

Προκαταρκτική Αξιολόγηση Προσομοίωσης Συμπεριφοράς Οδοστρωμάτων στο Πλαίσιο Συστημάτων Διαχείρισής τους

Α. ΛΟΪΖΟΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Λ. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Η εργασία επικεντρώνεται στα προσομοίωματα συμπεριφοράς οδοστρωμάτων στο πλαίσιο Συστημάτων Διαχείρισης Οδοστρωμάτων (Σ.Δ.Ο.), με σκοπό την προσπάθεια για προκαταρκτική αξιολόγηση και συγκριτική ανάλυσή τους. Λεδομένης της αναγκαιότητας χρήσης τους στη διαχείριση των οδικών δικτύων, μέσα από αυτήν τη διερεύνηση προβάλλονται διάφορα προβλήματα και οδυναμίες που αντά τα συστήματα παρουσιάζουν τόσο σε ολοκληρωμένο επίπεδο μέσω μιας συγκριτικής ανάλυσης των τελικών προϊόντων τριών Σ.Δ.Ο., των PERS, HDM-4 και RIMS, όσο και σε επίπεδο προσομοιωμάτων μέσω συγκριτικών αναλύσεων προσομοιωμάτων ρήγμάτων και ομαλότητας. Τα αποτέλεσματα των αναλύσεων αντάνευν φανερώνουν την ανάγκη να προϋπάρχει άμεση και συστηματική συλλογή στοιχείων σχετικών με τα οδοστρώματα, ώστε να καταστεί δυνατή η απαραίτητη εξέλιξη και προσαρμογή των Σ.Δ.Ο. στις ελληνικές συνθήκες και να μπορούν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά και στην Ελλάδα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δεδομένου ότι ένα σημαντικό μέρος των προγραμματισμένων οδικών έργων στην Ελλάδα έχει ήδη κατασκευαστεί, καθίσταται σαφής η ανάγκη συντήρησης των οδοστρωμάτων τους, μια διαδικασία που, ενώ στις περισσότερες χώρες της Ε.Ε., τις Η.Π.Α. κ.ά. δίνεται ιδιαίτερη σημασία αξιολογώντας την αυστηρά, μέχρι σήμερα στην Ελλάδα η κατάσταση είναι διαφορετική.

Πιο συγκεκριμένα, η συνήθης πολιτική της επέμβασης στα οδοστρώματα μόνον όταν η φθορά/αστοχία στην επιφάνειά τους είναι πλέον γεγονός, δεν επαρκεί καθ' ότι σύμφωνα με σχετικές μελέτες και έρευνες [1, 2, 3] και όπως φαίνεται στα διαγράμματα 1 και 2, παρουσιάζει σημαντικό επιπλέον κόστος έως 2 και 3 φορές μεγαλύτερο, εξαιτίας της εκθετικής εξέλιξης της φθοράς στο χρόνο [4]. Με τη χρήση Σ.Δ.Ο. επιτυγχάνεται η:

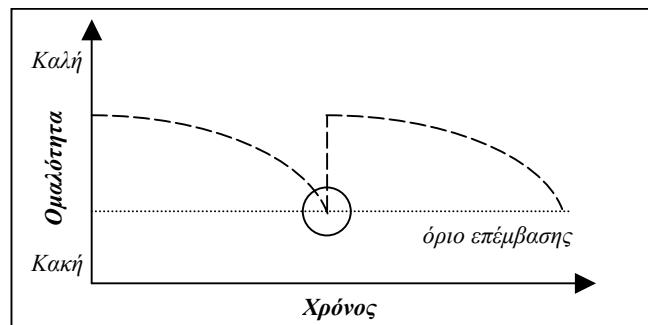
- Οργάνωση των οδικών και δικτύων μέσω μιας ισχυρής βάσης δεδομένων. Οι αρμόδιες υπηρεσίες δύνανται να γνωρίζουν για κάθε οδικό τμήμα τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, την κατάσταση και κυκλοφορία του οδοστρώματος και το είδος των κυκλοφορούντων οχημάτων.
- Πρόβλεψη της εξέλιξης της φθοράς των οδοστρωμάτων

Υποβλήθηκε: 9.9.2004 Εγινε δεκτή: 12.5.2005

σε βάθος χρόνου. Επομένως υπάρχει πλέον η δυνατότητα για έγκαιρη και προληπτική επέμβαση.

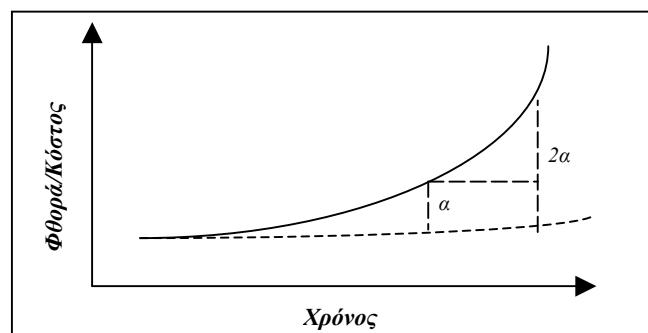
- Αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων συντήρησης για το σύνολο των οδικών δικτύων, με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης, στο πλαίσιο του κύκλου ζωής του οδοστρώματος.

Τα παραπάνω συντελούν σε θεαματική μείωση του κόστους συντήρησης (έως και 65%) αλλά και σε δυνατότητα επιστημονικά τεκμηριωμένης απαίτησης κονδυλίων [2].



Διάγραμμα 1: Ρυθμός εξέλιξης φθοράς οδοστρωμάτων στο χρόνο, πηγή: [1].

Diagram 1: Pavement deterioration rate against time, source: [1].



Διάγραμμα 2: Σχέση φθοράς/κόστους συντήρησης και χρόνου, πηγή: [1].

Diagram 2: relation between deterioration/maintenance costs and time, source: [1].

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

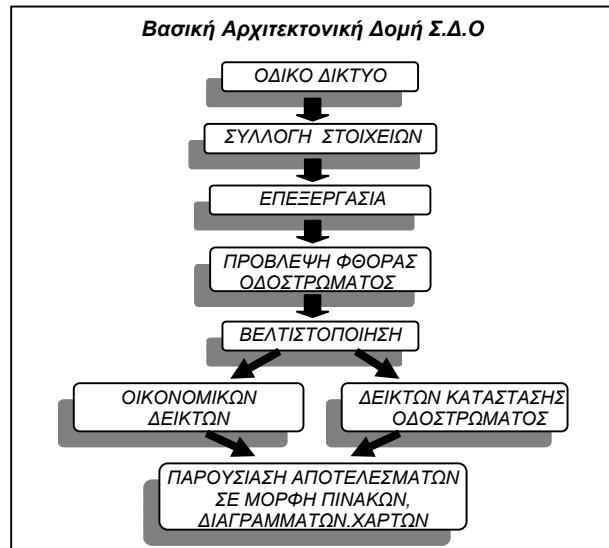
Σ.Δ.Ο.:	Σύστημα Διαχείρισης Οδοστρωμάτων.
I.A.Φ.:	Ισοδύναμο Αξόνικό Φορτίο.
N ₁₀ :	Προβλεπόμενες αθροιστικές διελεύσεις I.A.Φ 10t.
SCI:	Δείκτης δομικής κατάστασης (Surface Coverage Index).
N ₁₀ Y:	Μέσος ετήσιος αθροιστικός κυκλοφοριακός φόρτος.
InCrack:	Έναρξη της ρηγμάτωσης.
PrCrack:	Εξέλιξη της ρηγμάτωσης.
Cli:	Κλιματικές συνθήκες.
Drain:	Αποχέτευση οδοστρώματος.
Base:	Είδος στρώσης βάσης.
L _{τωπ} :	Φορτίο άξονα 8.2 t.
L:	Φορτίο άξονα 13 t.
CI:	Ρηγματώσεις σε μέτρα (cracking index).
A, B:	Παράμετροι του PARIS.
X:	Ηλικία του οδοστρώματος.
E.Δ.Z.:	Εναπομένουσα διάρκεια ζωής.
k:	Συντελεστής ισοδυναμίας.
L.T.P.P.:	Συμπεριφορά σε βάθος χρόνου.
T.M.Σ.Y:	Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Ε.Μ.Π.
EF _i :	Περιβαλλοντική συνάρτηση κατάστασης "i".
K _i :	Συντελεστής προσαρμογής κατάστασης "i".
MMP _i :	Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm) κατάστασης "i".
DF _a :	Συντελεστής αποχέτευσης.
ACRA _a :	Ρηγματωμένη επιφάνεια επί της συνολικής (%).
APOT _a :	Επιφάνεια με λακκούβες επί της συνολικής (%).
a ₀ , a ₁ , a ₂ , a ₃ , a ₄ :	Συντελεστές μοντέλουν.

3. Σ.Δ.Ο.: ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ

Η βασική αρχιτεκτονική δομή των σύγχρονων Σ.Δ.Ο. διακρίνεται στο σχήμα 1. Πρόκειται για συστήματα που προσδομοίωνται τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων στο χρόνο και επιτρέπουν την αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων συντήρησης με σκοπό την εύρεση της βελτιστης λύσης [2]. Περιλαμβάνουν:

- α. Βάση δεδομένων: Σε αυτήν αποθηκεύονται όλα τα στοιχεία σχετικά με τα οδικά τμήματα (υλικά, πάχη στρώσεων, κυκλοφορία και χαρακτηριστικά οχημάτων, φθορές).
- β. Προσδομοίωματα συμπεριφοράς οδοστρωμάτων, υπεύθυνα για την πρόβλεψη της εξέλιξης της φθοράς του οδοστρώματος στο χρόνο.
- γ. Αλγόριθμο για πραγματοποίηση βελτιστοποίησης. Εξετάζονται εναλλακτικά σενάρια συντήρησης και επιλέγεται

αυτό που πληρεί τις εκάστοτε προϋποθέσεις (οικονομοτεχνικές ή αμιγώς τεχνικές).



Σχήμα 1: Βασική αρχιτεκτονική δομή Σ.Δ.Ο.

Figure 1: Basic principal structure of a PMS.

4. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ

Σήμερα πλέον διατίθενται αρκετά Σ.Δ.Ο. και είναι αξιοσημείωτο πως οι περισσότερες χώρες της Ε.Ε., οι Η.Π.Α., η Αυστραλία κ.ά., χρησιμοποιούν τέτοια συστήματα για το σχεδιασμό της πολιτικής συντήρησης των οδικών δικτύων. Ο πίνακας 1 είναι ενδεικτικός της τάσης που επικρατεί [5].

Πίνακας 1: Στοιχεία χρήσης Σ.Δ.Ο στην Ευρώπη, πηγή: [5].

Table 1: Statistical data of PMS usage across Europe, source [5].

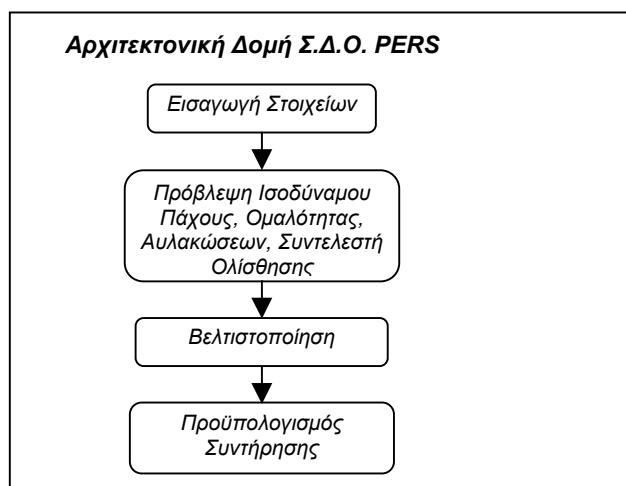
Ευρωπαϊκές χώρες που χρησιμοποιούν Σ.Δ.Ο	13 (Αγγλία, Γαλλία, Ισπανία, Ολλανδία, Σουηδία, Πορτογαλία, Ιταλία, Γερμανία, Αυστρία, Δανία, Φιλανδία, Νορβηγία, Βελγίο)
Αριθμός ατόμων που λειτουργούν τα Σ.Δ.Ο.	Από 1 (Δανία) έως 60 (Φιλανδία)
% λειτουργικού κόστους συντήρησης που αναλογεί στα Σ.Δ.Ο.	Από 1 % (Πορτογαλία) έως 3% (Φιλανδία)
Πεδία εργασιών τα οποία οργανώνονται βάσει των Σ.Δ.Ο.	
Κατασκευή νέων δρόμων	1 από τις 13 (Αυστρία)
Βελτίωση δρόμων (διαπλατύνσεις)	1 από τις 13 (Αυστρία)
Συντήρηση δρόμων	13 από τις 13
Χρήση Σ.Δ.Ο. για τον καταμερισμό σχετικών κονδύλων στις περιφέρειες	13 από τις 13

Πρέπει να σημειωθεί πως οι προαναφερθείσες χώρες συνήνικά κάνουν χρήση συστημάτων που οι ίδιες έχουν εξέλιξει μέσω επιστημονικών ιδρυμάτων και φορέων. Μέχρι σήμερα στην Ελλάδα έχουν γίνει ελάχιστες απόπειρες συστηματικής λειτουργίας τέτοιων συστημάτων, ενώ όλες βρίσκονται σε καθαρά ερευνητικό ή πιλοτικό επίπεδο, όπως, εκτός άλλων, αναφέρεται στις πηγές [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Με δεδομένη την έλλειψη σχετικής εμπειρίας, την ανάγκη για λειτουργία τέτοιων συστημάτων τόσο σε δημόσιο όσο και σε ιδιωτικό επίπεδο (συμβάσεις παραχώρησης), αλλά και την ιδιάτερα χρονοβόρο και απαιτητική σε πόρους και ανθρώπινο δυναμικό προσπάθεια εξέλιξης απαρχής Σ.Δ.Ο., η εργασία αυτή έχει ως σκοπό την προκαταρκτική αξιολόγηση και σύγκριση προσομοιωμάτων καθώς και τελικών προϊόντων τριών ολοκληρωμένων Σ.Δ.Ο.

Προς τούτου, έπειτα από σχετική διερεύνηση, έγινε επιλογή αντιπροσωπευτικών εκπροσώπων από κάθε κατηγορία/σχολή Σ.Δ.Ο. και προέκυψαν τα ακόλουθα Σ.Δ.Ο.:

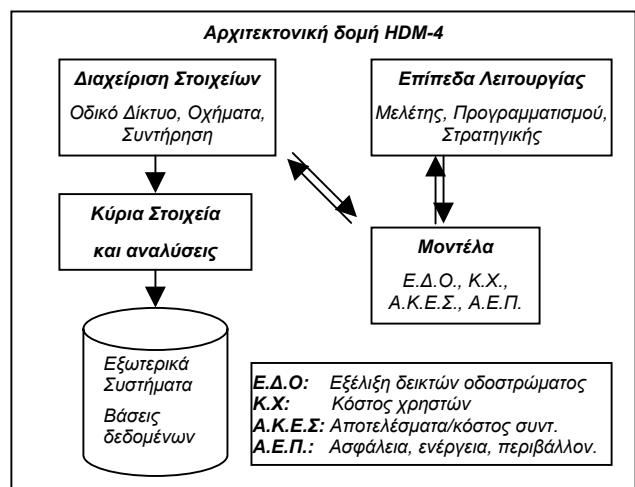
α. Σ.Δ.Ο. PERS: Ενδεικτικός εκπρόσωπος της σχολής που δίνει έμφαση στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών και χρησιμοποιεί στις προσομοιώσεις σχέσεις που συνδέουν την τάση με την παραμόρφωση και τους νόμους αστοχίας των υλικών. Αντιπροσωπεύει μία νέα αντίληψη στο σχεδιασμό των Σ.Δ.Ο. προσπαθώντας να προσεγγίσει τη φθορά των οδοστρωμάτων με καθαρά επιστημονικούς όρους. Πρόκειται για πειραματικό και υπό εξέλιξη Σ.Δ.Ο. με αρχιτεκτονική δομή, όπως διακρίνεται στο σχήμα 2 [13].



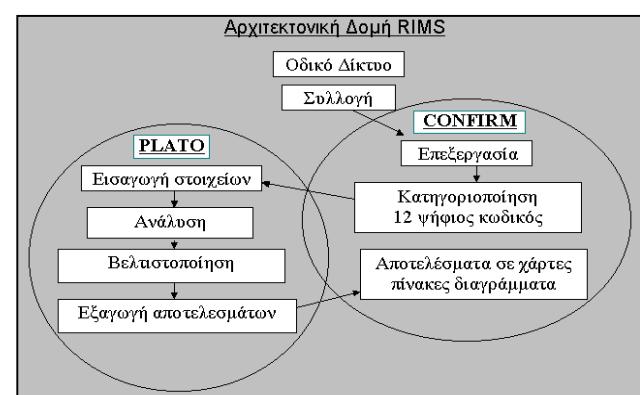
Σχήμα 2: Αρχιτεκτονική δομή PERS.
Figure 2: Principal structure of PERS.

β. Σ.Δ.Ο. HDM-4: Χαρακτηριστικό του είναι η ικανότητα για λειτουργία σε όλα τα περιβάλλοντα, ανεξαρτήτως κλιματικών/κυκλοφοριακών συνθηκών και υλικών [15]. Συνδυάζει επιστημονικές και εμπειρικές σχέσεις, ενώ θεωρείται αισθητά βελτιωμένο σε σχέση με προηγούμενες εκδόσεις [3]. Προϊόν της Παγκόσμιας Τράπεζας, του Πανεπιστημίου του Birmingham και του ARRB (Ινστιτούτο Οδικών Ερευνών Αυστραλίας).

γ. Σ.Δ.Ο. RIMS: Επελέγη, κυρίως, επειδή έχει αναπτυχθεί συμβατά με τις ελληνικές συνθήκες. Συνδυάζει στοιχεία από τις δύο προηγούμενες σχολές και αποτελείται από μία βάση δεδομένων και ένα σύστημα διαχείρισης [16]. Προϊόν συνεργασίας του Τομέα Μ.Σ.Υ. του Ε.Μ.Π. και του ARRB, βρίσκεται ακόμη σε φάση εξέλιξης [8] και συνεπώς οι ακριβείς δυνατότητές του δεν είναι ακόμη αυστηρά καθορισμένες. Η αρχιτεκτονική του δομή διακρίνεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 3: Βασική αρχιτεκτονική δομή HDM-4, πηγή: [15].
Figure 3: Basic principal structure of HDM-4, source: [15].



Σχήμα 4: Βασική αρχιτεκτονική δομή RIMS, πηγή: [16].
Figure 4: Basic principal structure of RIMS, source: [16].

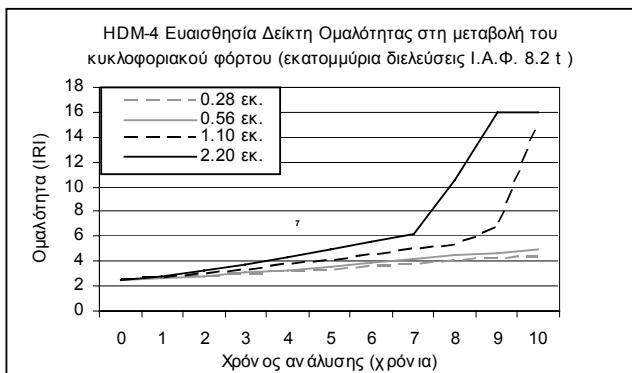
5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Στο πλαίσιο της προκαταρκτικής αξιολόγησης των Σ.Δ.Ο. και πριν από τη συγκριτική ανάλυση των τελικών προϊόντων τους, εκπονήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας των προσομοιωμάτων κάθε συστήματος. Αφορούν σε παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά την εξέλιξη της φθοράς

των οδοστρωμάτων, όπως ο κυκλοφοριακός φόρτος και οι κλιματικές συνθήκες. Στις αναλύσεις σημειώθηκαν οι επιπτώσεις που έχουν αυτές οι μεταβολές στην προβλεπόμενη φθορά των οδοστρωμάτων.

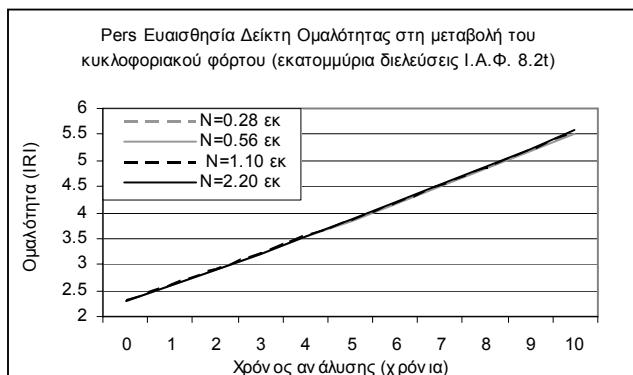
Μας δίνουν δηλαδή μια πρώτη εικόνα για τις δυνατότητες των συστημάτων να προσομοιώνουν τη συμπεριφορά οδοστρωμάτων κάθε κυκλοφοριακού φόρτου και κλιματικών συνθηκών [2, 17]. Στα δύο διαγράμματα 3 και 4 που ακολουθούν, διακρίνονται οι αναλύσεις ευαισθησίας του δείκτη ομαλότητας για μεταβολές της κυκλοφορίας σε οδικό τμήμα της Ελλάδας, των προσομοιωμάτων των Σ.Δ.Ο. PERS και HDM-4.

Το πρώτο διάγραμμα αφορά στο HDM-4 και είναι χαρακτηριστικό ότι οι μεταβολές του κυκλοφοριακού φόρτου έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικότατη αύξηση στην προβλεπόμενη φθορά του οδοστρώματος.



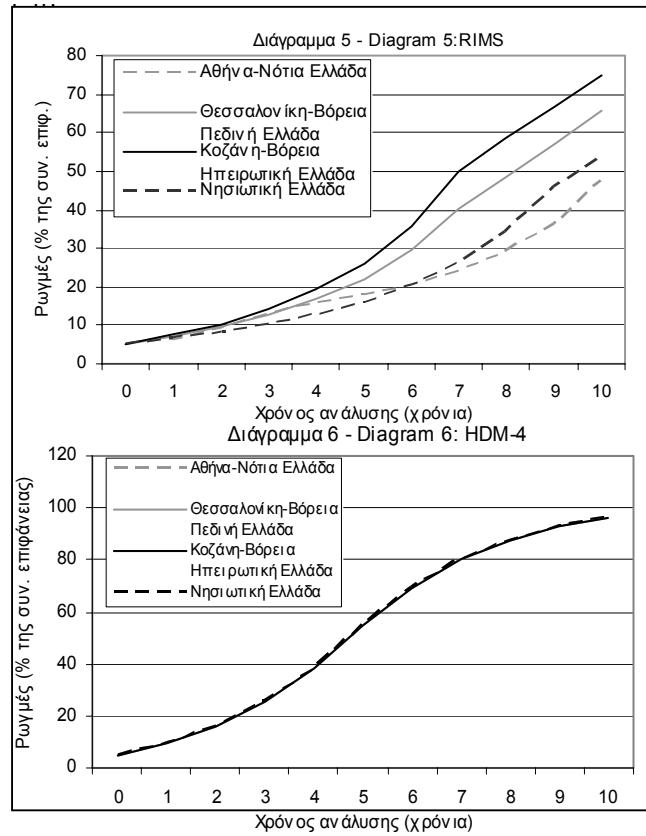
Διάγραμμα 3: Ανάλυση ευαισθησίας δείκτη ομαλότητας σε μεταβολές της κυκλοφορίας, προσομοιώμα HDM-4.

Diagram 3: Sensitivity analysis of roughness under traffic volume variations of the HDM-4 corresponding model



Διάγραμμα 4: Ανάλυση ευαισθησίας δείκτη ομαλότητας σε μεταβολές της κυκλοφορίας, προσομοιώμα PERS.

Diagram 4: Sensitivity analysis of PERS roughness model under traffic volume variations.



Διαγράμματα 5, 6: Αναλύσεις ευαισθησίας ρηγματώσεων σε μεταβολές κλιματικών συνθηκών, προσομοιώματα RIMS και HDM-4.

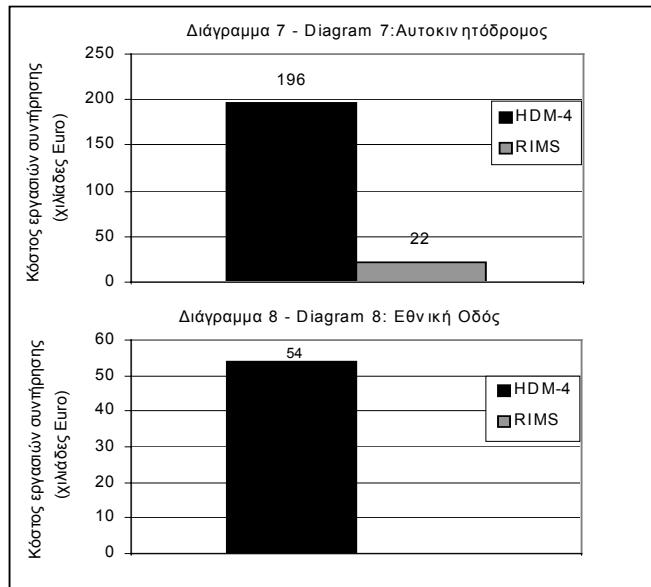
Diagrams 5, 6: Sensitivity analysis of cracking progression under climatic variations; RIMS and HDM-4 models.

Αντίθετα, όπως διακρίνεται στο δεύτερο διάγραμμα, το προσομοίωμα του Σ.Δ.Ο. PERS εμφανίζει μια πιο «άκαμπτη» συμπεριφορά, που σίγουρα προβληματίζει.

Στα διαγράμματα 5 και 6 παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας της εξέλιξης των ρηγματώσεων σε μεταβολές των κλιματικών συνθηκών, όπως εμφανίζονται σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Δεδομένης της σημαντικής επιρροής που έχει η μεταβολή της θερμοκρασίας αλλά και η παρουσία νερού στην ανάπτυξη και εξέλιξη των ρηγματώσεων είναι αναμενόμενο να εμφανίζονται διαφορές ανά γεωγραφική περιοχή. Όπως διακρίνεται στο πρώτο διάγραμμα, το αντίστοιχο προσομοίωμα του Σ.Δ.Ο. RIMS παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά, προβλέποντας εντονότερη παρουσία ρωγμών σε περιοχές με υψηλή μεσημεριανή βροχόπτωση ή/και χαμηλές θερμοκρασίες, πρόβλεψη που συμβαδίζει απόλυτα και με τα συλλεχθέντα κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του συστήματος στοιχεία από το ευρύτερο οδικό δίκτυο της Ελλάδας. Αντίθετα, στο δεύτερο διάγραμμα, όπου σημειώνονται οι προβλέψεις του αντίστοιχου προσομοιώματος του HDM-4, είναι φανερή η «άκαμπτη» συμπεριφορά εμφανίζοντας ενιαία πρόβλεψη της εξέλιξης των ρηγματώσεων ανεξάρτητα της μεταβολής των κλιματικών συνθηκών.

6. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΤΩΝ Σ.Δ.Ο. HDM-4, RIMS

Η σύγκριση αυτή κρίνεται ως η πλέον σημαντική, καθώς οι τελικά προϊόντα των συστημάτων αυτών, η εξαγωγή δηλαδή προϋπολογισμών κόστους εργασιών συντήρησης, είναι και η πεμπτουσία τους. Στα ραβδογράμματα 7, 8 διακρίνεται το προβλεπόμενο κόστος συντήρησης οδικού τμήματος κατηγορίας αυτοκινητόδρομου και εθνικής αντίστοιχα οδού, όπως προβλέπεται από τα Σ.Δ.Ο. HDM-4 και RIMS. Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια όρια επέμβασης, ενώ η απουσία αποτελεσμάτων από το Σ.Δ.Ο. PERS οφείλεται σε αδυναμία του συστήματος να ανταποκριθεί στις προδιαγραφές του, εμφανίζοντας αλλεπάλληλες εμπλοκές (shut downs) κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης.



Διαγράμματα 7, 8: Προϋπολογισμός εργασιών: αναλύσεις 10ετίας των HDM-4 και RIMS σε οδικό τμήμα μήκους 6.7 χλμ. κατηγορίας αυτοκινητόδρομου και 9.7 χλμ. κατηγορίας εθνικής οδού αντίστοιχα, με τα ίδια όρια επέμβασης και τις ίδιες εργασίες συντήρησης.

Diagrams 7,8: Maintenance costs: 10 years analysis of HDM-4 and RIMS for a Highway road section of 6.7 km length (diagram 7) and a 9.7 km National Road section (diagram 8), with the same trigger values and respective maintenance works.

Οι διαφορές, που εμφανίζονται, είναι ιδιαίτερα σημαντικές και στα δύο οδικά τμήματα. Αναγωγή των αποτελέσματων σε ένα οδικό δίκτυο μήκους 680 km, όπως για π.χ. αυτό της Εγνατίας Οδού, συνεπάγεται διαφορά στον προϋπολογισμό της τάξεως των 17 εκ. euro με αναλογία 1:9 για δίκτυο αυτοκινητόδρομου και 60 εκ. euro με αναλογία 1:60 για δίκτυο κατηγορίας εθνικής οδού αντίστοιχα. Οι διαφορές αυτές αποτέλεσαν την αφορμή για την περαιτέρω

διερεύνηση των παραμέτρων που τις προκαλούν. Με αυτόν το σκοπό κρίθηκε σκόπιμο η εργασία να επαναπροσανατολιστεί στα προσομοιώματα της φθοράς των οδοστρωμάτων. Επιλέχθηκε για την περαιτέρω διερεύνηση το προσομοιώμα των ρηγματώσεων για τους εξής λόγους:

- Οι ρηγματώσεις θεωρούνται ως η σημαντικότερη φθορά των οδοστρωμάτων.
- Έπειτα από σχετική έρευνα, συλλέχθηκαν τα απαιτούμενα ιστορικά στοιχεία για τις ρηγματώσεις. Η συγκριτική ανάλυση αφορά στα προσομοιώματα της εξέλιξης των ρηγματώσεων των HDM-4 και PARIS, για τα οποία αναφορά γίνεται παρακάτω.

7. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PARIS

Το PARIS [18] είναι ένα διευρωπαϊκό πρόγραμμα, στο οποίο συμμετείχαν 15 χώρες της Ευρώπης, ανάμεσα στις οποίες και η Ελλάδα, μέσω του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής (Μ.Σ.Υ.) του Ε.Μ.Π. Σκοπός του προγράμματος ήταν η ανάπτυξη εναρμονισμένων προσομοιώματων της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, τα οποία να διακρίνονται για την απλότητά τους, με απότερο στόχο την εισαγωγή τους σε κάποιο ολοκληρωμένο Σ.Δ.Ο. Πρέπει να σημειωθεί πως τα προσομοιώματα του PARIS είναι αναγνωρισμένα πλέον διεθνώς, όπως καταγράφεται από το «state of the art» του προγράμματος R.I.M.E.S. [5], και αποτελούν την αφρόκρεμα της ευρωπαϊκής έρευνας στο πεδίο αυτό. Απλά για λόγους αναφοράς και για να αναδειχθεί το μέγεθος του εγχειρήματος, να σημειωθεί πως συλλέχθηκαν στοιχεία από 720 οδικά τμήματα.

8. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

8.1. Εισαγωγή

Πριν από τη σύγκριση των προσομοιώματων έγινε προσάθεια για εκτενή προσαρμογή τους (προσαρμογή δεύτερου σταδίου). Η προσαρμογή των προσομοιώματων είναι απαραίτητη, καθώς ένας μεγάλος αριθμός συντελεστών στις σχέσεις που χρησιμοποιούν (95 για το HDM-4) μπορεί να λάβει ένα εύρος τιμών ανάλογα με το εκάστοτε οδόστρωμα και το περιβάλλον του.

Πέραν της αρχικής προσαρμογής που εκτελέσθηκε σε όλες τις συγκρίσεις της έρευνας (εισαγωγή των απαιτούμενων στοιχείων σχετικά με τις κλιματικές συνθήκες, την κατασκευαστική ποιότητα και άλλες παραμέτρους), στη συγκριτική αυτή ανάλυση έγινε εκτενέστερη προσαρμογή κάνοντας χρήση ιστορικών στοιχείων με τη μέθοδο των αλλεπάλληλων δοκιμών (trial and error). Τα απαιτούμενα στοιχεία αντλήθηκαν κυρίως από την Τράπεζα Δεδομένων

του Τομέα Μ.Σ.Υ. του Ε.Μ.Π. και αφορούν στην εξέλιξη των ρηγματώσεων και του κυκλοφοριακού φόρτου από πέντε οδικά τμήματα κατηγορίας αυτοκινητοδρόμου (εντός Ελλάδος). Πρέπει να τονιστεί ότι μία πλήρης προσαρμογή «δεύτερου σταδίου» απαιτεί ιστορικά στοιχεία από πλήθος οδικών τμημάτων και μπορεί να εκτείνεται σε χρονικό ορίζοντα πολλών μηνών (το εγχειρίδιο του HDM-4 κάνει λόγο για 6-9 μήνες [15]).

8.2. Περιγραφή Προσομοιωμάτων

Το προσομοίωμα για την έναρξη και την εξέλιξη των ρηγματώσεων του προγράμματος PARIS χαρακτηρίζεται από την απλότητά του. Η σχέση, που προσδιορίζει την έναρξη της ρηγμάτωσης, έχει ποιοτικά την ακόλουθη μορφή:

$$N_{10} = f(SCI, N_{10}Y) \quad (8.2.1)$$

όπου:

N_{10} = προβλεπόμενες αθροιστικές διελεύσεις I.A.Φ 10t κατά την έναρξη της ρηγμάτωσης.

SCI = δείκτης δομικής κατάστασης,

$N_{10}Y$ = μέσος ετήσιος αθροιστικός κυκλοφοριακός φόρτος (I.A.Φ. 8.2t) κατά τη χρονική διάρκεια της έρευνας.

Από το N_{10} και με απλή διαίρεση με το μέσο ετήσιο κυκλοφοριακό φόρτο, προσδιορίζεται η έναρξη της ρηγμάτωσης σε χρόνια από την αρχική κατασκευή ή την τελευταία επανεπίστρωση του οδοστρώματος. Η παρακάτω σχέση προσδιορίζει την εξέλιξη των ρηγματώσεων:

$$CI = A + B * X \quad (8.2.2)$$

όπου:

CI = ρηγματώσεις σε μέτρα (cracking index),

A και B = παράμετροι του μοντέλου και προσδιορίζονται με δοκιμές,

X = η ηλικία του οδοστρώματος.

Το αντίστοιχο προσομοίωμα του PLATO (και του HDM στο οποίο βασίζεται) είναι σαφώς πιο περίπλοκο λαμβάνοντας υπ' όψιν περισσότερες παραμέτρους. Στις σχέσεις που ακολουθούν διακρίνεται ποιοτικά η δομή του προσομοιώματος για την έναρξη και την εξέλιξη αντίστοιχα των ρηγματώσεων:

$$InCrack = f(N_{10}Y, CI, Drain, Base) \quad (8.2.3)$$

$$PrCrack = f(CI, Drain, Base) \quad (8.2.4)$$

όπου:

InCrack = έναρξη της ρηγμάτωσης

PrCrack = εξέλιξη της ρηγμάτωσης

CI = κλιματικές συνθήκες

Drain = αποχέτευση οδοστρώματος

Base = είδος στρώσης βάσης

Σημειώνεται πως οι ανωτέρω ρηγματώσεις CI και PrCrack αφορούν σε ισοδύναμους δείκτες ρηγμάτωσης, οι οποίοι και προκύπτουν από συνδυασμό διάφορων τύπων ρωγμών.

8.3. Προσαρμογή των προσομοιωμάτων

Απαιτήθηκαν ορισμένες παραδοχές για την προσαρμογή του προσομοιώματος του HDM-4 λόγω της μορφής των συλλεχθέντων στοιχείων. Οι ρηγματώσεις ήταν καταγεγραμμένες σε μέτρα μήκους, γεγονός που αφ' ενός παρέχει συμβατότητα με το προσομοίωμα του PARIS, αφ' ετέρου απαιτεί τη μετατροπή τους σε μονάδες επί της % της συνολικής επιφάνειας του οδοστρώματος, ώστε να εισαχθούν στα προσομοιώματα των HDM-4 και PLATO. Οι παραδοχές ήταν οι ακόλουθες:

- Οι διαμήκεις ρωγμές καταλαμβάνουν 0.75 μέτρα πλάτους της λωρίδας κυκλοφορίας.
- Οι εγκάρσιες ρωγμές καταλαμβάνουν 1,0 μέτρα πλάτους της λωρίδας κυκλοφορίας.
- Οι ρωγμές αλιγατορικής μορφής καταλαμβάνουν το 40% του πλάτους της λωρίδας κυκλοφορίας.

Πίνακας 2: Σχετική απόκλιση προσαρμοσμένων προσομοιωμάτων ρηγμάτωσης PARIS, HDM-4, RIMS.

Table 2: Relevant deviation of the calibrated PARIS, HDM-4 and RIMS cracking models.

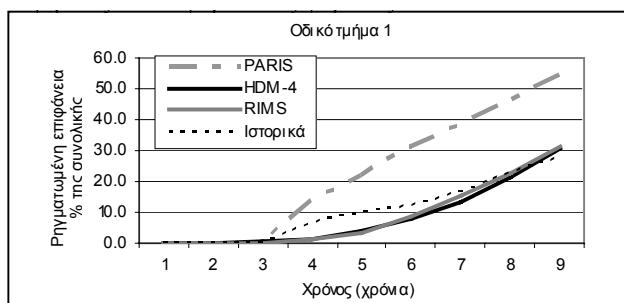
Σχετική απόκλιση (απόκλιση προβλέψεων/ιστορικά στοιχεία)		
Μοντέλο	Όλα τα έτη	Τελευταίο έτος
PARIS	11.94%	10.30%
HDM-4	47.22%	8.71%
RIMS	46.78%	8.69%

Η προσαρμογή ήταν σε γενικές γραμμές ικανοποιητική, πρέπει να σημειωθεί όμως πως τα προσομοιώματα των HDM-4 και RIMS δεν κατάφεραν να δώσουν αποτελέσματα κοντά στα πραγματικά κατά τα πρώτα τέσσερα χρόνια, πιθανόν εξαιτίας της μορφής της σχέσης που υπολογίζει τη ρηγμάτωση. Αυτή η σχέση δίνει πάντα καμπύλες που στρέφουν τα κοίλα προς τα άνω, ενώ στα οδικά τμήματα, όπου έγινε η προσαρμογή, οι πραγματικές ρηγματώσεις σε συνάρτηση με το χρόνο έδιναν μία καμπύλη με τα κοίλα προς τα κάτω. Κρίθηκε σκόπιμο, λοιπόν, η προσαρμογή να προσανατολιστεί στη μείωση της απόκλισης τα τελευταία έτη, στα οποία και τελικά, όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, η προσαρμογή ήταν ικανοποιητική.

9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΩΣ

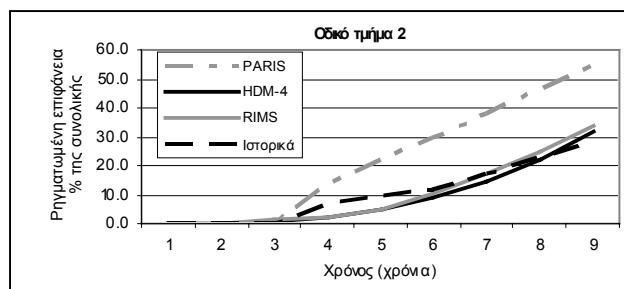
Η σύγκριση έγινε σε δύο οδικά τμήματα κατηγορίας αυτοκινητόδρομου, τα οποία παρουσίαζαν βαριά, διαφορετική όμως κυκλοφορία καθώς και διαφορετικά χαρακτηριστικά οδοστρώματος (ασφαλτική στρώση 14 cm, στρώση βάσης από αμμοχάλικο 30 cm για το τμήμα 1 και 15 / 26 αντίστοιχα για το τμήμα 2. Διαφορές υπάρχουν επίσης και στα αποτελέσματα του FWD.)

Στα διαγράμματα 9, 10 διακρίνονται οι προβλέψεις των προσομοιωμάτων για χρονικό διάστημα οκταετίας. Σημειώνεται πως η απότομη αλλαγή κλίσης υποδηλώνει την έναρξη της ρηγμάτωσης και προέρχεται από εφαρμογή της σχέσης 8.2.1. Παρατηρούμε μια σημαντική απόκλιση και στα δύο οδικά τμήματα μεταξύ της «ομάδας» HDM-4/RIMS και του PARIS, με τη σχετική απόκλιση των αποτελεσμάτων στο τελευταίο έτος της ανάλυσης να πλησιάζει το 45%. Οι παρόμοιες προβλέψεις των HDM-4 και RIMS θεωρητικά είναι αναμενόμενες, δεδομένης της συγγένειας των προσομοιωμάτων τους. Στο πλαίσιο, όμως σχετικών διεργασιών των συγγραφέων του παρόντος άρθρου, η ανάλυση εναισθησίας σε μεταβολές του κυκλοφοριακού φόρτου του μοντέλου ρηγμάτωσης του HDM-4 φανέρωσε μία ανελαστική συμπεριφορά, δείχνοντας πως αυτό είναι πιθανόν σχεδιασμένο για υψηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους.



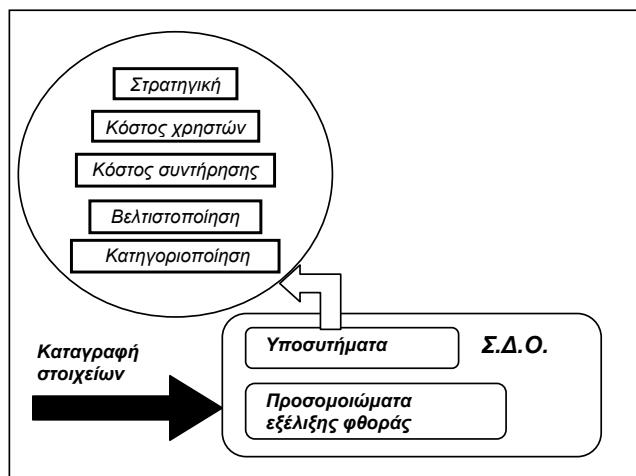
Διάγραμμα 9: Πρόβλεψη ρηγματώσεων PARIS, HDM-4, RIMS, οδικό τμήμα 1.

Diagram 9: Cracking predictions of the PARIS, HDM-4 and RIMS models, road section 1.



Διάγραμμα 10: Πρόβλεψη ρηγματώσεων PARIS, HDM-4, RIMS, οδικό τμήμα 1.

Diagram 10: cracking predictions of the PARIS, HDM-4 and RIMS models, road section 2.



Σχήμα 5: Σχέση υποσυστημάτων και καταγραφής στοιχείων.
Figure 5: PMSs subsystems and data collection relation.

Καθώς τα οδικά τμήματα της συγκριτικής ανάλυσης έφεραν σημαντική κυκλοφορία, οι συγγραφείς θεωρούν πως αν η ανάλυση αφορούσε και σε οδικό τμήμα με χαμηλότερο κυκλοφοριακό φόρτο, θα σημειώνονταν σημαντικές διαφορές στις προβλέψεις μεταξύ HDM-4 και RIMS.

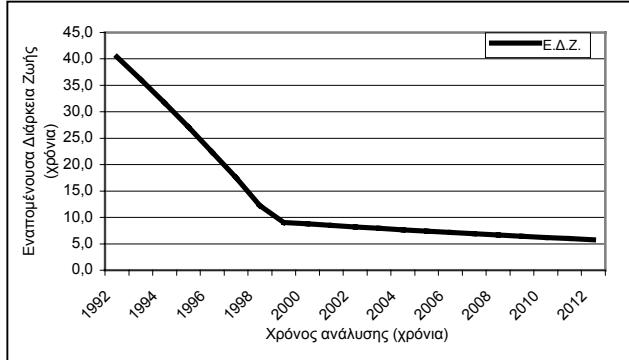
Είναι βεβαίως αντιληπτό πως, αν προσομοιώματα προσφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, η εισαγωγή τους σε Σ.Δ.Ο. (όπου υπεισέρχονται κατ' ελάχιστον άλλα 5 προσομοιώματα με ανάλογες διαφορές) συνεπάγεται και εξαγωγή τελικών προιόντων με σημαντικότατες διαφορές, καθιστώντας τα μη αξιόπιστα. Κρίνεται σκόπιμο να διευκρινιστεί επίσης πως η εξέλιξη ολοκληρωμένων Σ.Δ.Ο. απαιτεί την ανάπτυξη και άλλων υποσυστημάτων (σχήμα 5), όπως βάσεων δεδομένων, διαδικασιών κατηγοριοποίησης, αλγορίθμων βελτιστοποίησης κ.ά., ανάπτυξη η οποία χαρακτηρίζεται χρονοβόρος και ιδιαίτερα απαιτητική σε πόρους.

Όταν, όμως, τα προσομοιώματα της συμπεριφοράς του οδοστρώματος, που ουσιαστικά αποτελούν τη βάση του συστήματος, δεν λειτουργούν σωστά και αξιόπιστα ή όταν το σύστημα καταγραφής των στοιχείων δεν λειτουργεί επαρκώς και ικανοποιητικά, το σύστημα προφανώς δεν παρέχει αξιόπιστες προβλέψεις.

10. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΕΝΑΠΟΜΕΝΟΥΣΑΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ

Η χρησιμότητα του δείκτη Εναπομένουσας Διάρκειας Ζωής (Ε.Δ.Ζ.) στη διαχείριση οδοστρώματων είναι δεδομένη, αφού συχνά αποτελεί το βασικό δείκτη που λαμβάνεται υπόψη σε αναλύσεις στρατηγικού επιπέδου, όπως π.χ. ο σχηματισμός αντιπροσωπευτικού κόστους συντήρησης οδικών δικτύων και η αξιολόγηση του ύψους των σχετικών κομιστρών [2, 3, 17, 19]. Επιπλέον, μπορεί να βρει εφαρμογή και σε έργα συμβάσεων παραχώρησης, όπου η χρονική διάρκεια

φθοράς των οδοστρωμάτων [4] το πραγματικό κόστος συντήρησης θα ήταν πολύ μεγαλύτερο του προβλεπόμενου.



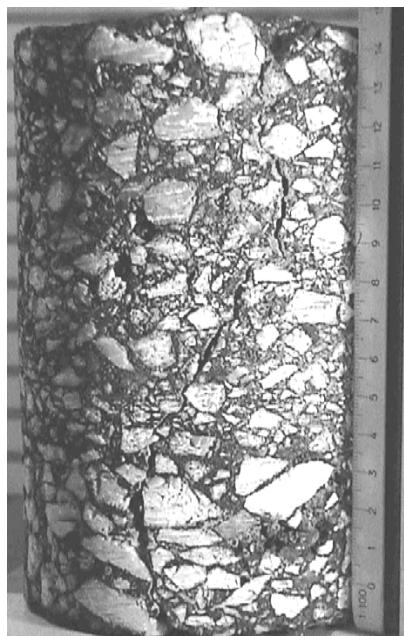
Διάγραμμα 12: Πρόβλεψη E.D.Z. των RIMS για οδικό τμήμα.

Diagram 12: Structural Remaining Life prediction by RIMS, of a particular road section.



Φωτογραφία 1: Κατάσταση του υπό εξέταση οδοστρώματος το έτος 2003, πηγή: Τράπεζα Λεδομένων Τ.Μ.Σ.Υ. Ε.Μ.Π.

Photo 1: Pavement condition in 2003, source: Data set Laboratory of Highway Engineering, NTUA.



Φωτογραφία 2: Δειγματοληψία (καρότο) από το υπό εξέταση οδικό

τμήμα, έτος 2003, πηγή: Τομέας Μ.Σ.Υ. Ε.Μ.Π.
Photo 2: Core obtained from the investigated road section, year 2003, source: NTUA.

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί πως η απότομη αλλαγή κλίσης στα τελευταία έτη της ανάλυσης οφείλεται στο γεγονός ότι το προσομοίωμα υποθέτει πως στο οδόστρωμα εκτελούνται βασικές εργασίες συντήρησης, όταν αυτό φθάνει στα όρια της E.D.Z., ώστε να μην καταρρεύσει [20]. Η υπόθεση αυτή δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα, καθώς είναι συχνό το φαινόμενο σποραδικών επεμβάσεων στα οδοστρώματα, όταν αυτά είναι εμφανώς γηρασμένα, οι οποίες και καθυστερούν ελαφρώς την επερχόμενη αστοχία. Ο ρυθμός επιβράδυνσης της αστοχίας λόγω της υπόθεσης αυτής, καθώς επίσης και η απομάκρυνσή της αποτελούν αντικείμενο έρευνας εν εξελίξει στον Τ.Μ.Σ.Υ. του Ε.Μ.Π.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως απαιτείται περαιτέρω εξέλιξη και προσαρμογή του συγκεκριμένου προσομοιώματος, ώστε τα αποτελέσματά του να συμβαδίζουν με την πραγματικότητα. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως η πρόβλεψη της E.D.Z., λόγω της εξάρτησής της από την εξέλιξη όλων των τύπων φθοράς των οδοστρωμάτων, αποτελεί το τελευταίο στάδιο εξέλιξης των Σ.Δ.Ο. και απαιτεί μακροπρόθεσμη συλλογή και συγκέντρωση πλήθους στοιχείων, καθώς και εύλογο χρονικό διάστημα για την οριστική ρύθμιση όλων των συντελεστών και παραμέτρων που την επηρεάζουν.

11. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων χρησιμοποιώντας αναλυτικά εργαλεία είναι μία ιδιαίτερα πολύπλοκη υπόθεση. Τα υλικά, που χρησιμοποιούνται στα οδοστρώματα, χαρακτηρίζονται από ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις, είναι ανισότροπα και οι σχέσεις που τα διέπουν, είναι κυρίως μη γραμμικές. [1, 2, 14, 21].

Αντίθετα, τα προσομοιώματα, που σήμερα χρησιμοποιούνται συχνά στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, κάνουν χρήση γραμμικών σχέσεων, υπόθετουν ελαστική συμπεριφορά των υλικών και θεωρούν τα υλικά ισότροπα. Επομένως, εκ προοιμίου υπάρχει αβεβαιότητα ως προς την εγκυρότητα των προβλέψεων. [1, 21]

Είναι, επίσης, γεγονός πως η πληθώρα Σ.Δ.Ο. δυσκολεύει την επιλογή από τις αρμόδιες υπηρεσίες κάποιου ολοκληρωμένου συστήματος για υιοθέτηση και εφαρμογή στην Ελλάδα. Αφ' ενός αυτό που ισχύει σε άλλες χώρες της Ε.Ε. και των Η.Π.Α. είναι ότι γίνεται χρήση των «εθνικών» τους Σ.Δ.Ο., κάτι που δεν συμβαίνει στην Ελλάδα. Αφ' ετέρου η έλλειψη επαρκούς εμπειρίας σε αυτό το θέμα και οι ελάχιστες μέχρι τώρα απόπειρες αξιολόγησης Σ.Δ.Ο. από φορείς καθιστούν την επιλογή δύσκολη. Με δεδομένη μάλιστα τη διαθεσιμότητα στην αγορά τόσο Σ.Δ.Ο., που καλύπτουν περιορισμένο φάσμα αναγκών και έχουν τοπικό χαρακτήρα (με την έννοια ότι έχουν εξελιχθεί για συγκεκριμένες συνθήκες

και επομένως δεν είναι κατάλληλα για όλες τις περιπτώσεις), όσο και άλλων που απευθύνονται σε μεγαλύτερο κοινό (και που ενέχουν τον κίνδυνο της εξαγωγής ανακριβών προβλέψεων), η νιοθέτηση ενός Σ.Δ.Ο. για τη διαχείριση της συντήρησης των οδικών δικτύων απαιτεί προσοχή και υπευθυνότητα.

Στο πλαίσιο της εργασίας παρατηρήθηκε ότι ορισμένα προσομοιώματα εμφανίζουν τελείως ανελαστική συμπεριφορά σε μεταβολές παραμέτρων που επηρεάζουν τα μέγιστα την φθορά των οδοστρωμάτων, όπως η κυκλοφορία και οι κλιματικές συνθήκες. Κατέστη δε σαφές πως οι διαφορές στα τελικά προϊόντα των Σ.Δ.Ο. εξαρτώνται σημαντικά από τα προσομοιώματα και τις προβλέψεις που αντά παρέχουν. Η προσαρμογή «δεύτερου σταδίου» (έστω και μερική λόγω έλλειψης στοιχείων) των επιμέρους προσομοιωμάτων ρηγμάτωσης δεν εμπόδισε την εμφάνιση σημαντικών διαφοροποιήσεων και, καθώς δεν συντέρχουν λόγοι αναστροφής της εικόνας στα υπόλοιπα προσομοιώματα των Σ.Δ.Ο., οι διαφορές στα αποτελέσματα των τελικών προϊόντων τους είναι αναμενόμενες.

Έγινε επίσης φανερό, πως δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν πλήρως τα Σ.Δ. χωρίς να έχει προηγηθεί μία συστηματική και εκτενής διαδικασία προσαρμογής ή και εξέλιξης των προσομοιωμάτων τους, η οποία απαιτεί ιστορικά στοιχεία για τις φθορές και την κυκλοφορία από πλήθος οδικών τμημάτων.

Τα προσομοιώματα για τη λειτουργία εκείνων των Σ.Δ.Ο., που χρησιμοποιούν σχέσεις από τη μηχανική των υλικών, απαιτούν στοιχεία όπως το μέτρο ελαστικότητας και τα πάχη των στρώσεων. Επιπλέον απαιτείται σχετική εργαστηριακή ανάλυση, στοιχεία που συλλέγονται κυρίως με δειγματοληψία. Αυτή η διαδικασία παρουσιάζει σημαντικό κόστος [4] αλλά και σημαντικές δυσκολίες επί τόπου των οδικών τμημάτων και πρακτικά είναι εξαιρετικά δύσκολο να εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα.

Επίσης, εξαίτιας της διαφοράς στα απαιτούμενα στοιχεία για τη λειτουργία των προσομοιωμάτων είναι σκόπιμο, πριν από την έναρξη της συλλογής στοιχείων, να έχει ήδη αποφασιστεί ποιο προσομοίωμα θα χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο ενός Σ.Δ.Ο. στο μέλλον. Αυτό είναι απαραίτητο, ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο οι όποιες αναγκαίες μετατροπές και εκτιμήσεις στοιχείων, που πάντα αλλοιώνουν, έστω και λίγο, την πραγματική κατάσταση.

Συνάμα πρέπει να σημειωθεί πως τυχόν εγγενή μειονεκτήματα των Σ.Δ.Ο. και των μοντέλων που αντά περιέχουν, όπως η απουσία παραμέτρων σχετικών με τη μεταβολή των κλιματικών συνθηκών που συνεπάγεται και την σχετική ανελαστικότητα, δεν δύνανται να απαλειφθούν ολοκληρωτικά με τη διαδικασία της προσαρμογής [1].

Υπό αυτές τις συνθήκες, λοιπόν, κρίνεται απαραίτητη η νιοθέτηση μίας μακροχρόνιας στρατηγικής με σκοπό τη συλλογή και αποθήκευση στοιχείων σχετικών με τα οδικά δίκτυα, όπως και η οργάνωση της απαιτούμενης τεχνικής υποδομής.

Είναι ζωτικής σημασίας η ίδρυση εύλογου αριθμού

πειραματικών οδικών τμημάτων (L.T.P.P. sites) όπου θα γίνονται συστηματικές μετρήσεις της κατάστασης των οδοστρωμάτων και της κυκλοφορίας, ώστε να καταστεί δυνατή η εφαρμογή και η εξέλιξη του καταλληλότερου για χρήση στις ελληνικές συνθήκες Σ.Δ.Ο.

Η άμεση έναρξη της συλλογής στοιχείων γίνεται επιτακτική, αν ληφθεί υπ' όψιν ότι σημαντικά οδικά έργα έχουν ήδη παραδοθεί στην κυκλοφορία, (που συνεπάγεται ανάγκη διαχείρισης της συντήρησης τους σε σύντομο χρονικό διάστημα). Επιπλέον, είναι γεγονός ότι πλήρης εφαρμογή και λειτουργία των Σ.Δ.Ο. δεν μπορεί να ξεκινήσει πριν από την πάροδο 5 τουλάχιστον επών από την έναρξη της συλλογής των στοιχείων, μία καθυστέρηση αυτής συνεπάγεται και απώλεια της δυνατότητας χρήσης Σ.Δ.Ο. στο πλαίσιο της συντήρησης αυτής της «γενιάς» οδικών δικτύων. Προφανώς η ύπαρξη σύγχρονης τεχνικής υποδομής είναι απαραίτητη, ώστε τα συλλεγόμενα στοιχεία να είναι αξιόπιστα και ακριβή και οι δυνατότητες των Σ.Δ.Ο. να αξιοποιούνται πλήρως.

Σίγουρα το κόστος μιας στρατηγικής συστηματικής καταγραφής στοιχείων είναι μεγάλο, πρέπει όμως να θεωρηθεί υπό το πρίσμα μιας επένδυσης, που στο μέλλον θα προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση πόρων.

12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ulidtz, P., Stubstand, R., "Standard Engineering Principles in PMS applications", ASTM, STP 1121, 1992.
- Holt, G. "Pavement Management Implementation", ASTM, STP 1121, 1992.
- Loizos, A., Fatseas, J., "Performance-Based asphalt Mix Properties in Relation to preventive Pavement Maintenance", 8th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, Proceedings, Vol. II, Seattle, August 1997.
- Κόλιας, Σ., Λοΐζος, Α., "Σημειώσεις Οδοστρωμάτων", Τομέας Μ.Σ.Υ. Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.
- Kerali, H. R., Evdorides, H., Holte, C., Spernol, Rievire, N., Feighan, K., Tapio, R., Kavina-Sodequist, M., Ornskov, J., Man-nisto, V., Kahkonen, A. and Potucek, J., "Road Infrastructure Maintenance Evaluation Study", 2nd European Road Research Conference, Brussels, 1999.
- Μαναράτης, Ι., Χασιώτης, Α.Π., Θεοδωρακόπουλος, "Σύστημα Στήριξης Αποφάσεων για Βέλτιστη Διαχείριση των Πόρων Συντήρησης Οδοστρωμάτων", 3rd Διεθνές Συνέδριο Ασφαλτικών Μιγμάτων και Οδοστρωμάτων, Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2002.
- Καρακαΐδην, Ι., Ευαγγελίδης, Δ., Μπαντέλας, Γ., Βουδούρης, Π., "Σύστημα Διαχείρισης Τακτικής Συντήρησης της Εγνατίας Οδού", 3rd Διεθνές Συνέδριο Ασφαλτικών Μιγμάτων και Οδοστρωμάτων, Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2002.
- Ε.Μ.Π., "Πλητοκή Εφαρμογή Στρατηγικού Σχεδιασμού για τη Διαχείριση της Οδικής Υποδομής στην Ελλάδα", Τελική Έκθεση, Ερευνητικό Πρόγραμμα, ΥΠΕΘΟ, Σεπτέμβριος 2002.
- Μουρατίδης, Α., "Μια πολυδιάστατη Πολιτική Διαχείρισης του Εθνικού Οδικού Δικτύου", Τεχνικά Χρονικά- πρακτικά ημερίδας «Μεγάλοι Χερσαίοι Συγκοινωνιακοί Αξόνες στην Ελλάδα», τεύχος 3/96, Αθήνα 1996.
- Λοΐζος, Α., "Ανάπτυξη Συστήματος Λειτουργικής Αξιολόγησης Ελληνικών Οδοστρωμάτων", τελική έκθεση, ερευνητικό πρόγραμμα ΥΠ.ΕΘ.Ο.-Ε.Μ.Π., Αθήνα 1994.
- Νικολαΐδης, Α., Ευαγγελίδης, Δ., "Ολοκληρωμένο Πρόγραμμα Διαχείρισης Οδικών Δικτύων και Οδοστρωμάτων με χρήση ΓΣΠ", 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, τόμος 2, Λάρισα, 4-7 Οκτωβρίου 1995.

12. Κοκκάλη, Α., Ιωαννίδη, Α., και Παρδάλη, Ε., “Δομή μιας Σύγχρονης Μεθόδου Συντήρησης Διαχείρισης Οδοστρωμάτων”, **3^o Διεθνές Συνέδριο Ασφαλτικών Μηχανών και Οδοστρωμάτων**, Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2002, σελ. 719-732.
13. Ulidtz, P., **“Performance Economic Rating System (PERS) manual”**, Technical University of Kopenhagen, 2001.
14. Ulidtz, P., **“Modeling Flexible Pavement Response and Performance”**, Polyteknish Forlag, Kopenhagen 1998.
15. Keralli, H.G.- Mc Mullen, D.- Odoki, J.B., **“HDM-4 User Manual Volumes I,II,III,IV,V”**, 2001.
16. Roberts, J., Roper, R., Crank, S., **“RIMS Final Report and Network Report”**, ARRB report, 2002.
17. Loizos, A., Roberts, J. and Crank, S., “Asphalt Pavement Deterioration Models for Mild Climatic Conditions”, **9th International Conference on Asphalt Pavements**, ISAP, Proceedings, Vol. I, Kopenhagen, 2002.
18. PARIS, **“Performance Analysis of Road Infrastructure”**, Transport RTD Programme, 4th Framework Programme, Brussels 1999.
19. Roberts, J., Ropper, R. and Moffat, M., “Project Level Pavement Performance Models”, **Austroads Conference on Road Asset Management Tools**, Proceedings, 2000.
20. Roberts, J., Loizos, A., “The Development and Pilot Implementation of a Road Infrastructure Management System for Greece”, **6th International Conference on Management Pavement**, TRB, Proceedings, Brisbane, 2004.
21. International Society for Asphalt Pavement (ISAP), **“Asphalt Pavement Evaluation and Overlay Design Guide”**, December 1989.

Α. Λοΐζος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π., Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 157 73 Ζωγράφου, Αθήνα.

Δ. Παπανικολάου

Project and Cost Consultant, Atkins Faithful and Gould, Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., MSc Project and Enterprise Management, UCL, Καλλιγά 55, 152 37 Φιλοθέη, Αθήνα.

Extended summary

Preliminary Evaluation of Pavement Deterioration Models for Pavement Management Systems

A. LOIZOS

Associate Professor N.T.U.A.

L. PAPANIKOLAOU

Civil Engineer N.T.U.A.

Abstract

The paper focuses on the scientific field of Pavement Management Systems (PMS), in an attempt to preevaluate and conduct a comparative analysis of incorporated models and end products. Taking under consideration the necessity of their usage in the management of road networks, through this paper various problems and weaknesses that these systems and their models bear are projected, in addition to a comparative analysis of the end products of three representative PMSs; the PERS, HDM-4 and RIMS systems respectively. The results of the analysis led to the reorientation of the paper in order to address the cracking models. The comparative analyses that followed included the corresponding models of HDM-4 and RIMS, together with the cracking model of the well-known European program, P.A.R.I.S. The results of the analysis underline the need for immediate and systematic collection of road-condition data, in order to facilitate the development and calibration of PMSs under the particular Greek conditions.

1. INTRODUCTION

Given that a significant part of the programmed road-construction projects in Greece have already been completed, an appreciation of the maintenance activities that will be required is clearly of great importance. This is a process to which most countries of the E.U. subscribe high priority; however, in Greece repair policies tend to be applied only after the pavement has suffered severe damage. This policy is definitely not efficient [1,2,3], mainly due to the pavement's deterioration rate against time and the additional maintenance costs that a delay of repair works brings [4] (diagrams 1, 2). The use of PMSs enables us to:

- Manage the road networks. It is possible through a powerful database to retain information about any road section regarding materials that have been used, the traffic characteristics, the technical specification of the vehicles, and of course the up-to-date condition of the pavement.
- Predict deterioration over time, which gives the option of repairing promptly.

Submitted: Sept. 9, 2004 Accepted: May 12, 2005

- Evaluate various alternative scenarios of maintenance activities and choose the most effective.

All the above result to a spectacular reduction in maintenance costs. The basic principal structure of a contemporary PMS is shown in figure 1, and includes:

- Database: All data related to the road networks are stored, including condition, traffic and vehicle data.
- Deterioration models: responsible for the prediction of the pavement's deterioration against time.
- Optimization algorithm: responsible for assessing alternative solutions..

2. TODAY'S STATUS

Nowadays, a wide variety of PMSs is used in many countries, including the US, countries of the EU, Australia and others. Table 1 [5] is indicative of the trend in EU-countries. It should also be stressed that the above countries use systems developed by regional scientific institutions. Unfortunately, until now few attempts have been made to implement such systems in Greece, see [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12], among others, all of them limited to a strictly academic level. It is therefore obvious that difficulties exist in the selection process of PMSs for use in Greece, and this paper aims at a preliminary evaluation and comparative analysis of three PMSs and some of their incorporated models. A selection of representative PMSs was made and it was decided to include in the analysis the PERS and the HDM-4 systems. The former was developed under the supervision of professor P.Ulidz (Copenhagen University and Dynatest [1, 12, 13]), while the later is a product of the A.R.R.B. (Australia Road Research Board), World Bank and University of Birmingham [14]. The third system to be selected was RIMS, which is still under development by NTUA, and ARRB [8],[15]. Their basic structure is shown in figures 2, 3 and 4.

3. SENSITIVITY ANALYSES

Prior to the comparative analysis of the PMSs' end products, sensitivity analyses of the deterioration models were conducted. In these analyses, the effects of the variations in parameters, which affect directly the pavement performance were illustrated, providing an initial view of the capabilities and weaknesses of the models [16]; in other words, whether they would be able to successfully predict performance in all kind of pavements, under variations in traffic volumes and climatic conditions. Diagram 3, which relates to the HDM-4 roughness model, shows normal behaviour since a distinctive increase in the roughness levels with traffic growth is evident. Diagram 4 (PERS corresponding model) shows far more "rigid" behaviour with minimal sensitivity.

In diagrams 5 and 6, the sensitivity analysis under climatic condition variations of the RIMS and HDM-4 cracking models are depicted. Diagram 5 (RIMS) illustrates an impressively elastic behavior, predicting intense cracking within regions bearing significant presence of water or/and low temperatures.

In contrast, the corresponding model of the HDM-4 system presents a much more "rigid" behaviour, predicting the same crack progression regardless of the the climatic conditions changes.

4. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE HDM-4 AND RIMS SYSTEMS END PRODUCTS

Diagrams 7 and 8 provide the prediction of the total maintenance costs, as generated from the RIMS and HDM-4 systems and refer to a highway and a National Road section respectively.

The differences between the predictions are quite striking, to the extent that a projection of the results to a network of about 680 km (such as, for instance, the Egnatia Motorway network) would result in a difference in the total maintenance cost of 17 million Euros. It should be noted that bigger differences would apply to a regional road network of the same size.

It was this differentiation that prompted a further investigation of the responsible parameters. For that reason, the research was re-orientated towards the cracking models, mainly because of their significance in terms of pavement performance, but also because of the available cracking data.

The comparative analysis concerns the HDM-4 and RIMS cracking models, as well as the corresponding model of the European program PARIS, data for which are provided below.

5. COMPARATIVE ANALYSIS OF CRACKING MODELS

PARIS [17] is a European program in which 15 countries of the EU took part, including Greece, which participated through the NTUA. The aim of the programme was to produce simple models, anticipating their incorporation within a complete PMS. It should be noted that PARIS is certificated by the European research program R.I.M.E.S. [5]

Before the comparative analysis, the three cracking models were intensively calibrated using cracking data provided by the NTUA's data bank, under the "trial-and-error" method. The calibration procedure was quite successful, as shown in table 2, especially regarding the results for the last year of the analysis

Diagrams 8 and 9 show the results of the comparative analysis in two different road sections bearing heavy traffic. The predictions of the HDM-4/RIMS group on the one hand, and those of PARIS on the other, differ considerably, deviating by approximately 45% in both sections.

It is therefore obvious that if the calibrated models differentiate at such level, their introduction into a PMS where many other models co-exist will probably lead to end-products, that is, total maintenance costs, with significant differences, rendering them unreliable. And since the development of a complete PMS demands the existence of many other sub-systems (figure 5); such as databases, optimization procedures and so forth – a demanding project in financial and time-dimension terms - it is meaningless if the deterioration models, or the data collection system, do not work properly.

6. PREDICTION OF REMAINING LIFE

Given the significance of pavements' remaining life (RL) in the road network management, an attempt to compare RL results generated by PMSs took place. The RIMS system was chosen for this role, since it is one of only a few PMSs that are able to generate such results. The analysis concerns road sections within the Athens network. The necessary data were provided by the NTUA's data bank.

Diagram 12 illustrates the results generated by RIMS, while photo 1 presents the pavement condition in 2003. The prediction for year 2003 is eight years of RL; however as shown in photo 1 the pavement suffers from extensive structural damage. In addition, in photo 2 the total and pervasive damage to the asphalt layer is visible.

Although the RIMS system is under development, these differences between predicted and historical data imply the need for further development and calibration. It should be noted, however, that the prediction of the remaining life, due to its dependence on various deterioration forms (cracking,

roughness, rutting and so forth), is the last stage of a PMS development, requiring long-running data collection in addition to reasonable time for the fine tuning of the relevant factors and coefficients. In any case, research regarding this model is being continued within the department of TP, N.T.U.A.

7. CONCLUSIONS

The modelling of pavements' behaviour is a particularly complex project, mainly because of their non-elastic and non-linear nature [1, 2, 13, 21]. And since today's models and systems use relationships that are mainly linear, their results tend to be doubtful [1, 21].

It is also a fact that the plethora of the available PMSs complicates the selection of one for implementation in Greece, mainly because of the local lack of knowledge and experience.

Furthermore, some models (HDM-4 cracking model, PERS roughness model) demonstrated an extremely inelastic behaviour during the conducted sensitivity analyses while the significant differences in the end-products of the

PMSs seem to derive from their deterioration models.

Lastly, it must also be made clear that the implementation of a PMS cannot be successful before an extended calibration process of its models has been completed, which in turn demands the availability of an extensive database of road network. Particular attention should also be paid to the degree of realistic model predictions prior to their calibration [1]. Sensitivity problems may demand inner corrections, which a calibration process usually can not address.

Under these circumstances the following are considered as indispensable:

- The adoption of a long-term strategy aimed at the collection and storage of data regarding road networks, together with organization of the necessary technical infrastructure.
- The immediate initiation of data collection. Since most road networks are already constructed, soon they will be needing maintenance and given that the implementation of PMSs can only begin five years post data collection initiation, any delay may lead to the loss of the opportunity to manage this generation of road networks using PMSs.

PMS is a relatively new concept in Greece, and their implementation and establishment can only come through extended usage and development.

A. Loizos

Associate Professor N.T.U.A., School of Civil Engineer, Department of Transportation and Planning, Laboratory of Highway Engineering, 5 Iroon Polytexniou Str., 157 73, Zografo, Athens.

L. Papanikolaou

Project and Cost Consultant, Atkins Faithful and Gould, Civil Engineer N.T.U.A., MSc Project and Enterprise Management, UCL, 55 Kalliga Str., 152 37, Filothei, Athens.