

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Εργαστήριο Συγκοινωνιακών Έργων
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πατρών

2010

1 Δείκτες αξιολόγησης κατάστασης οδοστρώματος

Στο εδάφιο αυτό γίνεται συνοπτική αναφορά στα διάφορα είδη φθορών του οδοστρώματος και στους δείκτες αξιολόγησης αυτών. Διακρίνονται δείκτες:

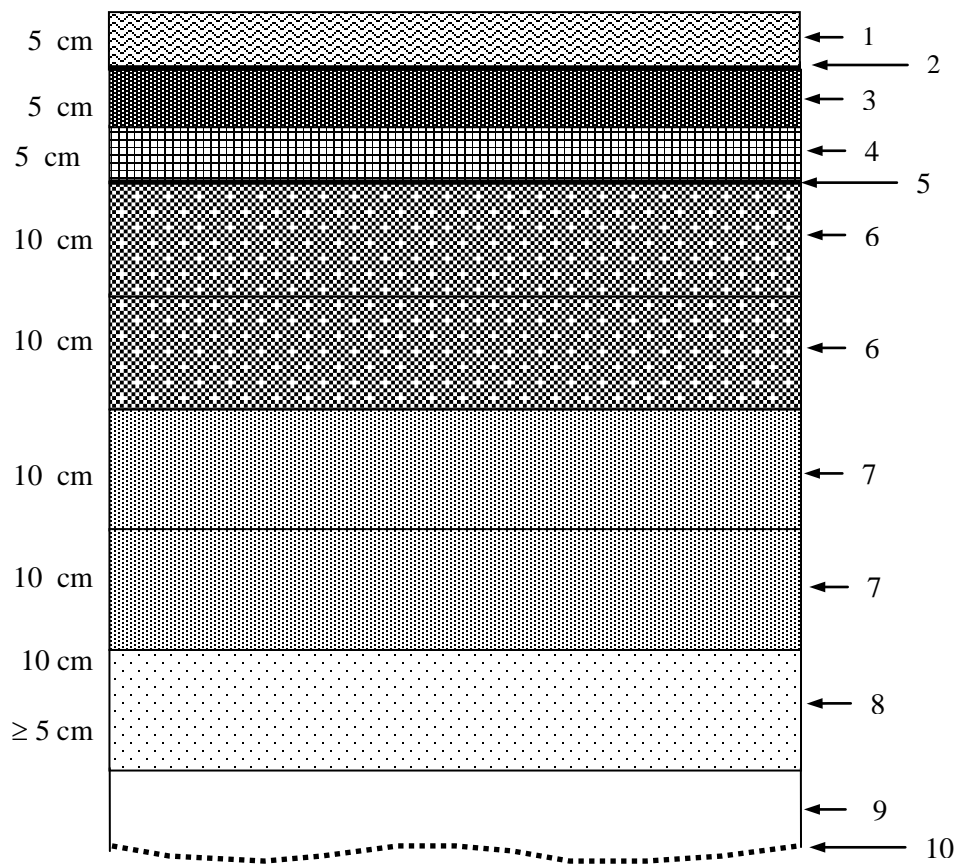
- Επιφανειακής κατάστασης
- Ρηγματώσεων
- Επιπεδότητας
- Ολισθηρότητας
- Φέρουσας ικανότητας

Προκειμένου να γίνονται καλύτερα κατανοητές οι παράμετροι που αναλύονται παρακάτω, παρατίθεται το Σχήμα 1 που απεικονίζει μια τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος.

1.1 Επιφανειακές φθορές

Ο καθορισμός της επιφανειακής κατάστασης των οδοστρωμάτων γίνεται με την καταγραφή του τύπου, της σοβαρότητας και της συχνότητα των φθορών. Στον Πίνακα 1 δίνονται οι κατηγορίες φθορών εύκαμπτων οδοστρωμάτων που καταγράφονται από διάφορα προγράμματα των ΗΠΑ [(FHWA,1979 & 1985, ARMY,1979, LTPM, 1982 και SHRP, 1990) από Gramling, 1994]. Στον ίδιο πίνακα καταγράφονται και οι φθορές που έχουν αναφερθεί σε εργασίες στην Ελλάδα (Κανελλαΐδης, 1990, Νικολαΐδης κα., 1992).

Για την εκτίμηση των επιφανειακών φθορών του οδοστρώματος έχουν αναπτυχθεί μια πληθώρα μεθόδων που ξεκινούν από την απλή οπτική επισκόπηση της επιφάνειας του οδοστρώματος με παρατηρητές που βαδίζουν σε αυτό ή το διατρέχουν μέσα σε όχημα, έως τεχνολογικά εξελιγμένες μεθόδους με χρήση αισθητήρων, βιντεοσκόπησης, επεξεργασίας εικόνας, αυτοματοποιημένων συστημάτων κλπ. Τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων ποσοτικοποιούνται μέσω αντίστοιχων δεικτών που αναπτύσσονται για να δώσω μια απλούστερη και συγκρίσιμη απεικόνιση της κατάστασης των οδοστρωμάτων. Επίσης, συσχετίζονται με αντίστοιχα δεδομένα από έρευνες για άλλα ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως η επιπεδότητα του οδοστρώματος και η αντίσταση της επιφάνειας σε ολίσθηση για την εξαγωγή δεικτών σχετικών με τη γενικότερη ποιότητα εξυπηρέτησης που παρέχει το οδόστρωμα (Gramling, 1994).



1. Αντιολισθηρή στρώση κυκλοφορίας πάχους 5 εκ. της Π.Τ.Π. Α-265.
2. Ασφαλτική συγκολλητική επάλειψη.
3. Ασφαλτική συνδετική στρώση (ισοπεδωτική) πάχους 5 εκ. της Π.Τ.Π. Α-265.
4. Ασφαλτική στρώση βάσης πάχους 5 εκ. της Π.Τ.Π. Α-260.
5. Ασφαλτική προεπάλειψη ανασφάλτωσης βάσης.
6. Βάση από θραυστό υλικό λατομείου συμπιεσμένου πάχους 10 εκ. της Π.Τ.Π. Ο-155.
7. Βάση από θραυστό υλικό λατομείου συμπιεσμένου πάχους 10 εκ. της Π.Τ.Π. Ο-150.
8. Στραγγιστική στρώση συμπιεσμένου πάχους 10 εκ.
9. Ισοπεδωτική στρώση υπόβασης από φυσικό ή θραυστό αμμοχάλικο.
10. Στάθμη χωματουργικών εργασιών.

Σχήμα 1 Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Πίνακας 1 Επιφανειακές φθορές εύκαμπτων οδοστρωμάτων (ΑΝΟΔΟΣ, 2001)

Είδη φθορών	FHWA	USA	LTPM	FHWA	SHRP	Ελλάδα**	
	1979*	1979*	1982*	1985*	1990*	1990	1992
Ρωγμές τύπου αλιγάτορα (Alligator cracks)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Διαμήκειες ρωγμές (Longitudinal cracks)	✓	✓	✓	✓	✓		
Εγκάρσιες ρωγμές (Transverse cracks)	✓	✓	✓	✓	✓		
Ρωγμές πολυγωνικού τύπου (Block cracking)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Ρωγμές συστολής ή συρρίκνωσης (Shrinkage cracks)							✓
Ρωγμές στα άκρα του οδοστρώματος (Edge cracks)		✓		✓	✓	✓	✓
Ρωγμές ανάκλασης (Reflection cracks)	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Επιδιορθωμένες ρωγμές (Sealed cracks)		✓		✓			
Ρωγμές μεταξύ λωρίδων διάστρωσης ή διαπλάτυνσης (Lane and widening cracks)							✓
Ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων (Slippage cracks)						✓	✓
Ρωγμές στον άξονα της οδού (ρωγμές στις τροχιές των τροχών, ελικοειδείς ρωγμές)						✓	
Ρωγμές στην τροχιά των τροχών (Wheel path cracks)							✓
Ελικοειδείς ρωγμές							✓
Λακκούβες (Potholes)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Επιδιορθώσεις (μπαλώματα) (Patch)	✓	✓		✓	✓		
Επιφανειακά μπαλώματα (Skin Patch)		✓		✓			
Κύρτωση (Shoving)	✓	✓		✓	✓		
Διόγκωση (Swell)	✓	✓		✓			
Καθιζήσεις (Depressions)	✓	✓		✓			
Τοπικές καθιζήσεις (Local depressions)						✓	✓
Καθιζήσεις σε τομές του οδοστρώματος (Utility cut depressions)							✓
Τοπικές διογκώσεις (Local upheaval)						✓	✓
Επιμήκειες κυματισμοί						✓	
Εγκάρσιες πτυχώσεις						✓	
Κυματώσεις-Ρυτιδώσεις (Corrugations)	✓	✓		✓			✓
Αυλακώσεις (Rutting)	✓	✓	✓	✓	✓		
Αυλακώσεις στις τροχιές των τροχών						✓	✓
Στρεβλώσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος						✓	
Τοπικές μετακινήσεις του ασφαλτοτάπητα						✓	
Συσσώρευση - ανάδυση ασφάλτου (Bleeding - flushing)	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Αποκόλληση αδρανών (Raveling/Weathering)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Λείανση αδρανών (Polished Aggregate)	✓	✓		✓	✓	✓	✓
Ραβδώσεις στις ασφαλτικές επαλείψεις						✓	
Ανύψωση - Βύθιση λωρίδας/ερείσματος Lane-Shoulder Dropoff	✓	✓			✓		
Διαχωρισμός λωρίδας/ερείσματος (Lane-Shoulder Separation)	✓		✓	✓	✓		
Ανάδυση νερού (Water Bleeding and Pumping)	✓				✓		

* Από Gramling, 1994.

** Κανελλαΐδης, 1990, Νικολαΐδης κα., 1992.

- Δείκτης Παρούσας Λειτουργικότητας (Present Serviceability Index, PSI).

Ο Δείκτης Παρούσας Λειτουργικότητας PSI συνδέει την λειτουργική κατάσταση του οδοστρώματος με την ποιότητα οδήγησης. Πρόκειται για το αποτέλεσμα της εμπειρίας που προέκυψε στα πλαίσια του οδικού πειράματος AASHO και βασίζεται σε αντικειμενικές μετρήσεις ορισμένων φυσικών παραμέτρων της επιφάνειας του οδοστρώματος όπως η διακύμανση της εγκάρσιας κλίσης, οι ρηγματώσεις (ποσοστό ρηγματωμένης επιφάνειας), το βάθος αυλακώσεων και το ποσοστό επιφάνειας με τοπικές επισκευές. Ο δείκτης λαμβάνει τιμές από 0 (απαράδεκτη ποιότητα οδήγησης) έως 5 (άριστη ποιότητα οδήγησης). Στις ΗΠΑ, η τιμή του PSI για νέα οδοστρώματα πρέπει να έχει τιμή μεταξύ 4,2 έως 4,7, ανάλογα με την ποιότητα κατασκευής. Η τιμή του δείκτη μειώνεται σταδιακά με το χρόνο. Η τιμή 2,5 συνήθως θεωρείται ως επίπεδο προειδοποίησης για αποκατάσταση του οδοστρώματος. Όταν ο δείκτης έχει τιμή μικρότερη του 2,0, το οδόστρωμα θεωρείται ότι βρίσκεται σε κακή κατάσταση και απαιτείται άμεση αποκατάστασή του. Ο δείκτης PSI μπορεί να υπολογιστεί για εύκαμπτα οδοστρώματα από την παρακάτω σχέση (Carey & Irick, 1960):

$$PSI=5,03 - 1,91 \log(1+SV) - 1,38 RD^2 - 0,01 (C+P)^{0,5} \quad (1)$$

Όπου

- SV: μέση τιμή διακύμανσης της εγκάρσιας κλίσης και στα δύο ίχνη των τροχών,
 RD: μέσο βάθος αυλάκωσης (σε in) μετρούμενο και στα δύο ίχνη των τροχών με ράβδο μήκους 4 ft,
 C: ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας (μήκος ρωγμών σε ft/1000 ft²),
 P: ποσοστό των μπαλωμάτων (ft²/1000 ft²).

Η επιπεδότητα, η οποία εκφράζεται από την μέση τιμή της κλίσης (SV), συμβάλλει πολύ ουσιαστικά στη τιμή του PSI (περίπου κατά 95%), ενώ μόνο το 5% συνδέεται με την επιρροή άλλων παραγόντων όπως οι επιφανειακές φθορές. Ιδιαίτερα ασθενής είναι για παράδειγμα η συμβολή των αυλακώσεων όπως προέκυψε από συσχέτιση του δείκτη παρούσας λειτουργικότητας με επί τόπου παρατηρήσεις σε δρόμους.

- Δείκτης Κατάστασης Οδοστρώματος (Pavement Condition Index, PCI)

Ο Δείκτης Κατάστασης Οδοστρώματος παρέχει τη δυνατότητα για την εκτίμηση της κατάστασης του οδοστρώματος βασιζόμενος στις φθορές που παρατηρούνται στην επιφάνεια του και έχει υιοθετηθεί από τα πρότυπα της ASTM για την αξιολόγηση της κατάστασης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Παρέχει μια υποκειμενική βάση για τον προσδιορισμό των αναγκών συντήρησης και εκτίμησης προτεραιοτήτων. Ο δείκτης δεν μετρά τη δομική ανεπάρκεια του οδοστρώματος ούτε παρέχει άμεση εκτίμηση της επιπεδότητας ή της ολίσθησης. Ο δείκτης λαμβάνει υπόψη 16 είδη φθορών για εύκαμπτα οδοστρώματα (Πίνακας 2) και η τιμή του κυμαίνεται από 0 (απαράδεκτη κατάσταση) έως 100 (άριστη κατάσταση). Η εξαγωγή του Δείκτη Κατάστασης Οδοστρώματος γίνεται με συγκεκριμένο μαθηματικό αλγόριθμο με βάση το ποσοστό της έκτασης και το επίπεδο σοβαρότητας κάθε φθοράς καθώς και συντελεστών βαρύτητας για κάθε τύπο και επίπεδο σοβαρότητας φθοράς (ASTM, 1997, Shahin, 1994).

Πίνακας 2 Φθορές εύκαμπτων οδοστρωμάτων που λαμβάνονται υπόψη στο δείκτη κατάστασης οδοστρώματος PCI

-
1. Ρωγμές αλιγάτορα (Alligator cracking)
 2. Ανάδυση ασφάλτου (Bleeding)
 3. Ρωγμές πολυγωνικού τύπου (Block cracking)
 4. Κυματώσεις (Corrugations)
 5. Καθιζήσεις (Depressions)
 6. Καύση ή ενανθράκωση του ασφαλτικού υλικού (Jet – Blast erosion)
 7. Ρωγμές ανάκλασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων που εδράζονται σε δύσκαμπτα οδοστρώματα (Joint Reflection Cracking)
 8. Διαμήκεις και εγκάρσιες ρωγμές (Longitudinal and Transverse Cracking)
 9. Φθορά της επιφάνειας του οδοστρώματος λόγω ρίψης καυσίμων, ελαίων ή άλλων διαλυτών (Oil Spillage)
 10. Μπαλώματα από φθορές και μπαλώματα σε τομές οδοστρώματος από οργανισμούς κοινής ωφέλειας (Patching and Utility Cut Patching)
 11. Λείανση αδρανών (Polished Aggregate)
 12. Αποκόλληση αδρανών (Raveling and Weathering)
 13. Αυλακώσεις (Rutting)
 14. Τοπικές μετακινήσεις του ασφαλτοτάπητα (Shoving)
 15. Ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων (Slippage Cracking)
 16. Τοπική διόγκωση (Swell)
-

- Δείκτης Επιπεδότητας Οδοστρώματος για εκτίμηση Κόστους Οδήγησης (Roughness Index for Driving Expenditure, RIDE)

Ο δείκτης αυτός προτάθηκε από τους Paragiannakis and Delwar (1999) με στόχο τη συσχέτιση του κόστους λειτουργίας οχήματος με την κατάσταση της οδού από άποψη επιπεδότητας. Ο δείκτης μετρά την κατακόρυφη επιτάχυνση ενός οχήματος λόγω των ανωμαλιών του οδοστρώματος με βάση ανάλυση συχνοτήτων του προφίλ της οδού. Ο δείκτης μπορεί να μετρηθεί με τη χρήση κατάλληλου επιταχυνσιόμετρου που στερεώνεται στο κινούμενο όχημα. Ο δείκτης μετράται σε mm/sec^2 και λαμβάνει τιμές μεταξύ 150 (περίπου) για οδόστρωμα χωρίς ανωμαλίες και 1500 (περίπου) για οδόστρωμα με σημαντικές ανωμαλίες.

- Δείκτης Άνεσης Οδήγησης (Riding Comfort Index, RCI).

Ο Δείκτης Άνεσης Οδήγησης RCI, παλιότερα γνωστός ως Βαθμολόγηση Παρούσας Εξυπηρετικότητας PPR (Present Performance Rating), προέκυψε από την βαθμολόγηση της ποιότητας οδήγησης που έγινε εμπειρικά από ομάδα ειδικών για οδοστρώματα διαφόρων καταστάσεων με εξαγωγή του μέσου όρου των βαθμολογιών. Αναπτύχθηκε τα τέλη της δεκαετίας του '50 και τις αρχές της δεκαετίας του '60 στον Καναδά (Haas *et al.*, 1994). Ο δείκτης RCI προτάθηκε με σκοπό να περιγράψει την συνολική κατάσταση του οδοστρώματος, κατέληξε ωστόσο να αποτελεί μέτρο της επιπεδότητας του οδοστρώματος.

- Βαθμολόγηση της κατάστασης του οδοστρώματος (Pavement Condition Rating, PCR).

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην καταγραφή και βαθμολόγηση όλων των φθορών που εμφανίζονται στο οδόστρωμα. Η βαθμολόγηση της κάθε φθοράς λαμβάνει τιμές από 0 (απουσία φθοράς) έως μια μέγιστη τιμή 5 ή 10 (που αναλογεί σε τμήμα με σημαντικές φθορές). Το αλγεβρικό άθροισμα της βαθμολόγησης όλων των φθορών που εξετάζονται, αντιπροσωπεύει την κατάσταση του οδοστρώματος και κυμαίνεται από 0 (ιδανική κατάσταση χωρίς φθορές) έως 100 (σημαντικές φθορές). Ο δείκτης PCR υπολογίζεται αφαιρώντας την τιμή του αλγεβρικού αθροίσματος από την τιμή 100 (Asphalt Institute, 1977).

- Δείκτης Εκδήλωσης Φθορών (Distress Manifestation Index, DMI)

Ο Δείκτης Εκδήλωσης Φθορών DMI περιγράφει την κατάσταση του οδοστρώματος δίνοντας ένα μέτρο της έκτασης και της σοβαρότητας κάθε τύπου φθορά. Για την εξαγωγή του δείκτη αυτού, σε κάθε φθορά i αντιστοιχεί συντελεστής βάρους C_i ανάλογα με την επίδραση της φθοράς στην υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος. Επιπλέον, καθορίζονται 5 επίπεδα έκτασης, ανάλογα με το ποσοστό της επιφάνειας που παρουσιάζει την εν λόγω φθορά, τα οποία περιγράφονται με το συντελεστή έκτασης D_i . Ανάλογοι συντελεστές S_i ορίζονται για τη σοβαρότητα της φθοράς που διακρίνεται επίσης σε 5 στάδια από ασήμαντη έως πολύ σοβαρή σοβαρότητα. Ο Δείκτης Εκδήλωσης Φθορών, που προκύπτει από καταγραφή n τύπων φθορών υπολογίζεται από την σχέση:

$$DMI = \sum_{i=1}^n C_i \cdot (S_i + D_i) \quad (2)$$

Οι τιμές του Δείκτη Εκδήλωσης Φθορών κυμαίνονται μεταξύ 0 και 248, όπου η τιμή 0 αντιστοιχεί σε οδόστρωμα χωρίς φθορές. Η κλίμακα τιμών εκφράζει το επίπεδο λειτουργικότητας και υποδεικνύει το είδος των απαιτούμενων εργασιών συντήρησης που πρέπει να υλοποιηθούν στο εξεταζόμενο τμήμα ανάλογα με την τιμή του δείκτη.

Σε άλλη μελέτη (Ningyuan et al 2000), ο δείκτης DMI ορίζεται διαφορετικά ως εξής:

$$DMI = 10 \times \frac{DMI_{Max} - \sum_{i=1}^n C_i (S_i + D_i)}{DMI_{Max}} \quad (3)$$

όπου

C_i : συντελεστής βαρύτητας ανάλογα με την επίδραση της φθοράς i στην υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος (τιμές μεταξύ 0,5 και 3,0)

D_i : συντελεστής έκτασης της φθοράς i (τιμές μεταξύ 0,5 και 4,0)

S_i : συντελεστής σοβαρότητας της φθοράς i (τιμές μεταξύ 0,5 και 4,0)

DMI_{Max} : Η μέγιστη θεωρητική τιμή του δείκτη (η τιμή αυτή, με τους συντελεστές βαρύτητας που προτείνονται στην παραπάνω αναφορά, είναι 208).

1.2 Ρηγματώσεις

Οι ρηγματώσεις αποτελούν μέρος των επιφανειακών φθορών του οδοστρώματος όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Αποτελούν μια ομάδα επιφανειακών φθορών με παρόμοια χαρακτηριστικά και επιπτώσεις στο οδόστρωμα και για το λόγο αυτό εξετάζονται ξεχωριστά. Η εμφάνιση των ρηγματώσεων σε ένα τμήμα της οδού σηματοδοτεί την έναρξη της διαδικασίας επιδείνωσης της κατάστασης του οδοστρώματος. Οι ρηγματώσεις της ασφαλικής επιφάνειας του οδοστρώματος οφείλονται σε συνδυασμένη δράση κυκλοφοριακών και περιβαλλοντικών παραγόντων μέσω ενός ή περισσότερων μηχανισμών. Η δημιουργία ρηγματώσεων ξεκινάει από την επιφάνεια του οδοστρώματος, εξασθενεί το οδόστρωμα και επιτρέπει τη είσοδο νερού προκαλώντας περαιτέρω φθορά και μεγαλύτερη ρηγματώση. Σε άλλες περιπτώσεις, η ρηγματώση ξεκινάει από τις υποκείμενες στρώσεις των ασφαλικών του οδοστρώματος. Η ρηγματώση αυτή οφείλεται σε δομική ανεπάρκεια των υποκείμενων στρώσεων (βάσης και υπόβασης) και προοδευτικά επεκτείνεται προς την επιφάνεια του οδοστρώματος. Οι ρωγμές του οδοστρώματος σταδιακά αυξάνονται σε έκταση, σοβαρότητα και συχνότητα και οδηγούν στην αποσύνθεση της επιφάνειας του οδοστρώματος. Οι ρηγματώσεις αποτελούν μια πολύ συνηθισμένη φθορά του οδοστρώματος καθώς και σημαντική ένδειξη της κατάστασης του οδοστρώματος. Οι ρηγματώσεις (όπως και άλλες επιφανειακές φθορές του οδοστρώματος) διαχωρίζονται σε 2 καταστάσεις (Paterson, 1987) που αντιστοιχούν στις ακόλουθες φάσεις εξέλιξης τους:

- την έναρξη της ρηγματώσης (τη χρονική στιγμή που εμφανίζεται η πρώτη ρωγή στο οδόστρωμα).
- την εξέλιξη της ρηγματώσης.

Οι κύριες μορφές ρηγματώσης είναι (Paterson, 1987)

- Ρωγμές αλιγάτορα
- Διαμήκεις ρωγμές
- Εγκάρσιες ρωγμές
- Τυχαίες ρωγμές
- Πολυγωνικές ρωγμές

Το επίπεδο σοβαρότητας τους καθορίζεται από το πλάτος των ρωγμών και από την ύπαρξη θρυμματισμού. Συγκεκριμένα, οι ρηγματώσεις διακρίνονται σε:

1. Τριχοειδείς ρηγματώσεις (πλάτος <1 mm).
2. Ρηγματώσεις με πλάτος 1-3 mm.
3. Ρηγματώσεις με πλάτος > 3 mm χωρίς θρυμματισμό.
4. Θρυμματισμένες ρηγματώσεις.

Για την περιγραφή των ρηγματώσεων χρησιμοποιείται ένας αθροιστικός δείκτης, ο **Δείκτης Ρηγματώσεων** (Cracking Index, CR_i) που αντιπροσωπεύει το ποσοστό της επιφάνειας που παρουσιάζει ρηγματώση με επίπεδο σοβαρότητας τουλάχιστον i. Για παράδειγμα, ο Δείκτης Ρηγματώσεως CR₂ δίνει τη συνολική έκταση των ρηγματώσεων 2ης, 3ης και 4ης τάξης. Οι τριχοειδείς ρηγματώσεις δεν λαμβάνονται υπόψη γιατί είναι δύσκολο να παρατηρηθούν και επιπλέον έχουν μικρή επίδραση στην επιδείνωση της κατάστασης του οδοστρώματος. Σύμφωνα με τον Paterson (1987), η έναρξη των «στενών» (2ης τάξης) ρηγματώσεων αντιστοιχεί με το δείκτη CR₂ (ρηγματώσεις 2ης, 3ης και 4ης τάξης), ενώ η έναρξη των «πλατιών» (4ης τάξης) αντιστοιχεί με το δείκτη CR₄ (4ης τάξης).

1.3 Παραμορφώσεις

Οι παραμορφώσεις αποτελούν μέρος των επιφανειακών φθορών του οδοστρώματος. Οι μόνιμες παραμορφώσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος περιλαμβάνουν αυλακώσεις, τοπικές διογκώσεις και καθιζήσεις, κυματώσεις του οδοστρώματος και καθιζήσεις ή ανυψώσεις των άκρων του οδοστρώματος. Οι φθορές αυτές επηρεάζουν άμεσα στην επιπεδότητα το οδοστρώματος και οδηγούν σε μείωση της ασφάλειας κίνησης και της άνεσης στην οδήγηση. Τα αίτια που προκαλούν τις παραμορφώσεις είναι κυρίως:

- ο υψηλός κυκλοφοριακός φόρτος και τα σημαντικά αξονικά φορτία,
- η ποιότητα του εδάφους έδρασης,
- ο παγετός.

Δύο είναι οι κύριοι μηχανισμοί των παραμορφώσεων:

- η συμπύκνωση (densification),
- η πλαστική ροή (plastic flow).

Κατά τη συμπύκνωση στη φάση της κατασκευής, μεταβάλλεται ο όγκος των υλικών λόγω της πυκνότερης δομής των αδρανών ή του θρυμματισμού των σε μικρότερα τεμάχια. Η

ποιότητα της συμπύκνωσης ελέγχεται με βάση τις προδιαγραφές συμπίεσης κατά την κατασκευή. Κατά την πλαστική ροή δεν παρατηρείται μεταβολή του όγκου των υλικών αλλά αύξηση των πλάγιων μετατοπίσεων όταν οι προκαλούμενες τάσεις από τα επιβαλλόμενα φορτία είναι μεγαλύτερες από τη διατμητική αντίσταση του υλικού. Η πλαστική ροή ελέγχεται κατά την κατασκευή του οδοστρώματος με την επιλογή των κατάλληλων υλικών (που καθορίζεται με τους συντελεστές CBR για το έδαφος και Marshall ή Hveem για τα ασφαλτικά). Οι μέθοδοι προσδιορισμού των παραμορφώσεων είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των επιφανειακών φθορών.

1.4 Επιπεδότητα

Η παράμετρος αυτή καταγράφει την απόκλιση της επιφάνειάς του οδοστρώματος από την ιδανικά επίπεδη επιφάνεια κύλισης. Η επιπεδότητα ενός οδοστρώματος επηρεάζεται από διαμήκεις αλλά και εγκάρσιες παραμορφώσεις της επιφάνειάς του οδοστρώματος, από την ύπαρξη ρωγμών και μπαλωμάτων. Η ύπαρξη ανωμαλιών στην επιφάνεια κύλισης έχει αρνητικές επιπτώσεις στη δυναμική του οχήματος, στην ποιότητα οδήγησης, στην αύξηση των δυναμικών φορτίων και στην αποστράγγιση του οδοστρώματος. Μη επίπεδα οδοστρώματα επηρεάζουν την πλευρική μετακίνηση του οχήματος και δημιουργούν κακές συνθήκες οδήγησης. Η σχέση μεταξύ επιπεδότητας και ποιότητας οδήγησης έχει καταγραφεί σε προηγούμενες μελέτες με κατάλληλες εξισώσεις (Carrey & Irrick, 1960).

Για την ενιαία και σαφή έκφραση της επιπεδότητας του οδοστρώματος, ανεξάρτητα από τη μέθοδο μέτρησης, έχει αναπτυχθεί σε παγκόσμιο επίπεδο ο **Διεθνής Δείκτης Επιπεδότητας (τραχύτητας) IRI** (International Roughness Index). Ο δείκτης καθορίστηκε μετά από μαθηματική προσομοίωση ενός τροχού με ελατήρια γνωστών μηχανικών χαρακτηριστικών και βάρους ίσου με ένα τυπικό άξονα επιβατικού οχήματος, ο οποίος κινείται πάνω σε επιφάνειες με διαφορετικό βαθμό ομαλότητας με ταχύτητα 80 km/h. Ο δείκτης IRI λαμβάνει τιμές από 0 έως 20 μονάδες ενώ η διαβάθμιση του είναι όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα (Sayers and Karamihas, 1997).

IRI, m/km	Επιπεδότητα
0	Απόλυτη
$0 < \text{IRI} < 6$	Ανεκτή (επιφανειακές ατέλειες)
$6 < \text{IRI} < 12$	Κακή (συχνές βυθίσεις μικρού βάθους και ορισμένες μεγάλες)
$12 < \text{IRI} < 20$	Πολύ κακή (μεγάλες βυθίσεις και διάβρωση της επιφάνειας)

Ο δείκτης IRI έχει συσχετιστεί με τις μετρήσεις που προκύπτουν από τα πλέον διαδεδομένα όργανα μέτρησης επιπεδότητας και έχουν εξαχθεί συγκεκριμένες σχέσεις που δομήθηκαν με βάση πληθώρα παρατηρήσεων. Για μετρήσεις με το Βρετανικό Bump Integrator:

$$\text{IRI} = 0.0032 (\text{BI}_{32})^{0.89}, \text{ m/km με απόκλιση } \pm 0,31 (\text{IRI})^{0.5}$$

όπου BI_{32} = το αποτέλεσμα της μέτρησης με Bump Integrator (BI) για ταχύτητα μέτρησης 32 km/h.

Για μετρήσεις με το Γαλλικό προφιλόμετρο APL-71:

$$\text{IRI} = \text{CP}_{2,5}/16, \text{ m/km με απόκλιση } \pm 0,27 (\text{IRI})^{0.5}$$

όπου $\text{CP}_{2,5}$ = συντελεστής του προφιλόμετρου (CP) σε μήκος αναφοράς 2,5 m.

1.5 Ολισθηρότητα

Με τον όρο ολισθηρότητα εκφράζεται η αδυναμία ανάπτυξης επαρκούς δύναμης τριβής μεταξύ των ελαστικών και της επιφάνειας του οδοστρώματος ώστε να υπάρχει αποτελεσματική πέδηση των οχημάτων. Πολλές φορές χρησιμοποιείται παρακάτω ο όρος αντίσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος σε ολίσθηση που υποδεικνύει την οριζόντια δύναμη που αναπτύσσεται όταν το ελαστικό ενός τροχού ολισθαίνει στην επιφάνεια του οδοστρώματος κατά την πέδηση του οχήματος. Οι δύο όροι παρέχουν αντίθετη εικόνα του ίδιου φαινομένου, σε οδοστρώματα δηλαδή με μεγάλη ολισθηρότητα η αντίσταση σε ολίσθηση είναι μικρή και αντιστρόφως. Η ολισθηρότητα σχετίζεται άμεσα με την ασφάλεια κίνησης του οχήματος τόσο κατά την οδήγηση όσο και κατά την πέδηση. Το πρόβλημα αυξάνεται ιδιαίτερα όταν η επιφάνεια του οδοστρώματος είναι υγρή αφού η παρεμβολή ύδατος μεταξύ ελαστικού και επιφάνειας κύλισης μειώνει αισθητά την αντίσταση σε ολίσθηση. Η εκτίμηση της αντίστασης της επιφάνειας του οδοστρώματος σε ολίσθηση σε τακτά χρονικά διαστήματα και η διατήρησή της σε αποδεκτά επίπεδα είναι πρωταρχικής σημασίας για την ασφάλεια κίνησης επί της οδού.

Αν και τα χαρακτηριστικά των ελαστικών των οχημάτων παίζουν σημαντικό ρόλο, η βασική συνεισφορά στην αντίσταση σε ολίσθηση προέρχεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος και συγκεκριμένα από την μικροϋφή και μακροϋφή. Η μικροϋφή σχετίζεται με την τραχύτητα της επιφάνειας των αδρανών και επηρεάζει την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος για κίνηση με μικρή ταχύτητα. Έτσι, περιορίζεται η αρνητική επίδραση του λεπτού υδάτινου υμένα που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια ελαστικού και οδοστρώματος. Η μακροϋφή σχετίζεται με την τραχύτητα συνολικά στην επιφάνεια του οδοστρώματος που δημιουργείται από προεξέχοντα αδρανή ή λόγω ανάδυσσης της ασφάλτου. Η μακροϋφή επηρεάζει την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος σε υψηλές ταχύτητες κίνησης καθώς υποβοηθά την αποστράγγιση του ύδατος κάτω από την επιφάνεια του ελαστικού (Gramling, 1994).

Για μετρήσεις που γίνονται με το ολισθηρόμετρο ASTM, χρησιμοποιείται ως δείκτης ο **Αριθμός Ολίσθησης** (Skid Number, SN). Ο Αριθμός Ολίσθησης θεωρητικά λαμβάνει τιμές από 1 έως 100, όπου η τιμή 100 εκφράζει την βέλτιστη αντιολισθηρή ικανότητα της επιφάνειας. Στην Ελλάδα δεν έχουν καθιερωθεί από κανονισμό όρια προειδοποίησης του συντελεστή αντίστασης σε ολίσθηση. Προτεινόμενες τιμές του συντελεστή αντίστασης σε ολίσθηση για τα ελληνικά δεδομένα έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία (Νικολαΐδης, 1996) όπου για όριο προειδοποίησης προτείνεται η τιμή SN=40, ενώ ως κατώτατο αποδεκτό όριο (όριο άμεσης δράσης αποκατάστασης προτείνεται η τιμή SN=35 για τις επικίνδυνες θέσεις και η τιμή SN=30 για τις υπόλοιπες θέσεις.

1.6 Φέρουσα ικανότητα

Η φέρουσα ικανότητα (ή δομική επάρκεια) είναι η δυνατότητα του οδοστρώματος να εξυπηρετεί κυκλοφοριακά φορτία με ελάχιστες ή καθόλου ρωγμές ή παραμορφώσεις. Ο προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας είναι χρήσιμος για την παροχή πληροφοριών σχετικών με το σχεδιασμό και την επιλογή των μεθόδων συντήρησης. Μετρήσεις της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων γίνονται με:

(α) καταστροφικές μεθόδους όπου ο έλεγχος μπορεί να γίνει:

- με εξαγωγή καρτών και προσδιορισμό της σύστασης του ασφαλτομίγματος και των μηχανικών ιδιοτήτων των στρώσεων

- με διάνοιξη τομών στο οδόστρωμα ως το επίπεδο του υπεδάφους και προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας καθώς και μέτρηση του βάθους ρωγμών.

(β) μη καταστροφικές μεθόδους:

Ουσιαστικά μετρείται μέσω οργάνων η βύθιση επιβαλλόμενου φορτίου. Το μέγεθος της βύθισης αποτελεί ένδειξη της ικανότητας του οδοστρώματος να φέρει φορτία.

Σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική, η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος σε Συστήματα Διαχείρισης Οδοστρωμάτων προσδιορίζεται με μηχανικά μέσα. Ο **Δείκτης Φέρουσας Ικανότητας** (Structural Index, SI) αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους εκτίμησης της κατάστασης του οδοστρώματος και έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές (Φινλανδία, North Dakota).

1.7 Συσχέτιση δεικτών κατάστασης οδοστρώματος

Οι κυριότεροι δείκτες κατάστασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων κωδικοποιούνται ως ακολούθως:

Δείκτης	Distress Manifestation Index (DMI)
Μέτρηση	Συνολική αξιολόγηση της επιφανειακής κατάστασης του οδοστρώματος
Εύρος τιμών	0 – 10
Βέλτιστη κατάσταση	10
Χείριστη κατάσταση	0

Δείκτης	International Roughness Index (IRI)
Μέτρηση	Αξιολόγηση της ποιότητας κύλισης του οδοστρώματος με βάση την ομαλότητα του
Εύρος τιμών	0 – 10 (για επιστρωμένα οδοστρώματα)
Βέλτιστη κατάσταση	0
Χείριστη κατάσταση	10

Δείκτης	Pavement Condition Index (PCI)
Μέτρηση	Συνολική αξιολόγηση της δομικής και λειτουργικής κατάστασης του οδοστρώματος
Εύρος τιμών	0 – 100

Βέλτιστη κατάσταση	100
Χείριστη κατάσταση	0

Δείκτης	Present Serviceability Index (PSI)
Μέτρηση	Αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης του οδοστρώματος σε σχέση με την ποιότητα οδήγησης
Εύρος τιμών	0 – 5
Βέλτιστη κατάσταση	5
Χείριστη κατάσταση	0

Δείκτης	Riding Comfort Index (RCI)
Μέτρηση	Αξιολόγηση της ποιότητας κύλισης του οδοστρώματος με βάση την άνεση μετακίνησης των χρηστών
Εύρος τιμών	0 – 10
Βέλτιστη κατάσταση	10
Χείριστη κατάσταση	0

Δείκτης	Roughness Index for Driving Expenditure (RIDE)
Μέτρηση	Εκτίμηση της επιπεδότητας του οδοστρώματος για συσχέτιση με το κόστος λειτουργίας οχήματος
Εύρος τιμών	150 – 1500 (περίπου)
Βέλτιστη κατάσταση	150
Χείριστη κατάσταση	1500

Διάφορες ερευνητικές προσπάθειες έχουν οδηγήσει σε συσχετίσεις μεταξύ των δεικτών κατάστασης του οδοστρώματος. Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα αναφέρονται οι παρακάτω σχέσεις:

$$RCI = 8,52 - 7,49 \times \log_{10}(IRI) \quad (1) \quad (R^2=0,652) \quad (4)$$

$$PCI = 10 \times (0,1 RCI)^{1/2} \times DMI \times C_i \quad (1) \quad \text{όπου } C_i = 1,088 \quad (R^2=0,652) \quad (5)$$

$$IRI = 0,15 \times (100 - PCI) \quad (2) \quad (6)$$

$$\text{IRI} = 0,0171 \times (153 - \text{PCI}) \quad (3) \quad (7)$$

$$\text{PSI} = 5,0 \times e^{-0,18 \text{ IRI}} \quad (4) \quad (8)$$

$$\text{RIDE} = 144,78 \times e^{0,235 \text{ IRI}} \quad (5) \quad (\text{R}^2=0,254) \quad (9)$$

(1) Ningyuan et al, 2000

(2) Sharaf and Fathy Mandeel, 1998

(3) Dewan and Smith, 2002

(4) Paterson, 1986

(5) Papagiannakis and Delwar, 2000

2 Μοντέλα πρόβλεψης κατάστασης οδοστρωμάτων

2.1 Διάκριση μοντέλων πρόβλεψης

Η πρόβλεψη της εξέλιξης των φθορών των οδοστρωμάτων είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό του χρόνου συντήρησης και βελτιστοποίησης του προγραμματισμού της συντήρησης του οδικού δικτύου σε συνδυασμό με το κόστος χρηστών που συνδέεται με την κατάσταση του οδοστρώματος. Από τη δεκαετία του '60 οπότε και ξεκίνησε το σκεπτικό της διαχείρισης οδοστρωμάτων, πολλά μοντέλα πρόβλεψης έχουν αναπτυχθεί στη Βόρεια Αμερική αλλά και αλλού. Τα πιο συνήθη μοντέλα πρόβλεψης μπορούν να διακριθούν σε 4 κατηγορίες, τα ντετερμινιστικά, τα πιθανοτικά, τα υποκειμενικά και τα μοντέλα 'ευφυών' μεθοδολογιών.

- Τα ντετερμινιστικά μοντέλα περιγράφουν την μεταβολή των παραμέτρων συμπεριφοράς του οδοστρώματος στο χρόνο με τη χρήση μαθηματικών συναρτήσεων. Συνήθως προκύπτουν από στατιστικές αναλύσεις για τη συσχέτιση ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών.
- Τα πιθανοτικά μοντέλα προβλέπουν τη μελλοντική κατάσταση του οδοστρώματος με βάση κάποιες παραμέτρους συμπεριφοράς τις οποίες θεωρούν ως τυχαίες εξαρτημένες μεταβλητές και η τιμή τους καθορίζεται από μια συνάρτηση πιθανότητας.
- Τα υποκειμενικά μοντέλα προκύπτουν από την τυποποίηση της εμπειρίας των ειδικών όσον αφορά στη διαδικασία φθοράς των οδοστρωμάτων. Είναι μοντέλα που αναπτύσσονται συνήθως σε περιπτώσεις έλλειψης ιστορικών παρατηρήσεων και δεδομένων.
- Τα μοντέλα 'ευφυών' μεθοδολογιών αποτελούν ένα νέο τομέα εφαρμογών στην πρόβλεψη φθορών οδοστρωμάτων και χρησιμοποιούν μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι ή τα νευρωνικά δίκτυα, για το σκοπό αυτό.

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των μοντέλων είναι σε μηχανιστικά, εμπειρικά και εμπειρικά-μηχανιστικά μοντέλα.

- Τα μηχανιστικά μοντέλα προβλέπουν την ανταπόκριση του οδοστρώματος σε εξωτερική καταπόνηση θεωρώντας τα οδοστρώματα ως στρώσεις υλικών και λαμβάνοντας υπόψη τις στοιχειώδεις ιδιότητες των υλικών αυτών.

- Τα εμπειρικά μοντέλα συσχετίζουν με εμπειρικό τρόπο τη μελλοντική κατάσταση με μια ομάδα παραγόντων που την επηρεάζουν χωρίς συστηματική ανάλυση της πραγματικής διαδικασίας εξέλιξης της κατάστασης (π.χ., μεταβολές στις ιδιότητες υλικών).
- Τα εμπειρικά-μηχανιστικά μοντέλα είναι συνδυασμός των παραπάνω μοντέλων όπου στις εμπειρικές σχέσεις υπεισέρχονται και δεδομένα από τη μηχανιστική απόκριση του οδοστρώματος.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου μοντέλου βασίζεται κριτήρια όπως οι ανάγκες εφαρμογής, ο απαιτούμενος όγκος, ο χρόνος και το κόστος συλλογής δεδομένων, η διαθεσιμότητα μαθηματικών εργαλείων και η προσαρμοσιμότητα τους στα δεδομένα. Στον Πίνακα 3 φαίνονται συνοπτικά οι διαφορές και ομοιότητες των μοντέλων.

Πίνακας 3 Κατηγοριοποίηση των μοντέλων πρόβλεψης εξέλιξης κατάστασης

Είδη μοντέλων	Δεδομένα	Τεχνικές εξαγωγής	Συμπεράσματα	Πεδίο εφαρμογής
Ντετερμινιστικό	Μετρήσεις/ πειράματα	Στατιστική ανάλυση	Δείκτες κατάστασης	Επίπεδο οδού
Πιθανοτικό	Μετρήσεις/ παρατηρήσεις	Πιθανοθεωρία	Πιθανοτικές κατανομές κατάστασης	Επίπεδο οδικού δικτύου
Υποκειμενικό	Γνώση ειδικών	Εμπειρικές εκτιμήσεις	Δείκτες, εύρος τιμών, πιθανοτικές κατανομές κατάστασης	Επίπεδο οδού/ οδικού δικτύου
‘Ευφυές’	Μετρήσεις / γνώση ειδικών	Τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης	Όλα τα παραπάνω	Επίπεδο οδού/ οδικού δικτύου

2.2 Υπάρχοντα μοντέλα πρόβλεψης

Τα τελευταία 40 χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο πλήθος μοντέλων πρόβλεψης κατάστασης οδοστρωμάτων, με πιο αξιόλογες προσπάθειες αυτές της Β. Αμερικής. Τα μοντέλα αυτά διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, τα απλά και τα σύνθετα. Τα σύνθετα μοντέλα που προβλέπουν κάποια μορφή δείκτη κατάστασης για τα οδοστρώματα βοηθούν στον καθορισμό της γενικής υγείας του οδικού δικτύου. Εντούτοις, τα μοντέλα για τις μεμονωμένες φθορές όπως οι ρωγμές και η τραχύτητα είναι ζωτικής σημασίας για τα Συστήματα Διαχείρισης Οδοστρωμάτων όταν εξετάζονται σε επίπεδο οδού. Το εδάφιο αυτό αναφέρει εν συντομία υλοποιημένα μοντέλα πρόβλεψης φθορών και εστιάζει στις επεξηγηματικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται, τη μορφή του μοντέλου και το εύρος εφαρμογής. Αυτοί οι τρεις στόχοι περιλαμβάνουν την πρωταρχική προσπάθεια οικοδόμησης μοντέλου.

Μοντέλα πρόβλεψης ρωγμών

Τα μοντέλα πρόβλεψης για τις ρωγμές στα εύκαμπτα οδοστρώματα, γενικά, προβλέπουν την έναρξη της ρωγμής, την εξέλιξη της ή την ποσοστιαία έκταση της ρωγμής. Τέτοια μοντέλα είναι το Μοντέλο Brazil UNDP (Queiroz and Hudson 1982), το Μοντέλο HDM III (World Bank) (Paterson, 1987), το Μοντέλο RTIM2 (Paterson 1987), το Μοντέλο συστήματος σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων του Texas (Lytton et. al. 1982), το Μοντέλο Queiroz (Queiroz), το Μοντέλο της South Dakota (Jackson et.al. 1996) το Μοντέλο ρωγμών για την Ινδία (Sood et.al. 1994), το Μοντέλο με εφαρμογή νευρωνικών δικτύων FDOT (Yang et.al. 2003, Lou et.al. 1997) και το Μοντέλο MS-DOT-RD-00-119 (George 2000).

Μοντέλα πρόβλεψης αυλακώσεων

Οι αυλακώσεις, που δημιουργούνται από την επανάληψη των κυκλοφοριακών φορτίων, μπορούν να προκληθούν από την μόνιμη παραμόρφωση όλων των στρώσεων του οδοστρώματος. Διάφορα μοντέλα για την πρόβλεψη των αυλακώσεων έχουν αναπτυχθεί βασισμένα σε μηχανιστικές αντιδράσεις, αντοχή, ηλικία, κυκλοφοριακό φόρτο κ.λ.π. Τέτοια μοντέλα είναι το Μοντέλο HDM : μέσο βάθος αυλακώσεων (Paterson 1987), το Μοντέλο Texas Transportation (Lytton et.al. 1982), το Μοντέλο MS-DOT-RD-00-119

(George 2000) και το Μοντέλο με εφαρμογή νευρωνικών δικτύων FDOT (Yang and Gunaratne 2003).

Μοντέλα πρόβλεψης τραχύτητας

Η τραχύτητα παίζει σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά του οδοστρώματος. Μοντέλα που προβλέπουν τραχύτητα περιλαμβάνουν τα Μοντέλα Transportation and Road Research Laboratory –TRRL (Sept. 1991), το Μοντέλο Arizona (Zaniewski et.al. 1990), το Μοντέλο Brazil-study (Queiroz and Hudson 1982), το Μοντέλο Riding Comfort – Alberta (Karan et.al. 1983), τα Μοντέλα γενικής μορφής (Paterson 1987), το Μοντέλο με τη βοήθεια γενετικού αλγορίθμου (Adrei et.al. 2000), το Μοντέλο MS-DOT-RD-00-119 (George 2000) και το Μοντέλο με εφαρμογή νευρωνικών δικτύων – FDOT (Yang and Gunaratne 2003).

Μοντέλα πρόβλεψης γενικής κατάστασης

Ο σύνθετος δείκτης κατάστασης δείχνει την συνολική κατάσταση του οδοστρώματος. Γενικά, είναι μια συνάρτηση των επιφανειακών φθορών ή της τραχύτητας ή και των δυο και μετράει φθορά, κατάσταση ή λειτουργικότητα. Διαφορετικοί δείκτες χρησιμοποιούνται από τις διάφορες τεχνικές υπηρεσίες για να δείξουν την κατάσταση του οδοστρώματος, όπως το Μοντέλο AASHTO PSI -Present Serviceability Index (AASHTO 1993), το Μοντέλο της πολιτείας της Washington- Pavement Condition Rating (PCR) (Sept.1991), τα Μοντέλα Mississippi PCR (George et.al. 1989), το Μοντέλο Uzan και Lytton (Uzan and Lytton 1982), τα Μοντέλα HPMS-Present Serviceability Rating (PSR) (Lee et.al. 1992), το Μοντέλο Damage Index (Lytton et.al., 1982), τα Μοντέλα South Carolina και Tennessee (Cheetham 1994), το Μοντέλο CRS (Condition Survey Rating System) για Illinois Interstate Highway System (Kathleen et.al. 1994), το Μοντέλο MS-DOT-RD-00-119 (George 2000), το Μοντέλο με εφαρμογή νευρωνικών δικτύων FDOT (Yang and Gunaratne 2003), το Μοντέλο με γενετικό αλγόριθμο (Shekharan 2000), το Μοντέλο Δείκτη Λειτουργικότητας με συνδυασμό δεδομένων πεδίου και πειραμάτων (Prozzi 2001), το Μοντέλο της πολιτείας Maryland (Hedfi and Stephanos) και το Μοντέλο πρόβλεψης τριβής επιφάνειας οδοστρώματος (Fulop et.al. 2000).

Εξέλιξη και πρόβλεψη της επιπεδότητας

Για την πρόβλεψη της εξέλιξης της επιπεδότητας έχουν αναπτυχθεί αρκετές σχέσεις από μακροχρόνια προγράμματα ανάπτυξης Συστημάτων Διαχείρισης Οδοστρωμάτων σε χώρες όπως η Βραζιλία, ΗΠΑ, και Κένυα. Το μοντέλο που βασίστηκε σε στοιχεία της Βραζιλίας και προέκυψε με μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων είχε την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned} \Delta RI_t = & 134 \cdot e^{0,023 \cdot t} \cdot SNCK^{-5,0} \cdot \Delta NE_4 + 0,114 \cdot \Delta RDS \\ & + 0,0066 \cdot \Delta CRX + 0,010 \cdot \Delta PAT + Z_{pot} + 0,023 \cdot RI_t \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (10)$$

όπου

ΔRI_t : αύξηση της επιπεδότητας (IRI) σε χρονικό διάστημα Δt [m/km],

Δt : χρονική περίοδος πρόβλεψης μεταβολής της επιπεδότητας [έτη],

t : ηλικία οδοστρώματος ή ασφαλτικής επίστρωσης [έτη],

RI_t : επιπεδότητα σε χρόνο t [m/km IRI],

ΔRDS : αύξηση της τυπικής απόκλισης του βάθους αυλάκωσης στις δύο τροχιές των τροχών [mm],

ΔCRX : αύξηση του δείκτη ρηγματώσεως [%],

ΔPAT : αύξηση επιφάνειας μπαλωμάτων [%],

ΔNE_4 : αύξηση του αριθμού των ισοδύναμων τυπικών αξόνων κατά την περίοδο Δt [10^6 ΙΤΑ/λωρίδα],

$SNCK$: $1 + SNC - 0,0000758 \cdot H \cdot CRX$,

SNC : τροποποιημένος δομικός αριθμός οδοστρώματος,

H : πάχος ρηγματωμένης στρώσης [mm],

CRX : επιφάνεια ρηγματώσεως [%],

Z_{pot} : παράγοντας προσομοίωσης των τμημάτων με λακκούβες [mm/km IRI].

Το μοντέλο προσαρμόζεται καλά με μετρήσεις από τμήματα με τιμές του IRI έως 7 m/km. Το προβλεπόμενο σφάλμα είναι 0,5 m/km (IRI) το οποίο αντιστοιχεί σε ένα ετήσιο σφάλμα στην πρόβλεψη της επιπεδότητας της τάξης των 0,12 m/km (IRI).

Μια πιο εξελιγμένη έκφραση για την πρόβλεψη της επιπεδότητας σε σχέση με το χρόνο, την κυκλοφορία, την αντοχή του οδοστρώματος και τις περιβαλλοντικές συνθήκες δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$RI(t) = \left[RI(o) + 725(1 + SNC)^{-4,99} NE_4(t) \right] e^{0,0153t} \quad (11)$$

όπου

RI(t): επιπεδότητα τη χρονική στιγμή t [m/km IRI],

RI(o): επιπεδότητα τη χρονική στιγμή 0 [m/km IRI],

SNC: τροποποιημένος δομικός αριθμός οδοστρώματος,

NE₄(t): συνολικός αριθμός διελεύσεων ισοδύναμων τυπικών αξόνων (ITA) ως το χρόνο t [10⁶ ITA/λωρίδα].

Ο τροποποιημένος δομικός αριθμός οδοστρώματος που υπεισέρχεται στις παραπάνω σχέσεις αποτελεί μια παράμετρο ποσοτικοποίησης της δομικής επάρκειας του οδοστρώματος, προκύπτει δε ως:

$$SNC = 0,04 \sum a_i h_i + SN_{sg} \quad (12)$$

όπου

a_i: δομικός συντελεστής της στρώσης i σύμφωνα με τη μέθοδο διαστασιολόγησης AASHTO,

h_i: πάχος στρώσης i [mm],

SN_{sg}: συνεισφορά του υπεδάφους,

$$SN_{sg} = 3,51 \log CBR - 0,85 (\log CBR)^2 - 1,43,$$

CBR: Καλιφορνιακός Δείκτης Φέρουσας Ικανότητας [%] με αντιπροσωπευτική τιμή (default value) 5%.

Μια τροποποιημένη έκφραση για το δείκτη SNC προτείνεται στα πλαίσια ανάπτυξης του HDM-4 που λαμβάνει υπόψη, πέραν των λοιπών παραμέτρων, και την επιρροή της ταχύτητας αποστράγγισης των στρώσεων αδρανούς υλικού του οδοστρώματος. Η παραπάνω σχέση γίνεται (N.D. Lee International, 1995)

$$SNC = 0,04 \sum a_i d_i h_i + SN_{sg} \quad (13)$$

όπου d_i: συντελεστής αποστράγγισης της στρώσης i

Η προσθήκη του συντελεστή d_i αφορά μόνο τις στρώσεις αδρανών (βάσης-υπόβασης) κι όχι τις ασφαλτικές στρώσεις (για τις οποίες στην παραπάνω σχέση λαμβάνεται d_i=1,0). Ο συντελεστής d_i λαμβάνει τιμές μεταξύ 1,40 (εξαιρετική ποιότητα αποστράγγισης και περιορισμένη διάρκεια κατά την οποία η στρώση είναι κορεσμένη από νερό) και 0,40

(πολύ κακή ποιότητα αποστράγγισης και εκτεταμένη διάρκεια κατά την οποία η στρώση είναι κορεσμένη από νερό).

Μια εναλλακτική σχέση της (11) για την πρόβλεψη της επιπεδότητας που έχει αναπτυχθεί με βάση την απόκλιση από την επίπεδη επιφάνεια (βύθιση) που μετρείται με τη δοκό Benkelman (DEF) αντί του τροποποιημένου δομικού αριθμού οδοστρώματος είναι:

$$RI(t) = \left[RI(o) + 0,0129DEF^{0,883}NE_4(t) \right] e^{0,0196t} \quad (14)$$

όπου DEF: βύθιση που μετρείται με τη δοκό Benkelman.

Η πρόβλεψη της επιπεδότητας με το μοντέλο αυτό είναι λιγότερο ικανοποιητική από ότι με το μοντέλο όπου χρησιμοποιείται ο τροποποιημένος δομικός αριθμός οδοστρώματος.

Εξέλιξη και πρόβλεψη της ολισθηρότητας

Το σημαντικότερο μοντέλο που περιγράφει την εξέλιξη της αντίστασης σε ολίσθηση για δύο τύπους αδρανών, ασβεστολιθικά και σκληρά αδρανή δίνεται παρακάτω το οποίο προέρχεται από τη μελέτη της FHWA (Paterson, 1987):

$$\text{Για κοινό ασβεστόλιθο:} \quad g(N) = 0,582 \cdot N^{0,574} \quad (15)$$

$$\text{Για σκληρά αδρανή:} \quad g(N) = 0,354 \cdot N^{0,383} \quad (16)$$

όπου

$g(N)$: συνάρτηση μείωσης της αντίστασης σε ολίσθηση με τη χρήση του οδοστρώματος που εξαρτάται από τον αριθμό ολίσθησης SN και την οριακή κατάσταση. Πχ. αν θεωρήσουμε ως οριακή κατάσταση αυτή για την οποία $S(N)=35$ για $g(N)=1$ τότε $g(N)=(SN_{αρχ}-SN_i)/(SN_{αρχ}-35)$,

SN: αριθμός ολίσθησης (εκφράζει την αντίσταση σε ολίσθηση για ταχύτητα 64 km/h),

N: αθροιστικός αριθμός οχημάτων, 10^6 /λωρίδα.

Σημειώνεται ότι ο αριθμός ολίσθησης SN=35 είναι περίπου ισοδύναμος με συντελεστή πλευρικής τριβής (sideways force coefficient, sfc) με τιμή 0,5-0,6.

2.3 Γενικευμένη μορφή μοντέλου επιδείνωσης της κατάστασης οδοστρωμάτων

Οι κύριοι παράγοντες έναρξης και εξέλιξης των φθορών οδοστρωμάτων είναι:

- Κυκλοφοριακά φορτία
- Περιβαλλοντικές συνθήκες
- Δομή οδοστρώματος
- Υποδιαστασιολόγηση στη φάση μελέτης
- Χρήση ακατάλληλων υλικών και κακοτεχνίες στην φάση κατασκευής
- Καθυστέρηση της κατασκευής των διαφόρων στρώσεων του ασφαλτοτάπητα

Πιο αναλυτικά, οι παράμετροι επιρροής που υπεισέρχονται στα μοντέλα πρόβλεψης της εξέλιξης της κατάστασης οδοστρωμάτων είναι:

- Ηλικία οδοστρώματος
- Ποιότητα υλικών (μέτρο ελαστικότητας) ασφαλικής στρώσης
- Ποιότητα υλικών (μέτρο ελαστικότητας) βάσης
- Ποιότητα υλικών (μέτρο ελαστικότητας) υπόβασης
- Ποιότητα (μέτρο ελαστικότητας ή CBR) εδάφους θεμελίωσης
- Πάχος ασφαλικής στρώσης
- Πάχος βάσης
- Πάχος υπόβασης
- Ύπαρξη νερού στις υποκείμενες στρώσεις
- Θερμοκρασία ατμόσφαιρας
- Κυκλοφοριακός φόρτος
- Ποσοστό βαρέων οχημάτων
- Ποιότητα (σκληρών) αδρανών
- Ποσοστό ασφάλτου
- Ποσοστό κενών
- Βροχόπτωση
- Παγετός

Στον Πίνακα 4 κωδικοποιούνται οι παράγοντες επιρροής στις επιμέρους φθορές του οδοστρώματος (Λουκέρη, 2004).

Πίνακας 4 Παράγοντες επιρροής φθορών εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Παράγοντες επιρροής	Ρηγματώσεις				Παραμορφώσεις				Από- σύνθεση		Ολισθη- ρότητα	
	Ρωγμές τύπου αλιγάτορα	Διαμήκειες ρωγμές	Εγκάρσιες ρωγμές	Ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων	Τοπικές καθιζήσεις	Τοπικές διογκώσεις	Αυλακώσεις	Επιδιορθώσεις (μπαλώματα)	Αποκόλληση αδρανών	Λακκούβες	Λείανση αδρανών	Ανάδυση ασφάλτου
Ποιότητα υλικών ασφαλτικής στρώσης	✓						✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ποιότητα υλικών βάσης	✓		✓		✓	✓	✓					
Ποιότητα υλικών υπόβασης	✓		✓		✓	✓	✓					
Ποιότητα εδάφους	✓		✓		✓	✓	✓					
Πάχος ασφαλτικής στρώσης	✓	✓	✓	✓					✓	✓		
Πάχος βάσης												
Πάχος υπόβασης												
Νερό στις υποκείμενες στρώσεις	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓		
Θερμοκρασία ατμόσφαιρας				✓	✓	✓	✓				✓	✓
Κυκλοφοριακός φόρτος	✓	✓	✓						✓	✓	✓	✓
Ποσοστό βαρέων οχημάτων	✓	✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓
Ποιότητα αδρανών											✓	✓
Ποσοστό ασφάλτου	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
Ποσοστό κενών	✓								✓	✓		
Βροχόπτωση	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓		
Παγετός	✓	✓	✓						✓	✓		

Ακολουθώντας τη δομή υπαρχόντων μοντέλων από τη βιβλιογραφία, όπως το MDOT (George 2000) και το HDM (Ekdahl 1994) που έχουν βασιστεί σε εκτενείς παρατηρήσεις πεδίου, μια γενική μορφή μοντέλων πρόβλεψης μεμονωμένων φθορών είναι:

$$DI = \alpha_0 AGE^{\alpha_1} MSN^{\alpha_2} TRAF^{\alpha_3} QUA^{\alpha_4} PSV^{\alpha_5} \quad (17)$$

Όπου

DI: δείκτης φθοράς,

AGE: ηλικία οδοστρώματος,

MSN: διαμορφωμένος αριθμός δομικής αντοχής οδοστρώματος,

TRAF: κυκλοφοριακός φόρτος,

QUA: ποιότητα κατασκευής, λαμβάνει τιμές σε μια βαθμονομημένη κλίμακα 0–10 (το 10 αντιστοιχεί σε καλή ποιότητα κατασκευής που καθυστερεί την έναρξη ή την εξέλιξη των φθορών) και προκύπτει από εμπειρική αποτίμηση της ποιότητας κατασκευής και ειδικότερα της καλής συμπύκνωσης (η ποιότητα κατασκευής εκτιμάται με βάση το ποσοστό ασφάλτου και το ποσοστό κενών τα οποία επιδρούν στην εξέλιξη της φθοράς ή υποβοηθούν την επίδραση του επιφανειακού νερού (βροχόπτωση) στην επιδείνωση της κατάστασης των οδοστρωμάτων),

PSV: ποιότητα αδρανών, αντίσταση σε στίλβωση των σκληρών αδρανών,

α_0 ως α_5 : σταθερές.

Μοντέλο επιπεδότητας

Ο δείκτης επιπεδότητας $DI_{\text{επιπ}}$ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$DI_{\text{επιπ}} = 7.584 AGE^{1.265} MSN^{-0.844} TRAF^{0.2185} QUA^{-0.253} \quad (18)$$

με τις επιμέρους παραμέτρους του μοντέλου να συνδέονται ως ακολούθως:

$$MSN = 0.0394 (b_1 d_1 + b_2 d_2 + b_3 d_3) + SNSG \quad (19)$$

$$b_1 = -8 \cdot 10^{-13} \text{psi}_{\text{asphalt}}^2 + 10^{-6} \text{psi}_{\text{asphalt}} + 0.0904 \quad (20)$$

$$\text{psi}_{\text{asphalt}} = 145 E_{\text{asphalt}} \quad (21)$$

$$b_2 = 0.249 \log(\text{psi}_{\text{base}} m_2) - 0.977 \quad (22)$$

$$\text{psi}_{\text{base}} = 145 E_{\text{base}} \quad (23)$$

$$b_3 = 0.277 \log(\text{psi}_{\text{subbase}} m_3) - 0.839 \quad (24)$$

$$\text{psi}_{\text{subbase}} = 145 E_{\text{subbase}} \quad (25)$$

$$\text{SNSG} = 3.51 \log(\text{CBR } m_4) - 0.85 [\log(\text{CBR } m_4)]^2 - 1.43 \quad (26)$$

$$\text{CBR} = E_{\text{subgrade}}/10 \quad (27)$$

$$\text{TRAF} = \text{AADT} \times \text{TR} \quad (28)$$

όπου

SNSG: ψευδοαριθμός για την συμβολή του εδάφους στην δομική αντοχή του οδοστρώματος,

CBR: California Bearing Ratio (%),

d_{11} πάχος στρώσης κυκλοφορίας [mm]

d_{12} πάχος συνδετικής στρώσης [mm]

d_{13} πάχος στρώσης βάσης [mm]

d_1 πάχος ασφαλτικής στρώσης [mm] ίσο με το άθροισμα $d_{11}+d_{12}+d_{13}$

d_2 : πάχος βάσης (mm),

d_3 : πάχος υπόβασης (mm),

E_{asphalt} : μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης (MPa),

E_{base} : μέτρο ελαστικότητας βάσης (MPa),

E_{subbase} : μέτρο ελαστικότητας υπόβασης (MPa),

E_{subgrade} : μέτρο ελαστικότητας εδάφους θεμελίωσης (MPa),

m_2 : μειωτικός παράγοντας λόγω παρουσίας υπόγειου νερού στη βάση (%),

m_3 : μειωτικός παράγοντας λόγω παρουσίας υπόγειου νερού στην υπόβαση (%),

m_4 : μειωτικός παράγοντας λόγω παρουσίας υπόγειου νερού στο έδαφος (%),

AADT: ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία (annual average daily traffic) σε οχήματα/ημέρα/λωρίδα (veh/day/lane),

TR: ποσοστό βαρέων οχημάτων (φορτηγά, λεωφορεία κ.λ.π.) (%).

AGE: ηλικία οδοστρώματος, εκφράζει το χρόνο που έχει παρέλθει από την τελευταία ανακατασκευή ασφαλτικών στρώσεων/οδοστρωσίας (μεταβλητή προβλήματος)

MSN: διαμορφωμένος αριθμός δομικής αντοχής οδοστρώματος,

TRAF: κυκλοφοριακός φόρτος,

QUA: ποιότητα κατασκευής, λαμβάνει τιμές σε μια βαθμονομημένη κλίμακα 0–10 (το 10 αντιστοιχεί σε καλή ποιότητα κατασκευής, το 0 σε κακή).

Ο δείκτης επιπεδότητας $DI_{\text{επιπ}}$ είναι καθαρός αριθμός και λαμβάνει τιμές 0 – 100 όπου το 0 εκφράζει την άριστη κατάσταση (καμία εμφάνιση φθοράς) και 100 τη χειρίστη κατάσταση (μέγιστη σοβαρότητα της φθοράς, αστοχία οδοστρώματος). Η συσχέτιση του δείκτη με άλλους δείκτες επιπεδότητας δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$PCI = 100 - DI_{\text{επιπ}} \text{ (καθαρός αριθμός, τιμές από } 100 - 0) \quad (29)$$

$$IRI = 0,15 \times (100 - PCI) \text{ (καθαρός αριθμός, τιμές από } 0 - 15) \quad (30)$$

Μοντέλο ολισθηρότητας

Ο δείκτης ολισθηρότητας $DI_{\text{ολισθ}}$ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$DI_{\text{ολισθ}} = 927 \text{ AGE}^{1.107} \text{ MSN}^{-0.926} \text{ TRAF}^{0.354} \text{ QUA}^{-0.530} \text{ PSV}^{-0.909} \quad (31)$$

με τις επιμέρους παραμέτρους του μοντέλου να συνδέονται ως ακολούθως:

$$\text{MSN} = 3.94 b_1 + 5.213 \quad (32)$$

$$b_1 = -8 \cdot 10^{-13} \text{ psi}_{\text{asphalt}}^2 + 10^{-6} \text{ psi}_{\text{asphalt}} + 0.0904 \quad (33)$$

$$\text{psi}_{\text{asphalt}} = 145 E_{\text{asphalt}} \quad (34)$$

$$\text{TRAF} = \text{AADT} \times \text{TR} \quad (35)$$

όπου

E_{asphalt} : μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης (MPa),

AADT: ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία (annual average daily traffic) σε οχήματα/ημέρα/λωρίδα (veh/day/lane),

TR: ποσοστό βαρέων οχημάτων (φορτηγά, λεωφορεία κ.λ.π.) (%).

AGE: ηλικία οδοστρώματος, εκφράζει το χρόνο που έχει παρέλθει από την τελευταία ανακατασκευή ασφαλτικών στρώσεων/οδοστρωσίας (μεταβλητή προβλήματος)

MSN: διαμορφωμένος αριθμός δομικής αντοχής οδοστρώματος,

TRAF: κυκλοφοριακός φόρτος,

QUA: ποιότητα κατασκευής, λαμβάνει τιμές σε μια βαθμονομημένη κλίμακα 0–10 (το 10 αντιστοιχεί σε καλή ποιότητα κατασκευής, το 0 σε κακή),

PSV: ποιότητα αδρανών, αντίσταση σε στίλβωση των σκληρών αδρανών,

Ο δείκτης ολισθηρότητας $DI_{ολισθ}$ είναι καθαρός αριθμός και λαμβάνει τιμές 0 – 100 όπου το 0 εκφράζει την άριστη κατάσταση (αντιολισθηρό οδόστρωμα) και 100 τη χειρίστη κατάσταση (εντελώς ολισθηρό οδόστρωμα). Η συσχέτιση του δείκτη με άλλους δείκτες επιπεδότητας δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$SN = 100 - DI_{ολισθ} \text{ (καθαρός αριθμός, τιμές από } 100 - 0) \quad (36)$$

Στον Πίνακα 5 παρατίθενται ενδεικτικές τιμές των (κύριων) παραμέτρων που υπεισέρχονται στα παραπάνω μοντέλα.

Πίνακας 5 Τυπικές τιμές των παραμέτρων εφαρμογής

Πάχος στρώσεων (mm)			
	Ελάχιστο	Μέσο	Μέγιστο
Ασφαλτική στρώση	50	150	300
Βάση	100	150	200
Υπόβαση	100	200	300
Έδαφος	-	-	-
Μέτρο ελαστικότητας στρώσεων (MPa)			
	Ελάχιστο	Μέσο	Μέγιστο
Ασφαλτική στρώση	1600	2500	3400
Βάση	200	450	700
Υπόβαση	200	450	700
Έδαφος	30	80	130
Μειωτικός συντελεστής μέτρου ελαστικότητας λόγω παρουσίας υπόγειου νερού			
	Ελάχιστο	Μέγιστο	
m_2 (Βάση)	0.83	1	
m_3 (Υπόβαση)	0.83	1	
m_4 (Έδαφος)	0.8	1	
Κυκλοφοριακός φόρτος			
	Ελάχιστο	Μέσο	Μέγιστο
AADT (οχημ/λωρ)	1.000	5.500	10.000
Ποσοστό βαρέων οχημάτων	10%	30%	50%
Δείκτης αντίστασης σε στίλβωση σκληρών αδρανών (PSV)			
	Ελάχιστο	Μέσο	Μέγιστο
PSV	26	48	70
Ποιότητα κατασκευής			
	Ελάχιστο	Μέγιστο	
QUA	0	10	

3 Επιρροή κατάστασης οδοστρώματος στα λειτουργικά χαρακτηριστικά οδού και οχημάτων

3.1 Επιρροή κατάστασης οδοστρώματος στις επιπτώσεις των οδικών έργων

Η επιρροή της κατάστασης του οδοστρώματος (επιπεδότητα – ολισθηρότητα) στις επιπτώσεις μιας οδού εξαρτάται από το μέσο επίπεδο κατάστασης και το ύψος της επίπτωσης ανά μονάδα υποβάθμισης της κατάστασης (π.χ., μείωση της ταχύτητας κίνησης για επιδείνωση της επιπεδότητας IRI κατά μία μονάδα). Ο καθορισμός του είδους, του τρόπου και του μεγέθους επιρροής της κατάστασης του οδοστρώματος στις επιπτώσεις μιας οδού είναι δύσκολος και οι σχετικές ερευνητικές προσπάθειες περιορισμένες. Στα πλαίσια της ανάπτυξης του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν εκτιμήσεις των επιπτώσεων της επιπεδότητας του οδοστρώματος στην/στα:

- ταχύτητα οχημάτων,
- κόστος χρήστη (κόστος συντήρησης κόστος υποτίμησης οχημάτων),
- κατανάλωση καυσίμου,
- ατυχήματα

ενώ της ολισθηρότητας στα:

- ατυχήματα.

Ενδεικτικές μοναδιαίες τιμές επιρροής των παραμέτρων κατάστασης οδοστρώματος στις επιπτώσεις οδού που αναφέρθηκαν παραπάνω δίνονται στον Πίνακα 6.

Το Σχήμα 2 δείχνει πως διαφοροποιείται η ταχύτητα διαφόρων τύπων οχημάτων καθώς μεταβάλλεται η επιπεδότητα του οδοστρώματος (εκφρασμένη σε μονάδες IRI).

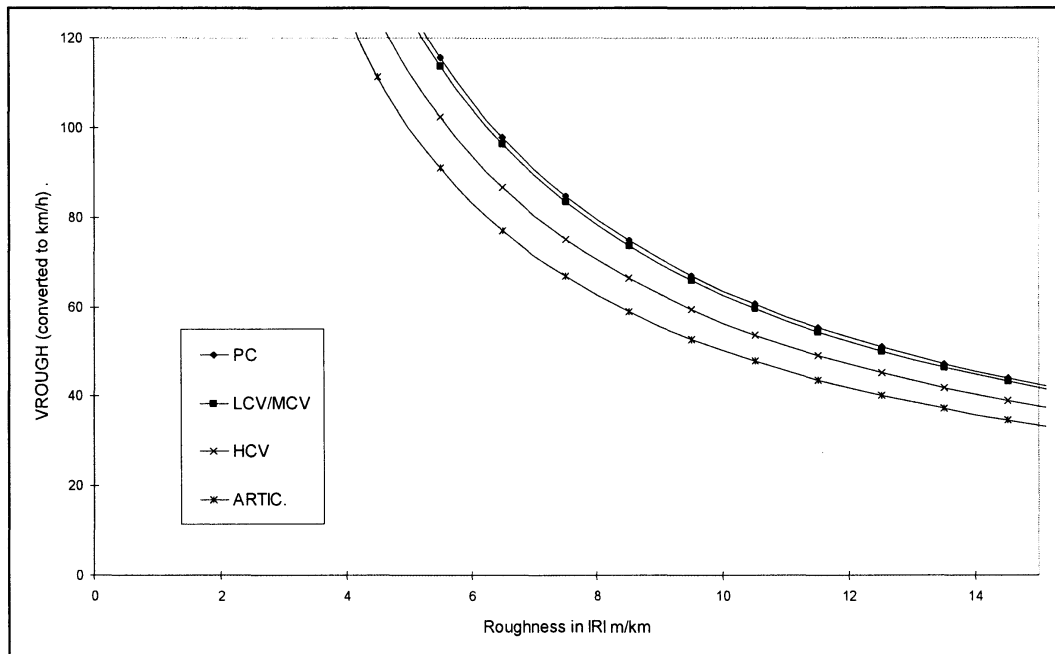
Το Σχήμα 3 παρουσιάζει την επιρροή της επιπεδότητας του οδοστρώματος στην κατανάλωση ανταλλακτικών συντήρησης των οχημάτων για την περίπτωση ελαφρών οχημάτων.

Το Σχήμα 4 παρουσιάζει την επιρροή της επιπεδότητας του οδοστρώματος στον χρόνο απασχόλησης για συντήρηση των οχημάτων για διάφορες κατηγορίες οχημάτων.

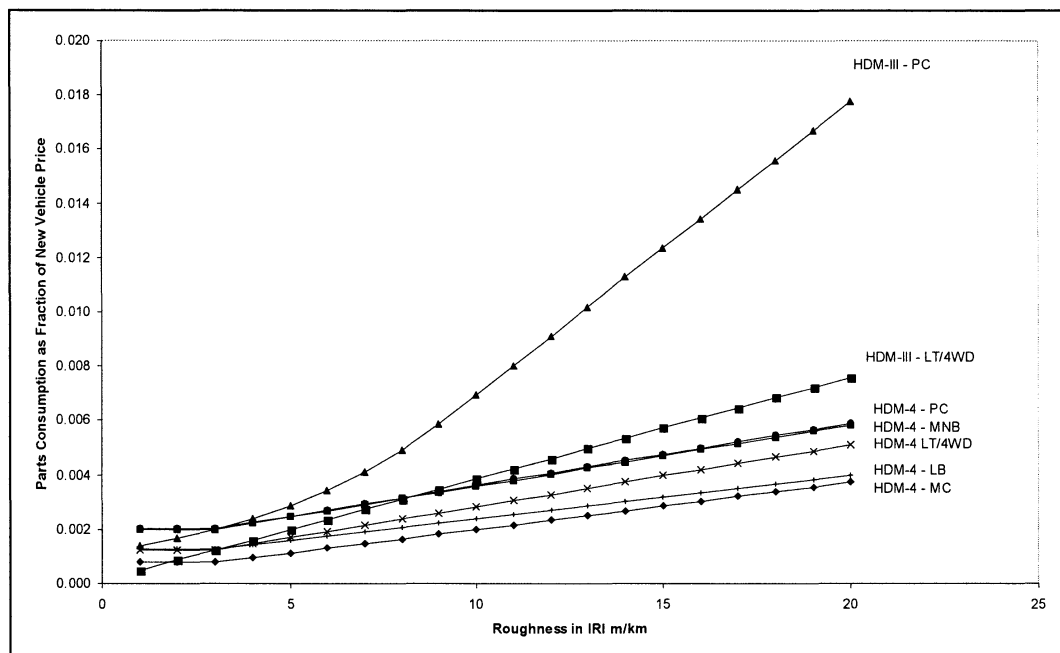
Το Σχήμα 5 απεικονίζει μια εκτίμηση του αναμενόμενου χρόνου χρήσης ενός οχήματος όταν χρησιμοποιείται σε οδούς με δεδομένο IRI ως ποσοστό του χρόνου που το αντίστοιχο όχημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε εντελώς επίπεδο οδόστρωμα (χαμηλή τιμή IRI).

Πίνακας 6 Ενδεικτικές τιμές επιρροής της επιπεδότητας οδού στις διάφορες συνιστώσες του κόστους κύκλου ζωής της οδού

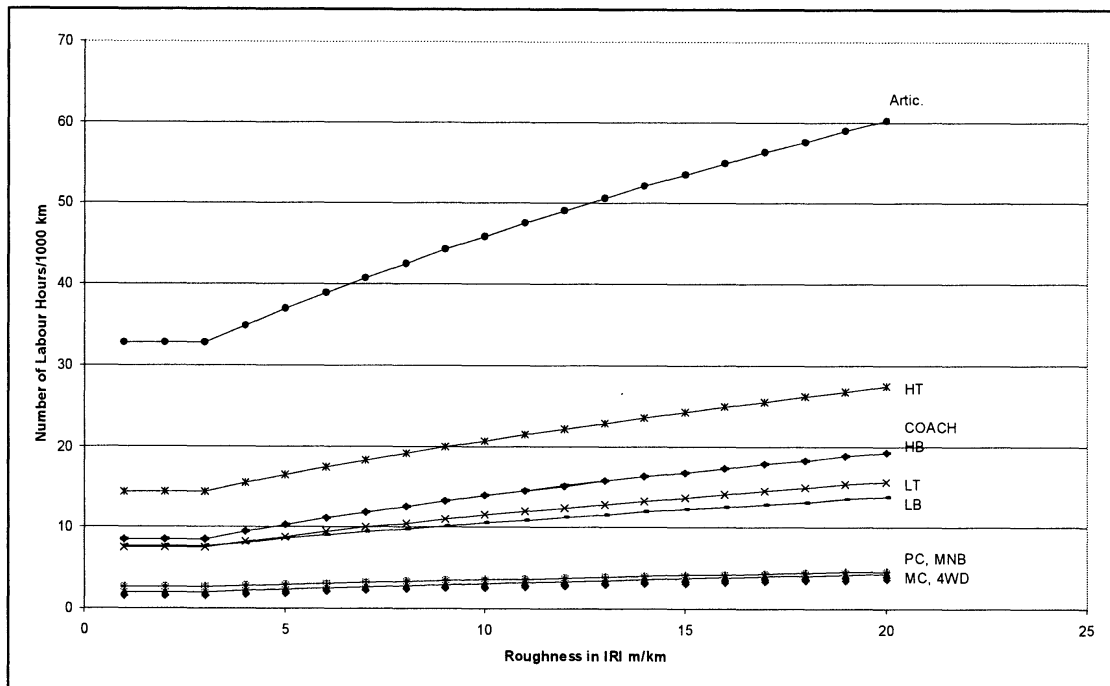
Επιρροή επιπεδότητας σε	Ενδεικτικές τιμές και μονάδες μέτρησης	Πηγές βιβλιογραφίας
Ταχύτητα οχημάτων	Μείωση ταχύτητας κατά 0,60 – 2,50 km/h ανά μοναδιαία αύξηση του IRI (m/km)	Geipot (1982), Morosiuk and Abaynayaka (1982), CRRI (1982), Watanatada (1981)
Ταχύτητα οχημάτων	Αν για IRI= 4 m/km η ταχύτητα είναι 120 km/h, για IRI= 14 m/km η αναμενόμενη ταχύτητα είναι 50 km/h	Bennett and Greenwood (2001)
Κατανάλωση καυσίμου	Αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 0,3 – 0,6% ανά μοναδιαία αύξηση του IRI (m/km)	Chesher and Harrison (1987), IRC (1993)
Κατανάλωση ανταλλακτικών συντήρησης οχημάτων	Κόστος ανταλλακτικών ως προς την αξία καινούριου αυτοκινήτου 0 – 0,1% ανά μοναδιαία αύξηση του IRI (m/km)	Bennett and Greenwood (2001)
Εργατοώρες εργασίας συντήρησης οχημάτων	Αύξηση των εργατοωρών εργασίας συντήρησης οχημάτων 0 – 2 ώρες ανά 1000 km μετακινήσεων και ανά μοναδιαία αύξηση του IRI (m/km)	Bennett and Greenwood (2001)
Χρήσιμη ζωή οχήματος	Μείωση της χρήσιμης ζωής του οχήματος κατά 2% ανά μοναδιαία αύξηση του IRI (m/km)	Bennett and Greenwood (2001)
Ετήσια απόσβεση οχημάτων	Αύξηση του κόστους απόσβεσης κατά 5% ανά μοναδιαία αύξηση του IRI (m/km)	Bennett and Greenwood (2001)
Κόστος χρήστη οχήματος	Αύξηση του κόστους χρήστη κατά 25% για μεταβολή του IRI από 1,2 σε 2,7 m/km	Barnes and Langworthy (2003)



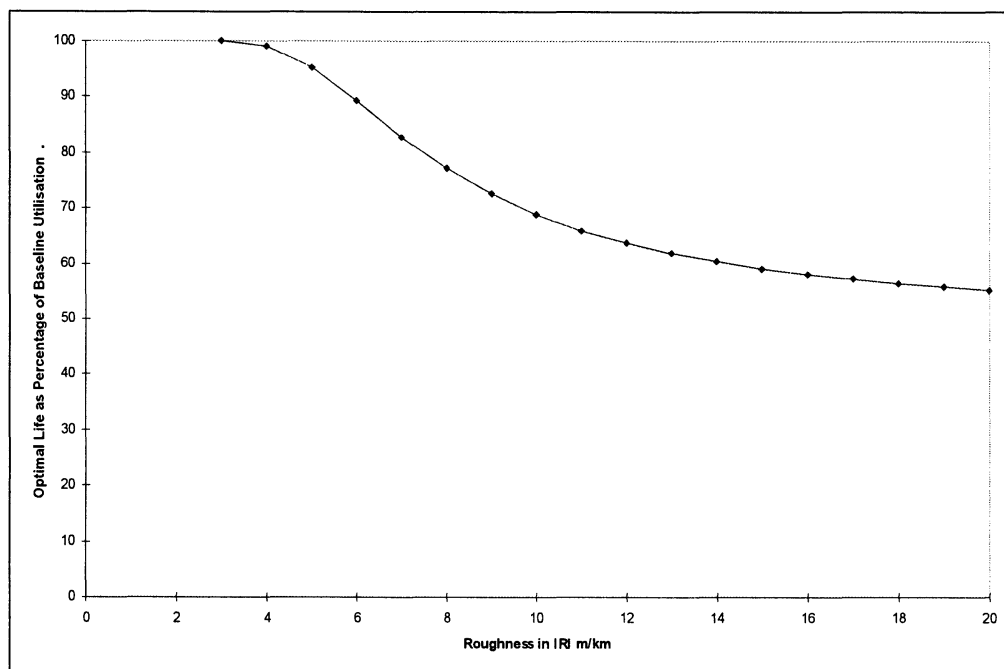
Σχήμα 2 Επιρροή επιπεδότητας οδοστρώματος στην ταχύτητα κυκλοφορίας (Bennett and Greenwood, 2001)



Σχήμα 3 Επιρροή επιπεδότητας οδοστρώματος στην κατανάλωση ανταλλακτικών συντήρησης οχημάτων: Ελαφρά οχήματα (Bennett and Greenwood, 2001)



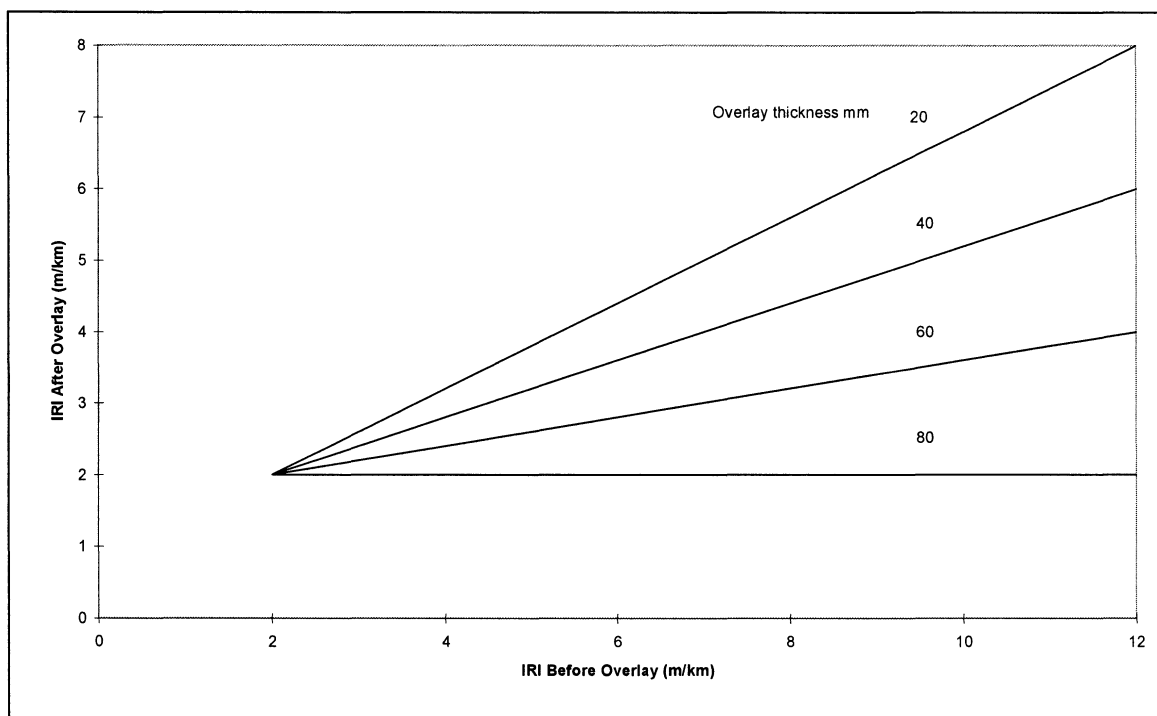
Σχήμα 4 Επιρροή επιπεδότητας οδοστρώματος στις εργατώρες εργασίας για συντήρηση οχημάτων (Bennett and Greenwood, 2001)



Σχήμα 5 Επιρροή επιπεδότητας οδοστρώματος στη χρήσιμη ζωή οχήματος (Bennett and Greenwood, 2001)

3.2 Εκτίμηση της μεταβολής του IRI μετά από συντήρηση

Ακόμα και σε ένα καινούριο οδόστρωμα με υψηλή ποιότητα κατασκευής υπάρχουν μικρές ανωμαλίες όσον αφορά στην επιπεδότητα. Ως αποτέλεσμα, ο δείκτης IRI σε τέτοιες περιπτώσεις δεν είναι μηδενικός αλλά έχει τιμές μεταξύ 1 και 2 m/km. Η εφαρμογή κάποιας ουσιαστικής (από την άποψη αποτελεσματικότητας) παρέμβασης συντήρησης (όπως π.χ., οι επιστρώσεις) αναμένεται να μειώσει σημαντικά το δείκτη IRI σε σχέση με την προτέρα κατάσταση, αλλά όχι να προσεγγίσει τιμές ιδανικής κατάστασης. Στο Σχήμα 7 δίνεται μια εκτίμηση της βελτίωσης του δείκτη IRI ενός οδοστρώματος μετά την εφαρμογή επιστρώσεων διαφόρων παχών. Όπως αναμένεται, η βελτίωση είναι μεγαλύτερη όσο χειρότερη είναι η επιπεδότητα πριν την παρέμβαση κι όσο μεγαλύτερο πάχος έχει η επίστρωση.



Σχήμα 7 Βελτίωση επιπεδότητας οδοστρώματος μετά από εφαρμογή επιστρώσεων (N.D. Lee International, 1995)

Το παρόν φυλλάδιο περιλαμβάνει αποσπάσματα από τις τεχνικές εκθέσεις ερευνητικού έργου με τίτλο:

ΚΑΤΟΨΗ - Καθορισμός βέλτιστων πρακτικών και ανάπτυξη συστήματος στήριξης αποφάσεων κατασκευής οδών υψηλών προδιαγραφών με στόχο τη βέλτιστη λειτουργικότητα και απόδοση στον κύκλο ζωής τους (2006-2009)

ΕΡΓΟ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΤΟ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ 2000-2006, ΜΕΤΡΟ 3.4 «ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ»

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AASHTO (1990). "AASHTO Guidelines for Pavement Management Systems." American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO (1993). "AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C. : The associations
- AASHTO (2001). "Chapter 4, Data Collection", AASHTO Guidelines for Pavement Management Systems, July 1990, American Associations of State Highway and Transportation Officials, Suite 249, Washington, D.C
- Adrei A., D. Adrei, and M. Aceves (2000). "Conception and development of an evolutionary algorithm for predicting road distress", Computational Intelligence Applications in Pavement and Geomechanical Systems, pp. 147-151
- Al –Omari B., and M.I. Darter (1995). "Effect of pavement deterioration types on IRI and rehabilitation", Transportation Research Record, No.1505, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 57-65
- Archila A.R., and S. Madanat (2001). "Estimation of rutting models by combining data from different sources", Journal of Transportation Engineering, September October 2001
- Archila A.R., and S. Madanat, "Statistical model of pavement rutting in asphalt concrete mixes", Transportation Research Record, No. 1764, TRB, National Research Council, Washington, D.C., paper No. 01-0128, pp. 70-77
- Asphalt Institute (1977). "A Pavement Rating System for Low-Volume Roads." Asphalt Institute, Information Series IS 169.
- ASTM (1997 α). "Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys." ASTM D 5340-93, Vol. 04, section 04.03, PA.
- ASTM (1997 β). "Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures." ASTM D 3515-96, Vol. 04, section 04.03, PA.
- Barnes G. and Langworthy P. (2003). "The per-mile costs of operating automobiles and trucks", Technical Report No MN/RC 2003-19, University of Minnesota.
- Bennett C., Greenwood I. (2001). "Modelling road user and environmental effects in HDM-4, Volume Seven", The Highway Development and Management Series.
- Breiman L., and J.H. Friedman (1985). " Estimating optimal transformations for multiple regression and correlation (with discussion)", Journal of the American Statistical Association, Vol.80, pp. 580-619

- Carey, W.N.Jr. and Irick, P.E. (1960). "The Pavement Serviceability-Performance Concept." *Highway Research Board Bulletin*, No. 250, 40-58.
- Carnahan J.V., W.J. Davis, and M.Y. Shanin (1987). "Optimal maintenance decisions for pavement management", *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol. 113, No.5, pp. 554-572
- Chassiakos, A.P., Panos, G. and Theodorakopoulos, D.D. (2006). "A knowledge-based system for pavement management", 5th International Conference on Engineering Computational Technology, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, B.H.V. Topping, G. Montero and R. Montenegro (editors), Civil-Comp Press.
- Chassiakos, A.P., Vagiotas P. and Theodorakopoulos, D.D. (2005) "A knowledge-based system for maintenance planning of highway concrete bridges", *Advances in Engineering Software*, 36, pp. 740-749.
- Cheetham A. (1994). "Pavement performance prediction models", Prepared for Fifth Annual South Eastern State Pavement and Design Conference, Nashville, Tennessee, July 1994
- Chesher A.D. and Harrison R. (1987). "Vehicle operating costs: Evidence from developing countries". World Bank Publications, John Hopkins Press.
- CRRI (1982). "Road user cost study in India". Central Road Research Institute, New Delhi.
- Darter M.I. (1980). "Requirements for reliable predictive pavement models", *Transportation Research Record*, No. 766, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 25-31
- Darter M.I., and W.R. Hudson (1973). "Probabilistic design concepts applied to flexible pavement system design", Center for Highway Research, Texas University, USA, pp. 202
- Dewan S.A., and Smith R.E (2002). "Estimating International Roughness Index from pavement Distresses to calculate vehicle operating costs for the San Francisco Bay area", *Transportation Research Record* 1816, pp. 65-72
- Dwivedi M., "An introduction to fuzzy logic control and modeling", Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Kampur, India
- Ekdahl P. (1994). "A sensitivity test of two deterioration models for flexible pavements", Department of Technology and Society, Lund Institute of Technology, Lund University, ISRN LUTVDG/(TVVB-1002) 1-127/1994, Bulletin 9
- FHPM, Highway Safety Program, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration

- FHWA (1991). "Using pavement performance data to develop mechanistic-empirical concepts for deteriorated and rehabilitated pavements – interim report", Contract No. DTF61-90-2-00011, Federal Highway Administration, Washington, D.C., Sept. 1991
- FHWA (2001). FHWA Traffic Monitoring Guide, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration
- Fulop I.A., I.Bogardi, A. Gulyas, and M. Csicsely-Tarpay (2000). "Use of friction and texture in pavement performance modeling", *Journal of Transportation Engineering*, May/ June 2000
- Geipot (1981). "Research on the interrelationships between costs of highway construction, maintenance and utilisation: Final report on Brazil-UNDP Highway Research Project" (12 Volumes), Brasilia, Brazil.
- George K.P. (2000). "MDOT Pavement Management System: Prediction models and feedback system", The University of Mississippi, October 2000
- George K.P., A.S. Rajagonal, and L.K. Lim (1989). "Models predicting pavement deterioration", *Transportation Research Record*, No. 1215, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 1-7
- Gramling, W.L. (1994). "Current Practices in Determining Pavement Condition." *NCHRP Synthesis of Highway Practice*, No. 203, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC.
- Haas, R., Hudson, W. R. and Zaniewski, J. (1994). "Modern Pavement Management." Krieger Publishing Company, Malabar, FL.
- Haugodegard T., Johansen J., Bertelsen D. and Gabestad K. (1994). "Norwegian Public Roads Administration: A complete pavement management system in Operation", *Proceedings, Third International Conference on Managing Pavements*, Vol. 2, San Antonio, Texas.
- Hedfi A., and P. Stephanos PE, "Pavement performance modeling: An applied approach at the state of Maryland", *Fifth International Conference on Managing Pavements*, August 11-14 2001, Seattle, Washington USA, paper ID: 175
- IRC (1993). "Manual on economic evaluation of highway projects in India". IRC Special Publication 20, Indian Roads Congress, New Delhi.
- Jackson N.C., R. Deighton, and D.L. Huft (1996). "Development of pavement performance curves for individual distress indexes in South Dakota on expert opinion", *Transportation Research Record*, No. 1524, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 130-136
- Karan M.A., T.S. Christison, A. Cheetham, and G. Berdahl (1983). "Development and implementation of Alberta's pavement information and needs system", *Transportation Research Record*, No. 938, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 11-20

- Kathleen T. H., Y.-H. Lee, M.I. Darter, and D. L. Lippert (1994). "Forecasting pavement rehabilitation needs for Illinois interstate Highway system", Transportation Research Record, No. 1455, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 116-122
- Lee Y. – H., and M. I. Darter (1995). "Development of performance prediction models for Illinois continuously reinforced concrete pavements", Transportation Research Record, No. 1505, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 75-84
- Lou Z., J.J. Lu, and M. Gunaratne (1997). "Road surface crack condition forecasting using neural network models", Transportation Program, Development of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, Tampa, Florida, Sponsored by Florida Department Of Transportation, 1997
- Loukeri, E.D. and Chassiakos, A.P. (2004). "Development of Pavement Performance Models using Fuzzy Systems", Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Computational Technology, Lisbon, Portugal, paper 129.
- Lytton R.L., C.H. Michalak, and T. Scullion (1982). "The Texas flexible pavement design system", Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Proceedings, Vol. 1, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, August 23-26 1982, pp. 131-141
- Morosiuk G. and Abaynayaka S.W. (1982). "Vehicle operating costs in the Caribbean: An experimental study of vehicle performance". TRRL Laboratory Research 1056. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- N.D. Lee International (1995). "Modelling road deterioration and maintenance effects in HDM-4", International Study of Highway Management and Development Tools, RETA 5549-REG Highway Development and Management Research, Final Report prepared for Asian Development Bank.
- Ningyuan L., Kazmierowski T., Tighe S., and Haas R. (2000). "Integrating dynamic performance prediction models into pavement management maintenance and rehabilitation programs"
- Papagiannakis A.T. and Delwar M. (1999). "Methodology to improve pavement investment decisions", Final report to National Cooperative Highway Research Program for Study 1-33, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Papagiannakis A.T. and Delwar M. (2000). "Methodology to improve pavement investment decisions", Research Results Digest No 246, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Papagiannakis A.T. and Delwar M. (2001). "Computer model for life-cycle cost analysis of roadway pavements", ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 152-156.
- Paterson W.D.O. (1986). "International Roughness Index: Relationship to other measures of roughness and riding quality" Transportation Research Record 1084, pp. 49-58.

- Paterson, W.D.O. (1987). "Road Deterioration and Maintenance Effects. Models for Planning and Management." The Highway Design and Maintenance Standard Series, Published for the World Bank, The John Hopkins University Press, Baltimore, MD.
- Prozzi J.A. (2001). "Modeling pavement performance by combining field and experimental data", Engineering – Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, Fall 2001
- Queiroz C.A.V., "A mechanistic analysis of asphalt pavement performance in Brazil", Journal of Association of Asphalt Paving Technology, V. 52-83, pp. 474-488
- Queiroz C.A.V., and W.R. Hudson (1982). "Improved pavement performance relationships in Brazil", Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Proceedings, Vol. 1, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, August 23-26 1982, pp. 500-510
- Sayers, M. W. and Karamihas, S.M (1997). "The Little Book of Profiling, Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles." University of Michigan Transportation Research Institute, <http://www.umtri.umich.edu>.
- Shahin, M. Y. (1998). "Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots." 3rd Printing, Kluwer Academic Publishers, MA.
- Sharaf A.E. and Fathy Mandeel M (1998). "An analysis of the impact of different priority setting techniques on network pavement condition", Proceedings 4th International Conference on Managing Pavements, Vol. 1, Durban, South Africa
- Shekharan Raja A. (2000). "Solution of pavement deterioration equations by genetic algorithms", Transportation Research Record, No. 1699, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.101-106
- Sood V.K., B.M. Sharma, P.K. Kanchan, and K. Sitaramanjaneyulu (1994). "Pavement deterioration modeling in India", Third International Conference on Managing Pavements Conference Proceedings, Vol.1, 1994, pp. 47-54
- Swan D.J., Hajek J.J., Hein D.K. and Jacques B. (2007) "Estimation of representative capital and maintenance costs for Canadian roads", Transportation Research Record No 1991, pp. 3-11.
- Uzan L., and R. L. Lytton (1982). "Structural design of flexible pavements: a simple predictive system", Transportation Research Record, No. 888, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 56-63
- Watanatada T. (1981). "Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM): Model description and user's manual – Release II". Transportation, Water and Telecommunications Department Report, the World Bank, Washington, D.C.
- Yang J., J.J. Lu, and M. Gunaratne (2003). "Application of neural network models for forecasting of pavement crack index and pavement condition rating", Transportation

Program, Development of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, March 2003

- Zaniewski L.P., R.W. Perera, and M.S. Mamlouk (1990). "Feedback of pavement management performance data for pavement design", Transportation Research Record, No. 1272, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 74-79
- ΑΝΟΔΟΣ (2001). "Σχεδιασμός Προτύπων Φθορών – Προσδιορισμός Βελτιωτικών Παρεμβάσεων", Έκθεση ερευνητικού προγράμματος "Ανάπτυξη Συστήματος για τη Βέλτιστη Διαχείριση ΠΟρων Συντήρησης ΟΔΟΣτρωμάτων Οδικών Δικτύων", Εργαστήριο Συγκοινωνιακών Έργων Πανεπιστημίου Πατρών.
- Βαγιώτας, Π.Α. (2002). «Ανάπτυξη έμπειρου συστήματος διαχείρισης γεφυρών οδικού δικτύου», Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
- Κανελλαΐδης, Γ. (1986). "Φθορές στα Εύκαμπτα Οδοστρώματα των Δρόμων." Τεχνικά Χρονικά Α, Τομ. 6 (1), 103-129.
- Κανελλαΐδης, Γ. (1990). "Αξιολόγηση της Επιφανειακής Κατάστασης των Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων Οδών με Χρήση Υποκειμενικών Εκτιμήσεων." Τεχνικά Χρονικά Α, Τομ. 10, Τεύχ. 2, σελ. 27-46.
- Λουκέρη Ε., Χασιακός Α. και Θεοδωρακόπουλος Δ. (2005). «Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης φθορών εύκαμπτων οδοστρωμάτων με τη χρήση έμπειρων ασαφών συστημάτων», Πρακτικά: 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος.
- Λουκέρη, Ε.Δ. (2004). «Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης φθορών εύκαμπτων οδοστρωμάτων με τη χρήση ασαφών συστημάτων», Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
- Νικολαΐδης, Α. (1996). "Οδοποιία Οδοστρώματα – Υλικά Έλεγχος Ποιότητας." Εκδόσεις Μ. Τριανταφύλλου & Σία, Πρώτη έκδοση, Θεσσαλονίκη.
- Νικολαΐδης, Α.Φ., Ευαγγελίδης, Δ. και Μήντης, Γ. (1992). "Διαχείριση Προβλήματος Συντήρησης Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων με την Βοήθεια Η/Υ" 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ασφαλτοσκυροδέματος και Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων, Θεσσαλονίκη, σελ. 467-482.
- Πάνος Γ (2002). "Ανάπτυξη έμπειρου συστήματος για τη διαχείριση οδοστρωμάτων", Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2002