεως κατά 13,6% σε σχέση με τη χρήση ανακυκλωμένου, ενώ η τοποθέτηση 5 ιντσών επίστρωσης μειώνει την πιθανότητα κατά 13,1% σε σχέση με την τοποθέτηση 2 ιντσών.

Λέξεις – Κλειδιά: SPS-5, LTPP, οδόστρωμα, συντήρηση, αλιγοτορικές ρηγματώσεις, μοντέλα probit.

Abstract

Title: “A Statistical Approach for Evaluating Maintenance Strategies in Infrastructure Rehabilitation”

Name: Eleni Bardaka

Supervisor: Matthew Karlaftis

Athens, July 2010.

Effectiveness of pavement maintenance and rehabilitation relies on successfully selecting rehabilitation strategies and accurately predicting pavement service life after rehabilitation. Data from the Specific Pavement Study 5 of the Long Term Pavement Performance Program are used to develop models for predicting alligator cracking initiation on pavements where different rehabilitation treatments were applied. The effectiveness of each treatment is examined using simple, random effects and multivariate probit models. An aggregate analysis is conducted to evaluate the effectiveness of rehabilitation treatments; then, treatments are separately examined to investigate the factors that affect their effectiveness. Results suggest that traffic, climate and structural factors significantly affect pavement condition following treatment; the magnitude of this effect is explicitly quantified. Results clearly indicate that using virgin asphalt mix overlay decreases the probability of alligator cracking initiation by 13.6% over recycled asphalt mix, while using 5-in asphalt concrete overlay decreases the probability by 13.1% over the 2-in overlay.

Keywords: SPS-5, LTPP, pavement, rehabilitation, alligator cracking, probit models.

Περίληψη

Η αποτελεσματικότητα συστημάτων διαχείρισης οδοστρωμάτων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ορθή επιλογή στρατηγικών συντήρησης και αποκατάστασης καθώς και στην πρόβλεψη της εναπομένουσας ζωής οδοστρωμάτων. Το θέμα της συντήρησης των οδικών έργων υποδομής απασχολεί τους μηχανικούς αλλά και τους ερευνητές εδώ και αρκετά χρόνια και πολλές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης αστοχιών με στόχο τον προσδιορισμό των παραγόντων που προκαλούν φθορά και αστοχία στα οδοστρώματα. Παρά τη σημασία, όμως, του επιστημονικού αλλά και πρακτικού ενδιαφέροντος του θέματος αυτού, η συμπεριφορά οδοστρωμάτων μετά την εφαρμογή εργασιών συντήρησης και αποκατάστασης δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς στη βιβλιογραφία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται και μοντελοποιείται το φαινόμενο της έναρξης αλियाτορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια ευκάμπτων οδοστρωμάτων που έχουν υποστεί διαφορετικές διαδικασίες συντήρησης. Συγκεκριμένα, διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο η συντήρηση επηρεάζει τη συμπεριφορά οδοστρωμάτων με τον υπολογισμό της πιθανότητας εμφάνισης ρηγματώσεων σε οδικά τμήματα στα οποία έχουν εφαρμοστεί διαφορετικές στρατηγικές συντήρησης.

Για τη στατιστική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τη βάση δεδομένων του προγράμματος Long Term Pavement Performance το οποίο αποτελεί κομμάτι του Strategic Highway Research Program που ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν ανήκουν στην έρευνα SPS-5 (Specific Pavement Study-5) η οποία αφορά στην αποκατάσταση ευκάμπτων οδοστρωμάτων που προέρχονται από δοκιμαστικές περιοχές σε 16 Πολιτείες των ΗΠΑ. Κάθε «περιοχή δοκιμών» αποτελείται από οκτώ ξεχωριστά τμήματα στα οποία εφαρμόζονται διαφορετικές διαδικασίες συντήρησης και αποκατάστασης. Αρχικά, συγκεντρώθηκαν στοιχεία από επί τόπου μετρήσεις που αφορούν τις αλियाτορικές ρηγματώσεις - για όλα τα διαθέσιμα έτη των καταγραφών και για κάθε δοκιμαστική περιοχή - και στη συνέχεια συλλέχθηκαν τα στοιχεία που αποτελούν τις επεξηγηματικές μεταβλητές όπως είναι η ηλικία του οδοστρώματος, ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση, τα πάχη των στρώσεων, κλιματικά στοιχεία, κυκλοφοριακά κτλ. Τα στοιχεία ελέγχθηκαν, συμπληρώθηκαν και δημιουργήθηκε ένα τελικό αρχείο για τους σκοπούς της ανάλυσης.

Για τη στατιστική επεξεργασία αναπτύχθηκαν και, σε πολλές περιπτώσεις συγκρίθηκαν, διαφορετικά στατιστικά μοντέλα ρηγματώσεων: πρώτον, αναπτύχθηκε ένα δίτιμο μοντέλο probit τυχαίων επιπτώσεων (random effects binary probit model) για την εκτίμηση της πιθανότητας αλιγοτορικής ρηγματώσης στην επιφάνεια συντηρημένων οδοστρωμάτων το οποίο, με βάση τη στατιστική θεωρία, βελτιώνει τις εκτιμήσεις του απλού δίτιμου μοντέλου probit συνυπολογίζοντας τη δυναμική διαστρωματική φύση των διαθέσιμων δεδομένων. Το εν λόγω μοντέλο αφορά το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης. Δεύτερον, αναπτύχθηκαν δίτιμα μοντέλα probit (binary probit model) για κάθε μία διαδικασία συντήρησης με σκοπό να προσδιοριστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την κάθε διαδικασία ξεχωριστά. Τρίτον, αναπτύχθηκε ένα σύστημα οκτώ εξισώσεων για τις διαδικασίες συντήρησης, οι παράμετροι του οποίου υπολογίστηκαν με βάση το πολυμεταβλητό μοντέλο probit (multivariate probit), με σκοπό να αναδειχθούν οι συσχετίσεις μεταξύ των διαφορετικών διαδικασιών συντήρησης. Τα συμπεράσματα από την ανάλυση καταδεικνύουν τα παρακάτω:

1. Με γνώμονα τη λογική συνέπεια, τη θεωρία οδοστρωμάτων αλλά και τη στατιστική θεωρία, «βέλτιστα» μοντέλα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μπορούν να θεωρηθούν τα μοντέλα probit τυχαίων επιπτώσεων. Τα αποτελέσματα των μοντέλων αυτών διαφέρουν και αποτελούν βελτίωση των απλών δίτιμων probit σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως στο μοντέλο που αναπτύχθηκε για το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης.
2. Η χρήση πολυμεταβλητών μοντέλων probit, παρά το σημαντικό χρόνο που απαιτείται για τον υπολογισμό των παραμέτρων, δίνει στατιστικά διαφορετικά συμπεράσματα από αυτά των προηγούμενων δύο μοντέλων.
3. Από τις οκτώ διαδικασίες συντήρησης, μόνο μία (507) εμφάνισε ισχυρή ετερογένεια και χρειάστηκε βελτίωση με μοντέλο τυχαίων επιπτώσεων. Τούτο σημαίνει ότι τα δίτιμα μοντέλα probit επαρκούν στις περισσότερες περιπτώσεις για τη μοντελοποίηση του φαινομένου της έναρξης αλιγοτορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια οδοστρωμάτων.
4. Με βάση το δίτιμο μοντέλο probit τυχαίων επιπτώσεων που αφορά το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης, η χρήση νέου ασφαλομίγματος ως επίστρωση μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσης κατά 13,6% σε σχέση με τη χρήση ανακυκλωμένου, ενώ η τοποθέτηση 5 ιντσών επίστρωσης μειώνει την πιθανότητα κατά 13,1% σε σχέση με την τοποθέτηση 2 ιντσών.

5. Ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση, ο παγετός, η κυκλοφορία και το πάχος των ασφαλικών στρώσεων επηρεάζουν σημαντικά την έναρξη της ρηγμάτωσης, όπως κατέδειξαν τα μοντέλα για τις διαδικασίες συντήρησης.
6. Συγκρίνοντας τις δύο ακραίες σε σχέση με το κόστος διαδικασίες συντήρησης, 502 και 507, παρατηρείται ότι για την 502 η πιθανότητα για αστοχία είναι στο 70% στα 7,5 χρόνια ενώ για την 507 στα 13,6 χρόνια. Αυτό δείχνει την υπεροχή της διαδικασίας 507 από την άποψη του χρόνου ζωής του οδοστρώματος που σχετίζεται με τη δομική του επάρκεια.
7. Δύο διαδικασίες συντήρησης, η 505 και η 507, εμφάνισαν υψηλό βαθμό συσχέτισης με βάση την πολυμεταβλητή ανάλυση probit, που σημαίνει ότι η εφαρμογή τους επιφέρει παρόμοια αποτελέσματα στο οδόστρωμα.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Γενικά	1
1.2. Μοντέλα Πρόβλεψης Αστοχιών.....	2
1.3. Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας.....	4
1.4. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	4
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	6
2.1. Εισαγωγή	6
2.2. Αρχικές έρευνες: Το οδικό πείραμα AASHO	7
2.3. Έρευνες για την έναρξη και την εξέλιξη των αστοχιών.....	8
2.4. Έρευνες για τον υπολογισμό του χρόνου ζωής του οδοστρώματος .	13
2.5. Έρευνες που αφορούν τη συντήρηση των οδοστρωμάτων.....	14
2.6. Έρευνες με στοιχεία από τη μελέτη SPS-5 του LTPP	16
2.7. Συμπεράσματα.....	17
3. ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	19
3.1. Το ερευνητικό πρόγραμμα LTPP	19
3.2. Στόχοι και προοπτική του προγράμματος LTPP.....	20

3.3. Χαρακτηρισμός δοκιμαστικών τμημάτων του προγράμματος LTPP	21
3.4. Η κατηγορία “Specific Pavement Studies”	21
3.5. Η μελέτη SPS-5: Αποκατάσταση Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων.....	23
3.6. Η βάση δεδομένων του προγράμματος LTPP	24
3.6.1. Η ενότητα “Administration”	26
3.7. Συλλογή στοιχείων από τη βάση δεδομένων του προγράμματος LTPP	28
3.7.1. Δοκιμαστικά τμήματα της μελέτης SPS-5.....	28
3.7.2. Συλλογή στοιχείων για το φαινόμενο της ρηγμάτωσης	31
3.7.3. Συλλογή στοιχείων για τις επεξηγηματικές μεταβλητές	36
3.7.4. Τελική μορφή των αρχείων επεξεργασίας.....	39
 4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	42
4.1. Εισαγωγή	42
4.2. Συσχέτιση μεταβλητών.....	42
4.3. Μοντέλα Binomial Probit, Random Effects Binary Probit και Multivariate Probit.....	45
4.4. Αποτελέσματα από την στατιστική επεξεργασία για το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης.....	49
4.4.1. Εισαγωγή	49
4.4.2. Ερμηνεία αποτελεσμάτων	49
4.5. Αποτελέσματα από την στατιστική επεξεργασία για την κάθε διαδικασία συντήρησης ξεχωριστά	54

4.5.1. Εισαγωγή	54
4.5.2. Ερμηνεία αποτελεσμάτων	55
4.5.3. Σύγκριση και αξιολόγηση διαδικασιών συντήρησης	73
4.5.4. Βελτίωση μοντέλου για τη διαδικασία συντήρησης 507.....	85
4.6. Αποτελέσματα από τη στατιστική επεξεργασία με τη χρήση του μοντέλου Multivariate Probit	87
4.6.1. Εισαγωγή	87
4.6.2. Ερμηνεία αποτελεσμάτων	88
4.7. Συμπεράσματα	91
 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑ	92
5.1. Συμπεράσματα	92
5.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	97
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Η αποτελεσματική συντήρηση οδικών έργων υποδομής είναι σημαντική για την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη μιας χώρας. Από την πλευρά των χρηστών, η ελλιπής συντήρηση ενός οδικού τμήματος μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες στην οδική ασφάλεια και στο επίπεδο εξυπηρετικότητας και άνεσης κατά την οδήγηση. Από την πλευρά των υπεύθυνων διαχειριστών των έργων και της Πολιτείας, η κακή διαχείριση της συντήρησης συνεπάγεται υψηλό συνολικά κόστος ζωής του οδοστρώματος (Loizos και Karlaftis, 2005). Για τους λόγους αυτούς, η συντήρηση και αποκατάσταση του οδοστρώματος πρέπει να γίνεται στα πλαίσια ενός συστήματος διαχείρισης οδοστρωμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται διεθνώς. Η αποτελεσματικότητά τους έγκειται στη σωστή επιλογή στρατηγικών συντήρησης με σκοπό τη μείωση του κόστους ζωής του οδοστρώματος και οι αποφάσεις λαμβάνονται με τον συνυπολογισμό διαφόρων παραγόντων όπως είναι ο διαθέσιμος προϋπολογισμός, το κόστος της κάθε διαδικασίας συντήρησης καθώς και τα προβλεπόμενα επίπεδα χρησιμοποίησης του δικτύου.

Στα συστήματα αυτά, τον πιο σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η διερεύνηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Για μια τέτοια διερεύνηση είναι απαραίτητη η συλλογή στοιχείων για την υπάρχουσα κατάσταση του οδοστρώματος αλλά και η απόκτηση πληροφοριών για την μελλοντική του κατάσταση. Η καταγραφή της παρούσας κατάστασης ενός οδικού τμήματος μπορεί να γίνει μέσω επί τόπου μετρήσεων και εργαστηριακών δοκιμών. Σε ότι αφορά στην απόκτηση πληροφοριών για την μελλοντική κατάσταση του οδοστρώματος, χρησιμοποιούνται στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης αστοχιών. Τα μοντέλα αυτά παρέχουν προβλέψεις για τη μελλοντική κατάσταση του οδοστρώματος βασισμένες στην υπάρχουσα κατάστασή του καθώς και σε παράγοντες που σχετίζονται με τη φθορά του όπως είναι η κυκλοφορία και τα καιρικά φαινόμενα και σε στοιχεία κατασκευής και συντήρησης. Με τις πληροφορίες που λαμβάνουν από τα μοντέλα πρόβλεψης αστοχιών, οι υπεύθυνοι διαχειριστές των έργων είναι σε θέση να γνωρίζουν την κατάσταση του οδικού δικτύου, τους παράγοντες που προκαλούν τις μελλοντικές αστοχίες και τα αποτελέσματα που θα επιφέρει μία πιθανή διαδικασία συντήρησης, στοιχεία απαραίτητα για την κατάστρωση ενός σχεδίου διαχείρισης και αποκατάστασης του δικτύου (Loizos και Karlaftis, 2005).

1.2. Μοντέλα Πρόβλεψης Αστοχιών

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι τα μοντέλα πρόβλεψης έναρξης και εξέλιξης αστοχιών διαδραματίζουν έναν πολύ σημαντικό ρόλο στα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων. Τα μοντέλα πρόβλεψης της έναρξης της αστοχίας δίνουν τη δυνατότητα στο διαχειριστή να προβλέψει με «ικανοποιητική» ακρίβεια τη χρονική στιγμή που θα αστοχήσει για πρώτη φορά το οδόστρωμα έχοντας ως αφετηρία το έτος κατασκευής, συντήρησης ή αποκατάστασης του οδοστρώματος. Ακολούθως, τα μοντέλα πρόβλεψης της εξέλιξης των αστοχιών περιγράφουν το πώς η αστοχία αναπτύσσεται με την πάροδο του χρόνου ως προς την σοβαρότητα αλλά και ως προς την έκταση αυτής. Ο διαχειριστής του έργου εκμεταλλευόμενος σωστά αυτές τις πληροφορίες μπορεί να γνωρίζει το πότε θα χρειαστεί να γίνει συντήρηση του οδοστρώματος, τον τρόπο με τον οποίο θα καταστεί το οδόστρωμα πάλι λειτουργικό και το ποσό των χρημάτων που απαιτείται για όλα αυτά. Επιπλέον, η διενέργεια των παραπάνω προβλέψεων συμβάλλει στην ενδεδειγμένη διαχείριση των οικονομικών πόρων που έχει στη διάθεσή του ο διαχειριστής του δικτύου,

στον υπολογισμό της εναπομένουσας ζωής του δικτύου και στην ανάλυση του κόστους ζωής του.

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

Είναι όμως απαραίτητο να επισημανθεί το γεγονός ότι παρ' όλο που τα μοντέλα πρόβλεψης αστοχιών αποτελούν το πιο σημαντικό μέρος των συστημάτων διαχείρισης οδοστρωμάτων είναι επίσης ένα από τα αδύνατα σημεία τους. Μη ακριβή μοντέλα μπορεί να κάνουν την επιλογή της καλύτερης στρατηγικής για την συντήρηση των οδοστρωμάτων πολύ δύσκολη. Από την άλλη πλευρά, σωστά διατυπωμένα μοντέλα μπορούν να διασφαλίσουν ότι η ανάλυση του κόστους ζωής των οδοστρωμάτων θα συνεισφέρει σε ένα ιδανικό επενδυτικό πρόγραμμα.

Στην προσπάθεια δημιουργίας των στατιστικών μοντέλων πρόβλεψης αστοχιών, το πρώτο βήμα είναι η συλλογή στοιχείων από τα οδοστρώματα που βρίσκονται σε λειτουργία. Αυτά τα στοιχεία αφορούν κλιματολογικά δεδομένα (θερμοκρασίες περιβάλλοντος, κατακρημνίσεις, υγρασία κλπ.), κυκλοφοριακά δεδομένα (αριθμός ετήσιων διελεύσεων τυπικών αξόνων, ημερήσιος αριθμός φορτηγών κλπ.), ιστορικά δεδομένα (έτος κατασκευής οδοστρώματος, χρονολογίες μετέπειτα συντηρήσεων ή αποκαταστάσεων κλπ.) και κατασκευαστικά δεδομένα (πάχη υπόβασης – βάσης – ασφαλικών στρώσεων κτλ.). Έτσι, δημιουργείται μια βάση δεδομένων η οποία αφού υποστεί κατάλληλη επεξεργασία οδηγεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων και σε ποιο βαθμό ο καθένας. Αυτά τα συμπεράσματα μπορούν να τεθούν στην διάθεση του διαχειριστή με σκοπό την πρόβλεψη του τρόπου συντήρησης του οδικού δικτύου.

1.3. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει εκτενής έρευνα για τον προσδιορισμό των παραγόντων που οδηγούν στη φθορά και την αστοχία του οδοστρώματος. Παρ' όλα αυτά, έχει ερευνηθεί ελάχιστα η συμπεριφορά του οδοστρώματος μετά την εφαρμογή εργασιών αποκατάστασης (Ahmed et al., 2010). Αυτό είναι ένα θέμα το οποίο χρήζει προσοχής μιας και τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να ξεκαθαρίσουν την καταλληλότητα των εργασιών συντήρησης αλλά και το ποιοι παράγοντες επηρεάζουν περισσότερο ένα οδόστρωμα το οποίο έχει συντηρηθεί. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η δημιουργία στατιστικών μοντέλων πρόβλεψης της έναρξης των αλγαιατορικών ρηγματώσεων για εύκαμπτα οδοστρώματα τα οποία έχουν ήδη υποστεί διαφορετικές εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης. Διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο διαφορετικές διαδικασίες συντήρησης επηρεάζουν τη συμπεριφορά του οδοστρώματος με τον υπολογισμό της πιθανότητας εμφάνισης ρηγματώσεων σε τμήματα στα οποία έχουν εφαρμοστεί διαφορετικές διαδικασίες συντήρησης. Για την πραγματοποίηση της στατιστικής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τη βάση δεδομένων του ερευνητικού προγράμματος Long Term Pavement Performance.

1.4. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

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

Το 2^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά την ανάλυση ερευνών από τη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την έναρξη και την εξέλιξη των αστοχιών, τον υπολογισμό του χρόνου ζωής οδοστρωμάτων, τη συντήρηση και την αποκατάσταση οδοστρωμάτων καθώς και την ανάλυση ερευνών που αφορούν τη μελέτη SPS-5 του προγράμματος Long Term Pavement Performance, η οποία αποτελεί και αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.

Το 3^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιγραφή της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιείται στη στατιστική επεξεργασία. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη αναφορά στο πρόγραμμα Long Term Pavement Performance και στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η μελέτη SPS-5 καθώς και η διαδικασία συλλογής των στοιχείων για τη δημιουργία του τελικού αρχείου.

Το **4^ο κεφάλαιο** περιέχει την παρουσίαση της επιλεγόμενης μεθοδολογίας για την ανάπτυξη των μοντέλων και τη στατιστική επεξεργασία. Για κάθε μοντέλο υπάρχει αναλυτική ερμηνεία και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Στο **5^ο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου και παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα. Επιπρόσθετα, παρατίθενται σχετικές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζεται και παρουσιάζεται η υπάρχουσα βιβλιογραφία που αφορά στα μοντέλα πρόβλεψης αστοχιών για οδοστρώματα. Τα μοντέλα αυτά κατά κύριο λόγο συσχετίζουν δείκτες κατάστασης οδοστρωμάτων όπως, για παράδειγμα, η έκταση μιας ρηγμάτωσης με ανεξάρτητες μεταβλητές όπως είναι η ηλικία του οδοστρώματος, η κυκλοφορία και οι κλιματολογικοί παράγοντες. Βασικά μεγέθη που αντικατοπτρίζουν την κατάσταση ενός οδοστρώματος είναι οι δείκτες αστοχίας οι οποίοι χωρίζονται σε δείκτες που αφορούν στη δομική κατάστασή του όπως είναι η εναπομένουσα διάρκεια ζωής σε διελεύσεις αξόνων και σε δείκτες που σχετίζονται με τη λειτουργικότητα και την εξυπηρετικότητα του οδοστρώματος όπως, για παράδειγμα, ο διεθνής δείκτης ομαλότητας IRI.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται εκτενής έρευνα σχετικά με το αντικείμενο της προτυποποίησης των αστοχιών οδοστρωμάτων χρησιμοποιώντας δεδομένα επιτόπου μετρήσεων. Παρακάτω παρατίθενται οι αρχικές έρευνες που έγιναν για το συγκεκριμένο αντικείμενο, έρευνες που αφορούν στην έναρξη και στην εξέλιξη των αστοχιών, έρευνες

για τον υπολογισμό του χρόνου ζωής του οδοστρώματος, έρευνες σχετικές με το θέμα της συντήρησης και της αποκατάστασης οδοστρωμάτων και τέλος έρευνες που αφορούν στη μελέτη SPS-5 του προγράμματος Long Term Pavement Performance, η οποία αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.2. Αρχικές έρευνες: Το οδικό πείραμα AASHO

Οι πρώτες προσπάθειες για τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης φθορών για οδοστρώματα χρησιμοποίησαν τη γραμμική παλινδρόμηση για την ανάπτυξη μαθηματικών συναρτήσεων που να προβλέπουν μια συγκεκριμένη αστοχία, απόκριση ή μείωση της λειτουργικότητας ενός οδοστρώματος ως συνάρτηση των φορτίσεων από την κυκλοφορία ή το χρόνο. Η πρώτη μορφή μιας τέτοιας συνάρτησης αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ανάλυσης που έγινε για το πείραμα AASHO (American Association of State Highway Officials) το 1962.

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε στο τέλος της δεκαετίας του '50 και είχε ως στόχο την δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης αστοχιών οδοστρωμάτων. Δοκιμές επιταχυνόμενης φόρτισης (Accelerated Loading Testing) έλαβαν χώρα σε μια τοποθεσία κοντά στην πόλη Ottawa της Πολιτείας Illinois η οποία και επελέγη γιατί το έδαφος στην περιοχή ήταν ομοιόμορφο και αντιπροσωπευτικό των εδαφών ενός μεγάλου αριθμού περιοχών της χώρας. Οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή της μελέτης θεωρήθηκαν επίσης αντιπροσωπευτικές αυτών που επικρατούσαν σε πολλές Πολιτείες των Ηνωμένων Πολιτειών. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για ένα μόνο είδος κλιματολογικών συνθηκών και για ένα υλικό υπόβασης. Επίσης, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των υπολοίπων στρώσεων διατηρήθηκαν σταθερά για όλα τα πειραματικά τμήματα και συνεπώς δεν ήταν δυνατό να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα σε ότι αφορά την επιρροή των ιδιοτήτων των διαφόρων υλικών των στρώσεων στην αντοχή ενός οδοστρώματος. Έτσι, διερευνήθηκε κυρίως η επιρροή του αριθμού των τυπικών αξονικών διελεύσεων. Η μαθηματική συνάρτηση που προέκυψε από την ανάλυση για το πείραμα AASHO είναι:

$$g_i = \left(\frac{ESA_i}{\rho} \right)^\beta$$

όπου:

g_t = φθορά τη χρονική στιγμή t ,

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

ρ = αριθμός τυπικών αξονικών διελεύσεων που απαιτείται για να αστοχήσει το οδόστρωμα,

β = σταθερά που αντιπροσωπεύει το ρυθμό αύξησης της φθοράς.

Οι παράμετροι ρ και β εκτιμώνται με ανάλυση παλινδρόμησης και διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο της υπό εξέταση αστοχίας. Η παραπάνω εξίσωση, έπειτα από την εφαρμογή της σε άλλες σχετικές έρευνες έδειξε ότι υπερεκτιμά την διάρκεια ζωής των άκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς και ότι παρουσιάζει σημαντικά λάθη στον υπολογισμό των συντελεστών των ανεξάρτητων μεταβλητών. Για τους λόγους αυτούς ακολούθησαν κι άλλες έρευνες στις οποίες έγινε προσπάθεια ανάπτυξης βελτιωμένων μοντέλων που θα μπορούσαν να εφαρμόζονται σε ένα μεγαλύτερο εύρος συνθηκών. Πολλές από αυτές τις έρευνες θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

2.3. Έρευνες για την έναρξη και εξέλιξη των αστοχιών

Μετά το οδικό πείραμα AASHO έγιναν προσπάθειες ανάπτυξης βελτιωμένων μοντέλων για την έναρξη και την εξέλιξη των αστοχιών σε οδοστρώματα. Η έρευνα ARE η οποία παρουσιάζεται στην εργασία των Butler et al. (1985) ανέπτυξε μοντέλα για την αστοχία των οδοστρωμάτων σε συνάρτηση με διάφορες ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι τύποι αστοχιών που προτυποποιήθηκαν στη συγκεκριμένη έρευνα ήταν η ρηγμάτωση, η αποκόλληση ασφαλτικού υλικού, η δημιουργία λακκουβών και η ομαλότητα. Δύο διαφορετικές ομάδες μοντέλων αναπτύχθηκαν για την έναρξη και εξέλιξη των αστοχιών και τα μοντέλα αυτά προβλέπουν την μεταβολή του βαθμού της αστοχίας για κάθε χρονική περίοδο.

Τα Highway and Design Models που παρουσιάζονται στην εργασία του Paterson (1987) προβλέπουν την έναρξη και την εξέλιξη διαφόρων τύπων αστοχιών όπως η ρηγμάτωση, αυλάκωση, δημιουργία λακούβων κτλ. Κάθε μοντέλο που αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη αστοχία περιλαμβάνει έναν αριθμό από ανεξάρτητες μεταβλητές, όπως ηλικία, κυκλοφοριακός φόρτος, παράμετροι σχεδιασμού και κλιματολογικοί παράγοντες. Μερικά

από τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε ο Paterson στην έρευνά του ήταν: ένα οδόστρωμα ξεκινά να ρηγματώνεται και να αποκολλάται το ασφαλικό υλικό με τυχαίο τρόπο (random manner) μετά από ορισμένα χρόνια λειτουργίας. Στη συνέχεια, οι ρηγματώσεις αυξάνουν σε μέγεθος και ένταση καταλήγοντας στη δημιουργία λακκουβών και άλλων επιφανειακών παραμορφώσεων.

Στην έρευνά τους, οι Madanat et al. (1995) έθεσαν το ζήτημα της εγκυρότητας των μοντέλων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία με το σκεπτικό ότι «πάσχουν» από μεροληψία επιλογής (selectivity bias) των οδοστρωμάτων που συνήθως αναλύονται. 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 μοντέλα στη βιβλιογραφία είναι απλά μοντέλα παλινδρόμησης που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας στοιχεία μετρήσεων αστοχιών οι οποίες ήδη βρίσκονται σε φάση έναρξης. Τα μοντέλα αυτά είναι στατιστικώς «εσφαλμένα» καθώς, όπως αναφέρθηκε, πάσχουν από μεροληψία επιλογής εξαιτίας της μη τυχαίας επιλογής των στοιχείων προς ανάλυση για την ανάπτυξη των μοντέλων.

Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκε μια δομημένη οικονομετρική προσέγγιση (structured econometric approach) για την δημιουργία μοντέλων έναρξης και εξέλιξης αστοχιών. Το μοντέλο έναρξης είναι «διακριτό», δηλαδή η εξαρτημένη μεταβλητή του μοντέλου παίρνει μόνο διακριτές τιμές, ενώ το μοντέλο εξέλιξης είναι συνεχές, δηλαδή η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχής. Στο «διακριτό» μοντέλο η εξαρτημένη μεταβλητή είναι δείκτης και παίρνει την τιμή 1 αν υπάρχει έναρξη αστοχίας και την τιμή 0 στην αντίθετη περίπτωση. Τα οδοστρώματα που είχαν την τιμή 1 συμπεριλαμβάνονταν στην ανάλυση για το μοντέλο εξέλιξης. Με αυτό τον τρόπο, όμως, καθίσταται σαφές ότι το συνεχές μοντέλο 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 μοντέλα έχουν τη γενική μορφή:

Μοντέλο έναρξης

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

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

όπου:

Z_i^* = μεταβλητή που εκφράζει την έναρξη της αστοχίας,

Z_i = μεταβλητή – δείκτης,

u = πίνακας των συντελεστών προς υπολογισμό,

w_i = πίνακας των ανεξάρτητων μεταβλητών,

u_i = όρος του τυχαίου σφάλματος.

Μοντέλο εξέλιξης

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

όπου:

Y_i = εξαρτημένη μεταβλητή που εκφράζει την έκταση της αστοχίας,

β = πίνακας των συντελεστών προς υπολογισμό,

X_i = πίνακας των ανεξάρτητων μεταβλητών,

ε_i = όρος του τυχαίου σφάλματος.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μεροληψίας επιλογής που –με βάση την υπόθεση των ερευνητών- δίνει προβληματικές τιμές για τους συντελεστές των μεταβλητών, τόσο στο πρότυπο έναρξης όσο και στο πρότυπο εξέλιξης, ακολουθήθηκε η διαδικασία κατά Heckman η οποία πραγματοποιείται σε δύο βήματα: Πρώτα υπολογίζονται οι συντελεστές u με το μοντέλο probit και τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας, 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, αλλά και πιο δύσκολη στην εφαρμογή, είναι η μέθοδος FIML (Full Information Maximum Likelihood), που υπολογίζει τους συντελεστές των δύο μοντέλων ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας όλα τα στοιχεία.

Τα παραπάνω εφαρμόστηκαν σε στοιχεία της Παγκόσμιας Τράπεζας και αφορούσαν σε αστοχίες οδοστρωμάτων από τη Βραζιλία μεταξύ του 1975 και του 1982. Οι ανεξάρτητες

μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο αριθμός δομικής αντοχής του οδοστρώματος, 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 των τροχών που περνούν ανά μονάδα αντοχής του οδοστρώματος. Πέρα από το ότι εξετάστηκαν όλα όσα ειπώθηκαν προηγουμένως, επιπλέον μετρήθηκε εκτενώς και ένα άλλο φαινόμενο που συναντάται συχνά σε συστήματα πολλαπλών εξισώσεων: το πρόβλημα των ενδογενών ανεξάρτητων μεταβλητών (endogeneity in explanatory variables). Στην εργασία αυτή, το πρόβλημα των ενδογενών μεταβλητών διορθώθηκε με τη βοήθεια της μεθόδου των “instrumental” μεταβλητών.

Επεκτείνοντας την παραπάνω έρευνα, οι Madanat και Shin (1998) εξέτασαν την ενδεχόμενη εμφάνιση μη παρατηρούμενης ετερογένειας (unobserved heterogeneity) στα μοντέλα, η οποία σχετίζεται με τη χρήση διαστρωματικών στοιχείων για τη δημιουργία των μοντέλων. Η μη παρατηρούμενη ετερογένεια εκφράζεται με τον όρο του τυχαίου σφάλματος u_i 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. Εάν δεν συνυπολογιστεί, θα οδηγήσει σε μεροληπτικές εκτιμήσεις των συντελεστών των μοντέλων. Και επειδή, όπως δείχθηκε κατά την ανάλυση των στοιχείων, ο όρος του τυχαίου σφάλματος u_i του μοντέλου έναρξης της ρηγμάτωσης σχετίζεται με τον όρο του τυχαίου σφάλματος ε_i του μοντέλου εξέλιξης, η επιρροή της ετερογένειας θα έχει έμμεσο αντίκτυπο και στο μοντέλο εξέλιξης της ρηγμάτωσης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με τη χρήση μοντέλων random effects και για το διακριτό αλλά και για το συνεχές μοντέλο.

Σε επόμενη εργασία τους, οι Shin και Madanat (2007) ασχολήθηκαν με το φαινόμενο της έναρξης των ρηγματώσεων στα οδοστρώματα. Παρατήρησαν ότι η χρήση ντετερμινιστικών μοντέλων για την περιγραφή αυτού του φαινομένου είναι προβληματική, ενώ ένα επιπλέον πρόβλημα δημιουργείται κατά τη συλλογή των στοιχείων. Μερικά τμήματα έχουν ρηγματωθεί πριν την έναρξη της έρευνας ενώ άλλα θα εμφανίσουν ρηγματώσεις μετά το πέρας της έρευνας (censoring). Στην έρευνα αυτή έγινε ανάλυση στοιχείων που είχαν συγκεντρωθεί από το οδικό πείραμα AASHO με τη χρήση στοχαστικών μοντέλων χρονικής διάρκειας (stochastic duration models). Τα μοντέλα χρονικής διάρκειας προσομοιώνουν καλά τη στοχαστική φύση του φαινομένου της έναρξης της ρηγμάτωσης αλλά και επιτρέπουν στα περικομμένα στοιχεία (censored data) να

ενσωματωθούν στη στατιστική εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Οι προβλέψεις των μοντέλων που προέκυψαν μέσω αυτής της ανάλυσης αποδείχθηκε ότι ήταν πιο ακριβής από αυτές που προέκυψαν από το αρχικό μοντέλο του πειράματος AASHO.

Πολλές έρευνες συγκεντρώθηκαν στην εξέταση της επίδρασης ενός συγκεκριμένου εξωτερικού παράγοντα στη φθορά του οδοστρώματος. Οι Kumara et al. (2004) ανέπτυξαν ένα μοντέλο βασισμένο στην αθροιστική τιμή των ισοδύναμων αξονικών φορτίων (ESAL) το οποίο προβλέπει την πιθανοτική κατανομή του βάθους των διαμήκων ρηγματώσεων σε τμήματα οδοστρωμάτων που βρίσκονται σε λειτουργία, ενώ οι Oh et al. (2007) χρησιμοποίησαν ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία για εκτιμήσουν την πιθανή καταστρεπτική επίδραση των υπέρβαρων οχημάτων στο οδόστρωμα.

Οι Puccinelli και Jackson (2007) ασχολήθηκαν με την επιρροή του παγετού στο οδόστρωμα. Ανέπτυξαν μοντέλα πρόβλεψης της συμπεριφοράς του οδοστρώματος για την εκτίμηση της ανεξάρτητης επιρροής των δύο ειδών έκθεσης στον παγετό (διείσδυση του παγετού στο οδόστρωμα και πολλαπλοί κύκλοι παγώματος-ξεπαγώματος) στην μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Για την δημιουργία μοντέλων για εύκαμπτα οδοστρώματα, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τη βάση δεδομένων του προγράμματος LTPP. Στην ανάλυση συμπεριλήφθηκαν ως ανεξάρτητες μεταβλητές στοιχεία που σχετίζονται με τον καιρό, την κυκλοφορία, τα είδη του οδοστρώματος και τις ιδιότητες του εδάφους και των υλικών και προέκυψαν μοντέλα για την πρόβλεψη των αλγαιατικών ρηγματώσεων, των ρηγματώσεων στο ίχνος του τροχού, την τροχοαυλάκωση και την ομαλότητα. Για τις αλγαιατικές και της διαμήκης ρηγματώσεις στο ίχνος του τροχού, αρχικά εφαρμόστηκε μια μέθοδος για την πρόβλεψη της ηλικίας στην οποία ξεκίνησε η φθορά χρησιμοποιώντας λογιστική (logistic) ανάλυση και εν συνεχεία, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης για την πρόβλεψη της εξέλιξης της αστοχίας με το χρόνο. Αναπτύχθηκαν καμπύλες συμπεριφοράς του οδοστρώματος για πέντε κλιματικές περιοχές, κάθε μία από τις οποίες χαρακτηριζόταν από κάποιο είδος/συνδυασμό έκθεσης σε παγετό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι προβλέψεις για τη ρηγμάτωση ήταν περίπου ίδιες για τις περιοχές που είχαν μεσαίο επίπεδο παγετού με αυτές που δεν είχαν καθόλου παγετό αλλά ήταν πολύ υψηλές για την περιοχή που χαρακτηριζόταν από σοβαρή διείσδυση παγετού στο οδόστρωμα.

Μία έρευνα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος σχετικά και με το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκε από τους Ker et al. (2008). Οι ερευνητές ασχολήθηκαν

με τον φαινόμενο των αλιγοτορικών ρηγματώσεων ή αλλιώς ρηγματώσεων κόπωσης (όπως τις ονομάζουν στην έρευνά τους). Αρχικά, διερεύνησαν την ορθότητα των ήδη υπαρχόντων μοντέλων και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι πάσχουν στο θέμα των προβλέψεων και χρειάζονται σοβαρές βελτιώσεις. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας στοιχεία από τη βάση δεδομένων του προγράμματος LTPP που αφορούσαν εύκαμπτα και ημι-άκαμπτα οδοστρώματα πραγματοποίησαν μια ανάλυση με μοντέλο παλινδρόμησης όπου εξαρτημένη μεταβλητή είναι ο λογάριθμος του ποσοστού του δοκιμαστικά τμήματος που είναι ρηγματωμένο και γίνεται η υπόθεση ότι ακολουθεί την κατανομή Poisson. Οι επεξηγηματικές μεταβλητές του τελικού μοντέλου ήταν η ηλικία του οδοστρώματος, ο ετήσιος αριθμός φορτίων ισοδύναμου μονού τροχού (ESAL), η συνολική ετήσια τιμή της βροχόπτωσης, η μέση ετήσια θερμοκρασία, η κρίσιμη τιμή της εφελκυστικής αντοχής του ασφαλτομίγματος και οι κύκλοι freeze-thaw (πάγωμα-ξεπάγωμα). Τέλος, δημιουργήθηκαν 4 ξεχωριστά μοντέλα ανάλογα με την κλιματική ζώνη που ανήκει το κάθε δοκιμαστικό τμήμα.

2.4. Έρευνες για τον υπολογισμό του χρόνου ζωής του οδοστρώματος

Ο υπολογισμός του χρόνου στον οποίο η κατάσταση του οδοστρώματος πέφτει κάτω από ένα ανεκτό επίπεδο είναι ένα ακόμη θέμα το οποίο έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον των ερευνητών. Πρώτοι, οι Paterson και Chesher (1986) χρησιμοποίησαν μοντέλα χρονικής διάρκειας για να εξηγήσουν τη μεταβλητότητα του χρόνου που επέρχεται η αστοχία σε ένα οδόστρωμα. Καθόρισαν ότι ο μηχανισμός αστοχίας ακολουθεί την κατανομή Weibull και εφάρμοσαν τη μέθοδό τους σε μια βάση δεδομένων από τη Βραζιλία. Σε μία ακόμη ευρέως αναγνωρισμένη έρευνα, οι Prozzi και Madanat (2000) χρησιμοποίησαν πιθανοτικές τεχνικές χρονικής διάρκειας για την δημιουργία μοντέλων που θα προβλέπουν το χρόνο που θα αστοχήσει ένα οδόστρωμα. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση προέρχονταν από το οδικό πείραμα AASHO. Ένα παραμετρικό πρότυπο τύπου “hazard” (κατανομή Weibull) χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή τη μελέτη. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε είχε δύο βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το αρχικό μοντέλο του πειράματος AASHO. Πρώτον, βασίζεται σε έγκυρη στατιστική ανάλυση υψηλών προδιαγραφών και συνεπώς είναι απαλλαγμένο από υποκειμενικές επιλογές και, δεύτερον, μετά από τη διαδικασία επαλήθευσης που ακολούθησε της στατιστικής επεξεργασίας, το

νέο πρότυπο προέβλεψε χρόνους αστοχίας που βρίσκονται πολύ πιο κοντά στους πραγματικούς από ότι προέβλεψε το αρχικό μοντέλο του πειράματος AASHO.

Σε μία ακόμη έρευνα για το χρόνο ζωής του οδοστρώματος, οι Loizos και Karlaftis (2005) δημιούργησαν μοντέλα πρόβλεψης επιφανειακών φθορών για το χρόνο αστοχίας του οδοστρώματος (έναρξη ρηγμάτωσης στην επιφάνεια εύκαμπτων και ημι-άκαμπτων οδοστρωμάτων) χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων του PARIS (Performance Analysis for Road Infrastructure) η οποία περιέχει στοιχεία που έχουν συλλεχθεί από 15 Ευρωπαϊκές χώρες και με τη χρήση στοχαστικών προτύπων χρονικής διάρκειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως, όπως ήταν αναμενόμενο, κατασκευαστικοί, κλιματικοί και κυκλοφοριακοί παράγοντες επηρεάζουν την φθορά του οδοστρώματος και ότι η λογαριθμοκανονική συνάρτηση περιγράφει καλύτερα το μηχανισμό εμφάνισης της ρηγμάτωσης στα οδοστρώματα σε αντίθεση με τα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών.

Χρησιμοποιώντας στοιχεία από τη βάση δεδομένων της διαχείρισης των οδοστρωμάτων της Πολιτείας Kentucky, οι Wang και Allen (2008) διερεύνησαν τη διαδικασία επανεπίστρωσης του οδοστρώματος με ασφαλτόμιγμα για λόγους συντήρησης και δημιούργησαν μοντέλα πρόβλεψης για τη συμπεριφορά της. Δύο είδη μοντέλων χρονικής διάρκειας προτάθηκαν για την πρόβλεψη του κύκλου ζωής της επίστρωσης με ασφαλτόμιγμα. Το πρώτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του χρόνου ζωής της επίστρωσης μέχρι να υπάρξει ανάγκη μία νέα διαδικασία επανεπίστρωσης ενώ το δεύτερο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του χρονικού παραθύρου στη διάρκεια του οποίου η νέα επίστρωση πρέπει να τοποθετηθεί για να αποφευχθεί η γρήγορη φθορά του οδοστρώματος.

2.5. Έρευνες που αφορούν τη συντήρηση των οδοστρωμάτων

Η συντήρηση και αποκατάσταση των οδοστρωμάτων είναι ένα θέμα το οποίο έχει απασχολήσει την έρευνα που γίνεται για τα οδοστρώματα λόγω της πολυπλοκότητάς του αλλά και της ιδιαίτερης σημασίας του για το χρόνο ζωής της οδικών έργων υποδομής. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες σχετικά πρόσφατες έρευνες που ασχολήθηκαν με το συγκεκριμένο θέμα.

Οι Labi και Sinha (2003) διεξήγαγαν μία έρευνα για τη βραχυπρόθεσμη αποτελεσματικότητα της συντήρησης οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων. Ως μέτρο αυτής της αποτελεσματικότητας χρησιμοποιήθηκαν το επίπεδο μείωσης των επιφανειακών φθορών, το ποσοστό μείωσης των επιφανειακών φθορών και η βελτίωση της ομαλότητας αμέσως μετά τη συντήρηση. Οι ερευνητές τονίζουν ότι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση μέχρι την διεξαγωγή ελέγχου και μετρήσεων για την επιφανειακή κατάσταση του οδοστρώματος είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την εκτίμηση της βραχυπρόθεσμης αποτελεσματικότητας της μεθόδου συντήρησης. Επιπλέον της ανάλυσης για το κάθε μέτρο εκτίμησης της αποτελεσματικότητας, δημιουργήθηκαν και σχέσεις ανά ζεύγος των μέτρων αυτών. Τέλος, η μέθοδος επιβεβαιώθηκε χρησιμοποιώντας στοιχεία από την Πολιτεία Indiana.

Στην έρευνά του, ο Abaza (2004) παρουσίασε ένα ντετερμινιστικό μοντέλο πρόβλεψης της συμπεριφοράς εύκαμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιώντας τη βασική εξίσωση από το οδικό πείραμα AASHO. Για τον προσδιορισμό του παράγοντα της εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης PSI (Present Serviceability Index) ο οποίος είναι συνδεδεμένος με την αθροιστική τιμή των αξονικών φορτίων μέσω μιας καμπύλης συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Το ντετερμινιστικό μοντέλο που παρουσιάζεται σε αυτή την έρευνα δημιουργεί μια μοναδική καμπύλη συμπεριφοράς για κάθε οδόστρωμα. Αυτή η καμπύλη μπορεί να χρησιμεύσει ακόμη και στον υπολογισμό του πάχους της επίστρωσης με ασφαλτόμιγμα κατά την αποκατάσταση του οδοστρώματος, όπως εξηγείται αναλυτικά από τον ερευνητή.

Μία ακόμη έρευνα για την επιφανειακή συντήρηση στα οδοστρώματα είναι αυτή του Martin (2010) στην οποία χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία που σχετίζονται με τη φθορά οδοστρωμάτων από δοκιμές επιταχυνόμενης φόρτισης. Σκοπός της έρευνας ήταν η εκτίμηση παραγόντων συμπεριφοράς του οδοστρώματος για την τροχοαυλάκωση και την φθορά της κατά μήκος ομαλότητας για διάφορες διαδικασίες επιφανειακής συντήρησης. Τα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιοριστεί το όριο της αργής εξέλιξης της φθοράς πριν αρχίσει η γρήγορη φθορά του οδοστρώματος καθώς και για τη σύγκριση των διάφορων τεχνικών συντήρησης.

2.6. Έρευνες με στοιχεία από τη μελέτη SPS-5 του προγράμματος LTPP

Πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει τη βάση δεδομένων του προγράμματος LTPP αλλά για να αναλύσουν το θέμα της εκτίμησης της αποτελεσματικότητας των τεχνικών αποκατάστασης στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Η μελέτη SPS-5 (Αποκατάσταση εύκαμπτων οδοστρωμάτων) του LTPP συνδυάζει αυτά τα δύο θέματα. Σε αρκετές έρευνες (Daleiden et al. 1995, Perera και Kohn 1999) αναλύθηκαν στοιχεία από τη μελέτη SPS-5 όταν όμως το πείραμα ήταν στα αρχικά του στάδια.

Το 2002 οι Hall et al. χρησιμοποιώντας στοιχεία από τις μελέτες SPS-5 και GPS-6 εξέτασαν τη συμπεριφορά των διαφόρων διαδικασιών συντήρησης και συμπέραναν τα εξής: μακροπρόθεσμα, η αποκατάσταση του οδοστρώματος με 2 ίντσες επίστρωση ασφαλτομίγματος είχε πολύ καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την αποκατάσταση με 5 ίντσες σε ότι αφορά την κατά μήκος ομαλότητα, την τροχοαυλάκωση και τις αλγαιακές ρηγματώσεις. Επίσης βρήκαν ότι οι τιμές του δείκτη ομαλότητας IRI (International Roughness Index) πριν τη συντήρηση, η ηλικία του οδοστρώματος και η μέση ετήσια θερμοκρασία έχουν σημαντική επιρροή στην μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του οδοστρώματος μετά τη συντήρηση. Από την άλλη πλευρά, η μελέτη των Hall et al., η οποία βασίστηκε στα στοιχεία τα οποία ήταν τότε διαθέσιμα (η ηλικία των περιοχών μελέτης του SPS-5 ήταν τότε το πολύ 10 ετών), δεν βρήκε σημαντική διαφορά στην μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητα του εργασιών συντήρησης μεταξύ των τμημάτων που είχε τοποθετηθεί επίστρωση με ανακυκλωμένο ασφαλτόμιγμα και αυτών που είχε τοποθετηθεί νέο ασφαλτόμιγμα. Επίσης, δεν αποδείχτηκε ότι υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των τμημάτων που είχαν δεχτεί έντονη προετοιμασία της αρχική επιφάνειας η οποία περιλάμβανε και φρεζάρισμα και των τμημάτων που είχαν δεχτεί ελαφριά προετοιμασία.

Μετά την μελέτη των Hall et al. η επόμενη μελέτη που ασχολήθηκε με τα στοιχεία του SPS-5 είναι αυτή των Ahmed et al. (2010). Οι ερευνητές ασχολήθηκαν με την αξιολόγηση των διαδικασιών συντήρησης και αποκατάστασης που εφαρμόστηκαν στις περιοχές μελέτης του SPS-5 που βρίσκονταν στις Πολιτείες Arizona, California, Colorado, Montana και Alberta (πέντε από τις συνολικά 18 Πολιτείες του πειράματος). Ως δείκτης της αποτελεσματικότητας της συντήρησης επιλέχθηκε ο δείκτης ομαλότητας IRI. Η μέτρηση της αποτελεσματικότητας έγινε με βραχυπρόθεσμη ανάλυση μετρώντας την βελτίωση της ομαλότητας αμέσως μετά τη συντήρηση αλλά και με μακροπρόθεσμη ανάλυση

δημιουργώντας καμπύλες συμπεριφοράς του οδοστρώματος με το χρόνο ζωής του. Όπως και οι Hall et al. κατέληξαν στο ότι η κατάσταση της κατά μήκος ομαλότητας πριν τη συντήρηση παίζει σημαντικό ρόλο μακροπρόθεσμα αλλά και στο ότι το είδος του μίγματος που χρησιμοποιείται στην επίστρωση δεν διαφοροποιεί σημαντικά τη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Αντίθετα όμως με τους Hall et al., συμπέραναν ότι η το είδος της προετοιμασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος επηρεάζει το χρόνο ζωής του και συγκεκριμένα ότι η έντονη προετοιμασία αυξάνει το χρόνο ζωής κατά 25%.

2.7. Συμπεράσματα

Κλείνοντας τη βιβλιογραφική ανασκόπηση επισημαίνονται τα παρακάτω: Ένα από τα κύρια στοιχεία που βοηθούν στην δημιουργία αξιόπιστων προτύπων είναι η εγκυρότητα και η 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 ώστε τα παραγόμενα μοντέλα πρόβλεψης αστοχιών να βρίσκουν εφαρμογή και σε άλλες περιοχές. Μια βάση δεδομένων πλούσια τόσο σε πλήθος στοιχείων όσο και σε γκάμα πληροφοριών, με σωστή επεξεργασία μπορεί να δώσει αποτελέσματα που μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν σε άλλες περιοχές απλά εισάγοντας στα μοντέλα τις υπάρχουσες συνθήκες, κυκλοφοριακές, κλιματολογικές, εδαφικές κτλ. Το πρόβλημα που δημιουργήθηκε σε κάποιες εργασίες όπως και στο οδικό πείραμα AASHO είναι ότι τα μοντέλα, εφόσον δημιουργούνται με στοιχεία συγκεκριμένων περιοχών, αδυνατούν να καλύψουν τις ανάγκες για πρόβλεψη αστοχιών μιας διαφορετικής περιοχής/χώρας.

Σε ό,τι αφορά στην επεξεργασία και στην τελική επιλογή των επεξηγηματικών μεταβλητών, στατιστικά σημαντικές συνήθως είναι οι κατακρημνίσεις, οι χαμηλές θερμοκρασίες, η κυκλοφορία, τα πάχη των στρώσεων και η ηλικία του οδοστρώματος. Τουλάχιστον θεωρητικά, όσο περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές υπάρχουν σε ένα μοντέλο, τόσο πιο αξιόπιστο μπορεί να είναι. Βέβαια, μοντέλα με λιγότερες ανεξάρτητες μεταβλητές είναι πιο πρακτικά γιατί χρειάζονται λιγότερες πληροφορίες για να δώσουν αποτελέσματα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο έρευνας την ανάλυση στοιχείων από τη βάση δεδομένων του προγράμματος LTPP. Αυτή η βάση δεδομένων προσφέρει μια τεράστια γκάμα πληροφοριών για οδοστρώματα που έχουν κατασκευαστεί σε διάφορες περιοχές της Βορείου Αμερικής και θεωρείται ιδανική για τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης φθορών που θα έχουν τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τη μελέτη SPS-5 (Specific Pavement Study – 5) που ασχολείται με τη συντήρηση και αποκατάσταση εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Έχουν περάσει σχεδόν 10 χρόνια από την τελευταία φορά που πραγματοποιήθηκε ανάλυση στοιχείων της μελέτης SPS-5 (Hall et al.) για το θέμα των ρηγματώσεων και αυτή τη στιγμή υπάρχουν πολύ περισσότερα στοιχεία καταγραφών φθορών διαθέσιμα σε σχέση με τότε. Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί πληρέστερη ανάλυση πάνω στο πρόγραμμα LTPP, στη βάση δεδομένων και στα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1. Το ερευνητικό πρόγραμμα LTPP

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, το Transportation Research Board (TRB) του Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας (National Research Council) στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, υπό την αιγίδα της FHWA (Federal Highway Administration) και με τη συνεργασία του AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) ανέλαβε την έρευνα “Strategic Transportation Research Study” για τη φθορά των εθνικών έργων υποδομής. Η έρευνα υπέδειξε ότι ένα στρατηγικό πρόγραμμα είναι απαραίτητο να ξεκινήσει και να συγκεντρώσει την έρευνα και τις δραστηριότητες που διεξάγονται σχετικά με την ανάπτυξη και βελτίωση των οδικών υποδομών στις ΗΠΑ. Έτσι, δημιουργήθηκε το Strategic Highway Research Program (SHRP) το οποίο θα περιλάμβανε έξι περιοχές έρευνας, μία από τις οποίες αποτέλεσε και το πρόγραμμα Long Term Pavement Performance (LTPP). Το Μάιο του 1986 δημοσιεύτηκαν τα αναλυτικά σχέδια του στρατηγικού προγράμματος σε μία έκθεση του TRB με τίτλο ‘Strategic Highway Research Program – Research Plans’.

Το πρόγραμμα LTPP σχεδιάστηκε για να συλλέξει ένα μεγάλο εύρος πληροφοριών για τις ανάγκες των οδοστρωμάτων. Η στρατηγική που εφαρμόστηκε σε αυτό το πρόγραμμα είναι μια σημαντική στροφή από την παραδοσιακή λογική της έρευνας στα οδοστρώματα. Συνήθως, η έρευνα που αφορούσε στην επίδοση των οδοστρωμάτων διαιρούνταν σε συγκεκριμένους θεματικούς στόχους περιορισμένης διάρκειας, ξεκινούσε με την συλλογή των δεδομένων και τελείωνε με συστάσεις και υποδείξεις βασισμένες στην ανάλυση των δεδομένων. Για να ξεπεράσει την πρόκληση αυτών των βραχυπρόθεσμων προσπαθειών, το πρόγραμμα LTPP εδραιώθηκε ως μια μακροπρόθεσμη εθνική προσπάθεια. Η συλλογή δεδομένων διεξάγεται πριν δημιουργηθεί η ανάγκη να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα αυτά για τους σκοπούς κάποιας ανάλυσης. Στα πλαίσια του προγράμματος αυτού αναπτύχθηκε μία βάση δεδομένων προσπελάσιμη από το κοινό με στόχο της αξιολόγησης της επίδοσης των οδοστρωμάτων μέσα από αναλύσεις και έρευνα που διεξάγεται κυρίως από ιδιώτες.

3.2. Στόχοι και προοπτική του προγράμματος LTPP

Ο αντικειμενικός σκοπός του προγράμματος LTPP είναι η εκτίμηση της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς οδοστρωμάτων που υφίστανται καταπόνηση από διάφορες φορτίσεις και κλιματολογικές συνθήκες στη διάρκεια μιας περιόδου 20 ετών. Οι επιμέρους στόχοι του εν λόγω προγράμματος καθορίστηκαν ως εξής:

1. Αξιολόγηση των μεθόδων σχεδιασμού που ήδη υπάρχουν,
2. Ανάπτυξη βελτιωμένης μεθοδολογίας και στρατηγικής σχεδιασμού για την αποκατάσταση των υφιστάμενων οδοστρωμάτων,
3. Ανάπτυξη βελτιωμένων στατιστικών μοντέλων για το σχεδιασμό νέων ή ανακατασκευασμένων οδοστρωμάτων,
4. Καθορισμός των επιδράσεων: (α) της φόρτισης, (β) του περιβάλλοντος, (γ) των ιδιοτήτων των υλικών, (δ) της ποιότητας της κατασκευής, και (ε) της συντήρησης στην καταπόνηση και τη συμπεριφορά του οδοστρώματος,
5. Καθορισμός της επίδρασης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του σχεδιασμού στη συμπεριφορά οδοστρωμάτων,
6. Εδραίωση μιας εθνικής μακροπρόθεσμης βάσης δεδομένων για οδοστρώματα που θα εξυπηρετεί τους στόχους του SHRP και μελλοντικές ανάγκες.

Το πρόγραμμα LTPP είναι μια έρευνα της συμπεριφοράς τμημάτων εν λειτουργία (in-service) οδοστρωμάτων. Αυτά τα τμήματα κατασκευάστηκαν με προδιαγραφές της κρατικής υπηρεσίας οδικών αρτηριών (highway agency specifications) και υποβλήθηκαν σε πραγματικές (real-time) φορτίσεις κυκλοφορίας.

3.3. Χαρακτηρισμός δοκιμαστικών τμημάτων του προγράμματος LTPP

Τα τμήματα των οδοστρωμάτων που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα LTPP ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: “General Pavement Studies” (GPS) και “Specific Pavement Studies” (SPS). Η κατηγορία GPS περιλαμβάνει μία σειρά ερευνών σε 800 δοκιμαστικά τμήματα (test sections) σε εν λειτουργία οδοστρώματα στις Ηνωμένες Πολιτείες και στον Καναδά. Η κατηγορία SPS αποτελείται από ειδικές μελέτες σε συγκεκριμένες μεταβλητές όπως οι διαδικασίες συντήρησης και οι εργασίες αποκατάστασης. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών κατηγοριών είναι ότι τα δοκιμαστικά τμήματα που υπάγονται στην GPS υπήρχαν από την αρχή του προγράμματος LTPP, ενώ οι μελέτες SPS αναφέρονται σε χώρους όπου κατασκευάζονται πολλά δοκιμαστικά τμήματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά το καθένα για τους σκοπούς της μελέτης.

Εν συνεχεία, τα δοκιμαστικά τμήματα υφίστανται περαιτέρω διαχωρισμό ανάλογα με κάποιους σημαντικούς παράγοντες που θεωρείται ότι έχουν επίδραση στην συμπεριφορά του οδοστρώματος. Τέτοιοι παράγοντες μπορεί να είναι τα πάχη των στρώσεων, το είδος της βάσης, το ποσοστό του οπλισμού κτλ. Έτσι, κάθε κατηγορία GPS ή SPS αποτελείται από διαφορετικές μελέτες. Η παρούσα εργασία ασχολείται με μία από τις μελέτες της κατηγορίας SPS και γίνεται μία πιο εκτενής αναφορά στη συγκεκριμένη κατηγορία.

3.4. Η κατηγορία “Specific Pavement Studies”

Το πρόγραμμα SPS περιλαμβάνει μελέτες μακροπρόθεσμου χαρακτήρα και ασχολείται με τμήματα που είναι ειδικά κατασκευασμένα και έχουν υποστεί συντήρηση ή αποκατάσταση δημιουργώντας έτσι μια οργανωμένη σειρά πειραματικού σχεδιασμού και κατασκευής. Ο αντικειμενικός σκοπός του προγράμματος SPS είναι να παρέχει μία πιο ολοκληρωμένη βάση δεδομένων για να επεκτείνει και να βελτιώσει τα αποτελέσματα από τις μελέτες της κατηγορίας GPS. Στην κατηγορία SPS περιλαμβάνονται εννέα μελέτες χωρισμένες σε

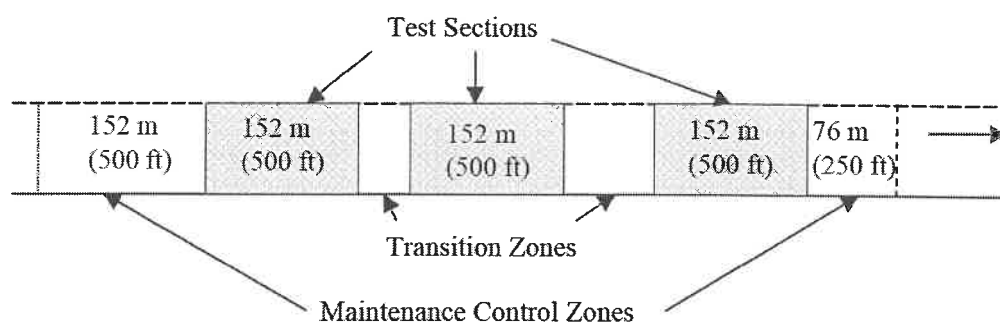
πέντε κατηγορίες όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.1. Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας βασίζεται στην μελέτη SPS-5.

Πίνακας 3.1. Μελέτες του προγράμματος SPS ανά κατηγορία (Πηγή: LTPP, 2009)

Κατηγορία	Μελέτη	Τίτλος
Δομικοί Παράγοντες (Structural Factors)	SPS-1	Στρατηγική Μελέτη Δομικών Παραγόντων για Εύκαμπτα Οδ/τα (Strategic Study of Structural Factors for Flexible Pavements)
	SPS-2	Στρατηγική Μελέτη Δομικών Παραγόντων για Δύσκαμπτα Οδ/τα (Strategic Study of Structural Factors for Rigid Pavements)
Συντήρηση (Maintenance)	SPS-3	Αποτελεσματικότητα της Προληπτικής Συντήρησης των Εύκαμπτων Οδ/των (Preventive Maintenance Effectiveness of Flexible Pavements)
	SPS-4	Αποτελεσματικότητα της Προληπτικής Συντήρησης των Δύσκαμπτων Οδ/των (Preventive Maintenance Effectiveness of Rigid Pavements)
Αποκατάσταση (Rehabilitation)	SPS-5	Αποκατάσταση Εύκαμπτων^a Οδοστρωμάτων (Rehabilitation of Asphalt Concrete Pavements)
	SPS-6	Αποκατάσταση Οδ/των από Σκυρόδεμα Κατασκευασμένα με Αρμούς (Rehabilitation of Jointed Portland Cement Concrete Pavements)
	SPS-7	Επιστρώσεις από Σκυρόδεμα Συνενωμένες με το Οδ/μα από Σκυρόδεμα (Bonded Portland Cement Concrete Overlays of Concrete Pavements)
Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις (Environmental Effects)	SPS-8	Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων στην Έλλειψη Βαρέων Φορτίων (Study of Environmental Effects in the Absence of Heavy Loads)
Προδιαγραφές Αδρανών του Ασφαλτομίγματος (Asphalt Aggregate Mixture Specifications)	SPS-9P	Επικύρωση και Βελτίωση των Προδιαγραφών της Ασφάλτου και Διαδικασιών Σχεδιασμού του Μίγματος της Έρευνας "Superpave" (Validation and Refinements of Superpave Asphalt Specifications and Mix Design Process)
	SPS-9A	Η Έρευνα "Superpave" για την Ασφαλτο και τα Τροποποιητικά (Superpave Asphalt Binder Study)

α. Σύμφωνα με την απάντηση που δόθηκε σε διευκρινιστική ερώτηση που έγινε στους υπεύθυνους της βάσης δεδομένων, τα τμήματα που ανήκουν στην μελέτη SPS-5 αποτελούνται από εύκαμπτα οδοστρώματα

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διάταξη των δοκιμαστικών τμημάτων του προγράμματος SPS. Κάθε δοκιμαστικό τμήμα έχει μήκος 152m (500ft) και ακολουθείται από ένα τμήμα μήκους 15.2m (50ft) που χρησιμοποιείται για δειγματοληψίες υλικών. Στην αρχή και στο τέλος κάθε ομάδας δοκιμαστικών τμημάτων υπάρχουν τμήματα που ονομάζονται ζώνες ελεγχόμενης συντήρησης (maintenance control zones) και έχουν ξεχωριστή σημασία για κάθε μελέτη του SPS.



Σχήμα 3.1. Γενική διάταξη τμημάτων του προγράμματος SPS (Πηγή: LTPP, 2009)

3.5. Η μελέτη SPS-5: Αποκατάσταση Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων

Η έρευνα για την αποκατάσταση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων έχει στόχο να εξετάσει τη συμπεριφορά και την αποτελεσματικότητα οκτώ διαφορετικών διαδικασιών αποκατάστασης και συντήρησης που εφαρμόζονται σε υφιστάμενα εύκαμπτα οδοστρώματα. Κάθε διαδικασία αποκατάστασης προκύπτει από το συνδυασμό τριών τεχνικών που σχετίζονται με την προετοιμασία της αρχικής επιφάνειας του οδοστρώματος, το πάχος της επίστρωσης που τοποθετείται πάνω από το υπάρχων οδόστρωμα και τη χρήση ανακυκλωμένης ή μη-ανακυκλωμένης ασφάλτου στο μίγμα της επίστρωσης. Η μελέτη SPS-5 απαρτίζεται από δοκιμαστικές περιοχές (test sites) σε 18 σημεία σε Ηνωμένες Πολιτείες και Καναδά όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Κάθε δοκιμαστική περιοχή έχει εννέα δοκιμαστικά τμήματα (test sections) τα οκτώ από τα οποία υφίστανται μια διαδικασία αποκατάστασης ενώ το ένα είναι το τμήμα ελέγχου το οποίο δεν λαμβάνει αποκατάσταση παρά μόνο κάποια συντήρηση ρουτίνας (όπως σφράγισμα ρωγμών, κλείσιμο αυλακώσεων).



Σχήμα 3.2. Δοκιμαστικές περιοχές της μελέτης SPS-5 (Πηγή: Hall et al. 2002)

3.6. Η βάση δεδομένων του προγράμματος LTPP

Η βάση δεδομένων του προγράμματος LTPP σχεδιάστηκε για την αποθήκευση της πλειοψηφίας των στοιχείων που συλλέγονται στα πλαίσια του προγράμματος με στόχο την εύκολη διαχείριση και χρήση των στοιχείων. Πρόσφατα, για την τελευταία έκδοση της βάσης δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η Microsoft Access 2000. Στο σύνολό της η βάση αποτελείται από ξεχωριστούς πίνακες δεδομένων οι οποίοι όμως συνδέονται μεταξύ τους. Σε κάθε πίνακα, κάθε σειρά δεδομένων αναγνωρίζεται με μοναδικό τρόπο από τις τιμές στην στήλη ή στις στήλες που αποτελούν το πρωτεύων κλειδί.

Σήμερα, στη βάση δεδομένων υπάρχουν αποθηκευμένα περισσότερα από 6,000 διαφορετικά «είδη» στοιχείων (μεταβλητές) σε πάνω από 400 πίνακες. Αυτό βέβαια κάνει το χειρισμό ιδιαίτερα δύσκολο αφού χρειάζονται γνώσεις και εμπειρία στη δομή της βάσης, στους κωδικούς που αναφέρονται σε διάφορα στοιχεία και στις σχέσεις μεταξύ των πινάκων. Στην προσπάθεια να γίνει η βάση δεδομένων πιο φιλική προς τους χρήστες δημιουργήθηκε ένα εργαλείο το οποίο ονομάζεται “DataPave”. Το DataPave δημιουργήθηκε και διατίθεται ελεύθερα στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση www.LTPP-Products.com. Σκοπός της δημιουργίας αυτού του εργαλείου είναι η παροχή μιας εύκολης και φιλικής εφαρμογής στους χρήστες της βάσης δεδομένων με την οποία θα μπορούν να εξερευνήσουν, να εξάγουν και να οργανώσουν τα δεδομένα, χρησιμοποιώντας παράλληλα

την πιο τελευταία έκδοση της βάσης δεδομένων. Περισσότερες πληροφορίες για το χειρισμό του DataPave υπάρχουν στην ιστοσελίδα που δόθηκε παραπάνω.

Η βάση δεδομένων είναι οργανωμένη σε ενότητες (modules) οι οποίες περιέχουν ομάδες πινάκων παρόμοιου θεματικού περιεχομένου. Παρακάτω δίνονται και περιγράφονται συνοπτικά οι 13 ενότητες:

Administration: Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει πίνακες σχετικούς με τη δομή της βάσης και θα υπάρξει περαιτέρω ανάλυση σε επόμενη παράγραφο.

Automated Weather Station: Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί από το πρόγραμμα LTPP από αυτοματοποιημένους μετεωρολογικούς σταθμούς που είναι εγκατεστημένοι σε κάποιες περιοχές μελέτης του προγράμματος SPS.

Climate: Για αυτή την ενότητα, συγκεντρώθηκαν δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς εκτός των δοκιμαστικών περιοχών αλλά σε μικρή απόσταση από αυτές. Παράλληλα έγινε στατιστική εκτίμηση για τις περιοχές μελέτης από τα παραπάνω δεδομένα και έτσι προέκυψαν στοιχεία τα οποία στη βάση δεδομένων θεωρούνται ως δεδομένα από «εικονικούς μετεωρολογικούς σταθμούς» (virtual weather stations).

Dynamic Load Response: Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει στοιχεία από όργανα που μετράνε την αντίδραση του οδοστρώματος στις δυναμικές φορτίσεις εγκατεστημένα σε περιοχές μελέτης του προγράμματος SPS στις Πολιτείες North Carolina και Ohio.

Ground Penetrating Radar: Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει τα αποτελέσματα από μετρήσεις που έγιναν με ραντάρ διείσδυσης στο έδαφος για τη μέτρηση του πάχους των στρώσεων του οδοστρώματος σε κάποιες περιοχές μελέτης του προγράμματος SPS.

Inventory: Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει λεπτομερή στοιχεία τα δοκιμαστικά τμήματα των προγραμμάτων GPS και SPS. Οι πίνακες αυτής της ενότητας περιέχουν πληροφορίες όπως η τοποθεσία και η δομή των δοκιμαστικών τμημάτων η οποίες έχουν δοθεί από την αντίστοιχη Πολιτεία ή το αρμόδιο διοικητικό διαμέρισμα. Επειδή αυτά τα στοιχεία έχουν προέλθει από το αρχείο των αρμόδιων κρατικών υπηρεσιών και όχι απαραίτητα από επί τόπου μετρήσεις, δεν θεωρούνται ιδιαίτερα έμπιστα έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση.

Maintenance: Αυτή η ενότητα περιέχει πληροφορίες για τις διαδικασίες συντήρησης που εφαρμόστηκαν στα δοκιμαστικά τμήματα.

Monitoring: Αυτή η ενότητα περιέχει δεδομένα που προέρχονται από τον έλεγχο και την παρακολούθηση των δοκιμαστικών τμημάτων και είναι η μεγαλύτερη ενότητα της βάσης δεδομένων του προγράμματος LTPP.

Rehabilitation: Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει πληροφορίες για τις διαδικασίες αποκατάστασης που εφαρμόστηκαν στα δοκιμαστικά τμήματα.

Seasonal Monitoring Program: Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει συγκεκριμένα στοιχεία για τη μελέτη Seasonal Monitoring Program (SMP) η οποία έχει στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης του κλίματος και των καιρικών συνθηκών στο οδόστρωμα.

Traffic: Στην ενότητα αυτή βρίσκονται όλα τα στοιχεία που έχουν να κάνουν με την κυκλοφορία, όπως κυκλοφοριακοί φόρτοι, κατηγορίες οχημάτων κτλ.

Test: Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει στοιχεία από επί τόπου μετρήσεις ή εργαστηριακές δοκιμές υλικών από τα δοκιμαστικά τμήματα.

3.6.1. Η ενότητα “Administration”

Η ενότητα που σχετίζεται με τη διαχείριση και τη διάταξη της βάσης δεδομένων υπάρχει στη βάση ως ένα αρχείο της Microsoft Access με το όνομα “Administration” και περιέχει μέσα τους πίνακες EXPERIMENT_SECTION (θα αναλυθεί παρακάτω), LTPPDD (λεξικό για τη σημασία των στοιχείων σε κάθε πίνακα της βάσης), LTPPTD (περιέχει περιγραφή και γενικές πληροφορίες για κάθε πίνακα της βάσης), CODES και CODETYPES (περιγράφουν τη σημασία των κωδικοποιημένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στη βάση), COMMENTS_GENERAL (πίνακας γενικών σχολίων για τα δοκιμαστικά τμήματα του προγράμματος LTPP) και άλλους πίνακες με τις συντεταγμένες των δοκιμαστικών τμημάτων κτλ.

Ο πίνακας EXPERIMENT_SECTION μπορεί να θεωρηθεί ως ο κύριος πίνακας της βάσης δεδομένων. Περιέχει πληροφορίες για τα δοκιμαστικά τμήματα όπως το σε ποια μελέτη ανήκει το καθένα, πότε έγιναν εργασίες συντήρησης ή αποκατάστασης κτλ. Σε αυτόν τον πίνακα τα πεδία STATE_CODE, SHRP_ID και CONSTRUCTION_NO αποτελούν πρωτεύοντα κλειδιά.

Το πεδίο STATE_CODE αποτελείται από ένα διψήφιο κωδικό που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση της Πολιτείας που βρίσκεται κάθε δοκιμαστικό τμήμα. Για παράδειγμα, ο κωδικός 12 αναφέρεται στην Πολιτεία Florida. Αναλυτικά οι κωδικοί βρίσκονται στον πίνακα CODES.

Το πεδίο SHRP_ID είναι ένας τετραψήφιος κωδικός σύμφωνα με τον οποίο αναγνωρίζεται ένα δοκιμαστικό τμήμα. Για τα τμήματα που ανήκουν στο πρόγραμμα GPS ο κωδικός αυτός έχει μόνο τη σημασία ότι, συνδυαζόμενος με το STATE_CODE, είναι μοναδικός. Για τα τμήματα που ανήκουν στο πρόγραμμα SPS, το δεύτερο ψηφίο του κωδικού αντιπροσωπεύει τον αριθμό της μελέτης που υπάγεται το τμήμα, το τρίτο και τέταρτο ψηφίο είναι για την αναγνώριση του τμήματος της συγκεκριμένης μελέτης και το πρώτο ψηφίο είναι 0 για την πρώτη τέτοια μελέτη που έγινε σε μια συγκεκριμένη Πολιτεία, Α για τη δεύτερη κτλ.

Το πεδίο CONSTRUCTION_NO αναφέρεται σε αλλαγές που γίνονται στη δομή του οδοστρώματος οι οποίες έχουν προκληθεί από κάποια εργασία αποκατάστασης ή συντήρησης του οδοστρώματος. Όταν ένα τμήμα εισάγεται στη βάση δεδομένων το πεδίο CONSTRUCTION_NO έχει την τιμή 1. Η τιμή του πεδίου αυξάνεται κατά 1 κάθε φορά που συμβαίνει ένα γεγονός συντήρησης, ανεξάρτητα από την επιρροή που θα έχει αυτό στο οδόστρωμα.

Ένα ακόμη σημαντικό πεδίο του πίνακα EXPERIMENT_SECTION είναι το GPS_SPS το οποίο μπορεί να πάρει την τιμή G ή S ανάλογα σε ποια κατηγορία ανήκει το συγκεκριμένο τμήμα για τον αντίστοιχο αριθμό κατασκευής του (CONSTRUCTION_NO). Επιπλέον, το πεδίο EXPERIMENT_NO αποτελείται από κωδικό ο οποίος υποδεικνύει σε ποια μελέτη του προγράμματος GPS ή SPS υπάγεται το συγκεκριμένο τμήμα.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι χρησιμοποιώντας τον πίνακα EXPERIMENT_SECTION μπορούμε να προσδιορίσουμε τα τμήματα που υπάγονται στη μελέτη που μας ενδιαφέρει και έτσι να αναζητήσουμε στοιχεία για τα τμήματα αυτά στις υπόλοιπες ενότητες της βάσης δεδομένων.

3.7. Συλλογή στοιχείων από τη βάση δεδομένων του προγράμματος LTPP

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τη βάση δεδομένων του προγράμματος LTPP και συγκεκριμένα από τη μελέτη SPS-5 που αναφέρεται στην αποκατάσταση εύκαμπτων οδοστρωμάτων, με σκοπό την εξήγηση και την πρόβλεψη του φαινομένου της έναρξης των αλιγοτορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια του οδοστρώματος για την περίοδο που ακολουθεί μετά τη συντήρηση και την αποκατάστασή του. Η διαδικασία της συλλογής στοιχείων ξεκινάει από τον εντοπισμό των τμημάτων που ανήκουν στη μελέτη SPS-5 και συνεχίζει με την εύρεση των στοιχείων που αφορούν τις αλιγοτορικές ρηγματώσεις, οι οποίες και θα αποτελέσουν την εξαρτημένη μεταβλητή στη στατιστική επεξεργασία, αλλά και των στοιχείων που σχετίζονται με το κλίμα, την ηλικία του οδοστρώματος, την κυκλοφορία κ.α. μέσω των οποίων θα προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε το φαινόμενο της έναρξης της ρηγματώσεως.

3.7.1. Δοκιμαστικά τμήματα της μελέτης SPS-5

Η μελέτη SPS-5 απαρτίζεται από δοκιμαστικές περιοχές (test sites) σε 18 Πολιτείες οι οποίες φαίνονται αναλυτικά μαζί με τον κωδικό τους (STATE_CODE) στον παρακάτω πίνακα. Οι δοκιμαστικές περιοχές καλύπτουν και τις τέσσερις γεωγραφικές περιοχές που καθορίστηκαν μέσω του SHRP για τη Βόρειο Αμερική.

Πίνακας 3.2. Πολιτείες με δοκιμαστικά τμήματα της μελέτης SPS-5.

Γεωγραφική Περιοχή	Κωδικός & Όνομα Πολιτείας
Νότια (Southern)	1 Alabama
	12 Florida
	13 Georgia
	28 Mississippi
	35 New Mexico
	40 Oklahoma
	48 Texas
Δυτικά (Western)	4 Arizona
	6 California
	8 Colorado
	30 Montana
	81 Alberta
Βόρεια-Κεντρικά (North Central)	27 Minnesota
	29 Missouri
	83 Manitoba
Βόρεια-Ανατολικά (North Atlantic)	23 Maine
	24 Maryland
	34 New Jersey

Κάθε δοκιμαστική περιοχή αποτελείται από οκτώ ξεχωριστά τμήματα στα οποία εφαρμόζονται διαφορετικές διαδικασίες συντήρησης και αποκατάστασης και ένα τμήμα ελέγχου. Στη βάση δεδομένων, τα τμήματα της μελέτης SPS-5 αναγνωρίζονται από τον κωδικό του πεδίου SHRP_ID ο οποίος είναι της μορφής 050x ή A50x (μόνο στην Πολιτεία Texas ο κωδικός είναι της μορφής A50x). Συγκεκριμένα, το τμήμα ελέγχου έχει τον κωδικό 0501 (ή A501) και τα υπόλοιπα οκτώ τμήματα έχουν κωδικούς 0502 έως 0509 (ή A502 έως A509). Στη συνέχεια της εργασίας θα αναφερόμαστε στους κωδικούς των τμημάτων χωρίς το πρώτο ψηφίο δηλαδή 501, 502 κτλ. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, κάθε διαδικασία συντήρησης για τα τμήματα 502-509 είναι διαφορετική. Παρακάτω υπάρχει η αναλυτική εξήγηση της κάθε διαδικασίας καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα γενικά τους χαρακτηριστικά:

- i. 501 – Τμήμα ελέγχου. Στο τμήμα αυτό δεν έχουν γίνει εργασίες αποκατάστασης παρά μόνο κάποια συντήρηση ρουτίνας (σφράγισμα ρωγμών, μπαλώματα).
- ii. 502 – Ελαφριά προετοιμασία της επιφάνειας του οδοστρώματος και 2 ίντσες ανακυκλωμένου ασφαλτομίγματος ως επίστρωση. Μπαλώματα και γέμισμα αυλακώσεων βάθους μεγαλύτερου των 0.5 ιντσών πριν την τοποθέτηση της

- επίστρωσης. Το ασφαλτόμιγμα της επίστρωσης αποτελείται από 30% ανακυκλωμένο υλικό.
- iii. 503 – Ελαφριά προετοιμασία της επιφάνειας του οδοστρώματος και 5 ίντσες ανακυκλωμένου ασφαλτομίγματος ως επίστρωση. Μπαλώματα και γέμισμα αυλακώσεων βάθους μεγαλύτερου των 0.5 ιντσών πριν την τοποθέτηση της επίστρωσης. Το ασφαλτόμιγμα της επίστρωσης αποτελείται από 30% ανακυκλωμένο υλικό.
- iv. 504 – Ελαφριά προετοιμασία της επιφάνειας του οδοστρώματος και 5 ίντσες ασφαλτομίγματος ως επίστρωση. Μπαλώματα και γέμισμα αυλακώσεων βάθους μεγαλύτερου των 0.5 ιντσών πριν την τοποθέτηση της επίστρωσης. Το ασφαλτόμιγμα της επίστρωσης αποτελείται από 100% νέο υλικό.
- v. 505 – Ελαφριά προετοιμασία της επιφάνειας του οδοστρώματος και 2 ίντσες ασφαλτομίγματος ως επίστρωση. Μπαλώματα και γέμισμα αυλακώσεων βάθους μεγαλύτερου των 0.5 ιντσών πριν την τοποθέτηση της επίστρωσης. Το ασφαλτόμιγμα της επίστρωσης αποτελείται από 100% νέο υλικό.
- vi. 506 – Έντονη προετοιμασία της επιφάνειας του οδοστρώματος και 2 ίντσες ασφαλτομίγματος ως επίστρωση. Η έντονη προετοιμασία της επιφάνειας περιλαμβάνει σφράγισμα ρωγμών, μπαλώματα και φρεζάρισμα σε βάθος 1.5 με 2 ίντσες πριν την τοποθέτηση της επίστρωσης με ασφαλτόμιγμα από 100% νέο υλικό.
- vii. 507 – Έντονη προετοιμασία της επιφάνειας του οδοστρώματος και 5 ίντσες ασφαλτομίγματος ως επίστρωση. Η έντονη προετοιμασία της επιφάνειας περιλαμβάνει σφράγισμα ρωγμών, μπαλώματα και φρεζάρισμα σε βάθος 1.5 με 2 ίντσες πριν την τοποθέτηση της επίστρωσης με ασφαλτόμιγμα από 100% νέο υλικό.
- viii. 508 – Έντονη προετοιμασία της επιφάνειας του οδοστρώματος και 5 ίντσες ανακυκλωμένου ασφαλτομίγματος ως επίστρωση. Η έντονη προετοιμασία της επιφάνειας περιλαμβάνει σφράγισμα ρωγμών, μπαλώματα και φρεζάρισμα σε βάθος 1.5 με 2 ίντσες πριν την τοποθέτηση της επίστρωσης με ασφαλτόμιγμα από 30% ανακυκλωμένο υλικό.
- ix. 509 – Έντονη προετοιμασία της επιφάνειας του οδοστρώματος και 2 ίντσες ανακυκλωμένου ασφαλτομίγματος ως επίστρωση. Η έντονη προετοιμασία της επιφάνειας περιλαμβάνει σφράγισμα ρωγμών, μπαλώματα και φρεζάρισμα σε

βάθος 1.5 με 2 ίντσες πριν την τοποθέτηση της επίστρωσης με ασφαλτόμιγμα από 30% ανακυκλωμένο υλικό.

Πίνακας 3.3. Χαρακτηριστικά των διαδικασιών συντήρησης και αποκατάστασης

Τμήμα	Πάχος Επίστρωσης (ίντσες)	Προετοιμασία Επιφάνειας	Ασφαλτόμιγμα
502	2	Ελαφριά	Ανακυκλωμένο ^a
503	5	Ελαφριά	Ανακυκλωμένο
504	5	Ελαφριά	Μη-ανακυκλωμένο
505	2	Ελαφριά	Μη-ανακυκλωμένο
506	2	Έντονη	Μη-ανακυκλωμένο
507	5	Έντονη	Μη-ανακυκλωμένο
508	5	Έντονη	Ανακυκλωμένο
509	2	Έντονη	Ανακυκλωμένο

^a Το ανακυκλωμένο ασφαλτόμιγμα αποτελείται από 30% ανακυκλωμένο υλικό

3.7.2. Συλλογή στοιχείων για το φαινόμενο της ρηγμάτωσης

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε αναλυτική παρουσίαση των οκτώ διαφορετικών διαδικασιών συντήρησης που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της μελέτης SPS-5. Η αποτελεσματικότητα των διαδικασιών αυτών μπορεί να αξιολογηθεί μέσω του βαθμού που αυτές αυξάνουν τη ζωή του οδοστρώματος δομικά. Για την παρούσα διπλωματική εργασία, ως δείκτης της δομικής κατάστασης και της συμπεριφοράς του οδοστρώματος επιλέχτηκε το φαινόμενο της έναρξης αλγατορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια του οδοστρώματος.

Οι αλγατορικές ρηγματώσεις είναι ένα είδος ρηγματώσεων κόπωσης. Ξεκινούν ως μικρές κατά μήκος ρωγμές στο ίχνος του τροχού οι οποίες εξαπλώνονται γρήγορα και συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας μία δομή που μοιάζει με το δέρμα του αλιγάτορα. Οι ρωγμές αυτές συνήθως ξεκινούν στη βάση των ασφατικών στρώσεων και υπό την επίδραση της κυκλοφορίας μεταδίδονται στην επιφάνεια. Αυτού του είδους οι ρηγματώσεις είναι κυρίως αποτέλεσμα της κάμψης που υφίστανται οι ασφατικές στρώσεις λόγω της επαναλαμβανόμενης φόρτισης από την κυκλοφορία. Μία σχετικά λεπτή στρώση ασφατικών για την υπάρχουσα κυκλοφορία ή μια «γερασμένη» στρώση ασφατικών είναι πιθανές αιτίες υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του ασφαλτομίγματος και της

δημιουργίας ρηγματώσεων. Επίσης, ασθενείς βάσεις και υποβάσεις που δεν έχουν συμπιεστεί σωστά είναι αίτια για την ανάπτυξη υψηλών τάσεων στη βάση των ασφαλτικών.

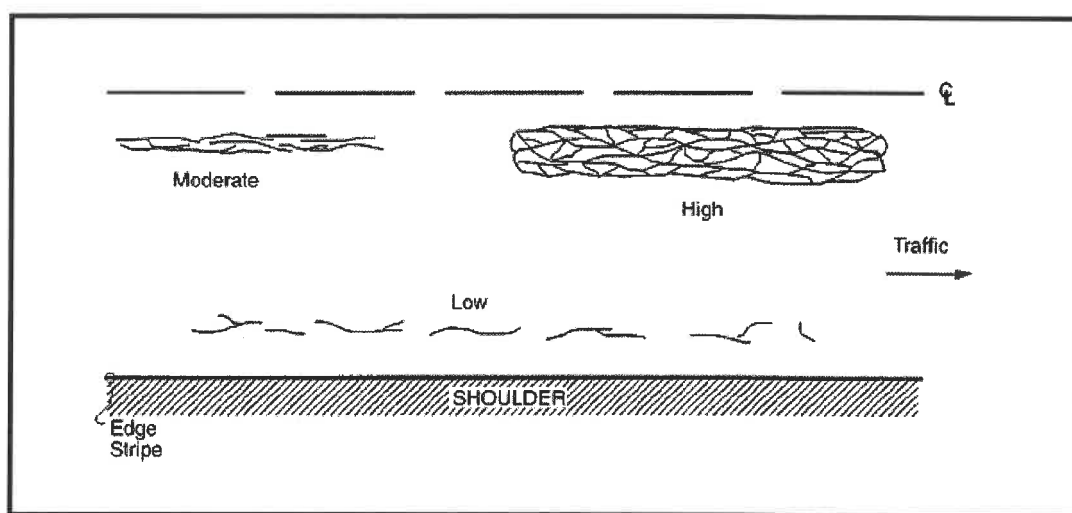


Σχήμα 3.3. Τυπική μορφή αλιγοτορικών ρηγματώσεων (Πηγή: Distress Identification Manual for LTPP, 2003)

Στη βάση δεδομένων του LTPP, τα στοιχεία που αφορούν την καταγραφή αστοχιών βρίσκονται στην ενότητα με όνομα “Monitoring”. Σε αυτή την ενότητα υπάρχουν τρεις διαφορετικοί πίνακες με στοιχεία ρηγματώσεων για εύκαμπτα οδοστρώματα, οι οποίοι διαφέρουν μεταξύ τους στον τρόπο με τον οποίο έχει γίνει η καταγραφή. Τα στοιχεία του πίνακα MON_DIS_AC_REV έχουν προκύψει από απλή οπτική επιθεώρηση, ενώ τα στοιχεία των πινάκων MON_DIS_PADIAS_AC και MON_DIC_PADIAS42_AC έχουν προκύψει από επεξεργασία ασπρόμαυρων φωτογραφιών με μια παλιά έκδοση του λογισμικού PADIAS και με την έκδοση 4.2 αντίστοιχα. Επειδή αυτό το λογισμικό είναι ακόμη σε πειραματικό στάδιο, τα στοιχεία του πίνακα MON_DIS_AC_REV θεωρήθηκαν πιο αξιόπιστα και επιλέχτηκαν για την ανάλυση.

Στον πίνακα MON_DIS_AC_REV, οι αλιγοτορικές ρωγμές για κάθε τμήμα δίνονται σε m^2 . Επιπλέον, υπάρχουν τρία πεδία που αναφέρονται στις αλιγοτορικές ρωγμές, ανάλογα με τη σοβαρότητά τους: α. το πεδίο GATOR_CRACK_A_L το οποίο δίνει το εμβαδό των αλιγοτορικών ρηγματώσεων χαμηλής σοβαρότητας, β. το πεδίο GATOR_CRACK_A_M το οποίο δίνει το εμβαδό των αλιγοτορικών ρηγματώσεων μέτριας σοβαρότητας και, γ. το πεδίο GATOR_CRACK_A_H το οποίο δίνει το εμβαδό των αλιγοτορικών ρηγματώσεων υψηλής σοβαρότητας. Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή των χαρακτηριστικών του κάθε επίπεδου σοβαρότητας καθώς και η σχηματική απεικόνισή τους:

- i. Χαμηλό επίπεδο σοβαρότητας (Low severity level): περιοχή με ρωγμές που δεν συνδέονται μεταξύ τους ή συνδέονται ελάχιστα και που δεν έχουν υποστεί θρυμματισμό.
- ii. Μέτριο επίπεδο σοβαρότητας (Moderate severity level): περιοχή με αλληλοσυνδεόμενες ρωγμές οι οποίες ίσως έχουν υποστεί θρυμματισμό.
- iii. Υψηλό επίπεδο σοβαρότητας (High severity level): περιοχή με αλληλοσυνδεόμενες ρωγμές που έχουν υποστεί μέτριο ή σοβαρό θρυμματισμό. Τα κομμάτια ίσως μετακινούνται με την επίδραση της κυκλοφορίας και πιθανότατα υπάρχει εμφάνιση νερού και υλικών από τις κατώτερες στρώσεις στην επιφάνεια.



Σχήμα 3.4. Αλगाτορικέσ ρηγματώσεις – Επίπεδα σοβαρότητας (Πηγή: Distress Identification Manual for LTPP, 2003)



Σχήμα 3.5. Αλγατορικέσ ρηγματώσεις – Χαμηλό επίπεδο σοβαρότητας (Πηγές: Pavement Distress Identification Manual for the NPS Road Inventory Program, Cycle 4, 2006-2009 και Distress Identification Manual for LTPP, 2003)



Σχήμα 3.6. Αλιγατορικές ρηγματώσεις – Μέτριο επίπεδο σοβαρότητας (Πηγή: Pavement Distress Identification Manual for the NPS Road Inventory Program, Cycle 4, 2006-2009)



Σχήμα 3.7. Αλιγατορικές ρηγματώσεις – Υψηλό επίπεδο σοβαρότητας (Πηγή: Pavement Distress Identification Manual for the NPS Road Inventory Program, Cycle 4, 2006-2009)

Για να υπάρχει συνέχεια στις παρατηρήσεις που συλλέξαμε, και τα τρία πεδία που αφορούν τις αλιγατορικές ρηγματώσεις προστέθηκαν για να εξάγουμε το συνολικό εμβαδό των ρωγμών για κάθε τμήμα και έτος καταγραφής. Τα δεδομένα αρχικά τοποθετήθηκαν σε πίνακες, ξεχωριστά για κάθε Πολιτεία, σε αρχείο Excel στη μορφή που φαίνεται παρακάτω. Με πορτοκαλί χρώμα είναι οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν πριν γίνει η συντήρηση των τμημάτων.

ALABAMA								
Εμβαδό αλιγοτορικών ρηγματώσεων								
	502	503	504	505	506	507	508	509
1991	30.5	30.5	2.3	30.5	12.8	30.4	30.5	24.6
1992	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1993	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1994								
1995	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1996								
1997								
1998	53.8	0.0	0.0	25.3	0.0	0.0	39.5	10.2
1999								
2000	24.8	0.0	0.0	14.2	0.0	0.0	16.1	1.3
2001	38.5	0.0	0.0	16.6	0.0	0.0	12.8	2.9
2002	27.3	2.5	0.0	21.0	0.7	0.6	13.8	10.2
2003	32.3	3.1	0.5	22.9	1.9	2.5	15.3	13.6
2004	32.3	4.7	0.6	23.8	3.3	6.8	18.8	18.6
2005	38.7	4.4	0.9	23.5	3.2	6.6	18.7	19.1
2006	39.9	5.0	2.5	30.9	2.8	9.1	18.1	20.2
2007								
2008								
2009	47.9	8.5	4.8	34.2	5.1	14.7	20.7	18.5

Σχήμα 3.8. Στοιχεία για τις αλιγοτορικές ρηγματώσεις των δοκιμαστικών τμημάτων στην Πολιτεία Alabama.

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, οι καταγραφές δεν γίνονταν σε ετήσια βάση και επιπλέον σε πολλά σημεία υπάρχουν σφάλματα. Για παράδειγμα, στο τμήμα 505 στην Πολιτεία Alabama είχαν καταγραφεί 25.3m² το 1998 και 14.2m² το 2000, γεγονός που δεν είναι λογικό αφού ανάμεσα στα δύο έτη δεν έγινε κάποια επιπλέον συντήρηση του δοκιμαστικού τμήματος. Επιπλέον, τα έτη που υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία καταγραφών διαφέρουν από Πολιτεία σε Πολιτεία, γεγονός που δυσχεραίνει την επεξεργασία των στοιχείων. Μετά τη συλλογή όλων των στοιχείων για τις αλιγοτορικές ρηγματώσεις, ακολούθησε η διόρθωσή τους. Σε πρώτη φάση, οι Πολιτείες Minnesota και Maine αφαιρέθηκαν από την ανάλυση γιατί δεν υπήρχαν καταγραφές αλιγοτορικών ρηγματώσεων ούτε πριν τη συντήρηση αλλά ούτε και μετά.

Το γεγονός ότι έλειπαν πάρα πολλά στοιχεία και η συμπλήρωσή τους θα παραποιούσε ίσως αρκετά το τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης, ήταν ένας από τους λόγους που αποφασίστηκε η εξαρτημένη μεταβλητή να μπορεί να πάρει μόνο δύο τιμές: 0 και 1. Έτσι, τα στοιχεία τοποθετήθηκαν σε αρχείο Excel δημιουργώντας ένα μη-ισσοροπημένο δυναμικό διαστρωματικό αρχείο (unbalanced panel) και στην εξαρτημένη μεταβλητή με το όνομα I50x, αντί για τις ακριβείς τιμές του εμβαδού των αλιγοτορικών ρωγμών, χρησιμοποιήθηκε η τιμή 1 όταν υπήρχε εμφάνιση ρωγμών στην επιφάνεια του

οδοστρώματος και η τιμή 0 όταν δεν υπήρχαν ρωγμές. Επιπλέον, όταν έλειπαν περισσότερα από δύο έτη παρατηρήσεων και η επόμενη καταγραφή είχε μη μηδενική τιμή, τότε γινόταν η θεώρηση ότι το οδόστρωμα ρηγματώθηκε στο ενδιάμεσο χρονικό διάστημα των παρατηρήσεων που έλειπαν. Οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση αφορούσαν την περίοδο από το έτος που έγινε η συντήρηση και μετά. Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν για την περίοδο πριν τη συντήρηση θα χρησιμοποιούνταν ως ανεξάρτητη μεταβλητή για κάθε δοκιμαστικό τμήμα που θα έδειχνε την κατάσταση του οδοστρώματος πριν τη συντήρηση αλλά ο αριθμός των τιμών που έλειπαν δεν επέτρεψε κάτι τέτοιο (δεν υπήρχαν καθόλου καταγραφές για την περίοδο πριν τη συντήρηση στις πέντε από τις 16 Πολιτείες).

3.7.3. Συλλογή στοιχείων για τις επεξηγηματικές μεταβλητές

Για κάθε δοκιμαστικό τμήμα συλλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων του LTPP στοιχεία που σχετίζονται με το κλίμα, την κυκλοφορία και την κατασκευή και συντήρηση του οδοστρώματος. Τα στοιχεία αυτά αναφέρονται στην αντίστοιχα διαθέσιμη χρονοσειρά της εξαρτημένης μεταβλητής, η οποία είναι διαφορετική για κάθε περιοχή μελέτης.

Τα κλιματολογικά δεδομένα συγκεντρώθηκαν από την ενότητα “Climate” και συγκεκριμένα από τους πίνακες CLM_VWS_PRECIP_ANNUAL και CLM_VWS_TEMP_ANNUAL. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, τα στοιχεία που βρίσκονται σε αυτή την ενότητα προέρχονται από στατιστική επεξεργασία στοιχείων που συλλέχθηκαν από μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τις περιοχές μελέτης. Από τον πίνακα CLM_VWS_PRECIP_ANNUAL πήραμε τις ετήσιες τιμές της βροχόπτωσης σε mm για τα έτη και τα τμήματα που μας ενδιαφέρουν. Οι τιμές τοποθετήθηκαν στο τελικό αρχείο και το όνομα της αντίστοιχης μεταβλητής είναι PRECIP. Από τον πίνακα CLM_VWS_TEMP_ANNUAL συλλέξαμε τα στοιχεία τεσσάρων μεταβλητών: α. ετήσιος αριθμός ημερών που η θερμοκρασία ανέβηκε πάνω από τους 32.2°C (όνομα μεταβλητής: D_AB_32), β. ετήσιος αριθμός ημερών που η θερμοκρασία έπεσε κάτω από του 0°C (D_BEL_0), γ. ετήσιος δείκτης παγετού (FR_IND) και δ. ετήσιος αριθμός ημερών που η θερμοκρασία πήγαινε από μικρότερη των 0°C σε μεγαλύτερη των 0°C, δηλαδή γινόταν κύκλος παγώματος-ξεπαγώματος (FR_TH). Έτσι, για την ανάλυση συγκεντρώθηκαν πέντε μεταβλητές σχετικές με το κλίμα και τις καιρικές συνθήκες. Όμως, σε καμία Πολιτεία δεν υπήρχαν καταγραφές από μετεωρολογικούς

σταθμούς μετά το 2006 και οι τιμές που έλειπαν συμπληρώθηκαν από τους μέσους όρους των υπολοίπων τιμών σε κάθε δοκιμαστικό τμήμα.

Από την ενότητα “Traffic” και συγκεκριμένα από τον πίνακα TRF_MON_EST_ESAL συλλέχτηκαν τα στοιχεία που σχετίζονται με την κυκλοφορία. Έτσι, στη μεταβλητή με όνομα AADT_TR καταχωρήθηκε ο ετήσιος μέσος αριθμός φορτηγών ανά ημέρα για τα τμήματα και τα έτη ενδιαφέροντος. Επίσης, στη μεταβλητή με όνομα ESAL καταχωρήθηκε ο ετήσιος αριθμός ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού σε χιλιάδες. Οι τιμές που έλειπαν, οι οποίες ήταν και ιδιαίτερα πολλές, συμπληρώθηκαν με τη χρήση γραμμικής πρόβλεψης (linear extrapolation).

Τα στοιχεία κατασκευής και συντήρησης περιλαμβάνουν την ηλικία του οδοστρώματος και τα πάχη των στρώσεων πριν και μετά τη συντήρηση. Αρχικά από τον πίνακα EXPERIMENT_SECTION προσδιορίστηκε η ηλικία του κάθε δοκιμαστικού τμήματος αλλά και η χρονική στιγμή που έγινε η συντήρηση από την ημερομηνία που το πεδίο CONSTRUCTION_NO πήρε την τιμή 2. Έτσι, δημιουργήθηκαν δύο μεταβλητές: α. η μεταβλητή AGE στην οποία καταχωρήθηκε η ηλικία του κάθε τμήματος (τα τμήματα σε μία συγκεκριμένη Πολιτεία φτιάχνονται και συντηρούνται το ίδιο έτος) και β. η μεταβλητή T_S_REP στην οποία καταχωρήθηκε ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση του τμήματος.

Τα πάχη των στρώσεων συγκεντρώθηκαν για κάθε δοκιμαστικό τμήμα (παρόλο που σε επίπεδο Πολιτείας οι διαφορές ήταν μικρές) από την ενότητα “Test” και συγκεκριμένα από τον πίνακα TST_L05B. Αν και υπάρχουν και άλλοι πίνακες στη βάση δεδομένων που δίνουν στοιχεία για τα πάχη των στρώσεων, ο πίνακας TST_L05B θεωρείται η καλύτερη πηγή άντλησης τέτοιων στοιχείων. Οι τιμές του πάχους των στρώσεων έχουν συγκεντρωθεί από πολλές πηγές και προέρχονται από συνδυασμό επί-τόπου και εργαστηριακών μετρήσεων γι’ αυτό και το πεδίο στο οποίο βρίσκονται αποθηκευμένες ονομάζεται REPR_THICKNESS (representative for a layer in a section). Δηλαδή, οι τιμές αυτές αποτελούν αντιπροσωπευτικές τιμές που σημαίνει ότι αποτελούν την καλύτερη εκτίμηση μέσα από ένα πλήθος στοιχείων.

Στον πίνακα TST_L05B μπορούμε να πάρουμε στοιχεία για κάθε CONSTRUCTION_NO του δοκιμαστικού τμήματος, δηλαδή μπορούμε να έχουμε τις τιμές του πάχους των στρώσεων πριν και μετά τη συντήρηση. Η αναγνώριση της κάθε στρώσης γίνεται μέσω του πεδίου LAYER_NO το οποίο περιέχει έναν κωδικό που αντιστοιχεί σε μία στρώση. Η

τιμή 1 αναφέρεται πάντα στην ανώτερη στρώση του ασφαλτομίγματος και αυξανόμενου του κωδικού κατεβαίνουμε και βαθύτερα στις στρώσεις. Με 7 συμβολίζεται η στρώση έδρασης, με 6 η υπόβαση κτλ. Όλα τα πάχη δίνονται σε ίντσες.

Από τα στοιχεία του πίνακα TST_L05B προέκυψαν πέντε ανεξάρτητες μεταβλητές: α. το πάχος της υπόβασης (TH_SUB), β. το πάχος της βάσης (TH_BAS), γ. το συνολικό πάχος βάσης και υπόβασης (TH_SB), δ. το πάχος των ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση (TH_AC) και ε. το πάχος των νέων ασφαλικών στρώσεων που προστέθηκαν κατά τη συντήρηση (TH_IMP).

Ο λόγος που δημιουργήθηκε ξεχωριστή μεταβλητή για το αθροιστικό πάχος βάσης και υπόβασης είναι ότι σε κάποια τμήματα δεν υπήρχε καταγραφή πάχους υπόβασης και δεν ήταν ξεκάθαρο αν απλά έλειπαν στοιχεία ή αν δεν είχε κατασκευαστεί υπόβαση. Επιπλέον, είναι σημαντικό να ξεκαθαριστεί η διαφορά μεταξύ πάχους επίστρωσης και πάχους νέου ασφαλικού υλικού (μεταβλητή TH_IMP). Η επίστρωση έχει να κάνει με το πόσο ανέβηκε σε ύψος το τελικό οδόστρωμα από την προηγούμενη αρχική επιφάνεια και διαφέρει από το πάχος του νέου ασφαλικού υλικού που προστέθηκε γιατί σε πολλές περιπτώσεις έγινε φρεζάρισμα της αρχικής επιφάνειας. Επομένως, αν σε ένα τμήμα αφαιρέθηκαν 2 ίντσες παλιού ασφαλτομίγματος και η διαδικασία συντήρησης περιλαμβάνει 5 ίντσες επίστρωση, τότε το πάχος του νέου υλικού που προστέθηκε θα είναι 7 ίντσες.

Τέλος, για ένα από τα μέρη της ανάλυσης ήταν απαραίτητο να δημιουργηθούν τρεις μεταβλητές τύπου 0,1 που αναφέρονται στα στοιχεία των διαδικασιών συντήρησης, δηλαδή στο πάχος της επίστρωσης (OVER_TH), στο είδος της προετοιμασίας της επιφάνειας (SURF_PR) και στο είδος του μίγματος της επίστρωσης (RECYCL). Από τον συνδυασμό αυτών των μεταβλητών προκύπτει η πληροφορία για το ποια διαδικασία συντήρησης έχει εφαρμοστεί στο συγκεκριμένο δοκιμαστικό τμήμα. Παρακάτω βρίσκεται ο συγκεντρωτικός πίνακας των επεξηγηματικών μεταβλητών μαζί με την εξήγησή τους.

Πίνακας 3.4. Ονόματα και ερμηνεία επεξηγηματικών μεταβλητών

<i>Στοιχεία Κατασκευής & Συντήρησης</i>	
ST_CD	Διψήφιος κωδικός για την αναγνώριση της Πολιτείας
T_S_REP	Χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση του δοκιμαστικού τμήματος
AGE	Ηλικία δοκιμαστικού τμήματος
TH_SUB	Πάχος υπόβασης
TH_BAS	Πάχος βάσης
TH_SB	Πάχος βάσης και υπόβασης
TH_AC	Πάχος ασφαλτικών στρώσεων μετά την εφαρμογή της συντήρησης
TH_IMP	Πάχος νέων ασφαλτικών στρώσεων που προστέθηκαν κατά τη συντήρηση
OVER_TH	Μεταβλητή – δείκτης για το πάχος του ασφαλτομίγματος της επίστρωσης (0 για τις 2 ίντσες and 1 για τις 5 ίντσες)
SURF_PR	Μεταβλητή – δείκτης για το είδος της προετοιμασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος (0 για ελαφριά και 1 για έντονη)
RECYCL	Μεταβλητή – δείκτης για το είδος του ασφαλτομίγματος της επίστρωσης (0 για ανακυκλωμένο και 1 για μη-ανακυκλωμένο)
<i>Κλιματικά Στοιχεία</i>	
D_AB_32	Ετήσιος αριθμός ημερών που η θερμοκρασία ανέβηκε πάνω από τους 32.2°C
D_BEL_0	Ετήσιος αριθμός ημερών που η θερμοκρασία έπεσε κάτω από του 0°C
FR_IND	Ετήσιος δείκτης παγετού (freeze index)
FR_TH	Ετήσιος αριθμός ημερών που η θερμοκρασία πήγαινε από μικρότερη των 0°C σε μεγαλύτερη των 0°C (freeze-thaw cycles)
PRECIP	Συνολική βροχόπτωση για το έτος
<i>Κυκλοφοριακά Στοιχεία</i>	
ESAL	Ετήσιος αριθμός φορτίων ισοδύναμου μονού τροχού σε χιλιάδες
AADT_TR	Ετήσιος μέσος αριθμός φορτηγών ανά ημέρα

3.7.4. Τελική μορφή των αρχείων επεξεργασίας

Τα δύο παρακάτω σχήματα αποτελούν τμήμα των τελικών αρχείων που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση. Στο πρώτο σχήμα, βλέπουμε τμήμα των διαστρωματικών στοιχείων που αντιστοιχούν στη διαδικασία συντήρησης 502. Το τμήμα αυτό περιλαμβάνει της Πολιτείες με κωδικό 1 και 4 (Alabama και Arizona) και στο αρχείο με τον ίδιο τρόπο παρακάτω συνεχίζουν και οι υπόλοιπες Πολιτείες. Χρησιμοποιώντας τη διάταξη αυτού του αρχείου θα γίνει ανάλυση για την κάθε διαδικασία συντήρησης ξεχωριστά. Η εξαρτημένη μεταβλητή είναι η I502 και στις ανεξάρτητες μεταβλητές υπάρχουν αυτές που είναι κοινές

για κάθε διαδικασία συντήρησης ανά Πολιτεία αλλά και αυτές που αποτελούν στοιχεία του συγκεκριμένου δοκιμαστικού τμήματος όπως τα πάχη των στρώσεων.

ST_CD	TIME	T_S_REP	AGE	D_AB_32	D_BEL_0	FR_IND	FR_TH	PRECIP	AADF_TR	ESAL	TH_SUB_2	TH_BAS_2	TH_SB_2	TH_AC_2	TH_IMP_2	IS02
1	1992	0	5	37	19	1	19	1728.7	415	51	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0
1	1993	1	6	83	26	2	26	1258.2	427	53	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0
1	1994	2	7	21	29	3	29	1834.1	440	54	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0
1	1995	3	8	77	34	2	34	1464.6	453	56	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0
1	1996	4	9	65	35	25	34	1600.5	467	58	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0
1	1997	5	10	47	23	2	23	1635.8	481	59	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0
1	1998	6	11	90	24	0	24	1783.6	495	61	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
1	1999	7	12	60	33	7	33	1118.5	510	63	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
1	2000	8	13	100	46	12	46	962.2	525	65	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
1	2001	9	14	63	36	7	36	1303.3	541	67	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
1	2002	10	15	85	28	3	28	1359.3	557	69	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
1	2003	11	16	48	38	7	38	1607.3	574	71	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
1	2004	12	17	54	29	0	29	1564.0	591	73	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
1	2005	13	18	72	22	1	22	1611.7	609	75	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
1	2006	14	19	104	22	0	22	1155.3	627	78	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
1	2007	15	20	67	30	5	30	1465.8	646	80	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
1	2008	16	21	67	30	5	30	1465.8	665	82	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
1	2009	17	22	67	30	5	30	1465.8	684	85	6	10.4	16.4	5.5	1.9	1
4	1990	0	3	183	31	0	31	302.7	660	250	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0
4	1991	1	4	168	7	0	7	202.3	490	180	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0
4	1992	2	5	181	19	0	19	388.3	620	220	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0
4	1993	3	6	165	13	0	13	389.9	550	202	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0
4	1994	4	7	163	20	0	20	267.0	610	200	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	1995	5	8	176	6	0	6	188.2	860	200	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	1996	6	9	184	21	0	21	95.9	900	200	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	1997	7	10	190	13	0	13	191.0	877	226	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	1998	8	11	167	12	0	12	234.3	929	323	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	1999	9	12	183	23	0	23	131.5	981	339	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	2000	10	13	181	23	0	23	213.4	1033	356	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	2001	11	14	189	24	0	24	228.2	1292	328	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	2002	12	15	180	24	0	24	80.9	1495	231	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	2003	13	16	175	13	0	13	150.1	1651	236	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	2004	14	17	189	21	0	21	233.6	1831	344	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	2005	15	18	175	11	0	11	226.8	2011	354	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	2006	16	19	176	27	0	27	167.8	2191	364	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	2007	17	20	178	18	0	18	217.2	2372	374	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1
4	2008	18	21	178	18	0	18	217.2	2570	384	0	14.7	14.7	6.4	2.7	1

Σχήμα 3.9. Τμήμα αρχείου επεξεργασίας

Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε τμήμα του αρχείου με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση για όλες τις διαδικασίες συντήρησης μαζί. Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι τρεις μεταβλητές-δείκτες οι οποίες καθορίζουν σε ποια διαδικασία συντήρησης αναφέρονται τα στοιχεία και έτσι δύναται η δυνατότητα όλες οι διαδικασίες συντήρησης να τοποθετηθούν μαζί η μία κάτω από την άλλη. Στο παρακάτω τμήμα του αρχείου, οι μεταβλητές-δείκτες έχουν την τιμή μηδέν αφού τα στοιχεία αναφέρονται στη διαδικασία συντήρησης 502.

ST_CD	TIME	T_S	REP	AGE	D_AB_32	D_BEL_0	FR_IND	FR_TH	PRECIP	AADT_TR	ESAL	TH_SUB	TH_BAS	TH_SB	TH_AC	TH_IMP	OVER_TH	SURF_PR	RECYCL	ISOκ
1	1992	0	5	37	19	1	19	1728.7	415	51	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	0
1	1993	1	6	83	26	2	26	1258.2	427	53	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	0
1	1994	2	7	21	29	3	29	1834.1	440	54	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	0
1	1995	3	8	77	34	2	34	1464.6	453	56	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	0
1	1996	4	9	65	35	25	34	1600.5	467	58	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	0
1	1997	5	10	47	23	2	23	1635.8	481	59	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	0
1	1998	6	11	90	24	0	24	1783.6	495	61	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
1	1999	7	12	60	33	7	33	1118.5	510	63	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
1	2000	8	13	100	46	12	46	962.2	525	65	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
1	2001	9	14	63	36	7	36	1303.3	541	67	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
1	2002	10	15	85	28	3	28	1359.3	557	69	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
1	2003	11	16	48	38	7	38	1607.3	574	71	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
1	2004	12	17	54	29	0	29	1564.0	591	73	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
1	2005	13	18	72	22	1	22	1611.7	609	75	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
1	2006	14	19	104	22	0	22	1155.3	627	78	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
1	2007	15	20	67	30	5	30	1465.8	646	80	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
1	2008	16	21	67	30	5	30	1465.8	665	82	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
1	2009	17	22	67	30	5	30	1465.8	684	85	6	10.4	16.4	5.5	1.9	0	0	0	0	1
4	1990	0	3	183	31	0	31	302.7	660	250	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	0
4	1991	1	4	168	7	0	7	202.3	490	180	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	0
4	1992	2	5	181	19	0	19	388.3	620	220	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	0
4	1993	3	6	165	13	0	13	389.9	550	202	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	0
4	1994	4	7	163	20	0	20	267.0	610	200	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	1995	5	8	176	6	0	6	188.2	860	200	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	1996	6	9	184	21	0	21	95.9	900	200	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	1997	7	10	190	13	0	13	191.0	877	226	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	1998	8	11	167	12	0	12	234.3	929	323	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	1999	9	12	183	23	0	23	131.5	981	339	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	2000	10	13	181	23	0	23	213.4	1033	356	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	2001	11	14	189	24	0	24	228.2	1292	328	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	2002	12	15	180	24	0	24	80.9	1495	231	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	2003	13	16	175	13	0	13	150.1	1651	236	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	2004	14	17	189	21	0	21	233.6	1831	344	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	2005	15	18	175	11	0	11	226.8	2011	354	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	2006	16	19	176	27	0	27	167.8	2191	364	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	2007	17	20	178	18	0	18	217.2	2372	374	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1
4	2008	18	21	178	18	0	18	217.2	2570	384	0	14.7	14.7	6.4	2.7	0	0	0	0	1

Σχήμα 3.10. Τμήμα αρχείου επεξεργασίας

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των στοιχείων της βάσης δεδομένων του προγράμματος LTPP, η ανάπτυξη των στατιστικών μοντέλων, καθώς και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων (ο υπολογισμός των παραμέτρων όλων των μοντέλων έγινε με το λογισμικό LIMDEP v. 8.0). Σκοπός της στατιστικής επεξεργασίας είναι η «εξήγηση» και η πρόβλεψη του φαινομένου της εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια ευκάμπτων οδοστρωμάτων που έχουν υποστεί συντήρηση.

4.2. Συσχέτιση μεταβλητών

Ο συντελεστής συσχέτισης ρ μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών ενός πληθυσμού είναι ένα μέτρο της γραμμικής τους σχέσης και παίρνει τιμές ανάμεσα σε -1 και 1. Όταν $\rho = 0$ δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών ενώ όταν $|\rho| = 1$ οι δύο μεταβλητές

σχετίζονται με μία τέλεια γραμμική σχέση. Συνήθως, στην πράξη, ο συντελεστής συσχέτισης ρ του πληθυσμού είναι άγνωστος, μπορεί όμως να γίνει εκτίμηση του δειγματικού συντελεστή συσχέτισης r .

Ο προσδιορισμός του δειγματικού συντελεστή συσχέτισης r για δύο συνεχείς μεταβλητές X , Y γίνεται με βάση τον συντελεστή συσχέτισης του Pearson (Pearson product-moment correlation coefficient) ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση (Washington et al., 2003):

$$r = \frac{COV(X,Y)}{s_X s_Y}$$

όπου $COV(X,Y)$ είναι η συνδυακόμενη μεταξύ των μεταβλητών X και Y του δείγματος και s_X και s_Y είναι οι τυπικές αποκλίσεις των μεταβλητών X και Y του δείγματος.

Όταν το $r > 0$, υπάρχει θετική γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών που σημαίνει πως όταν αυξάνεται η μία, αυξάνεται και η άλλη, και αντίστοιχα όταν το $r < 0$, η συσχέτιση είναι αρνητική, δηλαδή όταν αυξάνεται η μία μεταβλητή η άλλη μειώνεται. Στη στατιστική επεξεργασία δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιούνται παράλληλα μεταβλητές υψηλά συσχετιζόμενες μεταξύ τους γι' αυτό πριν την έναρξη της ανάλυσης εξάγονται οι πίνακες συσχετίσεων των ανεξάρτητων μεταβλητών (Σταθόπουλος και Καρλαύτης, 2008). Όταν μεταξύ δύο ανεξάρτητων μεταβλητών η τιμή του συντελεστή συσχέτισης είναι μεγαλύτερη του 0.60, μόνο μία εκ των δύο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην στατιστική ανάλυση. Στους παρακάτω πίνακες δίνονται περιγραφικά μεγέθη για τις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση (Πίνακες 4.1 και 4.2) καθώς και οι μεταβλητές με υψηλή συσχέτιση (Πίνακας 4.3).

Πίνακας 4.1. Περιγραφική Στατιστική

	Μεταβλητές	Units	Mean	Std.Dev.	Min	Max	N	Missing
Χρόνος	T_S_REP	years	7.45	5.04	0	20	238	0
	AGE	years	11	5.44	0	22	238	0
Κλίμα	D_AB_32	days	58.66	53.73	0	190	217	21
	D_BEL_0	days	89	67.74	0	243	217	21
	FR_IND	°C-days	302.78	534.08	0	2442	217	21
	FR_TH	days	68.74	44.41	0	173	217	21
	PRECIP	mm	819.26	488.32	27.5	1834.1	217	21
Κυκλοφορία	AADT	count	1307.81	1674.37	224	7597	145	93
	ESAL	count	638.18	895.85	26	3965	168	70

Πίνακας 4.2. Περιγραφική Στατιστική (πάχη στρώσεων)

Διαδικασία Συντήρησης	Υπόβαση & Βάση ^a		Ασφαλτόμιγμα ^b		Νέο Ασφαλτόμιγμα ^c	
	Mean	Std. Dev	Mean	Std. Dev	Mean	Std. Dev
502	17.76	11.24	7.51	2.38	2.42	0.66
503	17.27	7.85	10.37	2.32	5.18	0.60
504	16.69	7.94	10.24	2.11	5.15	0.50
505	16.49	8.22	7.79	2.37	2.45	0.55
506	15.75	6.94	7.49	2.42	3.84	0.90
507	19.74	13.65	10.26	2.33	6.66	0.72
508	17.06	8.12	10.36	2.75	6.83	0.86
509	16.81	8.24	7.62	2.47	4.11	0.57

a. Συνολικό πάχος υπόβασης-βάσης (σε ίντσες)

b. Πάχος ασφαλτικών στρώσεων μετά τη συντήρηση (σε ίντσες)

c. Πάχος του νέου ασφαλτικού υλικού που προστέθηκε κατά τη συντήρηση (σε ίντσες)

Πίνακας 4.3. Υψηλοί συντελεστές συσχέτισης μεταξύ ανεξάρτητων μεταβλητών

	T_S_REP	
AGE	0.88	
	FR_IND	FR_TH
D_BEL_0	0.82	0.89
	AADT_TR	
ESAL	0.92	
	D_BEL_0	FR_TH
D_AB_32	-0.70	-0.64
TH_BAS	-0.65	-0.65
	TH_SUB	
TH_SB	0.85	

4.3. Μοντέλα Binomial Probit, Random Effects Binary Probit και Multivariate Probit

Στην παρούσα εργασία, το φαινόμενο της εμφάνισης αλγιοτορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια ευκάμπτου οδοστρώματος αναλύεται με τη χρήση μοντέλων δυαδικής επιλογής (binary choice), όπου η εξαρτημένη μεταβλητή μπορεί να πάρει μόνο δύο πιθανές τιμές: 1, όταν το οδόστρωμα έχει εμφανίσει ρηγματώσεις και, 0, όταν δεν έχουν εμφανιστεί ρηγματώσεις. Τα μοντέλα δυαδικής επιλογής (δίτιμα μοντέλα) περιγράφουν άμεσα την πιθανότητα $P(y_i = 1)$ της εξαρτημένης μεταβλητής y_i ως συνάρτηση των επεξηγηματικών μεταβλητών x_i' (Σταθόπουλος και Καρλαύτης, 2008). Η πιθανότητα η εξαρτημένη μεταβλητή να πάρει την τιμή 1 αποδίδεται από τον εξής τύπο (Greene, 2003):

$$P(y_i = 1 | x_i) = \int_{-\infty}^{x_i'\beta} \phi(t) dt = \Phi(x_i'\beta) \quad (1)$$

Στο μοντέλο Binomial Probit γίνεται η υπόθεση ότι η συνάρτηση μετασχηματισμού $\Phi(.)$ είναι η αθροιστική συνάρτηση (cumulative density function) της τυποποιημένης κανονικής κατανομής. Η εκτίμηση του μοντέλου γίνεται με τη μέθοδο της Μέγιστης Πιθανοφάνειας

(Maximum Likelihood) και συγκεκριμένα με την μεγιστοποίηση του φυσικού λογαρίθμου της συνάρτησης μέγιστης πιθανοφάνειας (log likelihood function):

$$\log L = \sum_{i=1}^N [y_i \log \Phi(x_i' \beta) + (1 - y_i) \log(1 - \Phi(x_i' \beta))] \quad (2)$$

Η συνάρτηση του φυσικού λογαρίθμου της μέγιστης πιθανοφάνειας της Εξ. 2 είναι μη-γραμμική γι' αυτό ο προσδιορισμός των συντελεστών β γίνεται με μεθόδους αριθμητικής βελτιστοποίησης. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι τα β , σε αντίθεση με την γραμμική παλινδρόμηση, δεν μπορούν να ερμηνευτούν άμεσα αλλά μπορούν να συνεκτιμηθούν με τον υπολογισμό των οριακών επιδράσεων (marginal effects) για της ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι οριακές επιδράσεις, όταν έχουν υπολογιστεί στη μέση τιμή των μεταβλητών, δείχνουν την μεταβολή της πιθανότητας, για μία μονάδα αύξησης της ανεξάρτητης μεταβλητής από τη μέση τιμή με τις υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές να παραμένουν σταθερές (Washington et al., 2010).

Μία επέκταση των μοντέλων Probit, ειδική για δυναμικά διαστρωματικά στοιχεία είναι τα μοντέλα Random Effects Probit (Greene, 2003). Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να γραφτεί ως:

$$y_{it}^* = x_{it}' \beta + \varepsilon_{it}, \quad i = 1, \dots, n, t = 1, \dots, T_i, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{it} = v_{it} + u_i \quad (4)$$

όπου y_{it}^* είναι η μη παρατηρούμενη μεταβλητή, x_{it}' είναι ο $1 \times k$ πίνακας των ανεξάρτητων μεταβλητών, β είναι ο $k \times 1$ πίνακας των συντελεστών, u_i είναι η ατομική ετερογένεια και v_{it} είναι ένα τυχαίο σφάλμα. Το n αναφέρεται στον αριθμό των ομάδων (Πολιτείες στην περίπτωση μας) και το T_i στις διαθέσιμες χρονικές περιόδους. Η παρατηρούμενη μεταβλητή y_{it} προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$y_{it} = 1 \text{ if } y_{it}^* > 0, \text{ αλλιώς } 0 \quad (5)$$

Η υπόθεση ότι το u_i είναι ασυσχέτιστο με το x_{it} έτσι ώστε η δεσμευμένη κατανομή $f(u_i | x_{it})$ να μην εξαρτάται από το x_{it} , παράγει το μοντέλο των random effects (Greene, 2003). Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι τα u_i και v_{it} είναι αμοιβαίως ανεξάρτητα και ότι:

$$u_t \sim N(0, \sigma_u^2) \quad (6)$$

$$v_{it} \sim N(0, \sigma_v^2) \quad (7)$$

Τα ε_{it} και ε_{is} για $t \neq s$, σε ιδανικές συνθήκες είναι ελεύθερα συσχετιζόμενα μέσα σε μία ομάδα αλλά ασυσχέτιστα ανάμεσα στις διαφορετικές ομάδες (Greene, 2003). Η συσχέτιση των ε_{it} ανάμεσα στις παρατηρήσεις μιας ομάδας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Corr}[\varepsilon_{it}, \varepsilon_{is} | X] = \rho = \frac{\sigma_u^2}{\sigma_v^2 + \sigma_u^2} \quad \text{όπου } t \neq s \quad (8)$$

Στα μοντέλα Probit ως μέτρο καλής προσαρμογής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής ψευδο- ρ^2 του MacFadden (pseudo ρ^2) ο οποίος υπολογίζεται με βάση την τιμή του λογαρίθμου της συνάρτησης μέγιστης πιθανοφάνειας υπολογισμένη μόνο με το σταθερό όρο ($\ln L_0$) και την μέγιστη τιμή της στο τέλος της ανάλυσης ($\ln L$) όπως στην παρακάτω σχέση (Greene, 2003):

$$\rho^2 = 1 - \frac{\ln L}{\ln L_0} \quad (9)$$

Το μοντέλο multivariate probit είναι μια μορφή πολυμεταβλητού μοντέλου διακριτής επιλογής (multivariate discrete choice model) το οποίο βασίζεται στην πολυμεταβλητή κανονική κατανομή (multivariate normal distribution). Η επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών στις εξαρτημένες υπολογίζεται ταυτόχρονα και επιτρέπεται στα σφάλματα να συσχετίζονται ελεύθερα.

Το μοντέλο multivariate probit, με τη θεώρηση μεταβλητών πολλαπλών απαντήσεων, μπορεί να γραφεί μαθηματικά ως εξής:

$$y_1^* = \beta_1 x_1 + \varepsilon_1$$

$$y_2^* = \beta_2 x_2 + \varepsilon_2$$

...

$$y_n^* = \beta_n x_n + \varepsilon_n \quad (10)$$

όπου y^* είναι οι τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών (διαφορετικές διαδικασίες συντήρησης) και τα ε είναι οι όροι των σφαλμάτων, ο ρόλος των οποίων είναι να περιλάβουν μεταβλητές που επηρεάζουν την επιλογή του 0,1 αλλά δεν περιλαμβάνονται στο μοντέλο και άλλους άγνωστους παράγοντες. Επίσης, για τα σφάλματα ισχύει:

$$E[\varepsilon_1] = E[\varepsilon_2] = \dots = E[\varepsilon_n] = 0 \quad (11)$$

$$Var[\varepsilon_1] = Var[\varepsilon_2] = \dots = Var[\varepsilon_n] = 0 \quad (12)$$

$$Cov[\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n] = \rho \quad (13)$$

Από την εξίσωση (13) υπολογίζεται ο πίνακας των ρ ο οποίος δίνει τις συσχετίσεις μεταξύ των εξαρτημένων μεταβλητών.

Η γενική μορφή του μοντέλου multivariate probit για n αριθμό εξαρτημένων μεταβλητών είναι:

$$Y_i^* = \beta_i X_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

όπου Y_i^* είναι η μη παρατηρούμενη εξαρτημένη μεταβλητή, X_i είναι ο πίνακας των ανεξάρτητων μεταβλητών, β_i είναι ο πίνακας των συντελεστών και ε_i είναι το σφάλμα το οποίο ακολουθεί την τυπική κανονική κατανομή (μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1). Ο πίνακας των συνδυακυμάνσεων ρ των σφαλμάτων είναι της παρακάτω μορφής:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \dots & \rho_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1} & \dots & \rho_{nn} \end{pmatrix}$$

Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων στο μοντέλο γίνεται με τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo (Washington et al., 2003).

4.4. Αποτελέσματα από την στατιστική επεξεργασία για το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης

4.4.1. Εισαγωγή

Πρώτο βήμα στη στατιστική επεξεργασία είναι η παρουσίαση της έναρξης των αλγατορικών ρηγματώσεων από ένα μοντέλο για το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του δίτιμου μοντέλου probit (binomial probit) και στη συνέχεια, για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων, εφαρμόστηκε η μέθοδος του δίτιμου μοντέλου probit τυχαίων επιπτώσεων (random effects binary probit) η οποία είναι κατάλληλη για δυναμικά διαστρωματικά στοιχεία και από την οποία προέκυψε και το τελικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα στον οποίο εμφανίζονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές καθώς και ο συντελεστής επίδρασης (coefficient estimate) της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη, ο έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας (t-statistic) και η οριακή επιρροή (marginal effect) του μέσου όρου της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στην πιθανότητα εμφάνισης αλγατορικών ρηγματώσεων (θεωρώντας ότι οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές και στο μέσο όρο τους). Η επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών έγινε με δύο κριτήρια: i. να έχουν λογική συνέπεια, δηλαδή η θετική ή αρνητική επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη να μπορεί να εξηγηθεί από τη θεωρία και ii. να επηρεάζουν με στατιστικά σημαντικό τρόπο την εξαρτημένη μεταβλητή σε επίπεδο εμπιστοσύνης 5%.

Για να επιτευχθεί η επεξεργασία των δεδομένων για όλες τις διαδικασίες συντήρησης μαζί, χρησιμοποιήθηκαν τρεις ψευδο-μεταβλητές (OVER_TH, SURF_PR, RECYCL) οι οποίες εισάγουν τα χαρακτηριστικά της κάθε διαδικασίας συντήρησης στην αντίστοιχη παρατήρηση (αναλυτικά η εξήγηση των μεταβλητών στον πίνακα 3.4). Για παράδειγμα, αν για μία καταχώρηση οι τιμές των ψευδο-μεταβλητών είναι OVER_TH=0, SURF_PR=1 και RECYCL=0, συνεπάγεται ότι η καταχώρηση αναφέρεται σε ένα τμήμα στο οποίο έχει εφαρμοστεί η διαδικασία συντήρησης 509.

4.4.2. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Το φαινόμενο της έναρξης των αλγατορικών ρηγματώσεων μετά τη συντήρηση του οδοστρώματος αντιπροσωπεύεται από ένα δίτιμο μοντέλο probit τυχαίων επιδράσεων και

τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.4. Από τη θεωρία των δομικών αστοχιών στα εύκαμπτα οδοστρώματα, γνωρίζουμε ότι αυξανόμενου του χρόνου που μεσολαβεί από τη συντήρηση και αυξανόμενης της κυκλοφορίας, η πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων θα πρέπει να αυξάνεται λόγω της κόπωσης του ασφαλομίγματος. Επίσης, μεγάλος δείκτης παγετού σημαίνει ότι πολλές ημέρες του έτους η θερμοκρασία ήταν μικρότερη των 0°C αλλά και ότι σε αυτές τις ημέρες η απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας ήταν πολύ μεγάλη. Επομένως, είναι λογικό να περιμένουμε ότι όσο αυξάνεται ο δείκτης παγετού, αυξάνεται και η πιθανότητα το οδόστρωμα να ρηγματωθεί, μιας και οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες κάνουν το ασφαλομίγμα πιο ψαθυρό με αποτέλεσμα να ρηγματώνεται πιο εύκολα. Τέλος, περιμένουμε ότι αυξήσεις στα πάχη των στρώσεων, και ειδικά των ασφαλικών, θα μειώσουν την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων.

Τα πρόσημα των συντελεστών επίδρασης επιβεβαιώνουν τις υποθέσεις που κάναμε βάσει της θεωρίας. Στην ανάλυση συμπεριλήφθηκε και το τετράγωνο των ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού. Η στατιστική σημαντικότητα αυτής της παραμέτρου υποδηλώνει τη μη γραμμική φύση της σύνδεσης της κυκλοφορίας με την πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων. Από τα αποτελέσματα των marginal effects των μεταβλητών μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αν χρησιμοποιήσουμε μη-ανακυκλωμένη ασφαλτο στην επίστρωση, η πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων μειώνεται κατά 13.6%, ενώ η τοποθέτηση 5 ιντσών ασφαλομίγματος στην επίστρωση μειώνει την πιθανότητα κατά 13.1% σε σχέση με την τοποθέτηση 2 ιντσών. Επιπλέον, αύξηση του χρόνου που μεσολαβεί από τη συντήρηση κατά 1 έτος αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια του οδοστρώματος κατά 9.3%.

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα μοντέλου Random effects binary probit για το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης.

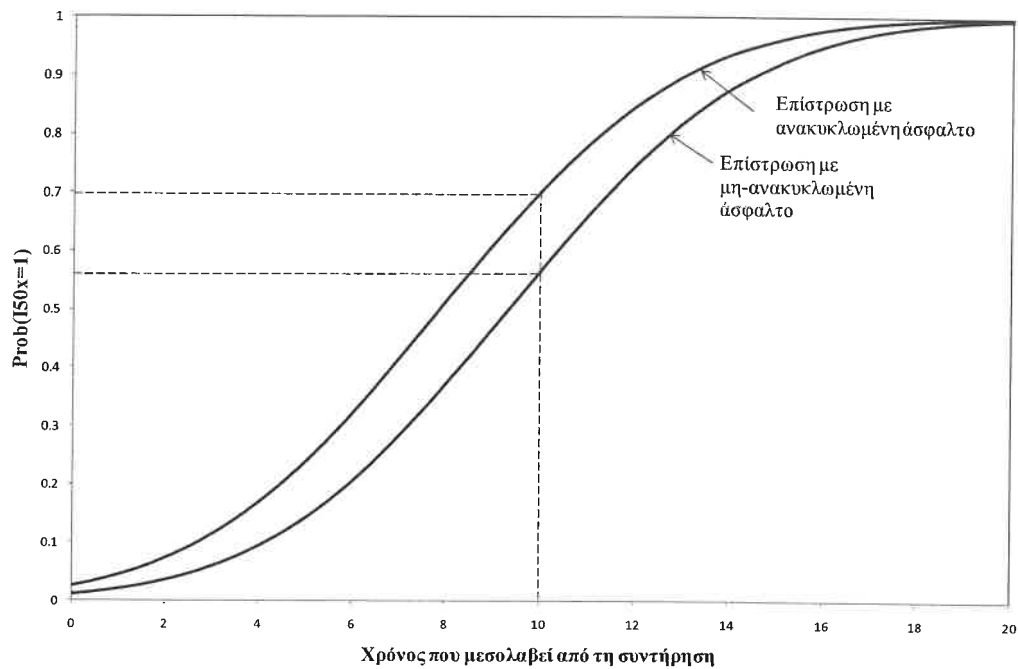
ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	έλεγχος t (t-stat)	οριακή επιρροή (marginal effect)
constant	-2.059	-14.960	-0.773
T_S_REP	0.247	22.344	0.093
FR_IND	0.001	12.242	0.0003
ESAL	0.002	15.598	0.0006
ESAL ²	-0.4E-06	-14.078	-0.2E-06
TH_SB	-0.111	-3.497	-0.004
TH_AC	-0.032	-3.078	-0.012
OVER_TH	-0.349	-6.937	-0.131
SURF_PR	-0.110	-2.533	-0.041
RECYCL	-0.361	-8.013	-0.136
ρ	0.043	4.977	-
αριθμός παρατηρήσεων	1904		
initial log-likelihood value	-1,299.089		
log-likelihood at convergence	-655.580		
pseudo ρ^2	0.495		
% επιτυχών προβλέψεων	83.3		

Στον Πίνακα 4.5 παρατίθενται τα αποτελέσματα των προβλέψεων που προέκυψαν για το παραπάνω μοντέλο. Το μοντέλο προβλέπει σωστά το 87.1% των τμημάτων που δεν εμφάνισαν ρηγμάτωση (49.9% επί του συνόλου) και το 78.2% των τμημάτων που εμφάνισαν ρηγμάτωση (40.8% επί του συνόλου). Η υψηλή επιτυχία των προβλέψεων του μοντέλου δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί στην πράξη για την διαχείριση της συντήρησης ενός οδικού δικτύου.

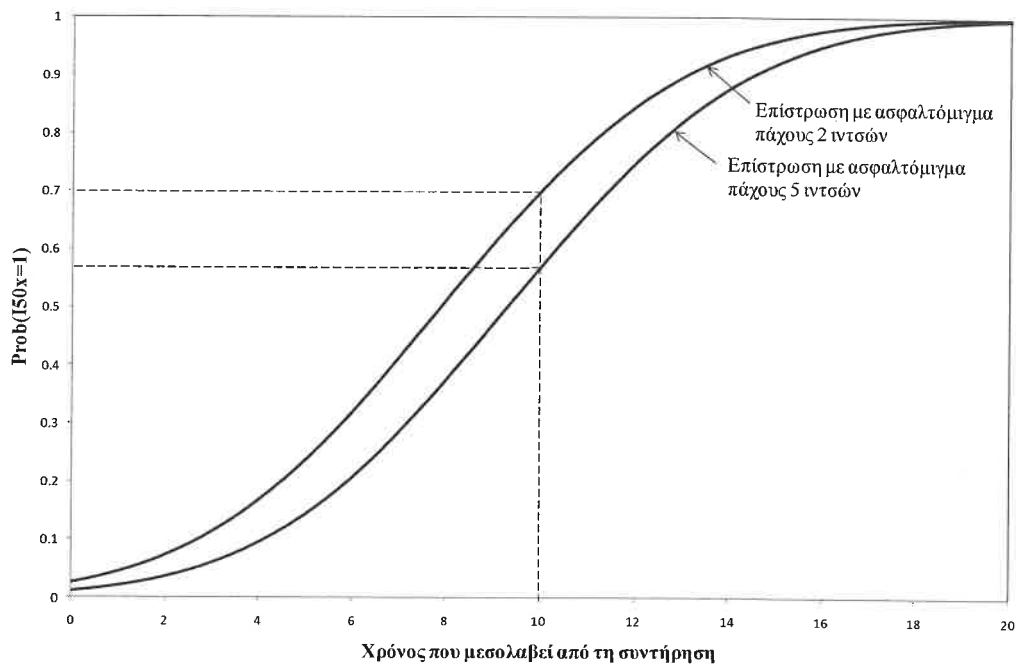
Πίνακας 4.5. Προβλέψεις για το μοντέλο Random effects binary probit για το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης.

Πραγματική Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή				Πραγματικό Σύνολο
	0		1		
0	951	(87.1%)	141	(12.9%)	1092
1	177	(21.8%)	635	(78.2%)	812
Συνολικές επιτυχείς προβλέψεις					83.3%

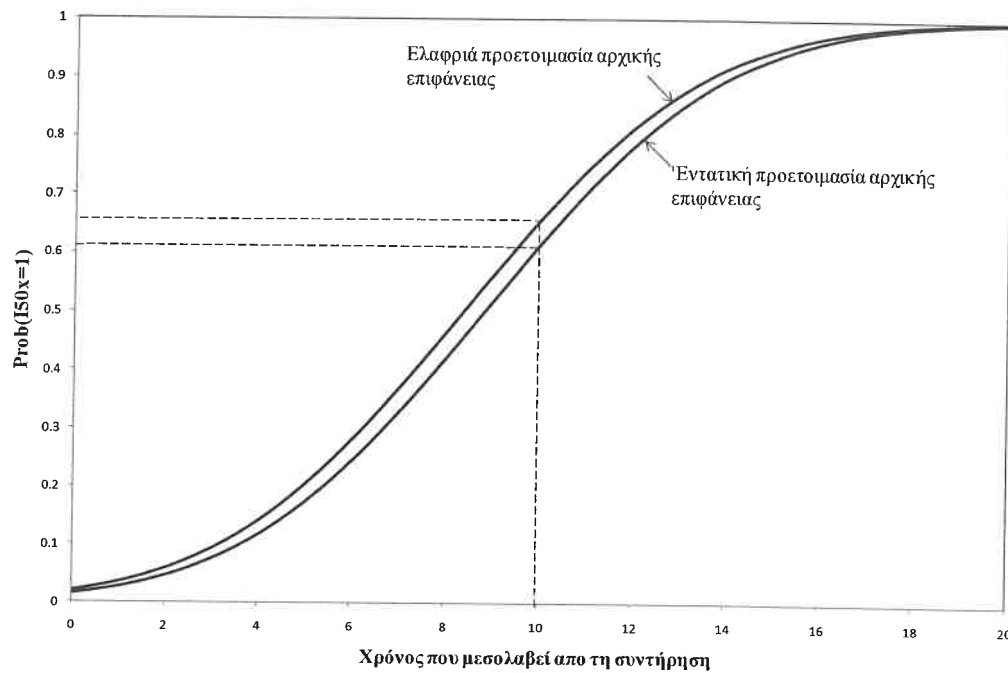
Τα διαγράμματα 4.1 έως 4.3 παρουσιάζουν την αθροιστική πιθανότητα της εμφάνισης αλιγοτροικών ρηγματώσεων σε σχέση με την επίδραση των διαφορετικών στοιχείων των διαδικασιών συντήρησης. Στο Διάγραμμα 4.1, παρατηρούμε ότι 10 χρόνια μετά τη συντήρηση, η πιθανότητα ρηγμάτωσης είναι 70% για οδοστρώματα στα οποία τοποθετήθηκε ανακυκλωμένη άσφαλτος ως επίστρωση και 57% για οδοστρώματα στα οποία τοποθετήθηκε μη-ανακυκλωμένη άσφαλτος. Αυτή η διαφορά μπορεί να δικαιολογηθεί καθώς οι αλιγοτροικές ρηγματώσεις είναι συνέπεια της κόπωσης του ασφαλτικού υλικού. Όταν ένα ήδη γερασμένο υλικό χρησιμοποιείται στη συντήρηση είναι πιθανό ότι θα κρατήσει λιγότερο στο χρόνο από ότι ένα νέο. Στο Διάγραμμα 4.2 επίσης παρατηρούμε ότι ένα οδόστρωμα στο οποίο τοποθετούνται 2 ίντσες ασφαλτόμιγμα ως επίστρωση θα ρηγματωθεί νωρίτερα από ότι ένα οδόστρωμα με 5 ίντσες επίστρωση. Το πάχος της επίστρωσης παίζει σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση ρηγματώσεων, ειδικά όταν δεν έχει γίνει φρεζάρισμα, γιατί το νέο ασφαλτόμιγμα θα είναι το μόνο που θα φέρει τα φορτία εάν η αρχική επιφάνεια είναι πολύ ρηγματωμένη. Συγκρίνοντας τα τρία διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό ότι το στοιχείο που επηρεάζει λιγότερο την εμφάνιση αλιγοτροικών ρηγματώσεων είναι ο τρόπος προετοιμασίας της αρχικής επιφάνειας του οδοστρώματος πριν τη συντήρηση.



Διάγραμμα 4.1. Επίδραση του είδους του ασφαλτομίγματος που χρησιμοποιείται ως επίστρωση στην πιθανότητα εμφάνισης αλγατορικών ρηγματώσεων.



Διάγραμμα 4.2. Επίδραση του πάχους του ασφαλτομίγματος που χρησιμοποιείται ως επίστρωση στην πιθανότητα εμφάνισης αλγατορικών ρηγματώσεων.



Διάγραμμα 4.3. Επίδραση του είδους της προετοιμασίας της αρχικής επιφάνειας του οδοστρώματος στην πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων.

4.5. Αποτελέσματα από την στατιστική επεξεργασία για την κάθε διαδικασία συντήρησης ξεχωριστά

4.5.1. Εισαγωγή

Επόμενο βήμα της στατιστικής επεξεργασίας είναι η παρουσίαση του φαινομένου της εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια ευκάμπτου οδοστρώματος από δίτιμα μοντέλα probit (binomial probit), ένα για κάθε διαδικασία συντήρησης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε πίνακες στους οποίους εμφανίζονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές καθώς και ο συντελεστής επίδρασης (coefficient estimate) της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη, ο έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας (t-statistic) και η οριακή επιρροή (marginal effect) του μέσου όρου της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στην πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων δεδομένου ότι οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές και στον μέσο όρο τους. Η επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών για κάθε μοντέλο πραγματοποιήθηκε ακριβώς όπως και στο πρώτο βήμα της ανάλυσης.

Ακολουθεί αναλυτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων για κάθε διαδικασία συντήρησης ξεχωριστά καθώς και σύγκριση της επίδρασης των διαδικασιών στο οδόστρωμα. Τέλος, παρουσιάζεται ένα βελτιωμένο μοντέλο για τη συντήρηση 507 και συγκρίνεται με το αρχικό.

4.5.2. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Διαδικασία Συντήρησης: 502

Στον Πίνακα 4.6 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση του μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 502. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση (T_S_REP), ο ετήσιος αριθμός ημερών όπου η θερμοκρασία έπεσε κάτω από τους 0°C (D_BEL_0), ο ημερήσιος μέσος αριθμός φορτηγών (AADT_TR) και το πάχος των ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση (TH_AC_2).

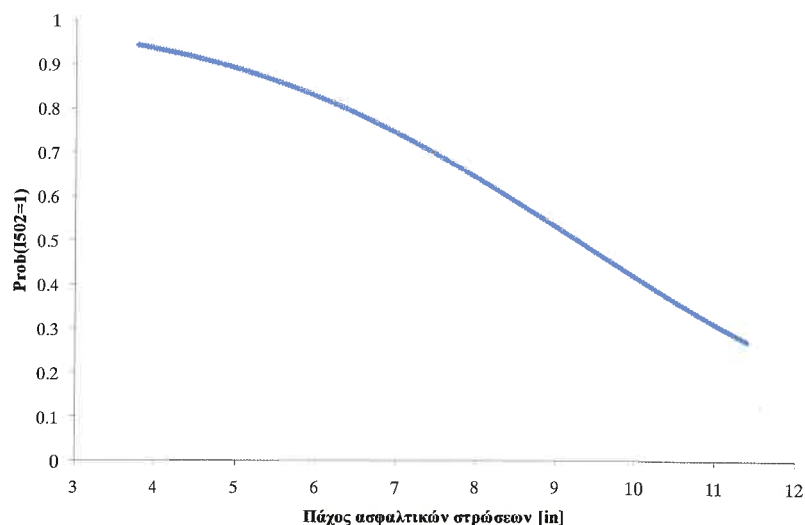
Από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος που μεσολαβεί από την διαδικασία συντήρησης τόσο αυξάνεται η πιθανότητα της εμφάνισης ρηγματώσης και συγκεκριμένα, αύξηση του χρόνου κατά 1 έτος αυξάνει την πιθανότητα της εμφάνισης ρηγματώσης κατά 16.3%. Το γεγονός αυτό είναι απολύτως λογικό αφού το ασφαλτόμιγμα με την πάροδο του χρόνου γερνάει και σταδιακά εμφανίζει αλगाτορικές ρηγματώσεις οι οποίες στην ουσία είναι ρηγματώσεις κόπωσης εξαιτίας της φθοράς του ασφαλτομίγματος.

Σε ό,τι αφορά τα κλιματολογικά δεδομένα, περισσότερο σημαντική φάνηκε να είναι η επίδραση του ετήσιου αριθμού ημερών που η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία ήταν μικρότερη των 0°C (D_BEL_0). Αύξηση αυτού του ετήσιου αριθμού κατά 1 ημέρα προκαλεί αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης ρηγματώσεων κατά 0.4%, γεγονός το οποίο δείχνει ότι οι χαμηλές θερμοκρασίες επιδρούν αρνητικά στα εύκαμπτα οδοστρώματα, πιθανότατα διότι το οδόστρωμα γίνεται πιο ψαθυρό, η εφελκυστική του αντοχή μειώνεται και έτσι ρηγματώνεται πιο εύκολα.

Η επίδραση του αριθμού των βαρέων οχημάτων στην έναρξη των ρηγματώσεων είναι προφανώς θετική αφού τα βαρέα οχήματα είναι γνωστό από τη θεωρία ότι προκαλούν μεγάλες καταπονήσεις στα εύκαμπτα οδοστρώματα και μάλιστα όχι σε αναλογία βάρους

με τα IX (1 διέλευση αξονικού φορτίου 13t προκαλεί στο οδόστρωμα καταπόνηση ισοδύναμη με 7 σχεδόν διελεύσεις αξονικού φορτίου 8t). Όπως φαίνεται από τα marginal effects στα αποτελέσματα, αύξηση του ημερήσιου αριθμού των φορτηγών κατά 1 μονάδα προκαλεί αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης αλियाτορικών ρηγματώσεων κατά 0.03%.

Το πάχος των ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση παίζει σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση ρηγματώσεων γιατί όσο μεγαλύτερο είναι, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απομείωση του φορτίου που ασκείται στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Έτσι, ένα οδόστρωμα με μεγάλο πάχος ασφαλικών στρώσεων σε σχέση με ένα άλλο, πρόκειται να έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής διότι τα εξωτερικά φορτία φθάνουν αρκετά απομειωμένα στη βάση των ασφαλικών στρώσεων και έτσι δεν υπερβαίνεται η εφελκυστική αντοχή του ασφαλτομίγματος. Βέβαια, η υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής δεν δημιουργεί αλियाτορικές ρηγματώσεις στο οδόστρωμα σε πρώτη φάση αλλά κατά μήκος ρηγματώσεις στο ίχνος των τροχών των οχημάτων. Με την πάροδο του χρόνου, αυτές οι ρηγματώσεις προχωρούν και καταλήγουν σε αλियाτορικές λόγω των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων, της επίδρασης των καιρικών φαινομένων και κυρίως του νερού. Κατά αυτόν τον τρόπο, το συνολικό πάχος των ασφαλικών στρώσεων επιδρά έμμεσα στην εμφάνιση αλियाτορικών ρηγματώσεων. Για τη συγκεκριμένη διαδικασία συντήρησης παρατηρείται ότι αύξηση των ασφαλικών κατά 1 ίντσα προκαλεί μείωση της πιθανότητας έναρξης του φαινομένου της ρηγματώσεως κατά 10%. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η επίδραση του πάχους του ασφαλτομίγματος στην πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων για το υπάρχων εύρος τιμών.



Διάγραμμα 4.4. Πιθανότητα εμφάνισης αλियाτορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το πάχος των ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση για τη διαδικασία συντήρησης 502.

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 502

ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	έλεγχος t (t-stat)	οριακή επιρροή (marginal effect)
constant	-2.207	-3.827	-0.295
T_S_REP	0.471	7.742	0.163
D_BEL_0	0.011	4.157	0.004
FR_IND			
FR_TH			
PRECIP			
AADT_TR	0.001	2.064	0.0003
AADT2	-0.14E-06	-2.754	-0.48E-07
ESAL			
ESAL2			
TH_SB_2			
TH_SUB_2			
TH_AC_2	-0.288	-3.648	-0.100
TH_IMP_2			
αριθμός παρατηρήσεων	238		
initial log-likelihood value	-164.431		
log-likelihood at convergence	-57.998		
pseudo ρ^2	0.647		
% επιτυχών προβλέψεων	89.5		

Σε ό,τι αφορά τις προβλέψεις, το μοντέλο για τη διαδικασία συντήρησης 502 προβλέπει σωστά κατά μέσο όρο το 89.5% των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, μόνο το 4.6% των παρατηρήσεων στις οποίες στην πραγματικότητα δεν υπήρχε εμφάνιση ρηγμάτωσης (τιμή 0), το αποτέλεσμα της πρόβλεψης είναι λανθασμένο (τιμή 1). Το σύνολο των προβλέψεων φαίνεται αναλυτικότερα στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.7. Προβλέψεις μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 502

Πραγματική Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή		Πραγματικό Σύνολο
	0	1	
0	100 (90.1%)	11 (9.9%)	111
1	14 (11.0%)	113 (89.0%)	127
Συνολικές επιτυχείς προβλέψεις			89.5%

Διαδικασία Συντήρησης: 503

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση του μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 503. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση (T_S_REP), ο δείκτης παγετού (FR_IND), οι κύκλοι freeze-thaw (FR_TH), ο ετήσιος αριθμός ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού σε χιλιάδες (ESAL) και το πάχος των ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση (TH_AC_3).

Ο αριθμός των ετών που πέρασαν από το έτος που έγινε η συντήρηση επιδρά θετικά στην έναρξη του φαινομένου της ρηγμάτωσης, γεγονός λογικό όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Αύξηση του αριθμού των ετών κατά 1 μονάδα αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων κατά 14.6%.

Σημαντική είναι η επίδραση του δείκτη παγετού και των κύκλων freeze-thaw (δηλαδή του αριθμού των ημερών στις οποίες η θερμοκρασία από μικρότερη των 0°C γίνεται μεγαλύτερη των 0°C). Και οι δύο αυτές μεταβλητές συμβάλλουν θετικά στο φαινόμενο της έναρξης της ρηγμάτωσης. Μεγάλος δείκτης παγετού σημαίνει ότι πολλές ημέρες του έτους η θερμοκρασία ήταν μικρότερη των 0°C αλλά και ότι σε αυτές τις ημέρες η απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας ήταν πολύ μεγάλη. Επομένως, είναι λογικό το ότι όσο αυξάνεται ο δείκτης παγετού, αυξάνεται και η πιθανότητα το οδόστρωμα να ρηγματωθεί. Για τη συγκεκριμένη διαδικασία συντήρησης βρέθηκε ότι αύξηση του δείκτη παγετού κατά 1 Celsius-days θα προκαλούσε αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης ρηγματώσεων κατά 0.04%. Αντίστοιχα, οι κύκλοι freeze-thaw καταπονούν το οδόστρωμα σε κόπωση λόγω της εναλλαγής παγώματος-ξεπαγώματος και έτσι επιδρούν θετικά στο φαινόμενο της ρηγμάτωσης.

Σε ό,τι αφορά την κυκλοφορία, σημαντική ήταν η επίδραση του ετήσιου αριθμού των ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού. Συγκεκριμένα, αύξηση της τιμής του ESAL κατά 1000 αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγμάτωσης κατά 0.1%.

Τέλος, το συνολικό πάχος των ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση παίζει σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο της ρηγμάτωσης, όπως εξηγήθηκε και παραπάνω. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι αύξηση των ασφαλικών κατά 1 ίντσα προκαλεί μείωση της πιθανότητας έναρξης του φαινομένου της ρηγμάτωσης κατά 8%.

Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 503

ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	έλεγχος t (t-stat)	οριακή επιρροή (marginal effect)
constant	-2.883	-3.849	-0.618
T_S_REP	0.385	7.779	0.146
D_BEL_0			
FR_IND	0.001	3.243	0.0004
FR_TH	0.010	2.644	0.004
PRECIP			
AADT_TR			
AADT2			
ESAL	0.003	4.196	0.001
ESAL2	-0.9E-06	-3.398	-0.3E-06
TH_SB_3			
TH_SUB_3			
TH_AC_3	-0.209	-3.081	-0.080
TH IMP_3			
αριθμός παρατηρήσεων	238		
initial log-likelihood value	-163.073		
log-likelihood at convergence	-59.989		
pseudo ρ^2	0.632		
% επιτυχών προβλέψεων	89.1		

Σε ό,τι αφορά τις προβλέψεις, το μοντέλο για τη διαδικασία συντήρησης 503 προβλέπει σωστά κατά μέσο όρο το 89.1% των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, το 5.5% των παρατηρήσεων στις οποίες στην πραγματικότητα δεν υπήρχε εμφάνιση ρηγμάτωσης (τιμή 0), το αποτέλεσμα της πρόβλεψης είναι λανθασμένο (τιμή 1). Το σύνολο των προβλέψεων φαίνεται αναλυτικότερα στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.9. Προβλέψεις μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 503

Πραγματική Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή				Πραγματικό Σύνολο
	0		1		
0	121	(90.3%)	13	(9.7%)	134
1	13	(12.5%)	91	(87.5%)	104
Συνολικές επιτυχείς προβλέψεις					89.1%

Διαδικασία Συντήρησης: 504

Στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση του μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 504. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση (T_S_REP), ο ετήσιος αριθμός ημερών όπου η θερμοκρασία έπεσε κάτω από τους 0°C (D_BEL_0), η συνολική ετήσια βροχόπτωση (PRECIP), ο ετήσιος αριθμός ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού σε χιλιάδες (ESAL), το συνολικό πάχος των ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση (TH_AC_4) και το πάχος των νέων ασφαλικών στρώσεων που προστέθηκαν κατά τη συντήρηση (TH_IMP_4).

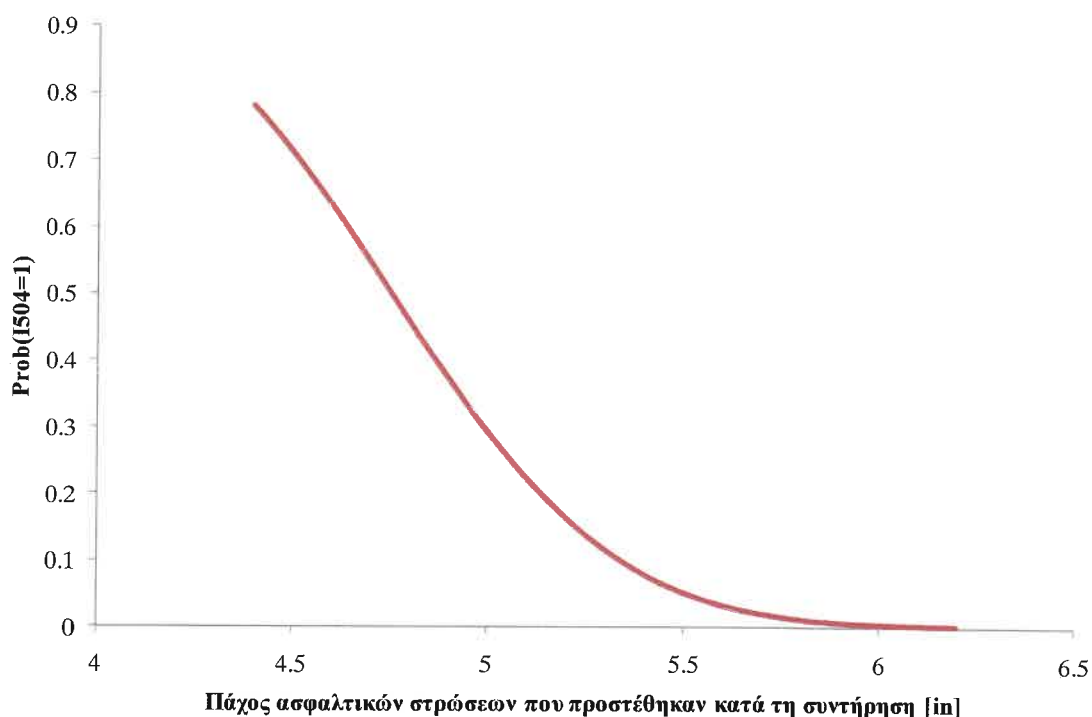
Από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης παρατηρείται ότι αύξηση του χρόνου που μεσολαβεί από τη συντήρηση κατά 1 έτος προκαλεί αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου της ρηγμάτωσης κατά 8.3%. Επιπλέον, αύξηση του ετήσιου αριθμού ημερών που η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία ήταν μικρότερη των 0°C κατά 1 ημέρα αυξάνει την πιθανότητα έναρξης της ρηγμάτωσης κατά 0.4%. Και τα δύο αυτά αποτελέσματα είναι απολύτως λογικά, όπως έχει εξηγηθεί παραπάνω.

Ένα επιπλέον καιρικό φαινόμενο που αποδείχτηκε ότι επηρεάζει το φαινόμενο της ρηγμάτωσης στη συγκεκριμένη διαδικασία συντήρησης είναι η βροχόπτωση. Το βρόχινο νερό διαβρώνει την επιφάνεια του οδοστρώματος, ειδικά όταν δεν αποστραγγίζεται σωστά. Η διάβρωση αυτή μακροπρόθεσμα επιτρέπει τη διήθηση του νερού στις εσωτερικές στρώσεις. Και η επιφανειακή διάβρωση αλλά και η είσοδος του νερού στο εσωτερικό του οδοστρώματος, καθιστούν το οδόστρωμα πιο ευάλωτο στην αστοχία. Από την ανάλυση συμπεραίνεται ότι αύξηση της ετήσιας βροχόπτωσης κατά 1mm, αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων κατά 0.02%.

Ο ετήσιος αριθμός ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού βρέθηκε να επηρεάζει θετικά το φαινόμενο της ρηγμάτωσης, όπως ήταν αναμενόμενο. Συγκεκριμένα, αύξηση της ετήσιας τιμής του ESAL κατά 1000 αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγμάτωσης κατά 0.1%.

Σε ό,τι αφορά τα κατασκευαστικά δεδομένα, δύο παράγοντες φάνηκε ότι παίζουν σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο της ρηγμάτωσης στη συγκεκριμένη διαδικασία συντήρησης, το συνολικό πάχος των ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση και το πάχος των νέων ασφαλικών στρώσεων που προστέθηκαν κατά την συντήρηση. Για το πρώτο, από τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι αύξηση των ασφαλικών κατά 1 ίντσα

προκαλεί μείωση της πιθανότητας έναρξης του φαινομένου κατά 4.2%. Η συμβολή όμως του πάχους του νέου υλικού που προστίθεται φαίνεται να είναι πολύ μεγαλύτερη αφού αύξηση 1 ίντσας προκαλεί μείωση της πιθανότητας εμφάνισης ρηγματώσεων κατά 59.8%. Οι αλγατορικές ρηγματώσεις κυρίως οφείλονται στην κόπωση του ασφαλτομίγματος και στη φθορά του λόγω των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων. Στη συγκεκριμένη διαδικασία συντήρησης, η παλιά επιφάνεια δέχεται ελαφριά προετοιμασία (minimal surface preparation) και από πάνω τοποθετείται νέο ασφαλτόμιγμα (όχι ανακυκλωμένο). Το νέο υλικό κυμαίνεται από 4.4 έως 6.2 ίντσες στις διάφορες Πολιτείες σύμφωνα με τις καταγραφές που έχουν γίνει και όπως φαίνεται από την ανάλυση, αυτή η διακύμανση είναι σημαντική για το φαινόμενο της ρηγματώσεως όταν στην παλιά επιφάνεια δεν έχει γίνει φρεζάρισμα. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η επιρροή του πάχους του ασφαλτομίγματος που προστίθεται κατά τη συντήρηση στην πιθανότητα εμφάνισης αλγατορικών ρηγματώσεων.



Διάγραμμα 4.5. Πιθανότητα εμφάνισης αλγατορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το πάχος των νέων ασφαλτικών στρώσεων που προστέθηκαν κατά τη συντήρηση για τη διαδικασία συντήρησης 504.

Πίνακας 4.10. Αποτελέσματα μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 504

ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	έλεγχος t (t-stat)	οριακή επιρροή (marginal effect)
constant	6.874	3.538	0.191
T_S_REP	0.304	7.741	0.083
D_BEL_0	0.015	5.089	0.004
FR_IND			
FR_TH			
PRECIP	0.001	2.065	0.0002
AADT_TR			
AADT2			
ESAL	0.002	4.372	0.001
ESAL2	-0.5E-06	-3.245	-0.1E-06
TH_SB_4			
TH_SUB_4			
TH_AC_4	-0.156	-2.239	-0.042
TH_IMP_4	-2.200	-5.299	-0.598
αριθμός παρατηρήσεων	238		
initial log-likelihood value	-151.258		
log-likelihood at convergence	-69.708		
pseudo ρ^2	0.539		
% επιτυχών προβλέψεων	86.6		

Για τη διαδικασία συντήρησης 504 το μοντέλο προβλέπει σωστά κατά μέσο όρο το 86.6% των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, το 5.9% των παρατηρήσεων στις οποίες στην πραγματικότητα δεν υπήρχε εμφάνιση ρηγμάτωσης (τιμή 0), το αποτέλεσμα της πρόβλεψης είναι λανθασμένο (τιμή 1). Το σύνολο των προβλέψεων φαίνεται αναλυτικότερα στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.11. Προβλέψεις μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 504

Πραγματική Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή		Πραγματικό Σύνολο
	0	1	
0	145 (91.2%)	14 (8.8%)	159
1	18 (22.8%)	61 (77.2%)	79
Συνολικές επιτυχείς προβλέψεις			86.6%

Διαδικασία Συντήρησης: 505

Στον Πίνακα 4.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση του μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 505. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση (T_S_REP), ο δείκτης παγετού (FR_IND), ο ημερήσιος μέσος αριθμός φορτηγών (AADT_TR), το πάχος της υπόβασης (TH_SUB_5) και το πάχος των ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση (TH_AC_5).

Ο αριθμός των ετών που πέρασαν από το έτος που έγινε η συντήρηση επιδρά θετικά στην έναρξη του φαινομένου της ρηγματώσης και συγκεκριμένα, αύξηση του αριθμού των ετών κατά ένα, αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων κατά 6.6%.

Ο δείκτης παγετού επιδρά επίσης θετικά στο φαινόμενο της ρηγματώσης. Αύξηση του δείκτη παγετού κατά 1 Celsius-days βρέθηκε ότι προκαλεί αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης ρηγματώσεων κατά 0.02%.

Σημαντική είναι και η επίδραση του αριθμού των βαρέων οχημάτων για τη διαδικασία συντήρησης 505. Αύξηση του ημερήσιου αριθμού των φορτηγών κατά 1 μονάδα προκαλεί αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων κατά 0.1%.

Από τις μεταβλητές που σχετίζονται με την κατασκευή και συντήρηση του οδοστρώματος, στατιστικά σημαντικές για τη συγκεκριμένη διαδικασία συντήρησης βρέθηκαν το πάχος της υπόβασης και το πάχος των ασφαλικών μετά τη συντήρηση. Αύξηση του πάχους της υπόβασης κατά 1 ίντσα προκαλεί μείωση της πιθανότητας εμφάνισης ρηγματώσεων κατά 1.5% ενώ αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων κατά 1 ίντσα μειώνει την πιθανότητα κατά 7.3%. Έτσι, καταλαβαίνουμε ότι και οι δύο αυτοί παράγοντες επιδρούν αρνητικά στην έναρξη των αλιγοτορικών ρηγματώσεων όμως πιο σημαντική φαίνεται ότι είναι η συμβολή των ασφαλικών στρώσεων.

Πίνακας 4.12. Αποτελέσματα μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 505

ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	έλεγχος t (t-stat)	οριακή επιρροή (marginal effect)
constant	-1.179	-2.234	-0.442
T_S_REP	0.210	7.446	0.066
D_BEL_0			
FR_IND	0.001	2.807	0.0002
FR_TH			
PRECIP			
AADT_TR	0.003	3.840	0.001
AADT2	-0.6E-06	-2.826	-0.2E-06
ESAL			
ESAL2			
TH_SB_5			
TH_SUB_5	-0.047	-2.667	-0.015
TH_AC_5	-0.234	-4.230	-0.073
TH IMP 5			
αριθμός παρατηρήσεων	238		
initial log-likelihood value	-163.757		
log-likelihood at convergence	-88.144		
pseudo ρ^2	0.462		
% επιτυχών προβλέψεων	83.6		

Για τη διαδικασία συντήρησης 505 το μοντέλο προβλέπει σωστά κατά μέσο όρο το 83.6% των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, το 7.1% των παρατηρήσεων στις οποίες στην πραγματικότητα δεν υπήρχε εμφάνιση ρηγμάτωσης (τιμή 0), το αποτέλεσμα της πρόβλεψης είναι λανθασμένο (τιμή 1). Το σύνολο των προβλέψεων φαίνεται αναλυτικότερα στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.13. Προβλέψεις μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 505

Πραγματική Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή		Πραγματικό Σύνολο
	0	1	
0	114 (87.0%)	17 (13.0%)	131
1	22 (20.6%)	85 (79.4%)	107
Συνολικές επιτυχείς προβλέψεις			83.6%

Διαδικασία Συντήρησης: 506

Στον Πίνακα 4.14 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση του μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 506. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση (T_S_REP), ο δείκτης παγετού (FR_IND), ο ετήσιος αριθμός των ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού σε χιλιάδες (ESAL), το πάχος της βάσης και υπόβασης (TH_SB_6) και το πάχος των νέων ασφαλικών στρώσεων που προστέθηκαν κατά τη συντήρηση (TH_IMP_6).

Από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης παρατηρείται ότι αύξηση του χρόνου που μεσολαβεί από τη συντήρηση κατά 1 έτος προκαλεί αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου της ρηγμάτωσης κατά 17.5%. Επιπλέον, αύξηση του δείκτη παγετού κατά 1 Celsius-days αυξάνει την πιθανότητα έναρξης της ρηγμάτωσης κατά 0.1%.

Ο ετήσιος αριθμός ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού βρέθηκε να επηρεάζει θετικά το φαινόμενο της ρηγμάτωσης, όπως ήταν αναμενόμενο. Συγκεκριμένα, αύξηση της ετήσιας τιμής του ESAL κατά 1000 αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγμάτωσης κατά 0.2%.

Σε ό,τι αφορά τις διαδικασίες κατασκευής και συντήρησης, σημαντική φαίνεται να είναι η επίδραση του πάχους βάσης και υπόβασης μιας και αύξηση 1 ίντσας του συνολικού πάχους βάσης-υπόβασης θα μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της ρηγμάτωσης κατά 4.4%. Το πάχος των ασφαλικών στρώσεων που προστέθηκαν κατά τη συντήρηση επιδρά επίσης αρνητικά στην έναρξη των αλιγοτροπικών ρηγματώσεων καθώς η πιθανότητα έναρξης του φαινομένου μειώνεται κατά 25.6% με την πρόσθεση μιας επιπλέον ίντσας νέου υλικού κατά τη συντήρηση (δηλαδή αν από τις 3.84 ίντσες το νέο ασφαλτόμιγμα ανερχόταν στις 4.84 ίντσες, αφού τα marginal effects αναφέρονται στους μέσους όρους των μεταβλητών).

Πίνακας 4.14. Αποτελέσματα μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 506

ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	έλεγχος t (t-stat)	οριακή επιρροή (marginal effect)
constant	-2.067	-2.359	-0.614
T_S_REP	0.479	7.014	0.175
D_BEL_0			
FR_IND	0.002	4.911	0.001
FR_TH			
PRECIP			
AADT_TR			
AADT2			
ESAL	0.005	6.032	0.002
ESAL2	-0.1E-05	-5.458	-0.4E-06
TH_SB_6	-0.120	-4.055	-0.044
TH_SUB_6			
TH_AC_6			
TH IMP_6	-0.703	-3.217	-0.256
αριθμός παρατηρήσεων	238		
initial log-likelihood value	-162.532		
log-likelihood at convergence	-45.745		
pseudo ρ^2	0.719		
% επιτυχών προβλέψεων	91.2		

Για τη διαδικασία συντήρησης 506 το μοντέλο προβλέπει σωστά κατά μέσο όρο το 91.2% των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, μόνο το 4.2% των παρατηρήσεων στις οποίες στην πραγματικότητα δεν υπήρχε εμφάνιση ρηγμάτωσης (τιμή 0), το αποτέλεσμα της πρόβλεψης είναι λανθασμένο (τιμή 1). Το σύνολο των προβλέψεων φαίνεται αναλυτικότερα στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.15. Προβλέψεις μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 506

Πραγματική Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή		Πραγματικό Σύνολο
	0	1	
0	126 (92.6%)	10 (7.4%)	136
1	11 (10.8%)	91 (89.2%)	102
Συνολικές επιτυχείς προβλέψεις			91.2%

Διαδικασία Συντήρησης: 507

Στον Πίνακα 4.16 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση του μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 507. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση (T_S_REP), ο ετήσιος αριθμός ημερών όπου η θερμοκρασία έπεσε κάτω από του 0°C (D_BEL_0), ο ετήσιος αριθμός ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού σε χιλιάδες (ESAL) και το πάχος των νέων ασφαλτικών στρώσεων που προστέθηκαν κατά τη συντήρηση (TH_IMP_7).

Ο αριθμός των ετών που πέρασαν από τη χρονική στιγμή που έγινε η συντήρηση επιδρά θετικά στην έναρξη του φαινομένου της ρηγμάτωσης, γεγονός λογικό όπως έχουμε ήδη εξηγήσει. Αύξηση του αριθμού των ετών κατά 1 μονάδα αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων κατά 6%.

Σε ό,τι αφορά τα κλιματολογικά δεδομένα, περισσότερο σημαντική φάνηκε να είναι η επίδραση του ετήσιου αριθμού ημερών που η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία ήταν μικρότερη των 0°C (D_BEL_0). Αύξηση αυτού του ετήσιου αριθμού κατά 1 ημέρα προκαλεί αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης ρηγματώσεων κατά 0.3%.

Σχετικά με την κυκλοφορία, σχετικά μικρή ήταν η επίδραση του ετήσιου αριθμού των ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού. Συγκεκριμένα, αύξηση της τιμής του ESAL κατά 1000 αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγμάτωσης κατά 0.01%.

Τέλος, η μόνη μεταβλητή σχετική με τη συντήρηση που βρέθηκε στατιστικά σημαντική αλλά και με το σωστό πρόσημο είναι το πάχος των νέων ασφαλτικών στρώσεων που προστέθηκαν κατά τη συντήρηση. Αύξηση του πάχους αυτού κατά 1 ίντσα θα προκαλούσε μείωση της πιθανότητας εμφάνισης αλγαιατορικών ρηγματώσεων κατά 17.4%.

Πίνακας 4.16. Αποτελέσματα μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 507

ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	έλεγχος t (t-stat)	οριακή επιρροή (marginal effect)
constant	0.561	0.531	0.156
T_S_REP	0.177	7.460	0.060
D_BEL_0	0.009	5.019	0.003
FR_IND			
FR_TH			
PRECIP			
AADT_TR			
AADT2			
ESAL	0.0003	2.479	0.0001
ESAL2			
TH_SB_7			
TH_SUB_7			
TH_AC_7			
TH_IMP_7	-0.511	-2.979	-0.174
αριθμός παρατηρήσεων	238		
initial log-likelihood value	-153.906		
log-likelihood at convergence	-105.690		
pseudo ρ^2	0.313		
% επιτυχών προβλέψεων	75.6		

Για τη διαδικασία συντήρησης 507 το μοντέλο προβλέπει σωστά κατά μέσο όρο το 75.6% των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, το 9.7% των παρατηρήσεων στις οποίες στην πραγματικότητα δεν υπήρχε εμφάνιση ρηγμάτωσης (τιμή 0), το αποτέλεσμα της πρόβλεψης είναι λανθασμένο (τιμή 1). Σημαντικό σφάλμα υπάρχει στην πρόβλεψη των τμημάτων στα οποία υπήρχε επιφανειακή αστοχία. Από το 34.9% των παρατηρήσεων οι οποίες είχαν πραγματική τιμή 1, μόνο το 20.2% προβλέπεται σωστά από το μοντέλο. Το σύνολο των προβλέψεων φαίνεται αναλυτικότερα στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.17. Προβλέψεις μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 507

Πραγματική Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή				Πραγματικό Σύνολο
	0		1		
0	132	(85.2%)	23	(14.8%)	155
1	35	(42.2%)	48	(57.8%)	83
Συνολικές επιτυχείς προβλέψεις					75.6%

Διαδικασία Συντήρησης: 508

Στον Πίνακα 4.18 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση του μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 508. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση (T_S_REP), ο ετήσιος αριθμός ημερών όπου η θερμοκρασία έπεσε κάτω από του 0°C (D_BEL_0), ο ετήσιος αριθμός ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού σε χιλιάδες (ESAL) και το πάχος των νέων ασφαλικών στρώσεων που προστέθηκαν κατά τη συντήρηση (TH_IMP_8).

Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές με το ακριβώς προηγούμενο μοντέλο που αναλύσαμε εκτός από το ποσοστό που επηρεάζουν την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεων οι διάφορες μεταβλητές. Για παράδειγμα, η επιρροή του πάχους της νέας ασφαλικής στρώσης που προστέθηκε κατά τη συντήρηση είναι σαφώς μεγαλύτερη σε αυτή τη διαδικασία συντήρησης αφού αύξηση του πάχους αυτής της στρώσης κατά 1 ίντσα μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της ρηγμάτωσης κατά 31.4%.

Πίνακας 4.18. Αποτελέσματα μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 508

ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	έλεγχος t (t-stat)	οριακή επιρροή (marginal effect)
constant	1.046	0.992	0.245
T_S_REP	0.293	7.962	0.103
D_BEL_0	0.013	5.674	0.005
FR_IND			
FR_TH			
PRECIP			
AADT_TR			
AADT2			
ESAL	0.003	5.440	0.001
ESAL2	-0.7E-06	-4.617	-0.3E-06
TH_SB_8			
TH_SUB_8			
TH_AC_8			
TH_IMP_8	-0.897	-4.716	-0.314
αριθμός παρατηρήσεων	238		
initial log-likelihood value	-160.095		
log-likelihood at convergence	-70.597		
pseudo ρ^2	0.559		
% επιτυχών προβλέψεων	86.6		

Για τη διαδικασία συντήρησης 508 το μοντέλο προβλέπει σωστά κατά μέσο όρο το 86.6% των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, για το 5.5% των παρατηρήσεων στις οποίες στην πραγματικότητα δεν υπήρχε εμφάνιση ρηγμάτωσης (τιμή 0), το αποτέλεσμα της πρόβλεψης είναι λανθασμένο (τιμή 1). Το σύνολο των προβλέψεων φαίνεται αναλυτικότερα στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.19. Προβλέψεις μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 508

Πραγματική Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή				Πραγματικό Σύνολο
	0		1		
0	130	(90.9%)	13	(9.1%)	143
1	19	(20.0%)	76	(80.0%)	95
Συνολικές επιτυχείς προβλέψεις					86.6%

Διαδικασία Συντήρησης: 509

Στον Πίνακα 4.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση του μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 509. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση (T_S_REP), ο δείκτης παγετού (FR_IND) και ο ετήσιος αριθμός ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού σε χιλιάδες (ESAL).

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω, καμία μεταβλητή που να σχετίζεται με την κατασκευή ή τη συντήρηση του οδοστρώματος δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική ή δεν είχε θεωρητικά λογικό πρόσημο. Η μεταβλητή με τη μεγαλύτερη στατιστική σημαντικότητα είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση, συνεπώς, αυτός είναι και ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο την εμφάνιση των ρηγματώσεων στη συγκεκριμένη διαδικασία συντήρησης.

Πίνακας 4.20. Αποτελέσματα μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 509

ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	έλεγχος t (t-stat)	οριακή επιρροή (marginal effect)
constant	-3.198	-8.054	-0.510
T_S_REP	0.297	8.914	0.118
D_BEL_0			
FR_IND	0.001	2.727	0.0003
FR_TH			
PRECIP			
AADT_TR			
AADT2			
ESAL	0.002	4.239	0.001
ESAL2	-0.5E-06	-3.977	-0.2E-06
TH_SB_9			
TH_SUB_9			
TH_AC_9			
TH_IMP_9			
αριθμός παρατηρήσεων	238		
initial log-likelihood value	-164.835		
log-likelihood at convergence	-80.400		
pseudo ρ^2	0.512		
% επιτυχών προβλέψεων	84.0		

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε προβλέπει σωστά κατά μέσο όρο το 84% των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, το 6.7% των παρατηρήσεων στις οποίες στην πραγματικότητα δεν υπήρχε εμφάνιση ρηγμάτωσης (τιμή 0), το αποτέλεσμα της πρόβλεψης είναι λανθασμένο (τιμή 1). Το σύνολο των προβλέψεων φαίνεται αναλυτικότερα στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.21. Προβλέψεις μοντέλου Probit για τη διαδικασία συντήρησης 509

Πραγματική Τιμή	Προβλεπόμενη Τιμή				Πραγματικό Σύνολο
	0		1		
0	107	(87.0%)	16	(13.0%)	123
1	22	(19.1%)	93	(80.9%)	115
Συνολικές επιτυχείς προβλέψεις					84.0%

4.5.3. Σύγκριση και αξιολόγηση διαδικασιών συντήρησης

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων που αναλύθηκαν προηγουμένως με σκοπό να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για τις διάφορες διαδικασίες συντήρησης που εφαρμόστηκαν στα οδοστρώματα. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα.

Πίνακας 4.22. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μοντέλων Probit

	Συντήρηση 502			Συντήρηση 503			Συντήρηση 504		
ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	t-stat	οριακή επιρροή	παράμετρος (coefficient)	t-stat	οριακή επιρροή	παράμετρος (coefficient)	t-stat	οριακή επιρροή
constant	-2.207	-3.827	-0.295	-2.883	-3.849	-0.618	6.874	3.538	0.191
T_S_REP	0.471	7.742	0.163	0.385	7.779	0.146	0.304	7.741	0.083
D_BEL_0	0.011	4.157	0.004				0.015	5.089	0.004
FR_IND				0.001	3.243	0.0004			
FR_TH				0.010	2.644	0.004			
PRECIP							0.001	2.065	0.0002
AADT_TR	0.001	2.064	0.0003						
AADT2	-0.1E-07	-2.754	-0.5E-08						
ESAL				0.003	4.196	0.001	0.002	4.372	0.001
ESAL2				-0.9E-07	-3.398	-0.3E-07	-0.5E-07	-3.245	-0.1E-07
TH_AC_x	-0.288	-3.648	-0.100	-0.209	-3.081	-0.080	-0.156	-2.239	-0.042
TH_IMP_x							-2.200	-5.299	-0.598
pseudo ρ^2		0.647			0.632			0.539	
% επιτυχών προβλέψεων		89.5			89.1			86.6	

	Συντήρηση 505			Συντήρηση 506			Συντήρηση 507		
ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	t-stat	οριακή επιρροή	παράμετρος (coefficient)	t-stat	οριακή επιρροή	παράμετρος (coefficient)	t-stat	οριακή επιρροή
constant	-1.179	-2.234	-0.442	-2.067	-2.359	-0.614	0.561	0.531	0.156
T_S_REP	0.210	7.446	0.066	0.479	7.014	0.175	0.177	7.460	0.060
D_BEL_0							0.009	5.019	0.003
FR_IND	0.001	2.807	0.0002	0.002	4.911	0.0006			
AADT_TR	0.003	3.840	0.0007						
AADT2	-0.6E-06	-2.826	-0.2E-06						
ESAL				0.005	6.032	0.002	0.0003	2.479	0.0001
ESAL2				-0.1E-05	-5.458	-0.4E-06			
TH_SB_x				-0.120	-4.055	-0.044			
TH_SUB_x	-0.047	-2.667	-0.015						
TH_AC_x	-0.234	-4.230	-0.073						
TH_IMP_x				-0.703	-3.217	-0.256	-0.511	-2.979	-0.174
pseudo ρ^2		0.462			0.719			0.313	
% επιτυχών προβλέψεων		83.6			91.2			75.6	

	Συντήρηση 508			Συντήρηση 509		
ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	t-stat	οριακή επιρροή	παράμετρος (coefficient)	t-stat	οριακή επιρροή
constant	1.046	0.992	0.245	-3.198	-8.054	-0.510
T_S_REP	0.293	7.962	0.103	0.297	8.914	0.118
D_BEL_0	0.013	5.674	0.005			
FR_IND				0.001	2.727	0.0003
ESAL	0.003	5.44	0.001	0.002	4.239	0.001
ESAL2	-0.7E-06	-4.617	-0.3E-06	-0.5E-06	-3.977	-0.2E-06
TH_IMP_x	-0.897	-4.716	-0.314			
pseudo ρ^2		0.559			0.512	
% επιτυχών προβλέψεων		86.6			84.0	

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται φανερό ότι η μεταβλητή που δείχνει το χρόνο που μεσολαβεί από τη συντήρηση είναι αυτή που έχει τη μεγαλύτερη στατιστική σημαντικότητα σε όλα τα μοντέλα. Υπάρχουν όμως σημαντικές διαφορές σε ότι αφορά το βαθμό επιρροής του χρόνου από τη μία διαδικασία συντήρησης στην άλλη (ο βαθμός επιρροής μιας μεταβλητής στην έναρξη της ρηγμάτωσης εδώ θα κριθεί από την τιμή των marginal effects) . Συγκεκριμένα:

- Η διαδικασία συντήρησης που επηρεάζεται λιγότερο από το χρόνο είναι η 507. Αυτό το αποτέλεσμα δεν είναι τυχαίο. Η διαδικασία 507 έχει το μεγαλύτερο κόστος

από όλες γιατί η επιφάνεια του οδοστρώματος δέχεται έντονη προετοιμασία πριν τη συντήρηση και χρησιμοποιούνται ως επικάλυψη 5 ίντσες μη-ανακυκλωμένης ασφάλτου. Αναδεικνύεται λοιπόν ότι αυτή η διαδικασία συντήρησης έχει μεγαλύτερη αντοχή στο χρόνο.

- Ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση έχει μικρή σχετικά επιρροή, εκτός από τη διαδικασία 507, και στις 504 και 505. Το κοινό χαρακτηριστικό αυτών των διαδικασιών συντήρησης είναι το ότι η άσφαλτος που χρησιμοποιήθηκε για την επίστρωση δεν ήταν ανακυκλωμένη.
- Η διαδικασία συντήρησης που φάνηκε ότι επηρεάζεται περισσότερο από τον παράγοντα του χρόνου είναι η 506. Συγκεκριμένα βρέθηκε ότι αύξηση του χρόνου κατά 1 έτος αυξάνει την πιθανότητα της εμφάνισης ρηγματώσης κατά 17.5%. Μία πιθανή εξήγηση θα μπορούσε να είναι η παρακάτω. Από όλες τις διαδικασίες συντήρησης που υπέστησαν φρεζάρισμα, η 506 είναι αυτή στην οποία τοποθετήθηκε το μικρότερο κατά μέσο όρο πάχος νέου ασφατικού υλικού. Παράλληλα, το πάχος αυτό έχει και τη μεγαλύτερη διακύμανση από πολιτεία σε πολιτεία σε σχέση με τα πάχη του νέου ασφαλτομίγματος των άλλων διαδικασιών συντήρησης. Έτσι, μετά τη συντήρηση, τα τμήματα στα οποία εφαρμόστηκε η διαδικασία 506 κατέληξαν να έχουν κατά μέσο όρο το μικρότερο πάχος ασφατικών στρώσεων συνολικά (7.49 ίντσες, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.2). Ενδέχεται, λοιπόν, οι παραπάνω παράγοντες να έκαναν το οδόστρωμα πιο ευπαθές στις καταπονήσεις και στην εμφάνιση αλιγοτορικών ρηγματώσεων.
- Επίσης υψηλή είναι η επιρροή του χρόνου που μεσολαβεί από τη συντήρηση στις διαδικασίες 502 και 503. Καταλαβαίνουμε έτσι ότι ο συνδυασμός ελαφριάς προετοιμασίας της επιφάνειας και ανακυκλωμένης ασφάλτου στην επίστρωση έχει μειωμένη δομική αντοχή σε βάθος χρόνου σε σχέση με τις υπόλοιπες διαδικασίες συντήρησης.

Σε ότι αφορά τα αποτελέσματα που έχουν να κάνουν με το κλίμα, είναι ξεκάθαρο ότι ο παράγοντας του παγετού παίζει σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση αλιγοτορικών ρηγματώσεων μιας και εμφανίζεται σε κάθε μοντέλο είτε με τη μορφή του δείκτη παγετού

(FR_IND) είτε με τη μορφή του ετήσιου αριθμού ημερών που η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία ήταν μικρότερη των 0°C (D_BEL_0). Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, οι χαμηλές θερμοκρασίες κάνουν το οδόστρωμα πιο ψαθυρό με αποτέλεσμα αυτό να ρηγματώνεται πιο εύκολα. Για αυτό και οι μεταβλητές που σχετίζονται με τον παγετό εμφανίζονται με θετικό πρόσημο που σημαίνει ότι αύξηση της τιμής τους αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της ρηγματώσεως. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επιρροή των υψηλών θερμοκρασιών δεν ήταν ξεκάθαρη κατά τη διαδικασία της στατιστικής ανάλυσης γιατί η μεταβλητή D_AB_32 πολλές φορές εμφανιζόταν με αρνητικό πρόσημο (γεγονός που δεν στέκει με βάση τη θεωρία) κι άλλες φορές δεν έβγαине στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 5%.

Από τη θεωρία για τις δομικές αστοχίες στα οδοστρώματα, είναι γνωστό ότι το βασικότερο αίτιο εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων είναι η καταπόνηση λόγω της κυκλοφορίας και των βαρέων οχημάτων. Αυτό επιβεβαιώθηκε και μέσω της στατιστικής ανάλυσης μιας και ο παράγοντας της κυκλοφορίας είναι παρών σε κάθε μοντέλο είτε με τη μορφή των ESALs (ESAL) είτε με τη μορφή του ημερήσιου αριθμού των βαρέων οχημάτων (AADT_TR). Η στατιστική σημαντικότητα της παραμέτρου του τετραγώνου των δύο παραπάνω μεταβλητών υποδηλώνει τη μη γραμμική φύση της σύνδεσης της κυκλοφορίας με την πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων. Η επιρροή της κυκλοφορίας στην έναρξη της ρηγματώσεως είναι παρόμοια για τα διάφορα είδη συντήρησης εκτός του 507. Συγκεκριμένα:

- Για την πλειοψηφία των διαδικασιών συντήρησης, αύξηση της τιμής του ετήσιου αριθμού ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού (ESAL) κατά 1000 αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγματώσεως κατά 0.1%.
- Για τη διαδικασία συντήρησης 507, η αύξηση της πιθανότητας για την παραπάνω μεταβολή του ESAL είναι 0.01% δηλαδή 10 φορές μικρότερη από τις υπόλοιπες διαδικασίες συντήρησης. Επομένως, στο συγκεκριμένο είδος συντήρησης η κυκλοφορία ασκεί τη μικρότερη επιρροή.

Σε ότι αφορά τα δεδομένα που σχετίζονται με την κατασκευή και τη συντήρηση των υπό εξέταση οδοστρωμάτων, έχουμε να παρατηρήσουμε τα παρακάτω:

- Κατά τη διαδικασία της ανάλυσης, πολλές φορές προέκυψε το αποτέλεσμα ότι μεγάλα πάχη βάσης και υπόβασης οδηγούν σε αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης

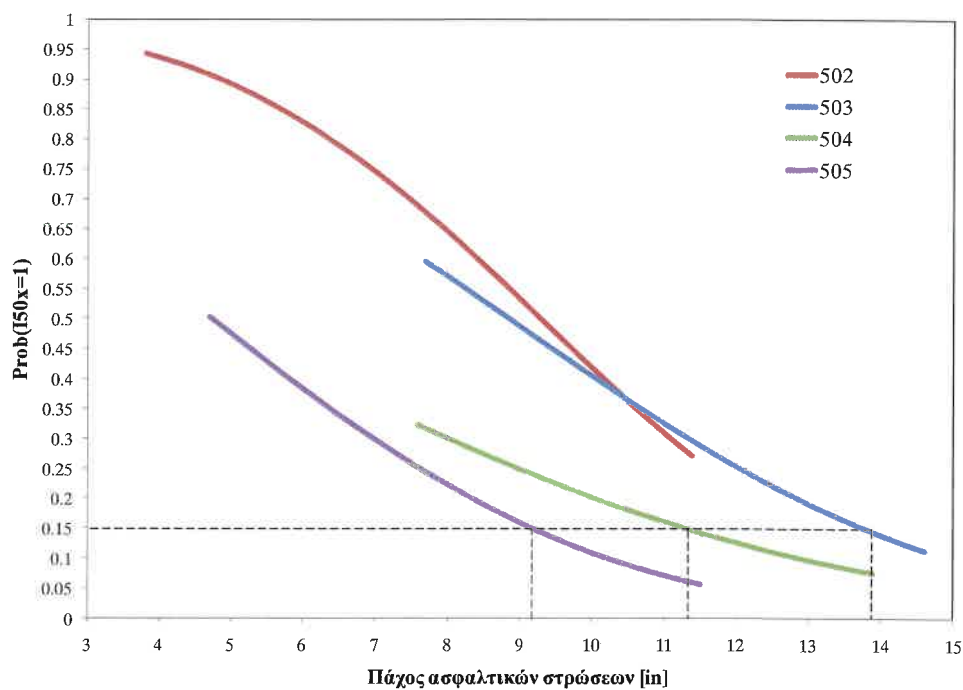
ρηγματώσεων. Βάσεις ή υποβάσεις μικρής αντοχής ή με ανεπαρκή συμπίκνωση μπορεί να προκαλέσουν τη ρηγμάτωση της επιφανειακής στρώσης (Yoder and Witczak, 2008). Επειδή όμως η υπόθεση ότι σε ένα τόσο μεγάλο πλήθος οδοστρωμάτων δεν έγινε σωστή συμπίκνωση δεν ευσταθεί, όταν οι μεταβλητές TH_SUB_x, TH_SB_x και TH_BAS_x εμφανίζονταν με θετικό πρόσημο αφαιρούνταν από το μοντέλο.

- Το πάχος των ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση (TH_AC_x) εμφανίστηκε ως στατιστικά σημαντικός παράγοντας στις διαδικασίες συντήρησης 502 έως και 505, δηλαδή για τα οδοστρώματα στα οποία είχε εφαρμοστεί ελαφριού τύπου προετοιμασία της επιφάνειάς τους πριν την επίστρωση του νέου ασφαλτομίγματος. Είναι λοιπόν φανερό ότι για αυτά τα οδοστρώματα, το συνολικό πάχος των ασφαλικών παίζει σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση ρηγματώσεων. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 4.6, η επιρροή του πάχους των ασφαλικών είναι μεγαλύτερη για τη διαδικασία συντήρησης 502, η οποία είναι και η διαδικασία που έχει το μικρότερο κόστος. Συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους των ασφαλικών κατά 1 ίντσα προκαλεί μείωση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου της ρηγμάτωσης κατά 10%.
- Το πάχος των νέων ασφαλικών στρώσεων που προστέθηκαν στη συντήρηση (TH_IMP_x) εμφανίστηκε ως στατιστικά σημαντικός παράγοντας σχεδόν σε όλες τις διαδικασίες συντήρησης οι οποίες περιλάμβαναν φρεζάρισμα και εντατική προετοιμασία της αρχικής επιφάνειας του οδοστρώματος (εκτός από την 509 όπου καμία μεταβλητή σχετική με την κατασκευή και συντήρηση δεν βγήκε στατιστικά σημαντική από την ανάλυση) αλλά και στην διαδικασία 504. Από τα αποτελέσματα και από το διάγραμμα 4.8 γίνεται φανερό ότι μια μικρή μεταβολή του πάχους του νέου ασφαλτομίγματος μειώνει κατά σημαντικό ποσοστό την πιθανότητα εμφάνισης αλιγατορικών ρηγματώσεων. Πιο έντονα αυτό φαίνεται στη διαδικασία συντήρησης 504 όπου αύξηση του νέου ασφαλτομίγματος κατά 1 ίντσα μειώνει την πιθανότητα έναρξης της ρηγμάτωσης κατά 59.8%.

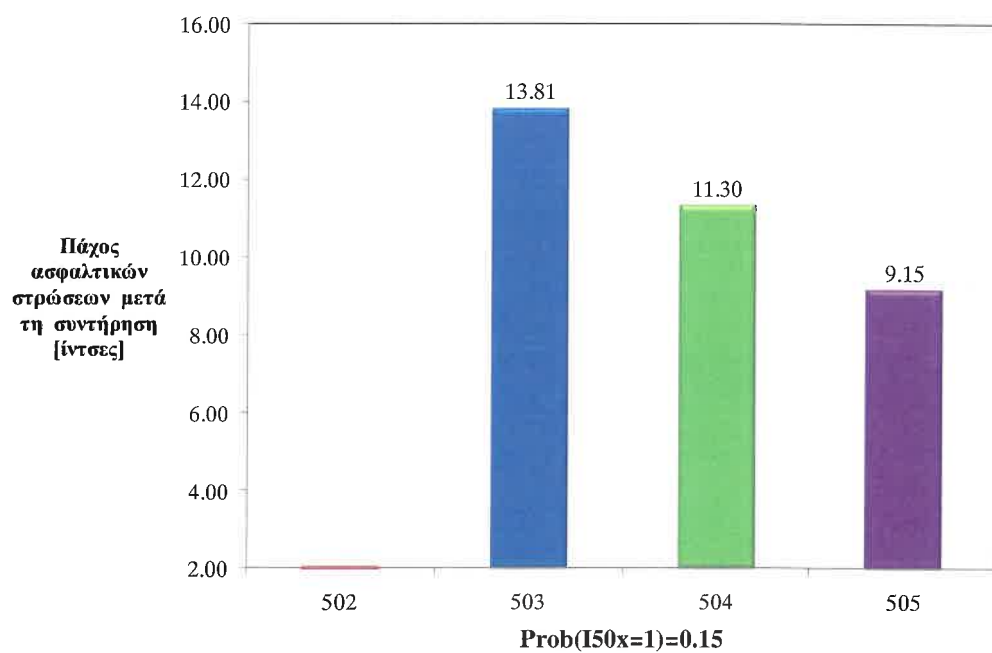
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των μεταβλητών TH_AC_x και TH_IMP_x οι οποίες αποτέλεσαν και τα όρια για τη δημιουργία των διαγραμμάτων 4.6 και 4.8. Στα διαγράμματα αυτά έγινε εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης αλγαιτορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το πάχος των ασφαλικών και τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές στον μέσο όρο τους για την κάθε διαδικασία συντήρησης ξεχωριστά. Για τις διαδικασίες συντήρησης 502 έως 505, στατιστικά σημαντική ήταν η μεταβλητή TH_AC_x ενώ για τις 504 και 506-508 η μεταβλητή TH_IMP_x. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το πάχος των ασφαλικών για πιθανότητα 0.15 ως παράδειγμα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή ραβδογράμματος.

Πίνακας 4.23. Μέγιστες και ελάχιστες τιμές των ασφαλικών στρώσεων

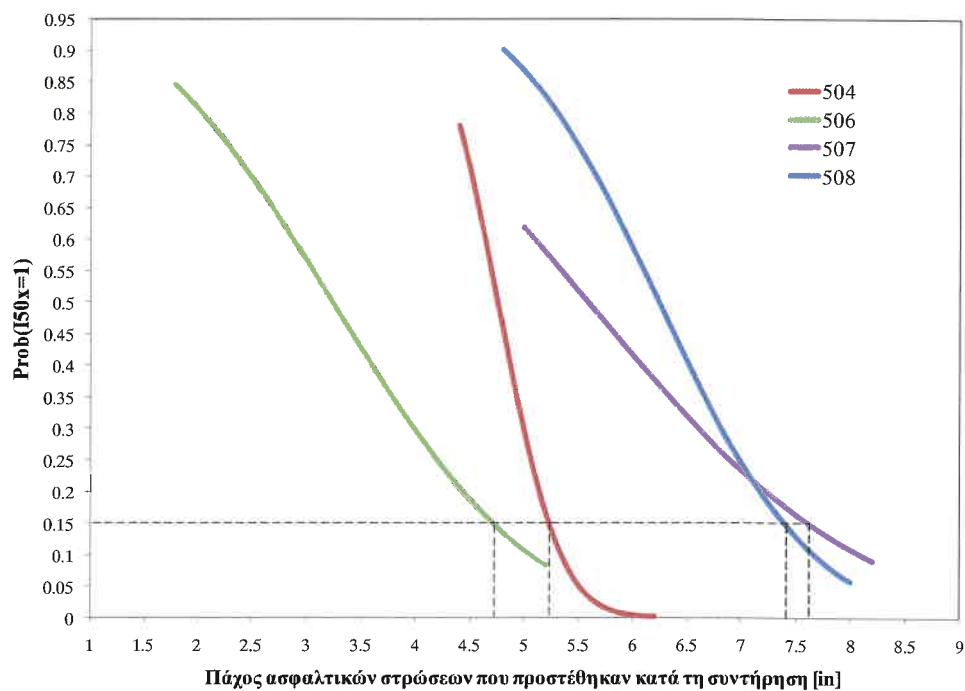
Πάχος ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση (TH_AC_x)		502	503	504	505
	min	3.8	7.7	7.6	4.7
	max	11.4	14.6	13.9	11.5
Πάχος νέων ασφαλικών στρώσεων που προστέθηκαν στη συντήρηση (TH_IMP_x)		504	506	507	508
	min	4.4	1.8	5.0	4.8
	max	6.2	5.2	8.2	8.0



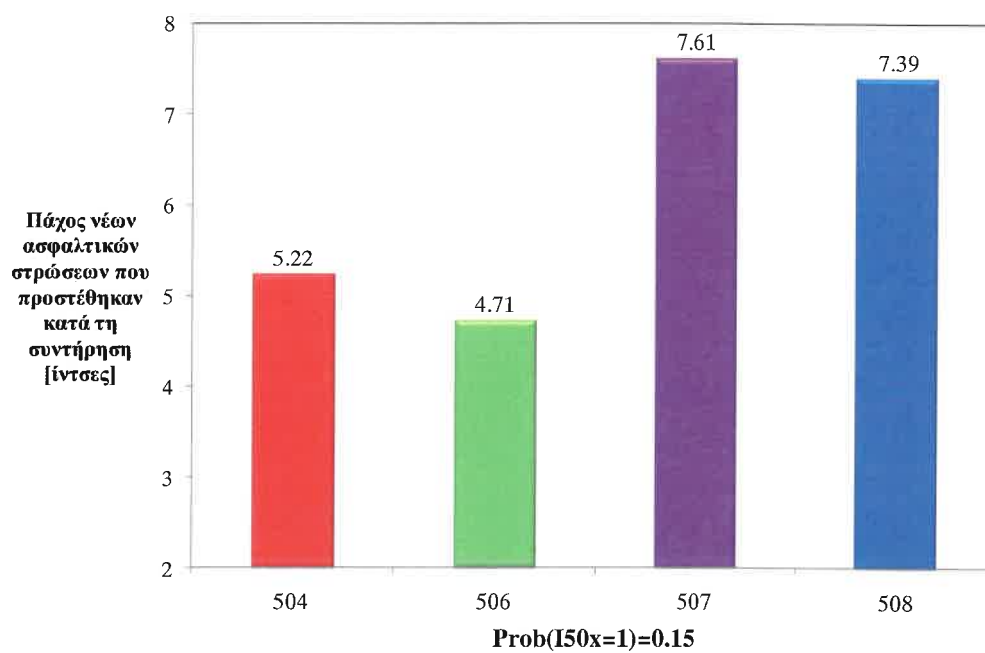
Διάγραμμα 4.6. Πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων μετά τη συντήρηση.



Διάγραμμα 4.7. Πάχος ασφαλτικών στρώσεων μετά τη συντήρηση για πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων ίση με 0.15.



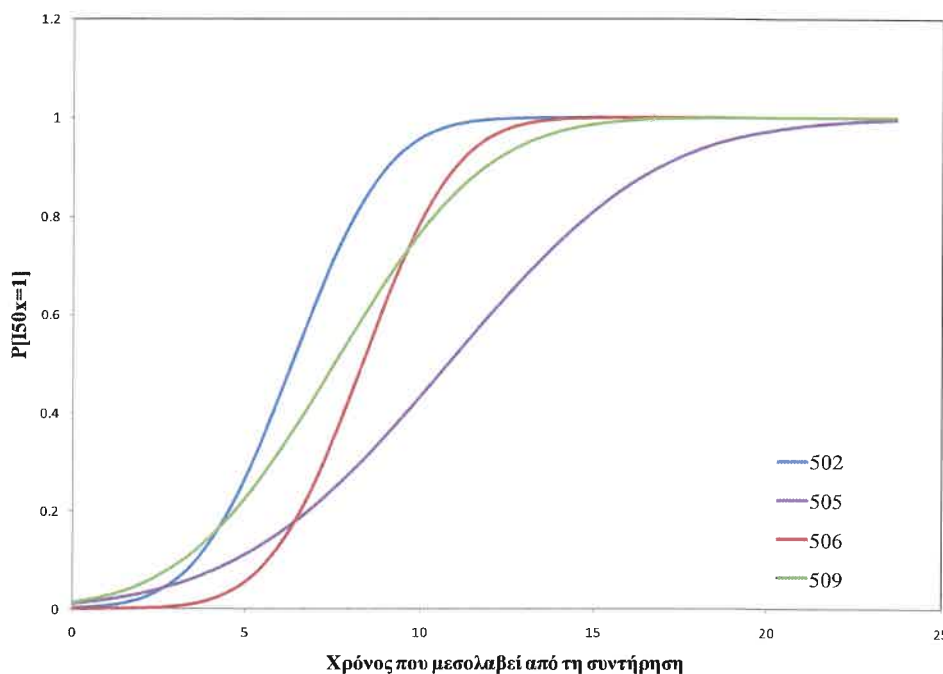
Διάγραμμα 4.8. Πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το πάχος των νέων ασφαλτικών στρώσεων που προστέθηκαν κατά τη συντήρηση.



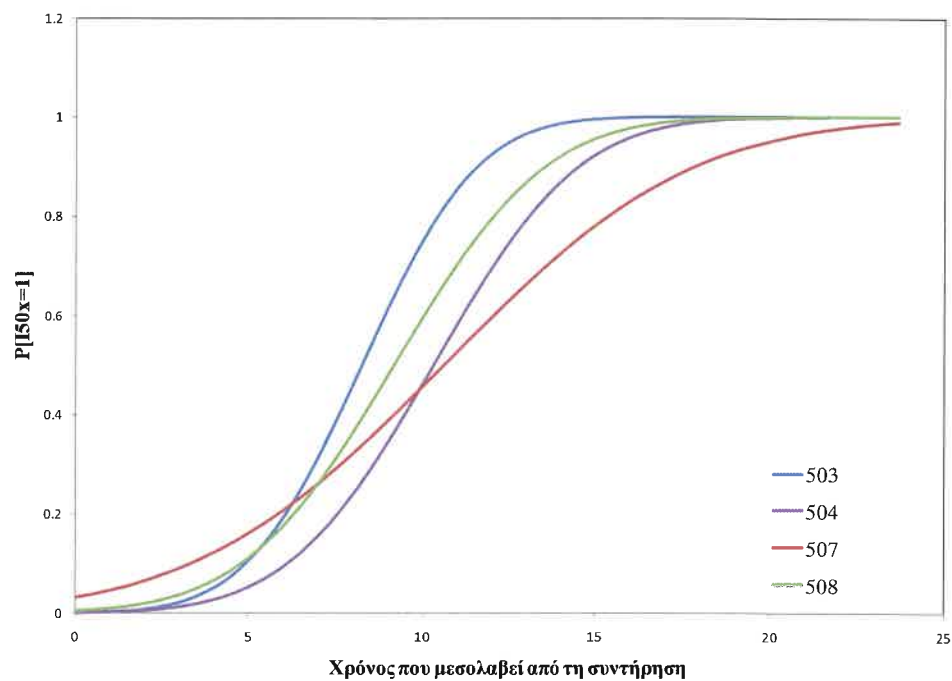
Διάγραμμα 4.9. Πάχος νέων ασφαλτικών στρώσεων για πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων ίση με 0.15.

Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για τις διάφορες διαδικασίες συντήρησης δίνουν στο σύνολό τους υψηλά ποσοστά προβλέψεων. Οι τιμές του pseudo ρ^2 θεωρούνται επίσης υψηλές για αυτού του είδους την ανάλυση. Επομένως, εκτός από τη λογική συνέπεια που διαθέτουν, τα παραπάνω μοντέλα επεξηγούν και προβλέπουν καλά το φαινόμενο της έναρξης των αλιγατορικών ρηγματώσεων γι' αυτό και μπορούμε ως ένα βαθμό να εμπιστευτούμε τα συμπεράσματα που βγαίνουν από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης.

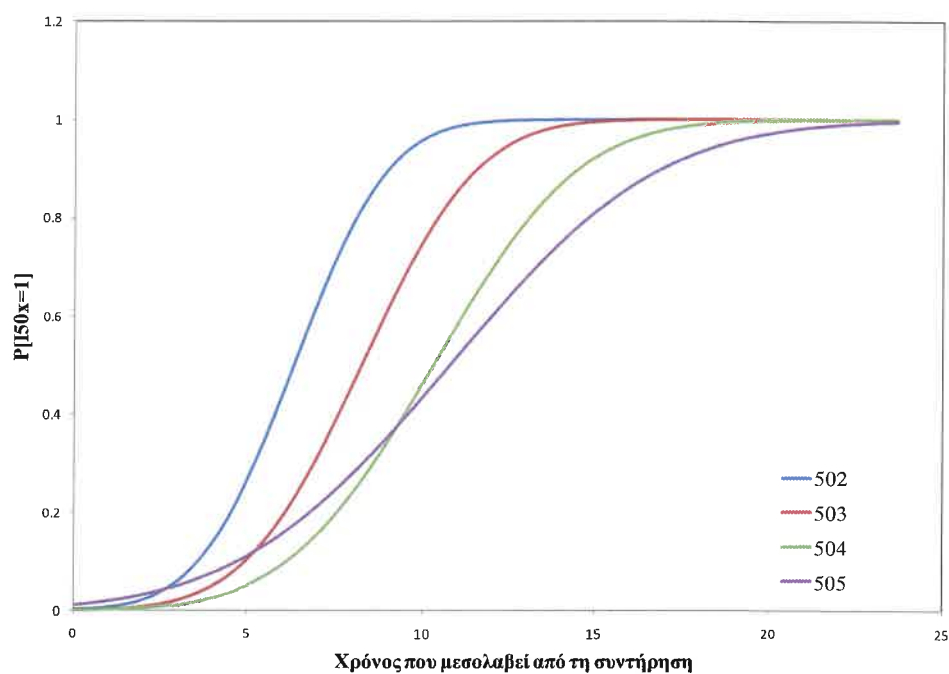
Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν την πιθανότητα έναρξης του φαινομένου της ρηγματώσεως σε σχέση με το χρόνο που μεσολαβεί από τη συντήρηση. Οι διαδικασίες συντήρησης έχουν ομαδοποιηθεί ανάλογα με τα διάφορα χαρακτηριστικά τους για να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση των καμπύλων των αθροιστικών πιθανοτήτων.



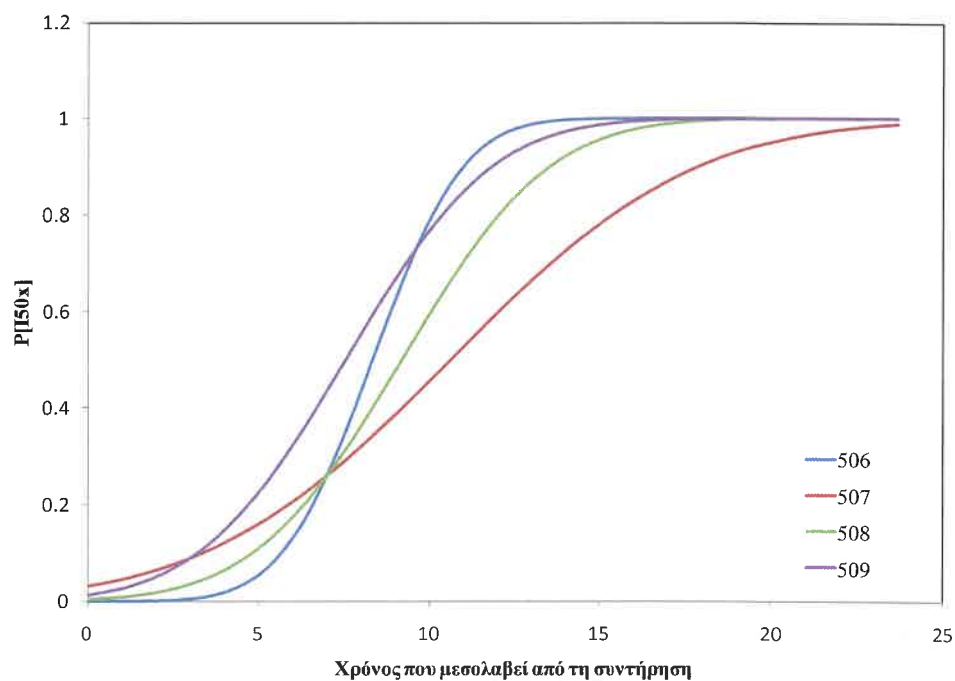
Διάγραμμα 4.10. Πιθανότητα εμφάνισης αλιγατορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το χρόνο που μεσολαβεί από τη συντήρηση (επίστρωση με ασφαλτόμιγμα πάχους 2 ιντσών).



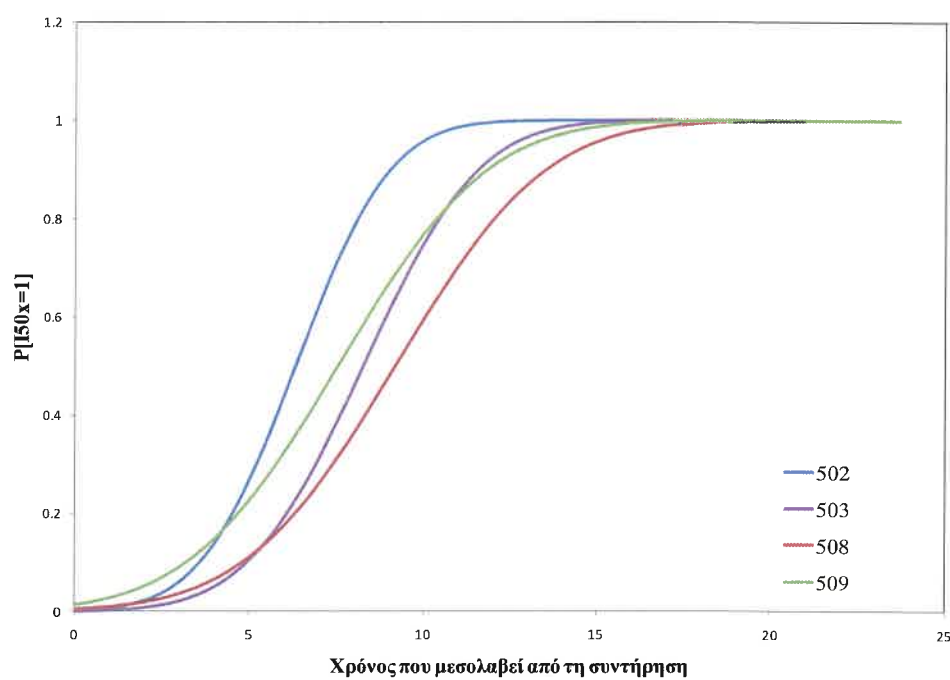
Διάγραμμα 4.11. Πιθανότητα εμφάνισης αλγατορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το χρόνο που μεσολαβεί από τη συντήρηση (επίστρωση με ασφαλτόμιγμα πάχους 5 ιντσών).



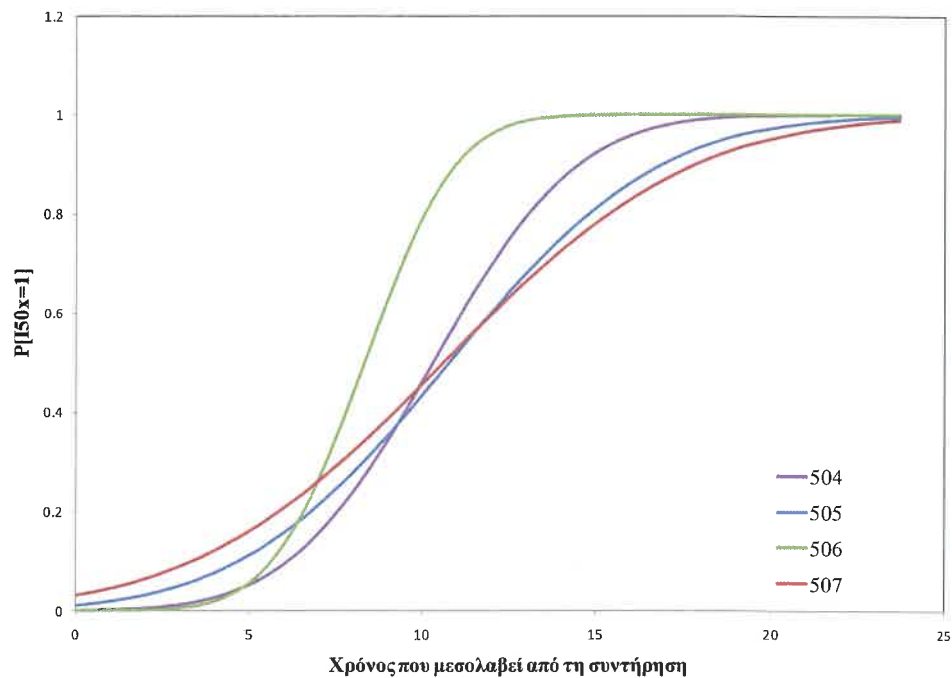
Διάγραμμα 4.12. Πιθανότητα εμφάνισης αλγατορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το χρόνο που μεσολαβεί από τη συντήρηση (ελαφρού τύπου προετοιμασία της αρχικής επιφάνειας).



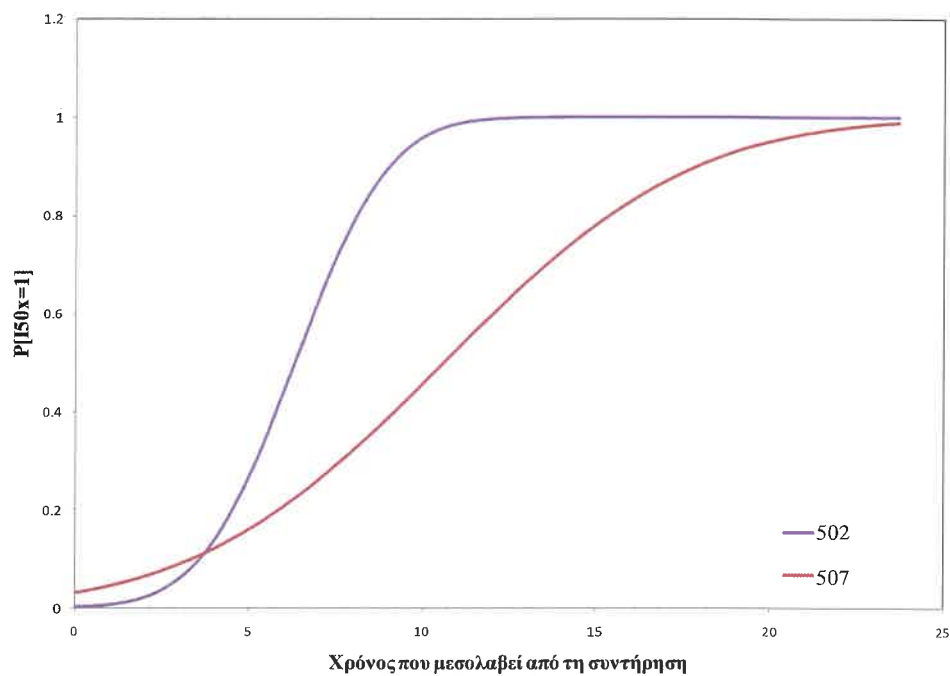
Διάγραμμα 4.13. Πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το χρόνο που μεσολαβεί από τη συντήρηση (έντονου τύπου προετοιμασία της αρχικής επιφάνειας).



Διάγραμμα 4.14. Πιθανότητα εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το χρόνο που μεσολαβεί από τη συντήρηση (επίστρωση με ανακυκλωμένη άσφαλτο).



Διάγραμμα 4.15. Πιθανότητα εμφάνισης αλγαιατορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το χρόνο που μεσολαβεί από τη συντήρηση (επίστρωση με μη-ανακυκλωμένη άσφαλτο).



Διάγραμμα 4.16. Πιθανότητα εμφάνισης αλγαιατορικών ρηγματώσεων σε σχέση με το χρόνο που μεσολαβεί από τη συντήρηση (μικρότερο κόστος (502) - μεγαλύτερο κόστος (507)).

Πίνακας 4.24. Χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση για κάθε διαδικασία συντήρησης σε σχέση με τις διάφορες πιθανότητες εμφάνισης αλιγατορικών ρηγματώσεων.

	Χρόνος από την εφαρμογή της 50x διαδικασίας συντήρησης (έτη)							
P[150x=1]	502	503	504	505	506	507	508	509
70%	7.5	9.6	12.1	13.3	9.4	13.6	11.0	9.3
80%	8.1	10.5	13.1	14.8	10.1	15.4	12.1	10.4
90%	9.1	11.6	14.6	16.9	11.0	17.9	13.6	11.9

Πίνακας 4.25. Πιθανότητα εμφάνισης αλιγατορικών ρηγματώσεων για κάθε διαδικασία συντήρησης σε σχέση με τα έτη που μεσολαβούν από τη συντήρηση.

Χρόνος από την εφαρμογή της 50x διαδικασίας	P[150x=1]							
	502	503	504	505	506	507	508	509
5	26.6%	10.5%	5.2%	11.2%	5.5%	15.9%	10.9%	22.5%
10	95.8%	74.8%	46.0%	43.4%	78.7%	45.5%	59.3%	76.7%
15	100.0%	99.5%	92.3%	81.2%	99.9%	78.0%	95.6%	98.6%

Συγκρίνοντας τις δύο ‘ακραίες’ σε σχέση με το κόστος διαδικασίες συντήρησης, 502 και 507, βλέπουμε ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στο χρόνο ζωής που δίνει η κάθε μία στο οδόστρωμα. Συγκεκριμένα, για τη διαδικασία 502, η πιθανότητα για αστοχία είναι στο 70% στα 7.5 έτη ενώ για την 507 στα 13.6 έτη. Αυτό φανερώνει ότι το ένα οδόστρωμα σε σχέση με το άλλο έχει, μετά τη συντήρηση, διπλάσιο χρόνο ζωής από άποψη δομικής επάρκειας.

4.5.4. Βελτίωση μοντέλου για τη διαδικασία συντήρησης 507

Στην ενότητα όπου έγινε η ανάλυση των μοντέλων για την κάθε διαδικασία συντήρησης, φάνηκε ότι τα περισσότερα μοντέλα έδιναν πολύ καλές προβλέψεις για το φαινόμενο της εμφάνισης αλιγατορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια του οδοστρώματος, παρά το γεγονός ότι ως μέθοδος ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε το Binomial Probit Model το οποίο δεν δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης δυναμικών διαστρωματικών στοιχείων. Τα αποτελέσματα όμως για τη διαδικασία συντήρησης 507 δεν ήταν αρκετά ικανοποιητικά οπότε και η ανάλυση προχώρησε με το Random Effects Binary Probit Model, το οποίο είναι κατάλληλο για δυναμικά διαστρωματικά στοιχεία, με σκοπό την βελτίωση των αποτελεσμάτων.

Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, υπάρχει πολύ σημαντική βελτίωση σε ότι αφορά την επεξηγηματική ικανότητα του μοντέλου. Η τιμή της log-likelihood function αυξήθηκε κατά πολύ με αποτέλεσμα να έχουμε αύξηση του δείκτη pseudo ρ^2 . Οι συντελεστές των μεταβλητών διαφοροποιούνται αρκετά σε σχέση με την αρχική ανάλυση, όπως και τα marginal effects. Συγκεκριμένα, η επίδραση της κυκλοφορίας εμφανίζεται ακόμα περισσότερο μειωμένη σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο, ενώ αυξάνεται η επίδραση του χρόνου που μεσολαβεί από τη συντήρηση και του πάχους του νέου ασφαλτομίγματος στην πιθανότητα εμφάνισης αλιγατορικών ρηγματώσεων.

Πίνακας 4.26. Αποτελέσματα μοντέλων για τη διαδικασία συντήρησης 507

	Binomial Probit Model			Random Effects Binary Probit Model		
ανεξάρτητη μεταβλητή	παράμετρος (coefficient)	έλεγχος t (t-stat)	οριακή επιρροή	παράμετρος (coefficient)	έλεγχος t (t-stat)	οριακή επιρροή
constant	0.561	0.531	0.156	9.035	1.688	0.387
T_S_REP	0.177	7.46	0.06	2.072	2.041	0.089
D_BEL_0	0.009	5.019	0.003	0.059	1.990	0.003
ESAL	0.0003	2.479	0.0001	0.001	1.965	0.4E-04
TH_IMP_5	-0.511	-2.978	-0.174	-5.071	-2.034	-0.217
ρ	-	-	-	0.986	72.862	-
αριθμός παρατηρήσεων	238			238		
initial log-likelihood value	-153.906			-153.906		
log-likelihood at convergence	-105.690			-40.805		
pseudo ρ^2	0.313			0.735		
% επιτυχών προβλέψεων	75.6			75.2		

Συγκρίνοντας τους πίνακες των προβλέψεων, παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική βελτίωση στην πρόβλεψη του 1 (δηλαδή των τμημάτων που έχουν αστοχήσει). Δεν μπορούμε να πούμε όμως το ίδιο και για την πρόβλεψη των τμημάτων που δεν έχουν αστοχήσει σε ρηγμάτωση. Κατά μέσο όρο, το ποσοστό των σωστών προβλέψεων παρέμεινε σχεδόν το ίδιο.

Πίνακας 4.27. Προβλέψεις για τη διαδικασία συντήρησης 507

Πραγματική Τιμή	Binomial Probit Model Προβλεπόμενη Τιμή		Πραγματικό Σύνολο
	0	1	
0	132 (85.2%)	23 (14.8%)	155
1	35 (42.2%)	48 (57.8%)	83
Συνολικές επιτυχείς προβλέψεις			75.6%

Πραγματική Τιμή	Random Effects Binary Probit Model Προβλεπόμενη Τιμή		Πραγματικό Σύνολο
	0	1	
0	123 (79.4%)	32 (20.6%)	155
1	27 (32.5%)	56 (67.5%)	83
Συνολικές επιτυχείς προβλέψεις			75.2%

4.6. Αποτελέσματα από τη στατιστική επεξεργασία με τη χρήση του μοντέλου Multivariate Probit

4.6.1. Εισαγωγή

Τελευταίο βήμα της στατιστικής επεξεργασίας της παρούσης εργασίας είναι η προσέγγιση του φαινομένου της εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια του οδοστρώματος με ένα σύστημα εξισώσεων που αντιπροσωπεύουν τις διαδικασίες συντήρησης. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με βάση το μοντέλο multivariate probit και τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω σε μορφή πίνακα. Στο πρώτο μέρος του πίνακα παρουσιάζονται οι οκτώ εξισώσεις για τις διαδικασίες 502-509 ενώ στο δεύτερο, παρουσιάζονται οι συσχετίσεις ρ μεταξύ των διαδικασιών συντήρησης. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την κάθε εξίσωση είναι αυτές που προέκυψαν στο ακριβώς προηγούμενο βήμα της ανάλυσης στα μοντέλα probit για κάθε διαδικασία συντήρησης. Από αυτές τις μεταβλητές πολλές αφαιρέθηκαν λόγω πολύ χαμηλών τιμών του t-statistic. Επιπλέον, οι ανεξάρτητες μεταβλητές που σχετίζονται με την κυκλοφορία (ESAL, AADT_TR) διαιρέθηκαν με το 1000 πριν εισαχθούν στο πρόγραμμα για επεξεργασία διότι λόγω των υψηλών τιμών τους δημιουργούνταν προβλήματα στην ανάλυση.

4.6.2. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την ανάλυση του μοντέλου multivariate probit. Η επεξήγηση των αποτελεσμάτων για την κάθε εξίσωση ξεχωριστά έχει ήδη γίνει σε προηγούμενη ενότητα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον όμως παρουσιάζουν οι συντελεστές συσχέτισης ρ μεταξύ των εξαρτημένων μεταβλητών. Τον υψηλότερο βαθμό συσχέτισης εμφανίζουν οι διαδικασίες συντήρησης 505 (Εξίσωση 4) και 507 (Εξίσωση 6), γεγονός που σημαίνει ότι οι δύο αυτές διαδικασίες επιφέρουν παρόμοια αποτελέσματα στην δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Στο ίδιο συμπέρασμα μπορούμε να καταλήξουμε παρατηρώντας το Διάγραμμα 4.8 της προηγούμενης ενότητας στο οποίο οι καμπύλες των 505 και 507 είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη. Αρκετά ασθενή συσχέτιση (<0.4) φαίνεται να έχουν οι διαδικασίες 502 (Εξίσωση 1), 503 (Εξίσωση 2) και 504 (Εξίσωση 3) με την 507 (Εξίσωση 6). Οι διαδικασίες 504 και 508 είναι οι μόνες που συσχετίζονται αρνητικά.

Πίνακας 4.28. Αποτελέσματα μοντέλου Multivariate Probit

Ανεξάρτητη μεταβλητή	Παράμετρος	Έλεγχος t
Εξίσωση 1: Διαδικασία Συντήρησης 502		
Constant	-1.474	-1.575
T_S_REP	0.372	3.388
D_BEL_0	0.009	2.124
TH_AC_2	-0.254	-2.123
Εξίσωση 2: Διαδικασία Συντήρησης 503		
Constant	-2.152	-1.127
T_S_REP	0.341	4.084
FR_IND	0.001	1.871
ESAL	2.708	1.445
ESAL ²	-0.954	-1.088
TH_AC_3	-0.193	-1.282
Εξίσωση 3: Διαδικασία Συντήρησης 504		
Constant	5.704	1.281
T_S_REP	0.322	3.630
D_BEL_0	0.015	2.711
PRECIP	0.0007	1.413

ESAL	2.535	1.710
ESAL ²	-0.515	-0.629
TH_IMP_4	-2.111	-2.618
Εξίσωση 4: Διαδικασία Συντήρησης 505		
Constant	-0.575	-0.731
T_S_REP	0.213	4.657
AADT_TR	1.642	1.559
AADT ²	-0.290	-0.902
TH_SUB_5	-0.023	-1.088
TH_AC_5	-0.276	-3.454
Εξίσωση 5: Διαδικασία Συντήρησης 506		
Constant	-2.337	-2.135
T_S_REP	0.422	3.302
FR_IND	0.002	2.679
ESAL	4.794	3.651
ESAL ²	-1.110	-1.691
TH_SB_6	-0.097	-2.176
TH_IMP_6	-0.551	-1.896
Εξίσωση 6: Διαδικασία Συντήρησης 507		
Constant	-0.929	-0.432
T_S_REP	0.187	4.553
D_BEL_0	0.009	2.096
Εξίσωση 7: Διαδικασία Συντήρησης 508		
Constant	0.688	0.444
T_S_REP	0.248	4.753
D_BEL_0	0.012	3.356
ESAL	1.675	1.552
ESAL ²	-0.442	-0.674
TH_IMP_8	-0.702	-2.946
Εξίσωση 8: Διαδικασία Συντήρησης 509		
Constant	-2.715	-1.603
T_S_REP	-0.237	2.069
ESAL	1.913	1.044
ESAL ²	-0.485	-1.240

Συσχέτιση μεταξύ εξαρτημένων μεταβλητών ^a		
ρ (Εξίσωση 1-Εξίσωση 2)	0.580	2.377
ρ (Εξίσωση 1-Εξίσωση 4)	0.477	2.538
ρ (Εξίσωση 3-Εξίσωση 4)	0.538	2.630
ρ (Εξίσωση 3-Εξίσωση 5)	0.510	2.833
ρ (Εξίσωση 4-Εξίσωση 5)	0.615	3.415
ρ (Εξίσωση 1-Εξίσωση 6)	0.383	2.002
ρ (Εξίσωση 2-Εξίσωση 6)	0.349	1.835
ρ (Εξίσωση 3-Εξίσωση 6)	0.327	1.794
ρ (Εξίσωση 4-Εξίσωση 6)	0.777	9.734
ρ (Εξίσωση 5-Εξίσωση 6)	0.690	5.455
ρ (Εξίσωση 1-Εξίσωση 7)	0.479	59.139
ρ (Εξίσωση 2-Εξίσωση 7)	0.361	2.238
ρ (Εξίσωση 3-Εξίσωση 7)	-0.361	-2.613
ρ (Εξίσωση 5-Εξίσωση 7)	0.524	4.900
ρ (Εξίσωση 6-Εξίσωση 7)	0.469	2.707
ρ (Εξίσωση 1-Εξίσωση 8)	0.672	3.649
ρ (Εξίσωση 4-Εξίσωση 8)	0.421	1.904
ρ (Εξίσωση 6-Εξίσωση 8)	0.729	2.231
ρ (Εξίσωση 7-Εξίσωση 8)	0.644	2.300

a Εμφανίζονται μόνο οι στατιστικά σημαντικές μεταβλητές σε επίπεδο σημαντικότητας 10%

4.7. Συμπεράσματα

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

- Για την στατιστική επεξεργασία του συνόλου των διαδικασιών συντήρησης:

Σε αυτό το πρώτο βήμα της ανάλυσης αναπτύχθηκε ένα μοντέλο Random effects binary probit με στόχο την αξιολόγηση των διαδικασιών συντήρησης. Από τα αποτελέσματα έγινε εμφανής η επίδραση του είδους του ασφαλομίσγματος (ανακυκλωμένο ή μη) αλλά και του πάχους της επίστρωσης στην έναρξη των αλιγοτορικών ρηγματώσεων. Επίσης, φάνηκε ότι ο τρόπος προετοιμασίας της αρχικής επιφάνειας δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την έναρξη της ρηγματώσεως.

- Για την στατιστική επεξεργασία της κάθε διαδικασίας συντήρησης ξεχωριστά:

Στο δεύτερο βήμα της ανάλυσης, το φαινόμενο της εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων παρουσιάζεται με μοντέλα Binomial probit, ένα για κάθε διαδικασία συντήρησης. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συντήρηση είναι η μεταβλητή με τη μεγαλύτερη στατιστική σημαντικότητα για όλες τις διαδικασίες συντήρησης. Σε ότι αφορά τα κλιματικά στοιχεία, ο παράγοντας του παγετού, είτε με τη μορφή του δείκτη παγετού είτε με τη μορφή του ετήσιου αριθμού ημερών που η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία ήταν μικρότερη των 0°C, έκανε την εμφάνιση του σε κάθε μοντέλο, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία των χαμηλών θερμοκρασιών στο θέμα της ρηγματώσεως του οδοστρώματος. Η επιρροή της κυκλοφορίας στην έναρξη της ρηγματώσεως είναι παρόμοια για τα διάφορα είδη συντήρησης εκτός της συντήρησης 507 όπου είναι αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Τέλος, από τα κατασκευαστικά στοιχεία πιο σημαντική αναδείχθηκε η επίδραση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων.

- Για τη στατιστική επεξεργασία με το μοντέλο Multivariate probit:

Τρίτο βήμα της ανάλυσης αποτέλεσε το μοντέλο Multivariate probit. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των συντελεστών συσχέτισης μεταξύ των διαδικασιών συντήρησης. Την υψηλότερη συσχέτιση έχουν οι διαδικασίες συντήρησης 505 και 507 που σημαίνει ότι η εφαρμογή τους επιφέρει παρόμοια αποτελέσματα στο οδόστρωμα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑ

5.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκαν πιθανοτικά στατιστικά μοντέλα για την έναρξη του φαινομένου των αλιγοτορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων οδοστρωμάτων που έχουν υποστεί διαφορετικές διαδικασίες συντήρησης και αποκατάστασης. Για την προσαρμογή των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων του προγράμματος Long Term Pavement Performance με στοιχεία επί τόπου μετρήσεων από την έρευνα SPS-5 που αφορά στην αποκατάσταση εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Τα στοιχεία αυτά προέρχονται από δοκιμαστικές περιοχές σε 16 Πολιτείες των ΗΠΑ. Κάθε περιοχή αποτελείται από οκτώ ξεχωριστά δοκιμαστικά τμήματα στα οποία εφαρμόζονται διαφορετικές διαδικασίες συντήρησης.

Η στατιστική επεξεργασία των στοιχείων χωρίστηκε σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο αναπτύχθηκε ένα δίτιμο μοντέλο probit τυχαίων επιπτώσεων (random effects probit model) για την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης αλιγοτορικών ρηγματώσεων στην επιφάνεια εύκαμπτων οδοστρωμάτων για όλες τις διαδικασίες συντήρησης μαζί. Στο δεύτερο στάδιο, κάθε διαδικασία συντήρησης εξετάστηκε ξεχωριστά και αναπτύχθηκαν οκτώ δίτιμα

μοντέλα probit και ένα δίτιμο μοντέλο probit τυχαίων επιπτώσεων με σκοπό την αναλυτική αξιολόγηση των μεταβλητών που επιδρούν στην έναρξη ρηγματώσεων ξεχωριστά για κάθε διαδικασία. Στο τρίτο στάδιο αναπτύχθηκε ένα σύστημα οκτώ εξισώσεων με βάση το πολυμεταβλητό μοντέλο probit (multivariate probit model) με σκοπό να αναδειχθούν οι σχέσεις μεταξύ των εξαρτημένων μεταβλητών, δηλαδή των διαδικασιών συντήρησης.

Σύμφωνα με τη στατιστική θεωρία, τα δίτιμα μοντέλα probit τυχαίων επιδράσεων είναι πιο κατάλληλα από τα απλά δίτιμα probit διότι στην στατιστική ανάλυση συνυπολογίζουν τη δυναμική διαστρωματική φύση των στοιχείων. Στην στατιστική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε για την παρούσα διπλωματική, πρώτα έγινε ανάλυση των στοιχείων, στο σύνολό τους αλλά και κάθε διαδικασία συντήρησης ξεχωριστά, με δίτιμα μοντέλα probit και μετά επιχειρούνταν βελτίωση με δίτιμα μοντέλα probit τυχαίων επιπτώσεων. Πολλές φορές όμως, τα μοντέλα δεν επιδέχονταν βελτίωση, δηλαδή η εφαρμογή του μοντέλου τυχαίων επιδράσεων δεν βελτιώνει την τιμή της συνάρτησης Μέγιστης Πιθανοφάνειας και η συσχέτιση ρ των σφαλμάτων μέσα σε μία ομάδα έβγαине μη στατιστικά σημαντική. Αυτό συνέβη στο δεύτερο στάδιο της ανάλυσης όπου επιχειρήθηκε η ανάπτυξη μοντέλων για την κάθε διαδικασία συντήρησης ξεχωριστά. Μόνο το μοντέλο της διαδικασίας 507 βελτιώθηκε σημαντικά από την ανάλυση με τυχαίες επιδράσεις. Συνολικά, όλα τα μοντέλα διακρίνονται από λογική συνέπεια και τα αποτελέσματά τους συμφωνούν με την θεωρία οδοστρωμάτων. Σημαντικό στοιχείο είναι και το υψηλό ποσοστό των επιτυχών προβλέψεων που μας δίνουν τα μοντέλα, το οποίο είναι συνήθως άνω του 80%. Εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού παρατηρήσεων, οι προβλέψεις των μοντέλων επιβεβαιώθηκαν στα στοιχεία του ίδιου δείγματος και όχι σε στοιχεία εκτός δείγματος, όπως είναι και το ορθότερο σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

Στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης επιχειρήθηκε η εφαρμογή του πολυμεταβλητού μοντέλου probit το οποίο ήταν ιδιαίτερα ασταθές και ο υπολογισμός του απαιτούσε σημαντικό χρόνο. Πολλές μεταβλητές αφαιρέθηκαν λόγω χαμηλών τιμών του στατιστικού ελέγχου t . Αυτό που προσέφερε η ανάλυση με το πολυμεταβλητό μοντέλο είναι ότι αναδείχθηκαν οι σχέσεις μεταξύ των εξαρτημένων μεταβλητών των οκτώ εξισώσεων και φάνηκε έτσι ποιες διαδικασίες συντήρησης επιφέρουν παρόμοια αποτελέσματα στα οδοστρώματα από δομική πλευρά.

Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με προηγούμενες έρευνες. Πρώτον, τα στοιχεία, όπως έχουμε

ήδη αναφέρει, προέρχονται από περιοχές μελέτης σε 16 Πολιτείες των ΗΠΑ και περιλαμβάνουν και τις τέσσερις γεωγραφικές περιοχές της Βορείου Αμερικής και έτσι μπορούν να περιγράψουν πιο ρεαλιστικά του μηχανισμούς φθοράς και αστοχίας των οδοστρωμάτων. Δεύτερον, τρεις ομάδες στοιχείων (κλιματικά, κυκλοφοριακά, κατασκευής και συντήρησης) χρησιμοποιήθηκαν ως επεξηγηματικές μεταβλητές, γεγονός το οποίο κάνει την ανάλυση πιο αξιόπιστη. Τέλος, η εργασία αυτή επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διάφορων στρατηγικών συντήρησης ως προς την εμφάνιση ρηγματώσεων το οποίο είναι ένα θέμα που δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς στο παρελθόν.

Συνοπτικά οι βασικές διαπιστώσεις που προκύπτουν από την παρούσα εργασία είναι:

- Σύμφωνα με την ανάλυση που αφορά το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης, η τοποθέτηση νέου ασφαλτομίγματος ως επίστρωση μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης αλगाτορικών ρηγματώσεων κατά 13,6% σε σχέση με την τοποθέτηση ανακυκλωμένου ενώ η τοποθέτηση 5 ιντσών ασφαλτομίγματος στην επίστρωση μειώνει την πιθανότητα κατά 13,1% σε σχέση με την τοποθέτηση 2 ιντσών. Σημειώνεται εδώ τα παραπάνω ποσοστά αποτελούν την οριακή επιρροή των αντίστοιχων μεταβλητών.
- Σύμφωνα πάλι με την ανάλυση που αφορά το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης, το στοιχείο που επηρεάζει λιγότερο την εμφάνιση αλγατορικών ρηγματώσεων είναι ο τρόπος προετοιμασίας της αρχικής επιφάνειας του οδοστρώματος πριν τη συντήρηση.
- Περνώντας στα μοντέλα για την κάθε διαδικασία συντήρησης ξεχωριστά και στην αξιολόγηση των διαδικασιών συντήρησης παρατηρούμε ότι η διαδικασία συντήρησης που επηρεάζεται λιγότερο από το χρόνο που μεσολαβεί από τη συντήρηση είναι η 507, η οποία είναι και η διαδικασία με το υψηλότερο κόστος.
- Σε ό,τι αφορά τα κλιματικά στοιχεία, ο παράγοντας του παγετού κάνει την εμφάνισή του και στα οκτώ μοντέλα, είτε με τη μορφή του δείκτη παγετού είτε με τη μορφή του ετήσιου αριθμού ημερών που η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία ήταν μικρότερη των 0°C, γεγονός που αναδεικνύει την αρνητική επίδραση των χαμηλών θερμοκρασιών στη ρηγμάτωση του οδοστρώματος.
- Σύμφωνα με την οδοστρωματική θεωρία, ένα από τα βασικότερα αίτια εμφάνισης αλγατορικών ρηγματώσεων είναι η καταπόνηση λόγω της κυκλοφορίας και των βαρέων οχημάτων. Αυτό επιβεβαιώθηκε από τη στατιστική ανάλυση αφού μία από

τις μεταβλητές που σχετίζονται με την κυκλοφορία (ESAL, AADT_TR) είναι παρούσα στα τελικά μοντέλα. Η στατιστική σημαντικότητα της παραμέτρου του τετραγώνου των δύο παραπάνω μεταβλητών υποδηλώνει τη μη γραμμική φύση της σύνδεσης της κυκλοφορίας με την πιθανότητα εμφάνισης αλγαιατορικών ρηγματώσεων.

- Για την πλειοψηφία των διαδικασιών συντήρησης, αύξηση της τιμής του ετήσιου αριθμού ισοδύναμων φορτίων μονού τροχού (ESAL) κατά 1000 αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγμάτωσης κατά 0.1%. Για τη διαδικασία συντήρησης 507, η αύξηση της πιθανότητας για την παραπάνω μεταβολή του ESAL είναι 0.01% δηλαδή 10 φορές μικρότερη από τις υπόλοιπες διαδικασίες συντήρησης. Έτσι καταλαβαίνουμε ότι στο συγκεκριμένο είδος συντήρησης η κυκλοφορία ασκεί τη μικρότερη επιρροή.
- Το πάχος των ασφαλικών στρώσεων μετά τη συντήρηση εμφανίστηκε ως στατιστικά σημαντικός παράγοντας στις διαδικασίες συντήρησης 502 έως και 505, δηλαδή για τα οδοστρώματα στα οποία είχε εφαρμοστεί ελαφριού τύπου προετοιμασία της επιφάνειάς τους πριν την επίστρωση του νέου ασφαλτομίγματος. Η επιρροή του πάχους των ασφαλικών είναι μεγαλύτερη για τη διαδικασία συντήρησης 502, η οποία είναι και η διαδικασία που έχει το μικρότερο κόστος. Συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους των ασφαλικών κατά 1 ίντσα προκαλεί μείωση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου της ρηγμάτωσης κατά 10%.
- Το πάχος των νέων ασφαλικών στρώσεων που προστέθηκαν στη συντήρηση εμφανίστηκε ως στατιστικά σημαντικός παράγοντας σχεδόν σε όλες τις διαδικασίες συντήρησης οι οποίες περιλάμβαναν φρεζάρισμα και εντατική προετοιμασία της αρχικής επιφάνειας του οδοστρώματος (εκτός από την 509 όπου καμία μεταβλητή σχετική με την κατασκευή και συντήρηση δεν βγήκε στατιστικά σημαντική από την ανάλυση) αλλά και στην διαδικασία 504. Από τα αποτελέσματα γίνεται φανερό ότι μια μικρή μεταβολή του πάχους του νέου ασφαλτομίγματος μειώνει κατά σημαντικό ποσοστό την πιθανότητα εμφάνισης αλγαιατορικών ρηγματώσεων. Πιο έντονα αυτό φαίνεται στη διαδικασία συντήρησης 504 όπου αύξηση του νέου ασφαλτομίγματος κατά 1 ίντσα μειώνει την πιθανότητα έναρξης της ρηγμάτωσης κατά 59.8%.
- Συγκρίνοντας τις δύο «ακραίες» σε σχέση με το κόστος διαδικασίες συντήρησης, 502 και 507, βλέπουμε ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στο χρόνο ζωής που δίνει η

κάθε μία στο οδόστρωμα. Συγκεκριμένα, για τη διαδικασία 502, η πιθανότητα για αστοχία είναι στο 70% στα 7.5 έτη ενώ για την 507 στα 13.6 έτη. Αυτό φανερώνει ότι το ένα οδόστρωμα σε σχέση με το άλλο έχει, μετά τη συντήρηση, διπλάσιο χρόνο ζωής από άποψη δομικής επάρκειας.

- Από τις οκτώ διαδικασίες συντήρησης, μόνο η 507 εμφάνισε ισχυρή ετερογένεια και χρειάστηκε βελτίωση με μοντέλο τυχαίων επιπτώσεων. Οι συντελεστές των μεταβλητών του βελτιωμένου μοντέλου διαφοροποιούνται αρκετά σε σχέση με την αρχική ανάλυση, όπως και οι οριακές επιδράσεις. Η ετερογένεια μπορεί να ερμηνευτεί με δύο τρόπους, ή ως μια ανεξάρτητη μεταβλητή η οποία επηρεάζει την πιθανότητα εμφάνισης ρηγμάτωσης αλλά δεν έχει εντοπιστεί από εμάς και δεν συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο ή ως ορισμένα μη-παρατηρούμενα χαρακτηριστικά, όμοια μέσα στην ομάδα (Πολιτεία) αλλά διαφορετικά μεταξύ τους.
- Συγκρίνοντας το μοντέλο για το σύνολο των διαδικασιών συντήρησης με τα μοντέλα για την κάθε διαδικασία συντήρησης ξεχωριστά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα μοντέλα για την κάθε διαδικασία υπερτερούν γιατί «εξηγούν» και περιγράφουν καλύτερα και πιο εξειδικευμένα την εμφάνιση των αλगाτορικών ρηγματώσεων και αυτό γίνεται πιο εμφανές από τις καμπύλες που δείχνουν τη πιθανότητα εμφάνισης ρηγμάτωσης σε σχέση με το χρόνο που μεσολαβεί από τη συντήρηση (π.χ. Διάγραμμα 4.10). Κάθε καμπύλη που αντιστοιχεί σε μία διαδικασία συντήρησης έχει σημαντικές διαφορές με τις υπόλοιπες και διαφορετικό ρυθμό αύξησης της πιθανότητας μέσα στο χρόνο. Από την άλλη μεριά όμως, το μοντέλο για το σύνολο των διαδικασιών είναι πιο αξιόπιστο μιας και υπερτερεί από την άποψη αριθμού παρατηρήσεων (1904 παρατηρήσεις) σε σχέση με τα οκτώ μοντέλα τα οποία διαθέτουν μόλις 238 παρατηρήσεις έκαστο.
- Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με το πολυμεταβλητό μοντέλο probit, οι διαδικασίες συντήρησης 505 και 507 εμφανίζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης, γεγονός που σημαίνει ότι αυτές οι δύο διαδικασίες επιφέρουν παρόμοια αποτελέσματα στη δομική κατάσταση των οδοστρωμάτων.

5.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από την άποψη της διαχείρισης της συντήρησης και αποκατάστασης οδοστρωμάτων, η αξιολόγηση διαφορετικών στρατηγικών συντήρησης είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση του κόστους ζωής των οδοστρωμάτων και των οδικών έργων υποδομής γενικότερα. Σε αυτή την εργασία προσδιορίστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την έναρξη των αλιγοτορικών ρηγματώσεων μετά από την εφαρμογή οκτώ συγκεκριμένων στρατηγικών συντήρησης και αποκατάστασης και παράλληλα αξιολογήθηκε η αποτελεσματικότητα των διαδικασιών αυτών. Από την ανάλυση προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για τους διαχειριστές ενός έργου υποδομής αλλά και για τους μελετητές. Όμως, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα μπορούν να εφαρμοστούν αυτούσια στην πράξη μόνο εάν γίνει εφαρμογή μίας από τις οκτώ στρατηγικές συντήρησης, γεγονός που περιορίζει αρκετά την εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, προτείνονται τα παρακάτω ζητήματα για περαιτέρω διερεύνηση:

1. Αρχικά κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση και η μοντελοποίηση και άλλων διαδικασιών συντήρησης και αποκατάστασης με σκοπό την ανάπτυξη μοντέλων που θα μπορούν να εφαρμοστούν ευρέως και την εξαγωγή πιο γενικών συμπερασμάτων για το θέμα της συντήρησης και αποκατάστασης οδοστρωμάτων.
2. Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με το φαινόμενο των αλιγοτορικών ρηγματώσεων. Για να μπορέσουμε όμως να αξιολογήσουμε μια στρατηγική συντήρησης συνολικά είναι απαραίτητο να διερευνηθούν και άλλα είδη δομικών αστοχιών, όπως είναι για παράδειγμα οι κατά μήκος ρηγματώσεις στο ίχνος του τροχού, αλλά και είδη λειτουργικών αστοχιών, όπως είναι η κατά μήκος ομαλότητα.
3. Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμη η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης φθορών για τη περίοδο που ακολουθεί τη συντήρηση για ημιάκαμπα και δύσκαμπα οδοστρώματα.
4. Η βάση δεδομένων του LTPP είναι μια πλούσια πηγή πληροφοριών για οδοστρώματα. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα μικρό κομμάτι αυτής της βάσης για την εξέταση ενός συγκεκριμένου φαινομένου. Θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η συλλογή διαφορετικών στοιχείων από τη βάση αυτή για την ανάπτυξη πιο γενικών προτύπων τα οποία θα είναι πιο εύχρηστα, πιο αξιόπιστα

(λόγω του μεγάλου πλήθους τους) και με τα οποία θα μπορούσε να γίνει ανάλυση εντός και εκτός δείγματος (in – out of sample analysis), δηλαδή οι προβλέψεις να επιβεβαιωθούν σε στοιχεία εκτός δείγματος.

5. Τέλος, είναι απαραίτητο να επισημάνουμε ότι παρά το ενδιαφέρον του φαινομένου της έναρξης της ρηγμάτωσης στα οδοστρώματα, ιδιαίτερα σημαντική είναι και η εξέλιξη αυτής στο χρόνο. Γι' αυτό, προτείνεται η ανάπτυξη ενός συνδυαστικού μοντέλου που θα έχει τη δυνατότητα να προβλέπει τόσο την έναρξη όσο και την εξέλιξη της αστοχίας. Για να γίνει βέβαια κάτι τέτοιο με τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, τα στοιχεία πρέπει να διορθωθούν και να συμπληρωθούν μιας και λείπουν αρκετές τιμές. Η συμπλήρωση ενός μη-ισσοροπημένου δυναμικού διαστρωματικού αρχείου θεωρείται ιδιαίτερα δύσκολη και συνιστάται η χρήση σύγχρονων μεθόδων (π.χ. multiple imputation) για να μην αλλοιωθούν σε σοβαρό βαθμό τα αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Abaza, K.A. (2004). "Deterministic performance prediction model for rehabilitation and management of flexible pavement." *International Journal of Pavement Engineering*, 5(2), 111-121.
- Ahmed, A., Labi, S., Li, Z., and Shields, T. (2010). "Aggregate and disaggregate statistical evaluation of the performance-based effectiveness of LTPP SPS-5 flexible pavement rehabilitation treatments." Accepted for presentation at 6th Annual Inter-University Symposium on Infrastructure Management, DE USA.
- Butler, B.C., Carmichael, R. F.III, and Flanagan, P. R. (1985). "Impact of pavement maintenance on damage rate, volume 2." Final Rep., ARE, Inc., Austin, Tex.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2003). "Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program." Publication No. FHWA-RD-03-031, U.S. DOT.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2009). "Long-Term Pavement Performance (LTPP) Information Management System: Pavement Performance Database User Reference Guide." FHWA, U.S. DOT.
- Federal Highway Administration (FHWA). "Pavement Distress Identification Manual for the NPS Road Inventory Program, Cycle 4, 2006-2009." U.S. DOT.
- Greene, W.H. (2003). *Econometric analysis*, 5th Ed., Pearson Education, Inc.
- Hall, K.T., Correa, C.E., Simpson, A.L. (2002). "LTPP Data Analysis: Effectiveness of Maintenance and Rehabilitation Options." Publication NCHRP Project 20-50(3/4): Final Report, National Cooperative Highway Research Program. *Transportation Research Board*, National Research Council, Washington D.C, USA.
- Huang, Y.H. (2004). *Pavement Analysis & Design*, 2nd Ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J.
- Ker, H-W., Lee, Ying-H., and Wu, P-H (2008). "Development of fatigue cracking prediction models using Long-Term Pavement Performance Database." *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 134(11), 477-482.
- Kumara, M.W., Gunaratne, M., Lu, J. J., and Dietrich, B. (2004). "Methodology for random surface-initiated crack growth prediction in asphalt pavements." *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(2), 175-185.
- Labi, S., and Sinha, K.C. (2003). "Measures of short-term effectiveness of highway pavement maintenance." *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 129(6), 673-683.
- Loizos, A., and Karlaftis, M.G. (2005). "Pavement crack initiation prediction from in-service pavements: A duration model approach." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.1940, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 38-42.

- Madanat, S., Bulusu, S., and Mahmoud, A. (1995). "Estimation of infrastructure distress initiation and progression models." *Journal of Infrastructure Systems*, 1(3), 146-150.
- Madanat, S., and Shin, H.C. (1998). "Development of Distress Progression Models Using Panel Data Sets of In-Service Pavements." *Transportation Research Record*, No 1643.
- Martin, T.C. (2010). "Experimental estimation of the relative deterioration of surface maintenance treatments." *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 136(1), 1-10.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2004). "Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final Report." Rep. No. NCHRP 1-37A, *Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- Oh, J., Fernando, E.G., and Lytton, R.L. (2007). "Evaluation of damage potential for pavements due to overweight truck traffic." *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 133(5), 308-317.
- Paterson, W.D.O., and Chesher, A.D. (1986). "On predicting pavement surface distress with empirical models of failure times." *Transportation Research Board* 1095, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 45-56.
- Paterson, W.D.O. (1987). "Road deterioration and maintenance effects: models for planning and management." The John Hopkins University Press, Baltimore, MD.
- Prozzi, J.A., and Madanat, S.M. (2000). "Using duration models to analyze experimental pavement failure data." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No 1699, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 87-94
- Puccinelli, J., and Jackson, N. (2007). "Development of pavement performance models to account for frost effects and their application to M-E Design Guide Calibration." *Transportation Research Board*, Annual Meeting (CD-ROM).
- Shin, H.C., and Madanat, S. (2007). "Development of a stochastic model of pavement crack initiation", *J. Infrastructure Plan. and Man.*, JSCE, No.744/IV-61, 61-67.
- "The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research", Special Report 61E, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1962.
- Wang, Y., and Allen, D. (2008). "Staged survival models for overlay performance prediction." *International Journal of Pavement Engineering*, 9(1), 33-44.
- Washington, S., Karlaftis, M.G., and Mannering, F.L. (2003). *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*. Chapman & Hall/CRC Press, Boca Raton, FL.
- Washington, S., Karlaftis, M.G., and Mannering, F.L. (2010). *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*. 2nd Edition, Chapman & Hall/CRC Press, Boca Raton, FL.
- Yoder, E.J., and Witczak, M.W. (2008). *Principles of pavement design*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Σταθόπουλος, Α., και Καρλαύτης, Μ. (2008). *Σχεδιασμός Μεταφορικών Συστημάτων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.