



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ
ΥΠΟΔΟΜΗΣ

*Διερεύνηση της επίδρασης στρατηγικών συντήρησης
στην έναρξη ρηγματώσης οδοστρωμάτων*



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΡΑΠΑΛΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

Επιβλέποντες : Α. Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ

Μ. Καρλαύτης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2013

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τους κ. Α. Λοΐζο, Καθηγητή και κ. Μ. Καρλαύτη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών, για την πολύτιμη στήριξη και την καθοδήγηση που επέδειξαν κατά την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Α. Σταθόπουλο, Καθηγητή και Διευθυντή του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών, για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την συνάδελφο Μπαρδάκα Ελένη για την συνεργασία μας κατά την πραγματοποίηση εργασίας με σκοπό την συμμετοχή μας στον διαγωνισμό “2010 International Contest on LTPP Data Analysis”, πάνω στην οποία στηρίχθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	3
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	4
2.1. Έρευνες μορφών Αστοχιών των Οδοστρωμάτων.....	5
3. Αρχές Σχεδιασμού	7
3.1. Ορισμός τύπων Οδοστρωμάτων	9
3.2. Είδη Φθοράς.....	9
3.3. Διαδικασία και Στρατηγικές Σχεδιασμού.....	12
3.4. Ο Σχεδιασμός ως διαδικασία Συμβιβασμού.....	12
3.5. Ανάλυση Συστήματος	13
3.6. Καταπόνηση Οδοστρωμάτων.....	13
3.7. Δομικές Αποτυχίες σε Εύκαμπτα Οδοστρώματα.....	14
3.8. Βασικοί τύποι καταπόνησης Οδοστρωμάτων	15
3.9. Συμπεράσματα σχετικά με την Αξιολόγηση των Οδοστρωμάτων	16
3.10. Τεχνικές Συντήρησης , Αξιολόγησης και Ενίσχυσης Οδοστρωμάτων	17
4. Το πρόγραμμα LTPP	17
5. Βάση δεδομένων	21
5.1. Συλλογή Δεδομένων.....	23
6. Μεθοδολογία - Μοντέλα Χρονικής Διάρκειας (Duration Models).....	26
6.1. Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας «Hazard»	26
6.2. Χαρακτηριστικά των στοιχείων Χρονικής Διάρκειας	33
6.3. Μη παραμετρικά Πρότυπα.....	35
6.4. Ημι-παραμετρικά Πρότυπα	37
6.5. Παραμετρικά Πρότυπα.....	39
6.6. Ετερογένεια	43
7. Στατιστική Επεξεργασία	45
7.1. Αποτελέσματα	46
8. Συμπεράσματα	48
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	51

1.Εισαγωγή

Εκτενής έρευνα έχει πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια σχετικά με τους παράγοντες οι οποίοι συντελούν στην φθορά των οδοστρωμάτων, λαμβάνοντας υπόψη συγκοινωνιακές και περιβαλλοντικές παραμέτρους. Συχνά οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται, με σκοπό να αναπτυχθούν μοντέλα για τον καθορισμό των εργασιών Συντήρησης και Αποκατάστασης των οδοστρωμάτων - Maintenance and Rehabilitation (M&R) Treatments. Τα μοντέλα αυτά μπορούν επίσης να αποτελέσουν ένα σημαντικό εργαλείο για τον καθορισμό του απαιτούμενου οικονομικού προϋπολογισμού των εργασιών αυτών , με σκοπό την απευθείας χρήση από αρχές διαχείρισης και κατασκευαστικές εταιρίες . Η υιοθέτηση λοιπόν της πλέον κατάλληλης στρατηγικής μπορεί να οδηγήσει στην ελαχιστοποίηση του κόστους των εργασιών συντήρησης κατά την διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος. Για τον λόγο αυτό, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν μοντέλα που βοηθούν στον καθορισμό της αποτελεσματικότητας διαφορετικών μεθόδων αποκατάστασης και στην επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης συντήρησης.

Παρά την εκτεταμένη έρευνα στο πεδίο της έναρξης της ρηγμάτωσης των οδοστρωμάτων, ανεπαρκής έρευνα έχει διεξαχθεί σχετικά με το φαινόμενο της ρηγμάτωσης ενός οδοστρώματος *έπειτα* από την εφαρμογή κάποιας μεθόδου συντήρησης. Αυτό είναι ένα πεδίο που οδηγεί σε σημαντικά συμπεράσματα αφού τα αποτελέσματα μπορούν να συντελέσουν στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου συντήρησης και να καθορίσουν τους παράγοντες που επηρεάζουν την ρηγμάτωση οδοστρωμάτων, τα οποία έχουν υποστεί κάποια συγκεκριμένη διαδικασία αποκατάστασης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ερευνάται το ερώτημα πώς διαφορετικές μέθοδοι επηρεάζουν την ζωή του οδοστρώματος υπό την εξής οπτική :

μοντελοποιούμε τον χρόνο που μεσολαβεί ανάμεσα στην εφαρμογή διαφόρων στρατηγικών συντήρησης και στην έναρξη της ρηγμάτωσης. Ο τύπος αστοχίας που μελετάται είναι η **αλιγατορική ρηγμάτωση**. Για τον λόγο αυτό γίνεται χρήση στοιχείων από την βάση δεδομένων του προγράμματος 2010 Long Term Pavement Performance (LTPP) και συγκεκριμένα από το Specific Pavement Study 5 - Rehabilitation of AC pavements (SPS-5) Test.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ο υπολογισμός του χρόνου κατά τον οποίο η κατάσταση του οδοστρώματος πέφτει κάτω από ένα επιτρεπτό επίπεδο είναι ένα θέμα που έχει προσελκύσει την προσοχή πολλών ερευνητών. Οι Paterson and Chesher (1986) ανέπτυξαν ένα μοντέλο φθορών εφαρμόζοντας μοντέλα χρονικής διάρκειας για την μεταβλητότητα στους χρόνους αστοχίας. Οι Prozzi and Madanat (2000) ενσωμάτωσαν πιθανοτικές τεχνικές μοντελοποίησης χρονικής διάρκειας, με σκοπό να αναπτύξουν μοντέλα που προβλέπουν χρόνους αστοχίας οδοστρωμάτων με βάση τα πειραματικά δεδομένα αστοχιών από το AASHO Road Test. Μια συνάρτηση διακινδύνευσης (κατανομή Weibull) υιοθετήθηκε σε αυτή την μελέτη ακολουθώντας την έρευνα των Paterson and Chesher (1986). Οι Λοΐζος και Καρλαύτης (2005) ανέπτυξαν μοντέλα επιφανειακών φθορών για την πρόβλεψη χρόνων αστοχίας οδοστρωμάτων βασισμένοι σε οδοστρώματα δεκαπέντε Ευρωπαϊκών χωρών, χρησιμοποιώντας στοχαστικά μοντέλα χρονικής διάρκειας. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν πως η φθορά του οδοστρώματος επηρεάζεται από κατασκευαστικούς, κυκλοφοριακούς και κλιματικούς παράγοντες καθώς και ότι η έναρξη της διαδικασίας της φθοράς

περιγράφεται καλύτερα από μια λογαριθμική συνάρτηση, εν αντιθέσει με προηγούμενες ανακαλύψεις.

Η βάση του LTPP είναι μια πολύτιμη πηγή στοιχείων που επιτρέπει σε ερευνητές να μελετήσουν το οδόστρωμα με ποικίλους τρόπους. Οι Mladenovic et al. (2003) διεξήγαγαν την πρώτη έρευνα του LTPP Specific Pavement Study Experiment 8 (Study of Environmental Effects). Οι Salama et al. (2008) ανέπτυξαν μοντέλα για την πρόβλεψη παραμέτρων παραμόρφωσης για ένα σύστημα οδοστρωμάτων 3 στρώσεων, χρησιμοποιώντας παλινδρόμηση πολλαπλών μεταβλητών με δεδομένα από το SPS-1 πείραμα. Οι Ahmed et al. (2010) ανέπτυξαν μοντέλα για την πρόβλεψη του αναμενόμενου επιπέδου αποτελεσματικότητας οχτώ μεθόδων αποκατάστασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιώντας στοιχεία από το SPS-5 LTPP πρόγραμμα της δυτικής περιοχής. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τον IRI (International Roughness Index) σαν δείκτη της κατάστασης του οδοστρώματος και η ανάλυση διεξήχθη χρησιμοποιώντας δύο μορφές δεδομένων : ενοποιημένα και μη. Η μελέτη έδειξε ξεκάθαρα ότι η αρχική κατάσταση του οδοστρώματος είναι απόλυτα συνδεδεμένη με το ποσοστό της φθοράς του οδοστρώματος έπειτα από εργασίες συντήρησης.

2.1. Έρευνες μορφών Αστοχιών των Οδοστρωμάτων

Κάποιες από τις σημαντικότερες μορφές αστοχίας οδοστρωμάτων, ένα σημαντικό θέμα από άποψη μηχανικού αλλά και οικονομικού ενδιαφέροντος, περιλαμβάνουν : διαμήκεις ρωγμές , αλιγοτορική ρηγμάτωση και αυλάκωση. Στις διαμήκεις και αλιγοτορικές ρωγμές, η ρηγμάτωση ξεκινάει κυρίως από την βάση της ασφατικής

στρώσης και εξελίσσεται ανοδικά προς την επιφάνεια του οδοστρώματος. Ωστόσο πολλά στοιχεία καταδεικνύουν πως σε συγκεκριμένες περιπτώσεις διαμήκειες ρωγμές ξεκινούν από την επιφάνεια και κατευθύνονται προς τα κάτω. Η αυλάκωση είναι μια επιφανειακή συμπίεση στο ίχνος της ρόδας. Η αλιγοτορική ρηγμάτωση μπορεί να περιγραφεί σαν μια σειρά από αλληλένδετες ρωγμές που έχουν προκληθεί από αστοχία εξαιτίας κόπωσης της επιφάνειας του ασφαλτικού σκυροδέματος κάτω από επαναλαμβανόμενο κυκλοφοριακό φορτίο. Η ρηγμάτωση ξεκινά στον πυθμένα της ασφαλτικής επιφάνειας όπου οι εφελκυστικές τάσεις είναι μεγαλύτερες υπό την επίδραση του φορτίου. Οι ρωγμές αναδύονται προς την επιφάνεια αρχικά σαν μια σειρά από παράλληλες διαμήκειες ρωγμές. Έπειτα από επαναλαμβανόμενα κυκλοφοριακά φορτία, οι ρωγμές συνδέονται σχηματίζοντας πολύπλευρα πολυγωνικά κομμάτια, διαμορφώνοντας έναν σχηματισμό που μοιάζει με το δέρμα ενός αλιγάτορα. Η αλιγοτορική ρηγμάτωση συμβαίνει κυρίως σε περιοχές που υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενα κυκλοφοριακά φορτία. Θεωρείται μια τεράστια κατασκευαστική φθορά και καταδεικνύει κατασκευαστική αποτυχία. Ανεπαρκής σχεδιασμός, φτωχή αποστράγγιση, αντίξοες κλιματικές συνθήκες και επαναλαμβανόμενη έκθεση σε μεγάλα φορτία είναι μερικές από τις πιθανές αιτίες της αλιγοτορικής ρηγμάτωσης. Αυτή η κατασκευαστική αστοχία θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί με προσοχή καθώς οι ρωγμές επιτρέπουν διείσδυση υγρασίας και μπορεί μακροπρόθεσμα να μετατραπεί σε λακκούβα. Πολλές διαφορετικές τεχνικές συντήρησης έχουν εφαρμοσθεί τα προηγούμενα χρόνια για την αντιμετώπιση της αλιγοτορικής ρηγμάτωσης και περιλαμβάνουν φρεζάρισμα, σφράγιση ρωγμών και τοποθέτηση επικάλυψης ασφαλτικού σκυροδέματος. Επιπλέον η ανακύκλωση έχει γίνει ευρέως γνωστή εξαιτίας των αυξανόμενων αποβλήτων και των παραπροϊόντων και έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή και συντήρηση οδοστρωμάτων. Για την

αποκατάσταση εύκαμπτων οδοστρωμάτων ένα μείγμα από υπάρχοντα ασφαλτικά υλικά, με ή χωρίς καινούργια υλικά, είναι συχνά εφαρμόσιμο.

Λόγω της σημαντικότητας της κατάστασης του οδοστρώματος και των αστοχιών του, πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί σε αυτό τον τομέα. Οι Butler et al.(1985) ανέπτυξαν μοντέλα για τις φθορές οδοστρωμάτων και τα επίπεδα εξυπηρέτησης σαν μια συνάρτηση από ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι αστοχίες που μοντελοποιήθηκαν ήταν οι ρωγματώσεις, οι λακκούβες, το βάθος αυλάκωσης και η τραχύτητα. Δύο διαφορετικά είδη μοντέλων αναπτύχθηκαν για την έναρξη και τις φάσεις εξέλιξης της διαδικασίας φθοράς. Οι Labi and Sinha (2003) διεξήγαγαν μια έρευνα για συντήρηση οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων και χρησιμοποίησαν μια ποικιλία μεταβλητών για την δημιουργία μοντέλων αποτελεσματικότητας της συντήρησης. Ο Martin (2010) χρησιμοποίησε πειραματικά δεδομένα φθοράς οδοστρωμάτων, τα οποία συνέλεξε από επιταχυνόμενες δοκιμές φορτίου, για να υπολογίσει παράγοντες φθοράς, ως προς τις αυλακώσεις και την τραχύτητα, για διάφορες μεθόδους συντήρησης της επιφάνειας οδοστρωμάτων στην Αυστραλία.

3. Αρχές Σχεδιασμού

Ο κλάδος του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων είναι ένας κλάδος δυναμικός με την έννοια ότι οι μέθοδοι αλλάζουν συνεχώς καθώς νέα στοιχεία γίνονται γνωστά. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι σχεδιασμού, καθώς οι αντιλήψεις σχετικά με την καταλληλότητά τους ποικίλλει από τόπο σε τόπο. Ειδικότερα, τα διαθέσιμα υλικά κατασκευής των οδοστρωμάτων επηρεάζουν σημαντικά τον σχεδιασμό. Ωστόσο,

υπάρχουν αρχές σχεδιασμού κοινές σε όλα τα προβλήματα, ανεξάρτητα από τις άλλες διαφορετικές συνθήκες.

Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων προϋποθέτει την μελέτη των εδαφών και των υλικών οδοστρωσίας, τη συμπεριφορά τους σε φόρτιση και το σχεδιασμό τους, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στις φορτίσεις κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες. Τα φορτία όλων των οδοστρωμάτων μεταβιβάζονται τελικά στο υπέδαφος και γι' αυτό οι βασικές γνώσεις της εδαφομηχανικής είναι απαραίτητες.

Κατά τα πρώτα στάδια της εξέλιξης, ο σχεδιασμός βασιζόταν στην τήρηση εμπειρικών κανόνων που στηρίζονταν στην προηγούμενη πείρα. Στην περίοδο 1920 μέχρι 1940 η εδαφομηχανική, όπως εφαρμοζόταν στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων, περιοριζόταν κυρίως στην κατάταξη των εδαφών, πράγμα που αποτελούσε ήδη ένα μεγάλο βήμα, αλλά όχι αρκετό. Έτσι καταστρώθηκαν συσχετισμοί συμπεριφοράς οδοστρώματος με τύπους υπεδάφους. Επιπλέον, η επίδραση του παγετού και η ανεπαρκής αποστράγγιση αναγνωρίστηκαν σαν δύο σημαντικοί παράγοντες φθοράς των οδοστρωμάτων.

Παρόλα αυτά πολλές Υπηρεσίες χρησιμοποιούσαν τυποποιημένες διατομές για τις περισσότερες οδούς. Αυτό σήμαινε ότι η οδός, αν και διέσχιζε διαφορετικούς τύπους εδάφους, κατασκευαζόταν με σταθερό πάχος. Η πρακτική αυτή βασιζόταν συχνά σε οικονομικά κριτήρια.

Αρχές της δεκαετίας του 1950, παρατηρείται αύξηση στην κυκλοφορία φορτηγών αυτοκινήτων με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται φθορές σε πολλούς δρόμους. Κρίθηκε λοιπόν αναγκαίο να γίνει εκτενής έρευνα για την μελέτη οδοστρωμάτων κάτω από διαφορετικές συνθήκες εδάφους, κλίματος και φόρτισης.

3.1. Ορισμός τύπων Οδοστρωμάτων

Ιστορικά, τα οδοστρώματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες : εύκαμπτα και δύσκαμπτα. Τα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από την ασφαλτική επίστρωση, που κατασκευάζεται από στρώσεις ασφαλτομίγματος (στρώση κυκλοφορίας, ισοπεδωτικές στρώσεις και στρώση ασφαλτομίγματος βάσης), στρώση βάσης και υπόβασης, οι οποίες κατασκευάζονται από συμπυκνωμένο ασύνδετο αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης και την στρώση έδρασης. Σε μερικές περιπτώσεις (ΗΠΑ κ.α.) παραλείπεται η κατασκευή της βάσης και της υπόβασης από αμμοχάλικο και αντικαθίσταται από ασφαλτόμιγμα, οπότε το οδόστρωμα αποτελείται από αμιγώς ασφαλτικές στρώσεις. Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από την στρώση σκυροδέματος, η οποία παίζει ρόλο επίστρωσης και στρώσης βάσης, την στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο ή κατεργασμένο με τσιμέντο αμμοχάλικο, με σκοπό την ομοιόμορφη έδραση της πλάκας και την μείωση των υποχωρήσεων που αναπτύσσονται σε αυτή. Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα δεν έχουν ανάγκη από μεγάλο αριθμό στρώσεων, γιατί το σκυρόδεμα είναι υλικό με συγκριτικά μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και σημαντική αντοχή σε κάμψη. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με την μελέτη εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

3.2. Είδη Φθοράς

Υπάρχουν δύο είδη φθοράς : δομική και λειτουργική. Το πρώτο, η δομική φθορά, είναι η κατάρρευση της δομής του οδοστρώματος ή η βλάβη μιας ή περισσότερων στρώσεων του οδοστρώματος σε τέτοιο βαθμό, ώστε το οδόστρωμα να μην είναι σε

θέση να παραλάβει τα φορτία που εξασκούνται στην επιφάνειά του. Το δεύτερο είδος, η λειτουργική φθορά, μπορεί να συνοδεύεται ή όχι από δομική φθορά, αλλά είναι τέτοια ώστε το οδόστρωμα να μην μπορεί να λειτουργήσει χωρίς να ταλαιπωρεί τους ταξιδιώτες ή χωρίς να προκαλεί ισχυρές καταπονήσεις στο όχημα που το διατρέχει, λόγω της ανώμαλης επιφάνειάς του.

Ο βαθμός καταπόνησης διαβαθμίζεται και για τις δύο κατηγορίες και η σοβαρότητα της φθοράς ενός οδοστρώματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υποκειμενική γνώμη του προσώπου που την κρίνει. Πάντως, η διαφορά μεταξύ των δύο τύπων καταπόνησης είναι σημαντική και ο μηχανικός πρέπει να είναι σε θέση να τη διακρίνει. Σαν παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος με ασφαλική επίστρωση. Η επιφάνεια ενδέχεται να παρουσιάσει ανωμαλίες σαν αποτέλεσμα φθοράς της ασφαλικής στρώσης (λειτουργική βλάβη) χωρίς δομική βλάβη της όλης κατασκευής. Αντίθετα, το ίδιο οδόστρωμα είναι δυνατόν να παρουσιάσει ρήγματα και φθορές σαν αποτέλεσμα υπερφόρτισης (δομική βλάβη). Τα μέτρα συντήρησης για την πρώτη περίπτωση μπορούν να περιοριστούν σε ανανέωση της επιφανειακής στρώσης για την εξασφάλιση λείας επιφάνειας. Η δομική φθορά, όμως, ίσως να χρειάζεται πλήρη ανακατασκευή.

Υπάρχουν τρεις αιτίες που προκαλούν συνθήκες καταπόνησης. Πρώτον, υπερφόρτιση με μεγάλα μικτά φορτία, υψηλός βαθμός επανάληψης των φορτίων και υψηλές πιέσεις ελαστικών ενδέχεται να προκαλέσουν είτε δομική είτε λειτουργική βλάβη. Δεύτερον, κλιματικές καθώς και περιβαλλοντικές συνθήκες είναι δυνατόν να προκαλέσουν επιφανειακές ανωμαλίες και στατικές ανεπάρκειες. Π.χ. η διόγκωση λόγω παγετού ή η ανεπαρκής αποστράγγιση μπορεί να είναι αιτίες καταπόνησης.

Πολλές από τις κλιματικές μεταβλητές μπορούν να εκτιμηθούν, αλλά πρόγνωση των κλιματικών συνθηκών είναι αβέβαιη.

Μια τρίτη αιτία μπορεί να είναι η αποσάθρωση των υλικών οδοστρωσίας λόγω πήξης και τήξης ή ύγρανσης και ξήρανσης. Επίσης, οι μέθοδοι κατασκευής ενδέχεται να έχουν κάποια επίδραση. Για παράδειγμα, αν κατά την κατασκευή δημιουργηθούν στο υπέδαφος λακκούβες που ευνοούν την συσσώρευση νερού και επομένως τη χαλάρωση του υπεδάφους μετά την αποπεράτωση της κατασκευής, τότε δημιουργείται φθορά του οδοστρώματος. Η χρήση ακάθαρτων αδρανών και η ανεπαρκής επίβλεψη της κατασκευής είναι προφανείς παράγοντες φθοράς του οδοστρώματος. Οι μέθοδοι σχεδιασμού πρέπει να συνοδεύονται από αυστηρή επίβλεψη και έλεγχο κατασκευής για οδοστρώματα καλής ποιότητας.

Πολλά είδη καταπόνησης των οδοστρωμάτων είναι συνάρτηση της συντήρησης ή, πιο σωστά, έλλειψης της συντήρησης. Η σφράγιση ρηγμάτων και αρμών σε κανονικά χρονικά διαστήματα εξασφαλίζει συμπαγή επιφανειακή στρώση, γιατί εμποδίζει τη διείσδυση νερού. Κατά τον ίδιο τρόπο, το σφράγισμα επιφανειακών εύκαμπτων οδοστρωμάτων είναι εξαιρετικά ευεργετικό.

Από τα παραπάνω πρέπει να αναγνωριστεί ότι ο ανεπαρκής στατικός σχεδιασμός δεν είναι παρά ένας από τους πολλούς παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν καταπόνηση του οδοστρώματος. Κατά το στάδιο της μελέτης είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη πολλές από τις κλιματικές συνθήκες, καθώς και οι μέθοδοι κατασκευής και συντήρησης. Εν κατακλείδι, η καλή συμπεριφορά των οδοστρωμάτων προϋποθέτει αλληλεξάρτηση πολλών παραγόντων.

3.3. Διαδικασία και Στρατηγικές Σχεδιασμού

Πρέπει να γίνει κατανοητό από την αρχή ότι στο σχεδιασμό οι αποφάσεις που είναι σχετικές με την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος είναι μία απόφαση συμβιβασμού, όπου ο μηχανικός εξισορροπεί το αυξημένο κόστος συντήρησης με το αυξημένο αρχικό κόστος, ανάλογα με το διάστημα συντήρησης που θα διαλέξει. Αν πρόκειται να επιλεγεί μικρή αρχική δαπάνη τότε οι δαπάνες συντήρησης αυξάνουν, γιατί η οδός θα φθαρεί σε σχετικά σύντομο χρόνο. Αν, όμως, ο μελετητής αυξήσει το αρχικό κόστος επιλέγοντας ένα αρκετά ανθεκτικότερο οδόστρωμα, οι δαπάνες συντήρησης μειώνονται ανάλογα. Έτσι, είναι φανερό ότι η διαδικασία λήψης αποφάσεων περιλαμβάνει και την εξισορρόπηση του ολικού κόστους με τη δυσχέρεια του ενόδιου (χρήστη της οδού) και πολλούς άλλους παράγοντες. Το ολικό κόστος του οδοστρώματος πρέπει να περιλαμβάνει όχι μόνο τα έξοδα συντήρησης του τάπητα, αλλά και τις δαπάνες του ενόδιου που προκύπτουν από την διακοπή λειτουργίας της οδού κατά τη συντήρησή της.

3.4. Ο Σχεδιασμός ως διαδικασία Συμβιβασμού

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι η διαδικασία λήψης αποφάσεων, που είναι στην καρδιά του σχεδιασμού, βασίζεται στην προσπάθεια να συμβιβαστεί το κόστος δυσχέρειας και συντήρησης με το αρχικό κόστος. Είναι αναγκαίο για το μελετητή μηχανικό να πάρει μία απόφαση σχετικά με το επίπεδο εξυπηρετικότητας που θα δοθεί στο οδόστρωμα και με βάση αυτή να κάνει μία εκτίμηση της αναμενόμενης διάρκειας ζωής του οδοστρώματος. Αυτή η διαδικασία λήψης αποφάσεων δεν είναι απλή, και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος του ίδιου του έργου.

3.5. Ανάλυση Συστήματος

Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας επιλογής με σκοπό την ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους του έργου είναι γνωστή σαν ανάλυση συστήματος. Όλοι οι παράγοντες που υπεισέρχονται στον σχεδιασμό (περιβαλλοντικοί, φορτία, ιδιότητες υλικών κλπ) είναι αλληλένδετοι, και είναι δύσκολο στην καλύτερη περίπτωση να απομονώσουμε τις μεταβλητές με ένα γενικό τρόπο. Ο μηχανικός πρέπει να κάνει μία λογική εκτίμηση όλων αυτών των μεταβλητών για να καταλήξει σε έναν σχεδιασμό που ταιριάζει στις συνθήκες και ύστερα να προβεί στην κατασκευή ενός οδοστρώματος ικανού να ανταποκριθεί στον προορισμό του. Έτσι, το πρόβλημα γίνεται ένα στατιστικό πρόβλημα όπου γίνονται εκτιμήσεις πάνω στις οποίες στηρίζονται λογικά συμπεράσματα.

3.6. Καταπόνηση Οδοστρωμάτων

Ο μηχανικός πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμήσει εντελώς τους παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Επιπλέον πρέπει να είναι σε θέση να επεκτείνει τις αρχές σχεδιασμού σε περιπτώσεις που δεν καλύπτονται εντελώς από τις σύγχρονες μεθόδους σχεδιασμού.

Ιδιαίτερα για τα εύκαμπτα οδοστρώματα, τα οποία εξετάζει και η παρούσα διπλωματική εργασία, υπάρχουν μεγάλες διαφορές ανάμεσα στις μεθόδους σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται από διάφορες πολιτείες.

Ένα από τα σημαντικότερα ερωτήματα που πρέπει να εξετασθούν είναι : ‘‘τι δημιουργεί την αποτυχία οδοστρωμάτων ;’’. Με σκοπό να απαντηθεί το ερώτημα

αυτό πρέπει αρχικά να κατανοηθούν οι τύποι καταπόνησης των οδοστρωμάτων. Ιδιαίτερη σημασία έχει να διαπιστωθεί, αν ορισμένοι τύποι καταπόνησης έχουν χαρακτήρα προοδευτικό, που πιθανόν οδηγεί σε τελική αποτυχία της οδού ή αν δεν είναι προοδευτικοί.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθούν πάλι οι δύο τύποι αποτυχίας, η δομική (κατάρρευση μίας ή περισσότερων στρώσεων του οδοστρώματος) και η λειτουργική (που σημαίνει ότι το οδόστρωμα δεν μπορεί να ανταποκριθεί στη λειτουργία για την οποία προορίζεται). Οι δύο τύποι αποτυχίας δεν εμφανίζονται απαραίτητα μαζί ενώ η λειτουργική αποτυχία εξαρτάται κυρίως από τον βαθμό τραχύτητας της επιφάνειας της οδού.

3.7. Δομικές Αποτυχίες σε Εύκαμπτα Οδοστρώματα

Οι δομικές αποτυχίες οφείλονται σε κόπωση της επιφάνειας, στερεοποίηση ή διάτμηση που αναπτύσσονται στο υπέδαφος, την υπόβαση, τη βάση ή την επιφανειακή στρώση. Το πλάτος μιας αυλάκωσης δείχνει γενικά το βάθος της αποτυχημένης στρώσης. Αυτό πάντως δεν είναι απόλυτα σωστό και πρέπει να αντιμετωπίζεται με επιφύλαξη. Οι αποτυχίες του υπεδάφους σε διάτμηση εκδηλώνονται με επιφανειακές διογκώσεις σε κάποια απόσταση από την αυλάκωση, ενώ οι αποτυχίες της επιφανειακής στρώσης σε διάτμηση καταλήγουν σε διόγκωση σε μικρή σχετικά απόσταση από το ίχνος του τροχού. Αν και τα παραπάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν γενικοί κανόνες, υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις και επομένως πρέπει να γίνεται μια ακριβέστερη ανάλυση για να καθορισθεί ποια στρώση έχει αποτύχει.

Η μετατόπιση της επιφανειακής στρώσης προκαλείται συνήθως από στερεοποίηση και επομένως καθίζηση μιας ή περισσοτέρων στρώσεων του οδοστρώματος, χωρίς να συνοδεύεται από διόγκωση. Η πλευρική ώθηση προκαλεί επίσης επιφανειακές ανωμαλίες. Καταπόνηση προξενείται από υπερβολική ή ανεπαρκή ποσότητα ασφάλτου, ενώ η αποτυχία της επιφανειακής στρώσης οφείλεται ίσως σε παγετό ή τήξη.

Οι διερευνήσεις γίνονται με τη διάνοιξη χαντακιών και οπτική επισκόπηση ή μετρήσεις για να προσδιορισθούν οι στρώσεις που μετατοπίστηκαν κατακόρυφα ή οριζόντια. Δοκιμές σε κάθε στρώση του οδοστρώματος δίνουν πολύτιμες πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την ανάλυση.

3.8. Βασικοί τύποι καταπόνησης Οδοστρωμάτων

Υπάρχουν ορισμένοι βασικοί τύποι καταπόνησης οδοστρωμάτων, οι οποίοι δεν καλύπτουν όλο το φάσμα αλλά είναι οι συνηθέστεροι. Αποκλίσεις από τους τύπους αυτούς είναι πιθανές καθώς και συνδυασμοί διαφόρων τύπων μεταξύ τους :

- Ρηγμάτωση μορφής αλιγάτορα
- Αυλακώσεις
- Αποτυχίες σε διάτμηση
- Διαμήκεις ρωγμές
- Διόγκωση παγετού
- Ανοιξιάτικη θραύση
- Εφίδρωση

- Καθίζηση ή μετακίνηση θεμελίωσης
- Ανακλαστική ρηγμάτωση
- Δυσμενείς συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την ρηγμάτωση μορφής αλιγάτορα. Ένα από τα πρώτα σημάδια καταπόνησης του οδοστρώματος είναι η εμφάνιση ρωγμών αλιγάτορα. Αυτός ο τύπος ρηγμάτωσης ονομάζεται επίσης ρηγμάτωση μορφής χάρτη και σημαίνει υπερβολική μετατόπιση μιας ή περισσοτέρων από τις στρώσεις ή κόπωση της επιφανειακής στρώσης, και πιθανόν να είναι προοδευτική. Εύκαμπτα οδοστρώματα κατασκευασμένα πάνω σε ελαστικά υπεδάφη συχνά παρουσιάζουν ρηγμάτωση μορφής αλιγάτορα. Βάσεις μικρής αντοχής ή με ανεπαρκή συμπίκνωση μπορεί να προκαλέσουν την ρηγμάτωση της επιφανειακής στρώσης που οφείλεται σε κόπωση.

3.9. Συμπεράσματα σχετικά με την Αξιολόγηση των Οδοστρωμάτων

Ένα από τα σημαντικότερα καθήκοντα του μηχανικού οδοστρωμάτων είναι η αξιολόγηση των εν χρήσει οδοστρωμάτων. Είναι ανάγκη να γνωρίζει την κατάσταση των οδοστρωμάτων, για να διατυπώσει κριτήρια σχεδιασμού και πρόγραμμα συντήρησης και προτεραιότητας.

Η γενική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν είναι η περιοδική επισκόπηση των οδοστρωμάτων σε μία περιοχή και κατάταξη των συνθηκών τους, έτσι ώστε να μπορούν με κάποια λογική να καταστρωθούν κριτήρια σχεδιασμού ή προγράμματα συντήρησης. Ο μηχανικός συντήρησης παίρνει τις αποφάσεις του σχετικά με τον

τύπο συντήρησης, που θα εφαρμοσθεί σε ένα οδόστρωμα, μετά από οπτική εξέταση και ακολουθώντας κάποια λογική για τη συνθήκη του οδοστρώματος, όπως την διαπίστωσε. Βεβαίως η αξιολόγηση της κατασκευής του οδοστρώματος είναι πολύ υποκειμενική και οι γνώμες σχετικά με τη σοβαρότητα της καταπόνησης του οδοστρώματος διαφέρουν από μηχανικό σε μηχανικό.

3.10. Τεχνικές Συντήρησης , Αξιολόγησης και Ενίσχυσης

Οδοστρωμάτων

Είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι ο τύπος αποκατάστασης οδοστρωμάτων, που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, εξαρτάται από τη γνώση των παραγόντων που προκάλεσαν την καταπόνηση σε ένα ορισμένο οδόστρωμα. Η καταλληλότητα ενός οδοστρώματος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το είδος συντήρησης που εφαρμόζεται σ' αυτό κι έτσι ο μηχανικός οφείλει να κατανοήσει ποιος τύπος συντήρησης πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τις διάφορες συνθήκες.

4. Το πρόγραμμα LTRP

Στις αρχές της δεκαετίας 1980 στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, το Συμβούλιο Συγκοινωνιακών Ερευνών - Transportation Research Board (TRB) του Εθνικού Ερευνητικού Συμβουλίου - National Research Council , υπό την χορηγία της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αυτοκινητοδρόμων - Federal Highway Administration (FHWA) και την συνεργασία της Αμερικανικής Ένωσης Εθνικών Οδών και

Μεταφορών - American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) διεξήγαγαν μια μελέτη σχετικά με την φθορά του εθνικού συστήματος υποδομής αυτοκινητοδρόμων και γεφυρών. Η μελέτη πρότεινε την έναρξη ενός ερευνητικού προγράμματος στρατηγικής - Strategic Highway Research Program (SHRP) με σκοπό να συγκεντρώσει έρευνες και δραστηριότητες ανάπτυξης που θα μπορούσαν να συνεισφέρουν σημαντικά στην βελτίωση των μεταφορών. Η αναφορά μελέτης που εκδόθηκε το 1984 ως TRB Special Report 202 , έδωσε έμφαση σε έξι περιοχές έρευνας, με το πρόγραμμα Long Term Pavement Performance (LTPP) ως μία από τις σημαντικότερες περιοχές μελέτης. Κατά την διάρκεια των ετών 1985 και 1986, ανεξάρτητοι ανάδοχοι έργων ανέπτυξαν τις λεπτομέρειες των ερευνητικών προγραμμάτων για το πρόγραμμα στρατηγικής SHRP. Η δημοσίευση των προγραμμάτων έγινε τον Μάη του 1986 με τίτλο Strategic Highway Research Program – Research Plans.

Με την ολοκλήρωσή του, το πρόγραμμα SHRP μεταβιβάστηκε στον FHWA το 1992 και πλέον ονομάζεται Long Term Pavement Performance (LTPP) program. Συνεχίζει το έργο που ξεκίνησε από τον προκάτοχό του, το SHRP program, μέχρι να ολοκληρωθεί. Το πρόγραμμα συνεχίζει την ερευνητική μελέτη των εν λειτουργία οδοστρωμάτων έτσι ακριβώς όπως το είχε οραματιστεί το SHRP, δηλαδή ως ένα πρόγραμμα που καλείται να ικανοποιήσει την ανάγκη να παρέχει ένα μεγάλο εύρος πληροφοριών σχετικών με τα οδοστρώματα. Αποτελεί πηγή άντλησης τεχνικών στοιχείων οδοστρωμάτων και αποσκοπεί στην ανάπτυξη βελτιωμένων μοντέλων ικανών να εξηγήσουν πως ανταποκρίνεται ένα οδόστρωμα. Επιπλέον στοχεύει στο να αποκτηθούν γνώσεις σχετικά με συγκεκριμένες επιδράσεις στην κατάσταση των οδοστρωμάτων εξαιτίας διαφόρων σχεδιαστικών μεταβλητών όπως ο κυκλοφοριακός

φόρτος, περιβαλλοντικοί παράγοντες, υλικά, ποιότητα κατασκευής και τεχνικές συντήρησης. Όσο γίνονται διαθέσιμα επαρκή δεδομένα, αναλύσεις διεξάγονται με σκοπό να δημιουργηθούν καλύτερα μοντέλα πρόβλεψης της κατάστασης των οδοστρωμάτων, για χρήση στον σχεδιασμό και στην διαχείριση των οδοστρωμάτων.

Ο γενικός σκοπός του προγράμματος είναι να αυξήσει την διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων, ερευνώντας διάφορες μεθόδους σχεδιασμού και υποδομές οδοστρωμάτων που έχουν υποστεί κάποιας μορφής αποκατάσταση, χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά και που υπόκεινται σε διάφορα φορτία, συνθήκες περιβάλλοντος, υπέδαφος και διαδικασίες συντήρησης. Συγκεκριμένα το πρόγραμμα αποσκοπεί στα εξής :

- ✓ Να αξιολογήσει υπάρχουσες μεθόδους σχεδιασμού.
- ✓ Να αναπτύξει βελτιωμένες μεθόδους σχεδιασμού και στρατηγικές αποκατάστασης υπαρχόντων οδοστρωμάτων.
- ✓ Να αναπτύξει βελτιωμένες σχέσεις –μοντέλα σχεδιασμού για νέα και ανακατασκευασμένα οδοστρώματα.
- ✓ Να καθορίσει τις επιδράσεις των εξής παραγόντων: κυκλοφοριακός φόρτος, περιβαλλοντικές συνθήκες, υλικά κατασκευής, ποιότητα κατασκευής και μέθοδοι συντήρησης ως επίδραση στην κατάσταση και φθορά του οδοστρώματος.
- ✓ Να καθορίσει τις επιδράσεις συγκεκριμένων σχεδιαστικών παραγόντων στην κατάσταση του οδοστρώματος.
- ✓ Να αποτελέσει μια εθνική βάση δεδομένων σχετικά με τα οδοστρώματα για να υποστηρίξει τους σκοπούς του προγράμματος και να καλύψει τις μελλοντικές ανάγκες.

Το LTPP πρόγραμμα περιλαμβάνει ένα μητρώο μελετών διαφόρων τύπων. Αυτές περιλαμβάνουν τις Γενικές - General Pavement Studies (GPS) και τις Ειδικές - Specific Pavement Studies (SPS). Οι GPS μελέτες αποτελούν ένα μεγάλο πείραμα που αποτελείται από περιοχές ελέγχου σε εν λειτουργία οδοστρώματα στην Αμερική και στον Καναδά, περιλαμβάνοντας μια σειρά από παράγοντες που δίνουν πληροφορίες σε μια εθνική βάση δεδομένων, με σκοπό να συνεισφέρουν στον στόχο του προγράμματος. Οι SPS μελέτες σχετίζονται με κατασκευαστικές ανάγκες και πειραματικές προσεγγίσεις που δεν μπορούν να φτάσουν οι GPS μελέτες. Οι SPS είναι εντατικές μελέτες ορισμένων συγκεκριμένων μεταβλητών. Πρόσθετα στις GPS και SPS περιοχές ελέγχου, δημιουργήθηκε ένα ξεχωριστό πρόγραμμα με σκοπό να μελετήσει τις επιδράσεις του περιβάλλοντος στην μακροπρόθεσμη κατάσταση οδοστρωμάτων σε λειτουργία, το λεγόμενο Seasonal Monitoring Program (SMP). Περίπου 65 περιοχές GPS ορίστηκαν ως SMP περιοχές ελέγχου.

Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος πληροφοριών :

- Γενικές Πληροφορίες
- Δεδομένα απογραφής
- Δεδομένα περιβάλλοντος
- Δεδομένα υλικών κατασκευής
- Στοιχεία συντήρησης και αποκατάστασης
- Στοιχεία κυκλοφοριακών φόρτων

Αποτελεί την μεγαλύτερη βάση δεδομένων σχετικά με την κατάσταση οδοστρωμάτων που έχει δημιουργηθεί παγκοσμίως, με τεράστιες προοπτικές για την ανάπτυξη μεθόδων βελτίωσης των τεχνολογιών στο μέλλον.

5. Βάση δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία προέρχονται από το πρόγραμμα LTPP. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, το πρόγραμμα ιδρύθηκε σαν ένα ερευνητικό πεδίο του Strategic Highway Research Program και έχει παραπάνω από 2400 πειραματικές περιοχές από αυτοκινητοδρόμους εν λειτουργία στην Βόρεια Αμερική. Ο γενικός του σκοπός είναι να αυξήσει την διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων μέσω της έρευνας και της μελέτης της απόκρισης του οδοστρώματος. Το LTPP πρόγραμμα αποτελείται από εν λειτουργία περιοχές οδοστρωμάτων που έχουν κατηγοριοποιηθεί σε General Pavement Studies και Specific Pavement Studies. Υπάρχουν εννέα SPS πειράματα, για τα οποία κατασκευάστηκαν περιοχές μελέτης όπου πραγματοποιήθηκαν εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης αποσκοπώντας στην μελέτη πέντε διαφορετικών πειραματικών κατηγοριών. Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το πείραμα SPS-5 από την κατηγορία Αποκατάσταση Οδοστρωμάτων - Pavement Rehabilitation.

Το SPS-5 πείραμα εξετάζει την αποτελεσματικότητα οχτώ τεχνικών αποκατάστασης επικάλυψης ασφαλτικού σκυροδέματος σε υπάρχοντα εύκαμπτα οδοστρώματα. Το πείραμα έχει 18 περιοχές μελέτης. Κάθε περιοχή μελέτης αποτελείται από 8 υποπεριοχές μελέτης των 500 ft, κάθε μία εκ των οποίων έχει υποστεί μια διαφορετική τεχνική αποκατάστασης.

Πίνακας 5.1. Τεχνικές αποκατάστασης

Treatment	Πάχος Επικάλυψης	Προετοιμασία Επιφάνειας	Τύπος Ασφαλτικής Επικάλυψης
502	2	Minimal	Recycled
503	5	Minimal	Recycled
504	5	Minimal	Virgin
505	2	Minimal	Virgin
506	2	Intensive	Virgin
507	5	Intensive	Virgin
508	5	Intensive	Recycled
509	2	Intensive	Recycled

Πίνακας 5.2. Πάχη Στρώσεων

Treatment	Subbase & Base		Asphalt Concrete		Improvement	
	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

5.1. Συλλογή Δεδομένων

Πληροφορίες σχετικά με την αλιγοτορική ρηγμάτωση για όλα τα επίπεδα (low/moderate/high) συνελέγησαν για όλα τα χρόνια των μετρήσεων για 16 από τις 18 πολιτείες . Μινεσότα και Μείν δεν είχαν καμία καταγραφή για αλιγοτορική ρηγμάτωση πριν ή μετά την συντήρηση για καμία από τις περιοχές μελέτης τους.

Πίνακας 5.3. Κλιματικές Περιοχές & Πολιτείες - SPS-5 περιοχές ελέγχου –Βόρειες/ Νότιες Περιοχές(Northern/Southern Regions) - Μεταβλητή S_N

Region	S_N	State Code & Name
Southern	Southern	1 Alabama
		12 Florida
		13 Georgia
		28 Mississippi
		35 New Mexico
		40 Oklahoma
		48 Texas
Western		4 Arizona
		6 California
North Central	Northern	8 Colorado
		30 Montana
		81 Alberta
		29 Missouri
North Atlantic		83 Manitoba
		24 Maryland
		34 New Jersey

Η παρούσα εργασία εξετάζει την έναρξη της ρηγμάτωσης υπό την εξής οπτική : υπολογίζεται ο χρόνος (χρονική διάρκεια) ανάμεσα στην εφαρμογή μεθόδων συντήρησης και στην έναρξη της ρηγμάτωσης. Ο χρόνος μέχρι την εμφάνιση της

αλιγοτορικής ρηγματώσης υπολογίστηκε από τον πίνακα δεδομένων του προγράμματος. Να τονίσουμε ότι όταν μια περιοχή δεν είχε εμφανίσει ρωγμές μέχρι το τέλος της περιόδου ελέγχου, η ένδειξη εκείνη θεωρείτο δεξιά περικεκομμένη. Που σημαίνει ότι ο χρόνος όπου τελικά θα εμφανιζόταν ρωγμή δεν ήταν διαθέσιμη πληροφορία. Για όλες τις περιοχές μελέτης, τρεις κατηγορίες από επεξηγηματικές μεταβλητές συνελέγησαν : κατασκευή και αποκατάσταση, κλίμα και δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου. Τα δεδομένα σχετικά με την κατασκευή και την αποκατάσταση περιλαμβάνουν ηλικία οδοστρώματος, χρόνος από την τελευταία αποκατάσταση, πάχη στρώσεων και μεταβλητές που αφορούν τις διαφορετικές μεθόδους αποκατάστασης. Τιμές που αφορούσαν την έκταση της φθοράς προ αποκατάστασης αν και θεωρείται μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος για την αλιγοτορική ρηγματώση έπειτα από τεχνικές αποκατάστασης, αποκλείστηκαν από την ανάλυση λόγω μεγάλου αριθμού ελλιπών δεδομένων (δεν υπήρχαν καταγραφές προ αποκατάστασης για 5 από τις 16 συνολικά πολιτείες). Κλιματικά δεδομένα συνελέγησαν από στατιστικά καιρικών σταθμών και περιλαμβάνουν ετήσιες θερμοκρασίες. Επειδή δεν υπήρχαν μετρήσεις καιρικών συνθηκών μετά το 2006 οι ελλιπείς τιμές αντικαταστάθηκαν από μέσους όρους για κάθε υποπεριοχή μελέτης ξεχωριστά. Ελλιπείς τιμές για τα στοιχεία κυκλοφοριακού φόρτου, που περιλαμβάνουν το ετήσιο ισοδύναμο μονοαξονικό φορτίο 18 kips και τον ετήσιο μέσο ημερήσιο αριθμό φορτηγών, συμπληρώθηκαν χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή.

Πίνακας 5.4. Μεταβλητές

<i>Δεδομένα Κατασκευής και Αποκατάστασης</i>	
ST_CD	Κωδικός πολιτείας
TH_SB	Συνολικό πάχος βάσης και υπόβασης
TH_AC	Συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων μετά την αποκατάσταση
SURF_PR	Δείκτης προετοιμασίας της επιφάνειας της μεθόδου αποκατάστασης (0 για την ελάχιστη απαραίτητη και 1 για την εντατική)
RECYCL	Δείκτης του ασφαλτικού μίγματος της μεθόδου αποκατάστασης (0 για ανακυκλώσιμο και 1 για παρθένο)
<i>Κλιματικά</i>	
<i>Δεδομένα</i>	
S_N	Δείκτης κλιματικών περιοχών (0 για νότιες και 1 για βόρειες (Πίνακας 5.2))
<i>Κυκλοφοριακά</i>	
<i>Δεδομένα</i>	
AADT_TR	Εκτιμώμενος ετήσιος μέσος ημερήσιος αριθμός φορτηγών

6. Μεθοδολογία - Μοντέλα Χρονικής Διάρκειας

(Duration Models)

Το θέμα του χρόνου αστοχίας για ένα δεδομένο οδόστρωμα είναι μια πρόκληση λόγω της ποικιλομορφίας και της τυχαιότητας του φαινομένου και λόγω ελλιπών πληροφοριών που είναι διαθέσιμες για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Για παράδειγμα τα μοντέλα χρονικής διάρκειας είναι πολύ καλά εξοπλισμένα να χειρίζονται περικεκομμένα δεδομένα που επικρατούν συχνά στην μοντελοποίηση των οδοστρωμάτων.

Τα μοντέλα αυτά δίνουν την δυνατότητα στους αναλυτές να εξετάσουν το εξής θέμα: εάν όσο περισσότερο αντιστέκεται ένα οδόστρωμα στην ρηγμάτωση τόσο περισσότερο είναι πιθανό να ρωγματωθεί μέσα στην επόμενη χρονική περίοδο (κάτι το οποίο θα έλεγε η διαίσθηση) ή εν αντιθέσει, εάν όσο περισσότερο αντιστέκεται ένα οδόστρωμα στην ρηγμάτωση τόσο λιγότερο πιθανό είναι να ρωγματωθεί μέσα στην επόμενη χρονική περίοδο.

6.1. Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας «Hazard»

Τα «hazard based» πρότυπα έχουν εκτενώς εφαρμοστεί σε πολλά επιστημονικά πεδία, όπως στη βιοστατιστική (Kalbfleisch and Prentice, 1980- Fleming and Harrington, 1991) και στα οικονομικά (Kiefer, 1998). Στον τομέα των μεταφορών μέχρι πρόσφατα η εφαρμογή των προτύπων αυτών ήταν περιορισμένη. Για παράδειγμα έρευνες έχουν γίνει με την χρήση των «hazard based» προτύπων και αφορούν την χρονική διάρκεια μετακινήσεων για την πραγματοποίηση διαφόρων δραστηριοτήτων

όπως το χρόνο που χρειάζεται για αγορά αντικειμένων ή για την πραγματοποίηση δραστηριοτήτων που γίνονται στον ελεύθερο χρόνο.

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

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

$$F(t) = P(T < t), \quad (6.1)$$

όπου P είναι η πιθανότητα, T είναι η τυχαία μεταβλητή του χρόνου και t είναι κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η εξίσωση 6.1 δίνει την πιθανότητα του να λήξει, για παράδειγμα, κάποια μετακίνηση πριν το τέλος του προκαθορισμένου χρόνου t . Η συνάρτηση πιθανότητας (density function) η οποία ανταποκρίνεται σε αυτή την συνάρτηση κατανομής είναι:

$$f(t) = dF(t)/dt, \quad (6.2)$$

και η συνάρτηση «hazard» είναι:

$$h(t) = f(t)/[1 - F(t)], \quad (6.3)$$

όπου $h(t)$ είναι η, υπό συνθήκη, πιθανότητα του να συμβεί ένα γεγονός (για παράδειγμα η λήξη μιας μετακίνησης για την πραγματοποίηση κάποιας

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

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

$$S(t) = P(T \geq t). \quad (6.4)$$

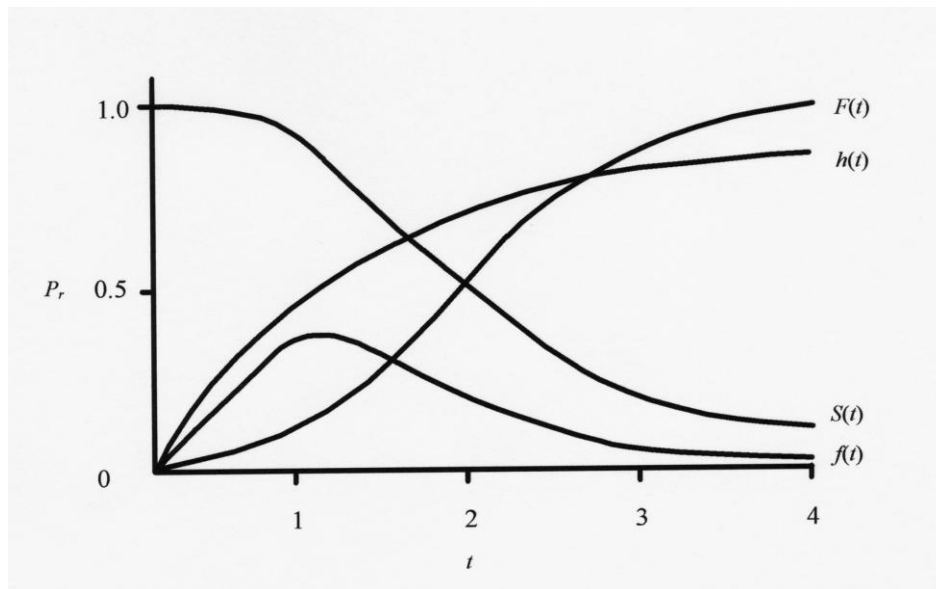
Εάν κάποια από τις παραπάνω συναρτήσεις είναι γνωστή – η συνάρτηση πιθανότητας, η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, η συνάρτηση «survivor», η συνάρτηση «hazard» ή η αθροιστική συνάρτηση «hazard» - τότε οποιαδήποτε άλλη από αυτές μπορεί εύκολα να προκύψει. Οι μαθηματικές σχέσεις των παραπάνω συναρτήσεων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

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

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = h(t) EXP[-H(t)] = -\frac{d}{dt} S(t) \quad (6.5)$$

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

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

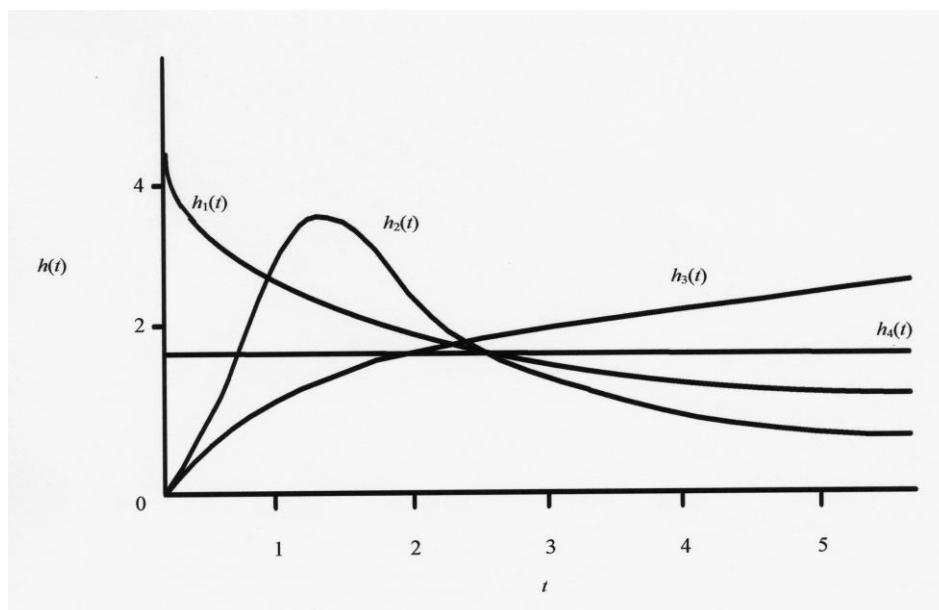


Σχήμα 6.1: Γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων: hazard ($h(t)$), πιθανότητας ($f(t)$), αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας ($F(t)$) και συνάρτησης survivor ($S(t)$).

Γραφικά, οι συναρτήσεις «hazard», συνάρτηση πιθανότητας, αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας και η «survivor» παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1.

Η κλίση της γραφικής παράστασης της συνάρτησης «hazard» οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα. Αναπαριστά την εξάρτηση της πιθανότητας του τέλους της χρονικής διάρκειας μιας δραστηριότητας ή μιας μετακίνησης από το χρόνο που ήδη έχει διαρκέσει η συγκεκριμένη δραστηριότητα ή μετακίνηση. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται τέσσερις περιπτώσεις της συνάρτησης «hazard». Η συνάρτηση «hazard» $h_1(t)$, έχει ρυθμό μεταβολής ($1^{\text{η}}$ παράγωγο, δηλαδή κλίση) $dh_1(t)/dt < 0$

για κάθε t . Η κλίση της συνάρτησης αυτής μειώνεται μονοτονικά σε συνάρτηση με το χρόνο. Η δεύτερη περίπτωση που αφορά τη συνάρτηση «hazard», $h_2(t)$, δείχνει ότι η συνάρτηση αυτή δεν είναι μονοτονική αλλά έχει ρυθμό μεταβολής $dh_2(t)/dt > 0$ και $dh_2(t)/dt < 0$ ο οποίος εξαρτάται από το χρόνο t . Η τρίτη συνάρτηση «hazard» έχει $dh_3(t)/dt > 0$ για κάθε t και αυξάνεται μονοτονικά σε σχέση με το χρόνο. Τέλος, η τέταρτη συνάρτηση έχει ρυθμό μεταβολής μηδέν ($dh_4(t)/dt = 0$), δηλαδή έχει σταθερή κλίση, πράγμα που καταδεικνύει ότι η πιθανότητα «hazard» δεν εξαρτάται από τον χρόνο t .



Σχήμα 6.2: Γραφική παράσταση των τεσσάρων παραγόμενων συναρτήσεων hazard.

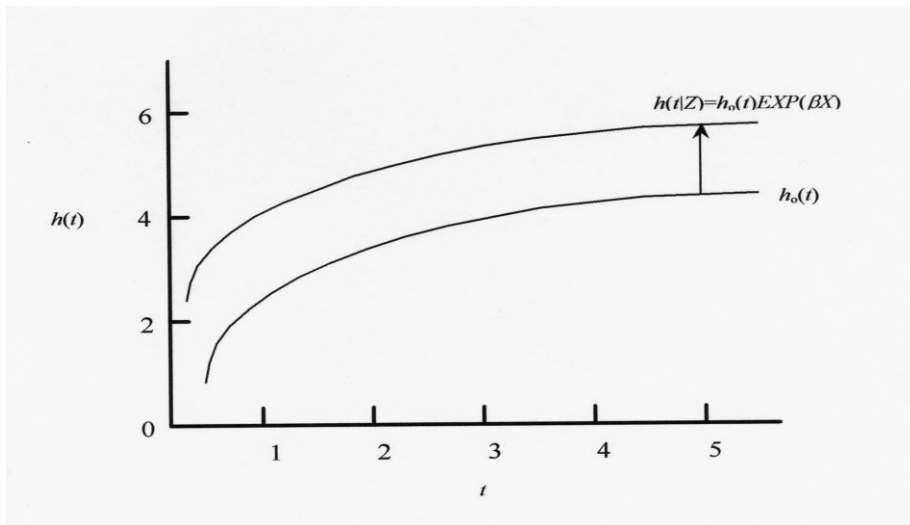
Επιπλέον, εκτός από το γεγονός ότι τα «hazard based» πρότυπα είναι κατάλληλα για την επεξεργασία δεδομένων που εξαρτώνται από την χρονική διάρκεια, προσομοιάζουν κατάλληλα την επιρροή που έχουν διάφοροι παράγοντες

(μεταβλητές) στην χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων ή στο χρόνο μετακίνησης που χρειάζεται προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι δραστηριότητες αυτές. Τα «proportional hazards» και «accelerated lifetime» πρότυπα αποτελούν επίσης δύο εναλλακτικές μεθόδους οι οποίες προσαρμόζονται κατάλληλα στις επιρροές που έχουν οι διάφοροι εξωγενείς παράγοντες στην χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων ή στο χρόνο μετακίνησης.

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

$$h(t | X) = h_0(t) \exp(\beta X). \quad (6.6)$$

Η αναλογική («proportional») συνάρτηση «hazard» αναπαριστάται γραφικά στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Γραφική παράσταση του «proportional hazard» προτύπου.

Η δεύτερη προσέγγιση των ανεξάρτητων μεταβλητών στα «hazard» πρότυπα είναι αυτή η οποία υποθέτει ότι οι μεταβλητές επιταχύνουν τον χρόνο άμεσα σε μια βασική συνάρτηση επιβίωσης, η οποία είναι η συνάρτηση επιβίωσης όταν όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι μηδέν. Αυτά τα «accelerated lifetime» πρότυπα ξανά υποθέτουν ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές επηρεάζουν την χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων ή το χρόνο μετακίνησης με την συνάρτηση $\exp(\beta X)$. Η εξίσωση των «accelerated lifetime» προτύπων είναι:

$$S(t | X) = S_0 [t \exp(\beta X)], \quad (6.7)$$

η οποία οδηγεί στην υπό συνθήκη συνάρτηση «hazard»

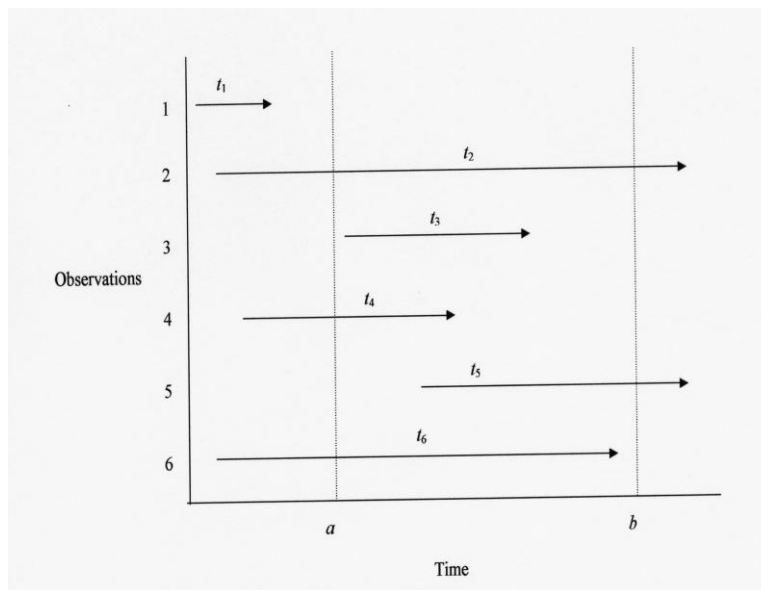
$$h(t | X) = h_0 [t \exp(\beta X)] \exp(\beta X) \quad (6.8)$$

Τα «accelerated lifetime» πρότυπα έχουν, μαζί με τα «proportional hazard» πρότυπα, ευρεία χρήση και έχουν χαρακτηριστεί ως πρότυπα μέγιστης πιθανοφάνειας (αφού η

συνηθέστερη μέθοδος υπολογισμού τους είναι μέσα από τη συνάρτηση μέγιστης πιθανοφάνειας).

6.2. Χαρακτηριστικά των στοιχείων Χρονικής Διάρκειας

Στα στοιχεία χρονικής διάρκειας συχνά παρατηρείται το φαινόμενο αριστερής ή δεξιάς περικοπής των στοιχείων (left or right censoring). Σε ότι αφορά τα διαθέσιμα στοιχεία που είναι απαραίτητα, για παράδειγμα για την διερεύνηση του χρόνου μετακίνησης, υποθέτουμε ότι αφορούν μια συγκεκριμένη περίοδο η οποία έχει ως σημείο εκκίνησης την χρονική στιγμή α και λήξη τη χρονική στιγμή β . Όπως φαίνεται και από το σχήμα 6.4, η παρατήρηση 1 είναι εκτός του χρονικού διαστήματος α - β οπότε δεν μετέχει στις παρατηρήσεις που αφορούν τα στοιχεία της χρονικής διάρκειας. Στην παρατήρηση 2 τα στοιχεία είναι αριστερά και δεξιά περικεκομμένα αφού δεν είναι γνωστή η χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκίνησαν οι παρατηρήσεις (πριν την χρονική στιγμή α) αλλά ούτε και το πότε σταμάτησαν (μετά την χρονική στιγμή β). Η αρχή και το τέλος της παρατήρησης 3 βρίσκονται εντός του χρονικού διαστήματος α - β , οπότε δεν παρατηρείται το φαινόμενο της περικοπής των στοιχείων (censoring). Στις παρατηρήσεις 4 και 6 παρατηρείται αριστερή περικοπή στοιχείων ενώ στην παρατήρηση 5 παρατηρείται δεξιά περικοπή.



Σχήμα 6.4: Γραφική παράσταση των στοιχείων χρονικής διάρκειας.

Τα «hazard based» πρότυπα προσαρμόζονται κατάλληλα για δεξιά περικοπή (right censoring) στοιχείων. Με τα αριστερά περικεκομμένα (left censored) στοιχεία δημιουργείται μαθηματικό πρόβλημα στο να προσδιοριστεί η κατανομή των χρόνων έναρξης της χρονικής διάρκειας δραστηριοτήτων ή των χρόνων μετακίνησης για την πραγματοποίηση των δραστηριοτήτων αυτών (και τα οποία είναι χρήσιμα ώστε να προσδιοριστεί η κατανομή των «left censored» στοιχείων στην συνάρτηση πιθανοφάνειας του προτύπου).

Ένα άλλο θέμα το οποίο μπορεί να προκύψει όταν ένα πλήθος παρατηρήσεων που αφορούν στοιχεία χρονικής διάρκειας τελειώνουν την ίδια χρονική στιγμή, είναι το πρόβλημα των ισοδύναμων (tied) στοιχείων. Τα ισοδύναμα στοιχεία είναι πιθανό να προκύψουν όταν η συλλογή στοιχείων δεν είναι αρκετά ακριβής ώστε να αναγνωρίσει ακριβώς τους χρόνους λήξης των στοιχείων της χρονικής διάρκειας (για παράδειγμα των μετακινήσεων). Όταν τα εξαγόμενα στοιχεία χρονικής διάρκειας ομαδοποιούνται

σε συγκεκριμένους χρόνους, η συνάρτηση πιθανότητας για τα «proportional hazard» και «accelerated lifetime» πρότυπα γίνεται αυξητικά πολύπλοκη.

6.3. Μη παραμετρικά Πρότυπα

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

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

Η βασική μέθοδος υπολογισμού πιθανοτήτων επιβίωσης με τη χρήση της PL μεθόδου ξεκινά με τον προσδιορισμό της πιθανότητας επιβίωσης («survival») για r χρόνια ενώ η υπό συνθήκη πιθανότητα επιβίωσης («survival») για r χρόνια δεδομένου του χρόνου επιβίωσης για $r-1$ χρόνια δίνει την πιθανότητα επιβίωσης («survival») μέχρι $r-1$ χρόνια (ή μήνες, ημέρες, ώρες, λεπτά, κλπ.). Η πιθανότητα επιβίωσης για k ή περισσότερα χρόνια δίνεται από τη σχέση:

$$S(k) = (p_k | p_{k-1}) \dots (p_4 | p_3)(p_3 | p_2)(p_2 | p_1)(p_1) \quad (6.9)$$

όπου $(p_k | p_{k-1})$ είναι το δείγμα των παρατηρούμενων αντικειμένων που θα επιβιώσουν για μια περίοδο k , δεδομένου ότι έχουν επιβιώσει για μια περίοδο $k-1$, και πάει λέγοντας. Αυτή η εκτίμηση PL παράγει μια τμηματική συνάρτηση επιβίωσης η οποία βασίζεται πλήρως στα παρατηρούμενα στοιχεία. Η μέθοδος αυτή παρέχει χρήσιμες εκτιμήσεις των πιθανοτήτων επιβίωσης αλλά και γραφική παρουσίαση της αντίστοιχης κατανομής.

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

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

6.4. Ημι-παραμετρικά Πρότυπα

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

Η μη-παραμετρική προσέγγιση προτυποποίησης της συνάρτησης «hazard» είναι κατάλληλη όταν ελάχιστα είναι γνωστά σχετικά με τη συναρτησιακή μορφή της συνάρτησης «hazard». Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε μια προσέγγιση από τον Cox (1972) και η οποία βασίστηκε στην αναλογική προσέγγιση «hazard». Η «Cox proportional hazard» αποτελεί ένα ημι-παραμετρικό πρότυπο «hazard» αφού η συνάρτηση $\exp(\beta X)$ εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ως η συναρτησιακή μορφή της επιρροής των ανεξάρτητων μεταβλητών. Το πρότυπο αυτό βασίζεται στην αναλογία των συναρτήσεων «hazard». Έτσι, η πιθανότητα μιας παρατήρησης i που τελειώνει την χρονική στιγμή t_i , δεδομένου ότι τουλάχιστον μια παρατήρηση έχει τελειώσει τη χρονική στιγμή t_i , δίνεται ως:

$$EXP(\beta X_i) / \sum_{j \in R_i} EXP(\beta X_j) \quad (6.10)$$

όπου R_i είναι το σύνολο των παρατηρήσεων και j είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων που έχουν χρονική διάρκεια μεγαλύτερη ή ίση από t_i . Το πρότυπο αυτό έχει καθοριστεί με τη χρήση μεθόδων μέγιστης πιθανοφάνειας. Εάν μόνο μια παρατήρηση ολοκληρώνει τη χρονική της διάρκεια σε κάθε χρόνο (δεν υπάρχουν «tied» στοιχεία) και το φαινόμενο των περικεκομμένων στοιχείων (censoring) δεν παρατηρείται σε καμιά από τις παρατηρήσεις, η μερική λογαριθμική συνάρτηση πιθανοφάνειας είναι:

$$LN(L) = \sum_{i=1}^I \left[\beta X_i - \sum_{j \in R_i} EXP(\beta X_j) \right] \quad (6.11)$$

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

$$LN(L) = \sum_{i=1}^I \left[\beta \sum_{j \in t_i} X_j - n_i \sum_{j \in R_i} EXP(\beta X_j) \right] \quad (6.12)$$

6.5. Παραμετρικά Πρότυπα

Με τα παραμετρικά πρότυπα, πολλές εναλλακτικές κατανομές για την συνάρτηση «hazard» έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία. Οι κατανομές αυτές είναι η γάμμα, η εκθετική, η Weibull, η λογαριθμολογιστική, η Gompertz και άλλες. Στον πίνακα 3.2.1 φαίνονται τα ονόματα και οι συναρτήσεις των κατανομών «hazard» (μαζί με τις παραμέτρους τους) για ένα πλήθος προτύπων χρονικής διάρκειας. Η επιλογή οποιασδήποτε από αυτές τις εναλλακτικές κατανομές για την συνάρτηση «hazard» στηρίζεται σε θεωρητικό υπόβαθρο ή σε στατιστική κατοχύρωση. Η επιλογή μιας συγκεκριμένης κατανομής είναι σημαντική όχι μόνο για το σχήμα της «baseline hazard» αλλά επίσης για την αποτελεσματικότητα και για την πιθανή μεροληψία των παραμέτρων που έχει προσδιοριστεί ότι επηρεάζει την χρονική διάρκεια διαφόρων δραστηριοτήτων ή του χρόνου μετακίνησης.

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

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t), \quad (6.13)$$

με συνάρτηση «hazard»

$$h(t) = \lambda . \quad (6.14)$$

Πίνακας 6.2.1: Μερικές Συχνά Χρησιμοποιούμενες Hazard Συναρτήσεις για Παραμετρικά Πρότυπα Χρονικής Διάρκειας.

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

Όπως γίνεται φανερό από την εξίσωση 6.14 η συνάρτηση «hazard» της εκθετικής κατανομής είναι σταθερή και το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από το Σχήμα 6.2. Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα του τέλους της χρονικής διάρκειας μιας δραστηριότητας ή μιας μετακίνησης είναι ανεξάρτητη από το χρόνο και δεν υπάρχει σχέση της πιθανότητας αυτής με την χρονική διάρκεια.

Η κατανομή Weibull είναι μια πιο γενική μορφή της εκθετικής κατανομής. Επιτρέπει θετική εξάρτηση της χρονικής διάρκειας με το χρόνο (η συνάρτηση «hazard» αυξάνεται μονοτονικά σε σχέση με τη χρονική διάρκεια και η πιθανότητα του τέλους της χρονικής διάρκειας αυξάνει με το χρόνο), αρνητική εξάρτηση (η συνάρτηση «hazard» μειώνεται μονοτονικά σε σχέση με την χρονική διάρκεια και η πιθανότητα του τέλους της χρονικής διάρκειας μειώνεται με το χρόνο), ή καμία εξάρτηση της χρονικής διάρκειας με το χρόνο (η συνάρτηση «hazard» παραμένει σταθερή σε σχέση με την χρονική διάρκεια και η πιθανότητα του τέλους της χρονικής διάρκειας δεν εξαρτάται από το χρόνο). Με παραμέτρους $\lambda > 0$ και $P > 0$, η κατανομή Weibull έχει συνάρτηση πιθανότητας:

$$h(t) = \lambda P (\lambda t)^{P-1} [S(t)]^\theta. \quad (6.15)$$

με συνάρτηση «hazard»

$$h(t) = (\lambda P) (\lambda t)^{P-1} \quad (6.16)$$

Όπως γίνεται φανερό από την εξίσωση 6.16, εάν η παράμετρος P είναι μεγαλύτερη από 1 ($P > 1$), η συνάρτηση «hazard» αυξάνεται μονοτονικά με το χρόνο (βλ. $h_3(t)$ στο σχήμα 6.2), αν $P < 1$ η συνάρτηση «hazard» μειώνεται μονοτονικά με το χρόνο (βλ. $h_1(t)$ στο σχήμα 6.2) και αν $P = 1$ η συνάρτηση «hazard» είναι σταθερή σε σχέση

με τη χρονική διάρκεια, και έτσι προκύπτει η εκθετική κατανομή της συνάρτησης «hazard» με εξίσωση $h(t) = \lambda$ (βλ. $h_4(t)$ στο σχήμα 6.2). Επειδή η κατανομή Weibull είναι μια πιο γενική μορφή της εκθετικής κατανομής, παρέχει ένα πιο ευέλικτο τρόπο για να αντιμετωπιστεί η εξάρτηση των στοιχείων χρονικής διάρκειας από τον χρόνο. Βέβαια, πρέπει να τονιστεί ότι η κατανομή Weibull είναι λιγότερο «γενική» από την λογαριθμολογιστική γιατί απαιτεί η συνάρτηση «hazard» να μεταβάλλεται μονοτονικά με το χρόνο.

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

$$f(t) = \lambda P (\lambda t)^{P-1} \left[1 + (\lambda t)^P \right]^{-2} \quad (6.17)$$

και συνάρτηση «hazard»:

$$h(t) = \frac{(\lambda P)(\lambda t)^{P-1}}{\left[1 + (\lambda t)^P \right]}. \quad (6.18)$$

Από την εξίσωση 6.18 καταδεικνύεται ότι εάν $P < 1$ τότε η συνάρτηση «hazard» μειώνεται μονοτονικά με το χρόνο (βλ. $h_1(t)$ στο σχήμα 6.2), εάν $P > 1$ τότε η συνάρτηση «hazard» αυξάνεται με το χρόνο από μηδέν ως ένα σημείο, $t_i = (P-1)^{1/P} / \lambda$, και από αυτό το σημείο και μετά μειώνεται μέχρι να γίνει μηδέν (βλ. $h_2(t)$ στο σχήμα 6.2), εάν $P=1$ η συνάρτηση «hazard» μειώνεται μονοτονικά με το χρόνο από την παράμετρο λ .

6.6. Ετερογένεια

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

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

$$S(t) = \int S(t | \omega) g(\omega) d\omega. \quad (6.19)$$

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο ο όρος της ετερογένειας εφαρμόζεται, θεωρείται η κατανομή Weibull με γάμμα ετερογένεια. Χωρίς να χαθεί η γενικότητα, γίνεται η υπόθεση ότι η συνάρτηση Weibull έχει γάμμα κατανεμημένη ετερογένεια (ω) με μέσο όρο 1 και διασπορά $= 1/k$. Έτσι,

$$g(w) = \frac{k^k}{\Gamma(k)} e^{-kw} w^{k-1}. \quad (6.20)$$

Με την κατανομή Weibull και $S(t) = f(t)/h(t)$, οι εξισώσεις 6.17 και 6.18 δίνουν

$$S(t|w) = e^{-(w\lambda t)^p} \quad (6.21)$$

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

$$S(t) = \int_0^{\infty} S(t|w)g(w)dw = \left[1 + \theta(\lambda t)^p\right]^{-1/\theta}, \quad (6.22)$$

με αποτέλεσμα η συνάρτηση «hazard» να διαμορφωθεί ως

$$h(t) = \lambda P(\lambda t)^{p-1} [S(t)]^\theta. \quad (6.23)$$

Σημειώνεται ότι, εάν $\theta=0$, η ετερογένεια δεν είναι παρούσα αφού η συνάρτηση «hazard» δίνεται από τη σχέση 6.18 και η διασπορά του όρου της ετερογένειας ω είναι μηδέν.

Η επιλογή της κατανομής ετερογένειας είναι ένα σημαντικό θέμα. Οι συνέπειες του λανθασμένου προσδιορισμού της κατανομής $g(\omega)$ του δείγματος είναι αρνητικές αφού μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς και λανθασμένες εκτιμήσεις (αυτό έχει διαπιστωθεί θεωρητικά και εμπειρικά από τους Heckman και Singer (1984)). Ενώ η κατανομή γάμμα αποτελεί μια δημοφιλή προσέγγιση η οποία αντιμετωπίζει τα φαινόμενα ετερογένειας που μπορεί να εμφανίζονται στο δείγμα, είναι απαραίτητο να υπάρξει προσοχή σε ότι αφορά την επιλογή συγκεκριμένης παραμετρικής μορφής για την ετερογένεια. Ευτυχώς, σε ότι αφορά την επιλογή μεταξύ των κατανομών, έχει αποδειχτεί ότι εάν χρησιμοποιηθεί η σωστή κατανομή για την «baseline hazard»

συνάρτηση ο προσδιορισμός των παραμέτρων δεν είναι εύκολο να επηρεαστεί από εναλλακτικές υποθέσεις κατανομών ετερογένειας (Kiefer, 1988). Επίσης, οι Meyer (1990) και Han και Hausman (1990) προσπάθησαν να δείξουν ότι εάν η βασική συνάρτηση «hazard» είναι μη-παραμετρική (το «Cox proportional hazard» πρότυπο) τότε η επιλογή της κατανομής για τη συνάρτηση ετερογένειας μπορεί να είναι λιγότερο σημαντική λόγω του γεγονότος ότι τα προκύπτοντα αποτελέσματα εξαρτώνται ακόμα λιγότερο από την επιλογή της συναρτησιακής μορφής της κατανομής.

7. Στατιστική Επεξεργασία

Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει τις εκτιμηθείσες παραμέτρους για το μοντέλο χρονικής διάρκειας με χρήση της κατανομής Weibull, ενώ το Σχήμα 7.1 δείχνει την συνάρτηση “επιβίωσης”. Είναι σημαντικό να τονίσουμε πως οι κατανομές Λογαριθμολογιστική, Εκθετική και Weibull με ετερογένεια εξετάστηκαν αλλά οδήγησαν σε μη αποδεκτό στατιστικό αποτέλεσμα. Για τον λόγο αυτό η κατανομή Weibull κρίθηκε η πλέον κατάλληλη για την μοντελοποίηση των δεδομένων και χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του τελικού μοντέλου.

Πίνακας 7. Παράμετροι μοντέλου Χρονικής Διάρκειας για τον χρόνο ανάμεσα στην συντήρηση του οδοστρώματος και στην έναρξη της αλιγοτορικής ρηγμάτωσης.

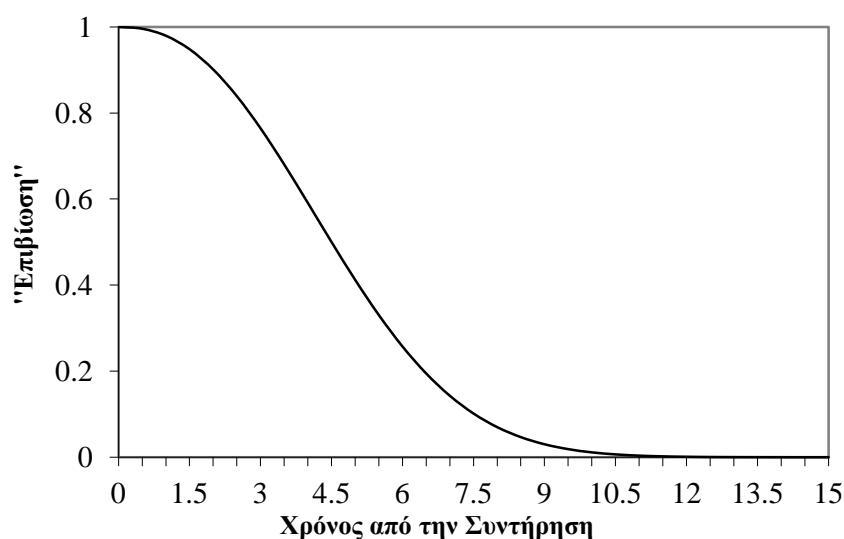
Ανεξάρτητες Μεταβλητές	coefficient	
	estimate	t-stat
CONSTANT	0.779	10.32
SURF_PR	0.085	3.77
RECYCL	0.056	2.41
S_N	-0.071	-2.21
AADT_TR	-0.000	-7.76
AADT_TR2	0.412E-07	7.15
TH_SB	0.014	5.41
TH_AC	0.029	5.04
Αριθμός παρατηρήσεων	128	
<u>Παράμετροι Κατανομής Weibull</u>		
lambda	0.35	
p	7.34	

7.1. Αποτελέσματα

Από τον Πίνακα 7 βλέπουμε ότι η AADT_TR παράμετρος που αναφέρεται στον ετήσιο μέσο ημερήσιο αριθμό φορτηγών επηρεάζει σημαντικά το ποσοστό κατά το οποίο συμβαίνει αστοχία και συγκεκριμένα όταν αυξάνεται, η διάρκεια ανάμεσα στην συντήρηση και στην έναρξη της αλιγοτορικής ρηγμάτωσης μειώνεται, καταδεικνύοντας πως το οδόστρωμα αναμένεται να αναπτύξει ρωγμές σε μεγαλύτερη αναλογία. Όσον αφορά την προετοιμασία της επιφάνειας του οδοστρώματος

(SURF_PR), τα αποτελέσματα δείχνουν πως εντατική προετοιμασία της επιφάνειας έχει θετική επιρροή στην διάρκεια ζωής του οδοστρώματος και επιβραδύνει την έναρξη της ρηγμάτωσης. Ομοίως η παράμετρος που αφορά την ασφαλική επικάλυψη (RECYCL) καταδεικνύει ότι παρθένο μείγμα μειώνει τις πιθανότητες αστοχίας που ακολουθούν την συντήρηση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι περιοχές με ψυχρότερο κλίμα είναι επιρρεπείς σε γρηγορότερη ανάπτυξη ρωγμών συγκριτικά με θερμότερα κλίματα (S_N μεταβλητή). Επίσης αύξηση στο πάχος της υπόβασης και της βάσης (TH_SB) και του ασφαλικού μείγματος επικάλυψης (TH_AC) έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη διάρκεια ανάμεσα στην συντήρηση και στην έναρξη της αλιγοτορικής ρηγμάτωσης.

Το Σχήμα 7 δείχνει ότι όσο περνάει ο χρόνος από την συντήρηση, το επίπεδο της επιβίωσης του οδοστρώματος μειώνεται με μια έντονη αύξηση της ρηγμάτωσης ανάμεσα στα 3 και στα 6 χρόνια μετά την εργασία συντήρησης. Σχεδόν όλες οι περιοχές καταδεικνύουν πως αλιγοτορική ρηγμάτωση εμφανίζεται 11 χρόνια μετά τις εργασίες συντήρησης.



Σχήμα7. Συνάρτηση επιβίωσης στη φθορά του οδοστρώματος (κατανομή Weibull)

8. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αντικείμενο μελέτης είναι η αποτελεσματικότητα διαφορετικών μεθόδων συντήρησης οδοστρωμάτων σε σχέση με την διάρκεια ζωής τους, χρησιμοποιώντας την αλιγοτορική ρηγμάτωση ως δείκτη της κατάστασης του οδοστρώματος και αντλώντας δεδομένα από την βάση δεδομένων 2010 LTPP. Χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση των μοντέλων χρονικής διάρκειας - hazard based duration models - για την πρόβλεψη του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί ανάμεσα στην εφαρμογή συντήρησης και της έναρξης της αλιγοτορικής ρηγμάτωσης. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε έχει πλεονεκτήματα συγκριτικά με παλαιότερες έρευνες καθώς : πρώτον , χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα υποπεριοχών από 16 πολιτείες που περιλαμβάνουν όλες τις κλιματικές συνθήκες και μπορούν πιο ρεαλιστικά να αναπαραστήσουν τους μηχανισμούς αστοχίας των οδοστρωμάτων. Δεύτερον, τρεις ομάδες μεταβλητών χρησιμοποιήθηκαν (κατασκευή και αποκατάσταση, κλίμα και κυκλοφοριακός φόρτος) κάνοντας την ανάλυση πιο

αξιόπιστη. Τέλος η εργασία επικεντρώθηκε στο να αξιολογήσει την επίδραση διαφορετικών στρατηγικών συντήρησης στην έναρξη της ρηγμάτωσης, ένα θέμα όπου λίγη έρευνα έχει διεξαχθεί στο παρελθόν. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως κάθε χρόνος που περνάει μετά την αποκατάσταση αυξάνει την πιθανότητα της αλιγοτορικής ρηγμάτωσης κατά 9,3% ενώ αύξηση στο πάχος της υπόβασης, της βάσης και του ασφαλικού μίγματος της επιφάνειας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ανάμεσα στη συντήρηση και στην έναρξη της αλιγοτορικής ρηγμάτωσης.

Πίνακας 8. Επιδράσεις των εξωγενών μεταβλητών

	Κυκλοφορία	Κατασκευή		Τεχνικές Συντήρησης		Κλίμα
	AADT_TR	TH_SB	TH_AC	RECYCL	SURF_PR	S_N
Χρόνος από την συντήρηση μέχρι την έναρξη της αλιγοτορικής ρηγμάτωσης	--	++	++	+	+	-

Ποιοτική εκτίμηση βασισμένη στην στατιστική σημαντικότητα:

- (++) υποδεικνύει πολλή ισχυρή επίδραση στην επιβράδυνση της ρηγμάτωσης
- (+) υποδεικνύει ισχυρή επίδραση στην επιβράδυνση της ρηγμάτωσης
- (-) υποδεικνύει ισχυρή επίδραση στην επιτάχυνση της ρηγμάτωσης
- (- -) υποδεικνύει πολλή ισχυρή επίδραση στην επιτάχυνση της ρηγμάτωσης

Από την πλευρά της διαχείρισης της συντήρησης και της αποκατάστασης, είναι αναγκαίο να μελετήσουμε την αποτελεσματικότητα διαφορετικών τεχνικών συντήρησης με σκοπό να πετύχουμε ελαχιστοποίηση του κόστους των εργασιών συντήρησης στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος αλλά και του γενικού κόστους των οδικών μεταφορών. Σε αυτή την εργασία εξετάστηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν την έναρξη της αλγαιτορικής ρηγμάτωσης σε οδοστρώματα όπου έχουν εφαρμοσθεί διάφορες στρατηγικές συντήρησης. Τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας από πρακτορεία αυτοκινητοδρόμων και αρμόδιες αρχές με σκοπό την επιλογή της κατάλληλης πολιτικής συντήρησης, την επέκταση της ζωής των οδοστρωμάτων, ελαχιστοποιώντας τα κόστη και αυξάνοντας παράλληλα την ποιότητα του οδοστρώματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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.

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.

Martin, T.C. (2010). “Experimental estimation of the relative deterioration of surface maintenance treatments.” *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 136(1), 1-10.

Mladenovic, G., Jiang, Y., and Darter M. (2003). “Effects of environmental factors on pavement performance – The initial evaluation of the LTPP SPS-8 experiment.” Proc., 82nd *Transportation Research Board Annual Meeting*, National Research Council, Washington, D.C.

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.

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

Salama, H.K., Chatti, K., and Haider, S.W. (2008). “Regression models for permanent deformation parameters using in-service pavement data from the SPS-1 experiment.” *International Journal of Pavement Engineering*, 9(5), 317-328.

Yoder/ Witczak (1975) “Principles of pavement design”