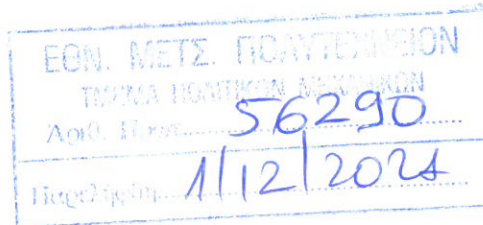




www.ntua.gr

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ**  
**ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ 5 - 157 73 ΖΩΓΡΑΦΟΥ**  
**ΤΗΛ: 210 772 1279 FAX: 210 7724254**



**Προς:**  
Τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Αθήνα, 01/12/2021

**Θέμα: Υποστήριξη Διδακτορικής Διατριβής**

Ο Υποψήφιος Διδάκτορας κ. Κωνσταντίνος Γκυρτής θα υποστηρίξει τη Διδακτορική Διατριβή του με τίτλο «Διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς ασφαλικών οδοστρωμάτων» την Τετάρτη 15 Δεκεμβρίου 2021 και ώρα 15:00 μέσω τηλεδιάσκεψης στον σύνδεσμο:

<https://centralntua.webex.com/centralntua/j.php?MTID=mfc1fd85c5d6af63b738ce4400e19f645>

Η Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή αποτελείται από τους κ.κ.:

Α. Λοΐζο, Καθηγητή ΕΜΠ (επιβλέπων)  
Κ. Σπηλιόπουλο, Καθηγητή ΕΜΠ  
Χ. Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Β. Ψαριανό, Καθηγητή ΕΜΠ (Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών)  
Γ. Γιαννή, Καθηγητή ΕΜΠ  
Ε. Μπαδογιάννη, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ  
Σ. Μαυρομάτη, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ

Επισυνάπτεται περίληψη της Διατριβής.

Με εκτίμηση,

ANDREAS  
AS  
LOIZOS

Digitally signed  
by ANDREAS  
LOIZOS  
Date: 2021.12.01  
11:22:01 +02'00'

**Ανδρέας Λοΐζος**  
Καθηγητής ΕΜΠ  
(Επιβλέπων)

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**  
της Διδακτορικής Διατριβής του  
**κ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΓΚΥΡΤΗ**

Αθήνα, 2021

## Γενικά

Η διατριβή εντάσσεται στην επιστημονική περιοχή της δομικής αξιολόγησης ασφαλτικών οδοστρωμάτων. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει διαπιστωθεί διεθνώς ότι το ενδιαφέρον των μηχανικών οδοστρωμάτων, λόγω περιορισμένων οικονομικών πόρων, έχει στραφεί σταδιακά προς την συντήρηση και αποκατάσταση των υφιστάμενων δομών οδοστρώματος. Ως εκ τούτου, η αξιολόγηση της κατάστασης των οδοστρωμάτων, ορολογία που αποδίδεται διεθνώς ως Pavement Condition Assessment (PCA), έχει καταστεί εγγενής προϋπόθεση σε όλα τα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων. Η ισχύς του PCA έχει επεκταθεί από το παραδοσιακό πλαίσιο παρακολούθησης της λειτουργικής συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, καλύπτοντας πλέον και το σκέλος της δομικής αξιολόγησης. Άλλωστε τα ζητήματα δομικής συμπεριφοράς του οδοστρώματος που συνδέονται ουσιαστικά με τη φέρουσα ικανότητά του, επιβάλλεται να παραμένουν συνεχώς στο προσκήνιο, καθώς η πραγματική διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος επεκτείνεται πέρα από τη διάρκεια ζωής για την οποία έχει σχεδιαστεί. Επομένως, η συνεχής αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος είναι αναγκαία συνθήκη προκειμένου να εξασφαλίζεται μακροπρόθεσμα η βιωσιμότητά του. Υπό το πρίσμα αυτό, η έρευνα επικεντρώθηκε στα ζητήματα δομικής αξιολόγησης οδοστρωμάτων στο πεδίο.

## Υπόβαθρο και Στόχοι

Σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση, η σημαντικότερη ερευνητική καινοτομία στα θέματα δομικής αξιολόγησης αφορά στην εισαγωγή του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer, FWD), το οποίο εδραιώθηκε τη δεκαετία του '80 παγκοσμίως ως η επικρατούσα μέθοδος αναφοράς για τη δομική αξιολόγηση οδοστρωμάτων. Το υπόψη σύστημα είναι ιδιαίτερα δημοφιλές για την αξιολόγηση τόσο (α) σε επίπεδο δικτύου (network-level analysis), όπου ενδιαφέρει συνολικά και εμποπτικά η κατάσταση των οδοστρωμάτων στο πλαίσιο της παρακολούθησής τους, αλλά και (β) σε επίπεδο έργου (project-level analysis), όπου ενδιαφέρει η άμεση αξιολόγηση των αναγκών επανασχεδιασμού οδοστρωμάτων και η επιλογή ενεργειών αποκατάστασης. Επισημαίνεται ότι δόθηκε έμφαση στην αξιολόγηση οδοστρωμάτων για ανάλυση σε επίπεδο έργου. Σύμφωνα με την πάγια διαδικασία αξιολόγησης, στοιχεία συλλογής με το FWD (υποχωρήσεις) και το γεωραντάρ GPR (στρωματογραφία) τροφοδοτούν την ανάλυση οδοστρωμάτων κυρίως με τη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων (MLET). Στο πλαίσιο αυτό, αξιολογήθηκαν ως μείζονος σημασίας οι εξής δύο θεματικές κατηγορίες:

- Στο σύνολο των αναλύσεων που λαμβάνουν χώρα με την πάγια διαδικασία, τυχόν περιορισμοί που απορρέουν από τη χρήση μη καταστρεπτικών (NDT) συστημάτων (θέματα κόστους προμήθειας – μεταφοράς συστημάτων ή θέματα εξειδικευμένης ανάλυσης) τροφοδοτούν τη δημιουργία μοντέλων συσχέτισης των πληροφοριών που προκύπτουν από τα επιμέρους συστήματα με στόχο την επιτάχυνση και βελτιστοποίηση των διαδικασιών αξιολόγησης. Το πρόβλημα ωστόσο που προκύπτει, αφορά στην επάρκεια τέτοιων μοντέλων ή αλγόριθμων για ευρεία χρήση σε οδοστρώματα διαφορετικής στρωματογραφίας ή διαφορετικών υλικών και κλιματολογικών συνθηκών.
- Μία ακόμη πιο σημαντική πρόκληση που αντιμετωπίζει ο μηχανικός οδοστρωμάτων, ιδιαίτερα εμφανής στην ανάλυση σε επίπεδο έργου, έχει σχέση με τις παραδοχές που γίνονται για τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών. Η έρευνα εστίασε στα ασφαλτομίγματα των ανώτερων στρώσεων ενός οδοστρώματος. Η ιξωδοελαστική φύση των ασφαλτομιγμάτων έχει τροφοδοτήσει διαρκή έρευνα για την συμπεριφορά τους σε κλίμακα εργαστηρίου αλλά και σε επίπεδο προηγμένης μοντελοποίησης. Ωστόσο, αναδείχθηκε ότι η πλειονότητα αναλύσεων από προϋπάρχουσες έρευνες σχετικές με τη συμπεριφορά ασφαλτομιγμάτων, βασίζεται σε θεωρητικές διατομές και προσομοιώσεις με στόχο τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων σχεδιασμού. Περιορισμένες είναι οι σχετικές έρευνες που αφορούν στη συμβολή της ιξωδοελαστικότητας στην επιτόπου αξιολόγηση οδοστρωμάτων.

Υπό το πρίσμα αυτό, ο στόχος της διατριβής είναι η συμβολή στη διαδικασία δομικής αξιολόγησης υφιστάμενων ασφαλτικών οδοστρωμάτων μέσω βελτιστοποίησης της χρήσης στοιχείων εργαστηρίου και στοιχείων συλλογής πεδίου από NDT συστήματα, καθώς και χρήσης διαθέσιμων εργαλείων ανάλυσης. Ειδικότερα, δόθηκε αρχικά έμφαση σε επιμέρους παρεμβάσεις του τρόπου με τον οποίο πραγματοποιείται σήμερα η αξιολόγηση οδοστρωμάτων κι ακολούθως διερευνήθηκε κατά πόσο η θεώρηση διαφορετικών παραδοχών της συμπεριφοράς ασφαλομιγμάτων μπορεί να συμβάλει στις αναλύσεις πεδίου με περισσότερη ακρίβεια.

### **Μεθοδολογία**

Για την επίτευξη του στόχου, διαμορφώθηκαν δύο αλληλένδετοι ερευνητικοί άξονες:

- Ο πρώτος αφορά σε επιμέρους βελτιστοποιήσεις της πάγιας διαδικασίας ανάλυσης μέσω επεξεργασίας στοιχείων συλλογής με διαφορετικά NDT συστήματα (system integration / data integration) με στόχο την ανάδειξη νέων πτυχών, όπως:
  - τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της στρωματογραφίας του οδοστρώματος και στοιχείων μηχανικής απόκρισης που συλλέγονται μέσω του FWD,
  - τη διερεύνηση της απευθείας εκτίμησης της εντατικής καταπόνησης του οδοστρώματος με στοιχεία συλλογής από το FWD παρακάμπτοντας τις χρονοβόρες διαδικασίες του ανάστροφου υπολογισμού και των εντατικών αναλύσεων, και
  - τη διερεύνηση της συμβολής των χαρακτηριστικών της επιφάνειας κύλισης του οδοστρώματος (κατά μήκος κατατομή/ομαλότητα) στην εντατική κατάσταση που διαμορφώνεται στο σώμα του οδοστρώματος.
- Ο δεύτερος άξονας αφορά στην αξιολόγηση της συμβολής των ασφαλομιγμάτων στη μηχανική συμπεριφορά οδοστρωμάτων. Για την αξιολόγηση αυτή, πραγματοποιείται:
  - διερεύνηση των διαφορών που προκύπτουν στο πλαίσιο αναλύσεων οδοστρωμάτων οδών με επιτόπου στοιχεία για θεώρηση ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλομιγμάτων. Προς τούτο, πέρα από επιτόπου NDT στοιχεία, αξιοποιούνται εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας επί πυρήνων ασφαλομίγματος.
  - διερεύνηση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλομιγμάτων στην αξιολόγηση οδοστρώματος αεροδρομίου.

Το σύνολο των προς ανάλυση στοιχείων αντλήθηκε από την βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, που περιέχει στοιχεία από την παρακολούθηση της μακροπρόθεσμης δομικής και λειτουργικής συμπεριφοράς οδοστρωμάτων.

### **Βασικά αποτελέσματα και συμπεράσματα**

*Σχετικά με τον πρώτο άξονα διερεύνησης:*

- Αναδείχθηκε μια προκαταρκτικά εφικτή σύζευξη στοιχείων από τα δύο κυρίαρχα NDT συστήματα (system integration), τα οποία χρησιμοποιούνται για τη δομική αξιολόγηση οδοστρωμάτων (FWD και GPR), ώστε κατόπιν στοιχειώδους στατιστικής επεξεργασίας (μη γραμμική παλινδρόμηση) να μπορεί να εκτιμηθεί η στρωματογραφία του οδοστρώματος και συγκεκριμένα το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων μέσω στοιχείων FWD.
- Αναπτύχθηκαν δύο νέοι αλγόριθμοι πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης οδοστρωμάτων με ικανοποιητική προσαρμογή και ακρίβεια εκτίμησης αξιοποιώντας άμεσα μετρήσιμους δείκτες (στοιχεία συλλογής με FWD). Επισημάνθηκε παράλληλα η ανάγκη επαναβαθμονόμησης των νέων αλγορίθμων για χρήση σε διαφορετικά οδοστρώματα με στόχο τη θεώρηση τοπικών συνθηκών και υλικών.



- Εντοπίστηκε μία ενδιαφέρουσα αλληλεπίδραση μεταξύ της ομαλότητας και της δομικής συμπεριφοράς του οδοστρώματος, ειδικότερα ως προς την εντατική καταπόνηση που αναπτύσσεται στη θεμελίωσή του. Η αλληλεπίδραση αυτή είναι χρήσιμη δεδομένου ότι είναι ούτως ή άλλως δύσκολο να αξιολογηθεί η γεωτεχνική υποδομή στο πλαίσιο λειτουργίας υφιστάμενων οδοστρωμάτων.

#### *Σχετικά με τον δεύτερο άξονα διερεύνησης:*

- Αναδείχθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές για τις κατακόρυφες παραμορφώσεις στην στρώση έδρασης των πειραματικών οδοστρωμάτων όταν γίνεται θεώρηση ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων, με δυσμενέστερη την ιξωδοελαστική θεώρηση. Για την περίπτωση του πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, η ιξωδοελαστική θεώρηση εμφανίστηκε δυσμενέστερη για χαμηλές ταχύτητες αξονικών φορτίων και υψηλές θερμοκρασίες στο μέσο της ασφαλτικής βάσης.
- Εντοπίστηκε μία ασαφής τάση αναφορικά με την περαιτέρω επίδραση της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος στην κόπωση οδοστρωμάτων λόγω αλιγοτορικών ρωγμών (bottom-up cracking), η οποία τεκμηριώθηκε λαμβάνοντας υπόψη το μέσο πάχος των ασφαλτικών στρώσεων στα πειραματικά οδοστρώματα. Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, ένα μέσο πάχος της τάξης των 17-18cm παραπέμπει σε πυκνή δομή οδοστρώματος, όπου σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία η αστοχία σε κλασσικές ρωγμές κόπωσης ενδέχεται να μην είναι κρίσιμη.
- Αντίθετα, αξιολογήθηκε ως καθοριστικότερη η επίδραση της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος για την περίπτωση εκτίμησης της φθοράς λόγω διαμηκών ρωγμών στην επιφάνεια (top-down cracking) με δυσμενέστερη την ιξωδοελαστική θεώρηση. Το στοιχείο αυτό αφορά άμεσα στη διαχείριση της συντήρησης οδοστρωμάτων, δεδομένου ότι οι συναφείς ενέργειες συχνά επικεντρώνονται στην αποξήλωση του άνω μέρους των ασφαλτικών στρώσεων, δηλαδή της αντιολισθηρής στρώσης καθώς και μέρους της ασφαλτικής βάσης. Επομένως, αναδείχθηκε ότι η θεώρηση μίας συμπεριφοράς έναντι άλλης διαφοροποιεί εν δυνάμει τον χρονικό προγραμματισμό αλλά και το είδος των ενεργειών αποκατάστασης οδοστρωμάτων.
- Διερευνήθηκε η μοντελοποίηση των κρίσιμων ιξωδοελαστικών παραμορφώσεων αξιοποιώντας κυρίως NDT στοιχεία, δεδομένων των περιορισμών που απορρέουν από την εκτεταμένη πυρηνοληψία που είναι απαραίτητη για τον ιξωδοελαστικό χαρακτηρισμό των ασφαλτομιγμάτων. Αναφέρθηκαν ενθαρρυντικά επί της αρχής αποτελέσματα, καθώς επίσης και ικανοποιητικές συσχετίσεις μεταξύ του ποσοστού ρωγμών κόπωσης με στοιχεία συλλογής από το FWD (δείκτες υποχωρήσεων), ιδιαίτερα χρήσιμες στο πλαίσιο παρακολούθησης της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς οδοστρωμάτων.
- Αναδείχθηκε ως εκ νέου ως δυσμενέστερη η ιξωδοελαστική θεώρηση συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων αναφορικά με την εκτίμηση της φθοράς οδοστρωμάτων αεροδρομίων λόγω κόπωσης. Τούτο προέκυψε έπειτα από θεώρηση αεροσκαφών με διαφορετικά συστήματα τροχών και διαφορετικές θεωρούμενες ταχύτητες κίνησης. Ειδικότερα, διαμορφώθηκε το συμπέρασμα ότι η MLET που υιοθετείται για την αξιολόγηση οδοστρωμάτων από την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας (Federal Aviation Administration, FAA) δεν αποτελεί συντηρητική προσέγγιση στις κανονικές-ενδιάμεσες ταχύτητες λειτουργίας, οι οποίες άλλωστε είναι περισσότερο κρίσιμες για την εμφάνιση φθοράς.