

# Επίδραση βραχώδους υποβάθρου στη δομική αξιολόγηση και ανάλυση οδοστρωμάτων με το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD)

Impact of bedrock depth on pavement structural evaluation and analysis based on Falling Weight Deflectometer (FWD) measurements

ΤΣΑΪΜΟΥ, Χ.	Πολιτικός Μηχανικός, ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.
ΧΑΡΩΝΙΤΗΣ, Γ.	Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
ΦΙΚΙΡΗΣ, Ι.	Πολιτικός Μηχανικός, Msc, ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.
ΠΑΠΑΚΑΤΣΙΚΑΣ, Χ.	Πολιτικός Μηχανικός, INTRAKAT Α.Ε.
FULLERTON, W.	Chief Technical Officer, FRAPORT GREEECE

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Διερευνάται η επιρροή της παρουσίας βραχώδους υποβάθρου στα αποτελέσματα αναλύσεων που διεξάγονται για τη δομική αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Βάσει των αποτελεσμάτων έρευνας πεδίου που πραγματοποιήθηκε σε Ελληνικό Αεροδρόμιο με Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD), ερευνητικές γεωτρήσεις και επιτόπου δοκιμές διαπιστώθηκε η παρουσία βραχώδους υποβάθρου σε σχετικά μικρά αλλά κυμαινόμενα βάθη από την επιφάνεια του υφιστάμενου οδοστρώματος. Παρουσιάζεται η σημασία - επιρροή της ρεαλιστικής συνεκτίμησης της στρωματογραφίας στα αποτελέσματα αναλύσεων αξιολόγησης και επιλογής λύσεων αποκατάστασης υφιστάμενων οδοστρωμάτων.

**ABSTRACT :** The influence of the presence of bedrock on the analyses results carried out for the structural evaluation of existing pavements is examined. Based on field investigations conducted at a Greek airport using Falling Weight Deflectometer (FWD), boreholes and in-situ tests, it was derived that bedrock underlays the existing pavement at variable but generally shallow depth. In terms of the evaluation and the selection of a rehabilitation solution of existing pavements, the importance - influence of a realistic ground stratigraphy assumption on the analyses results is presented.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια αξιολόγησης ενός υφιστάμενου οδοστρώματος, είναι αναγκαία η διερεύνηση της δομικής του κατάστασης με χρήση στοιχείων από επί τόπου μετρήσεις και καταγραφές. Συνήθης στόχος της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι ο προσδιορισμός παραμέτρων μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών των επιμέρους στρώσεων, όπως για παράδειγμα των μέτρων ελαστικότητας τα οποία μπορούν να προκύψουν από την ανάλυση των καταγραφών με το Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD). Η τελευταία αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία λόγω της επίδρασης διάφορων παραγόντων όπως για παράδειγμα τα πάχη των επιμέρους στρώσεων, η επιλογή του κατάλληλου προτύπου ανάστροφου υπολογισμού, η ύπαρξη δύσκαμπτου υποστρώματος (π.χ. βραχώδους υποβάθρου) κλπ. Η εφαρμογή κατάλληλης προσέγγισης για τον προσδιορισμό των μέτρων ελαστικότητας επηρεάζει τη διαδικασία της δομικής αξιολόγησης των υφιστάμενων οδοστρωμάτων και τη διαστασιολόγηση που ενδέχεται να απαιτηθεί προκειμένου να πραγματοποιηθούν ενέργειες αποκατάστασης ή συντήρησής τους.

Η επίδραση της παρουσίας δύσκαμπτου υποστρώματος στην εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας για τα υλικά των επιμέρους στρώσεων των οδοστρωμάτων έχει ανέκαθεν αποτελέσει αντικείμενο ερευνητικών μελετών (π.χ. Ullidtz 1987, Seng et al. 1993, Aouad et al.

2000), ενώ έχουν προταθεί μεθοδολογίες προσδιορισμού του βάθους του για τις σχετικές αναλύσεις (Aouad et al. 2000). Μεταγενέστερες έρευνες ασχολήθηκαν και με την επίδραση του δύσκαμπτου οδοστρώματος στη διαστασιολόγηση εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων (Christopher et al. 2006). Η παρούσα έρευνα ασχολείται με την επίδραση της παρουσίας δύσκαμπτου υποστρώματος στη δομική αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων, καθώς επίσης και στον αναλυτικό υπολογισμό αποκατάστασης και ενίσχυσης της φέρουσας ικανότητας τους. Ως δύσκαμπτο υπόστρωμα (bedrock ή rigid bottom) θεωρείται μία δύσκαμπτη στρώση που υπόκειται των στρώσεων της οδοστρωσίας και των τυχόν εδαφικών υλικών της στρώσης έδρασης (Λοΐζος και Σαριδάκης, 1992). Στη διερεύνηση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τα οδοστρώματα του αεροδρομίου της Μυκόνου, το οποίο αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση Ελληνικού περιφερειακού αεροδρομίου με διαφορετικές τυπικές διατομές στα διάφορα τμήματα (διάδρομος, τροχόδρομοι, δάπεδο στάθμευσης αεροσκαφών). Τα οδοστρώματα εδράζονται σε βραχώδες υπόβαθρο, το οποίο βρίσκεται σχετικά κοντά στην επιφάνεια και χαρακτηρίζεται από έλλειψη επιπεδότητας.

Στα οδοστρώματα του αεροδρομίου πραγματοποιήθηκαν επί τόπου δοκιμές που περιελάμβαναν τη λήψη πυρήνων, δοκιμές με Δυναμικό Πενετρόμετρο (Dynamic Cone Penetrometer – DCP), γεωτρήσεις καθώς επίσης και μετρήσεις με Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer - FWD). Τα αποτελέσματα της επιτόπου διερεύνησης αξιοποιήθηκαν προκειμένου να αξιολογηθεί η υφιστάμενη κατάσταση των οδοστρωμάτων του αεροδρομίου.

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 2.1 Επιτόπου δοκιμές και μετρήσεις

Το αεροδρόμιο της Μυκόνου βρίσκεται σε λειτουργία εδώ και 50 χρόνια περίπου, ενώ αποτελείται από ένα Διάδρομο (Δ), δύο Τροχόδρομους (T1 και T2) και ένα Δάπεδο Στάθμευσης Αεροσκαφών (ΔΣΑ). Στο πλαίσιο διερεύνησης της κατάστασης και των χαρακτηριστικών των υφιστάμενων οδοστρωμάτων πραγματοποιήθηκαν επιτόπου δειγματοληψίες που περιελάμβαναν τη λήψη πυρήνων, και τη διεξαγωγή γεωτρήσεων. Ταυτόχρονα, στις θέσεις πυρηνοληψίας διεξήχθησαν δοκιμές με DCP. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αξιοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των παχών των υποκειμένων στρώσεων καθώς επίσης και για την αξιολόγηση των υλικών τους.

Όπως προέκυψε από τη διεξαχθείσα πυρηνοληψία, οι ασφαλικές στρώσεις αποτελούνται από τυπικά ελληνικά ασφαλτομίγματα, με πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 7cm και 9cm. Κάτω από τις ασφαλικές στρώσεις εντοπίστηκε στρώση από αμμοχάλικο με πάχος από 5cm έως και 30cm, ενώ κάτω από αυτή υπάρχει μία στρώση με αμμώδες υλικό με πάχος μεταξύ 40cm και 90cm. Περαιτέρω, η περιοχή του αεροδρομίου χαρακτηρίζεται από την παρουσία βραχώδους ανάγλυφου, το οποίο δεν παρουσιάζει επιπεδότητα. Όπως διαπιστώθηκε και από στοιχεία δειγματοληπτικών γεωτρήσεων το βραχώδες υπόστρωμα κατά περίπτωση εντοπίζεται σε σχετικά μικρό βάθος (έως και 65 - 75cm από την επιφάνεια), ή και σε μεγαλύτερο (άνω των 120cm του μέγιστου βάθους διάτρησης).

Στα οδοστρώματα του εν λόγω αεροδρομίου πραγματοποιήθηκαν επίσης μετρήσεις με το FWD με στόχο την καταγραφή των ελαστικών υποχωρήσεων και την εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων. Η θερμοκρασία των ασφαλικών στρώσεων κατά τα διάρκεια των δοκιμών FWD κυμάνθηκε μεταξύ 29 και 30°C.

### 2.2 Σχολιασμός μετρήσεων FWD

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της εξεταζόμενης περίπτωσης, το οποίο τη διαφοροποιεί από τις συνήθεις περιπτώσεις, είναι ο εντοπισμός φυσικού βραχώδους υποβάθρου σε μικρό βάθος από την επιφάνεια, το επηρεάζει τόσο τις καταγραφές με τη συσκευή FWD όσο και την επεξεργασία τους. Βάσει της παρατηρούμενης απόκρισης του οδοστρώματος, κατά τη διάρκεια των δοκιμών σε αρκετές θέσεις οι καταγραφές των υποχωρήσεων από τα

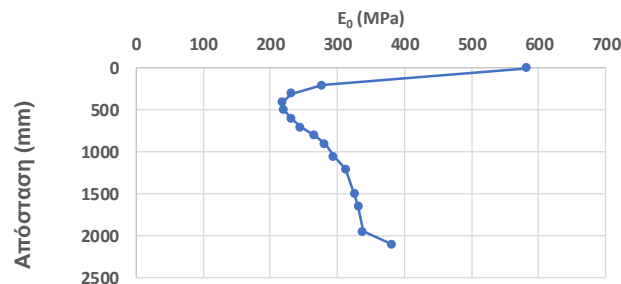
περισσότερο απομακρυσμένα σε σχέση με το φορτίο γεώφωνα ήταν πολύ μικρές, κατά περίπτωση και σχεδόν/κοντά στο μηδέν. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (Ullidtz, 1987, Molenaar, 2006), οι ελαστικές υποχωρήσεις όπως καταγράφονται στις διαφορετικές αποστάσεις από το κέντρο της πλάκας φόρτισης παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας του οδοστρώματος σε συγκεκριμένο βάθος. Η εκτίμηση του επιφανειακού μέτρου ελαστικότητας  $E_0$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να προσδιοριστεί η ελαστική συμπεριφορά της στρώσης έδρασης ή η παρουσία δύσκαμπτης στρώσης στον πυθμένα του οδοστρώματος (Εξισώσεις 1 και 2). Το διάγραμμα του Σχήματος 1 δείχνει το εκτιμώμενο μέτρο  $E_0$  σε μία ενδεικτική θέση της δοκιμής FWD στο οδόστρωμα του Διαδρόμου που εξετάστηκε.

$$E_0(0) = \frac{2 * (1 - \nu^2) * \sigma_0 * a}{d(0)} \quad (1)$$

$$E_0(r) = \frac{(1 - \nu^2) * \sigma_0 * a^2}{r * d(r)} \quad (2)$$

όπου:

$E_0(r)$  το επιφανειακό μέτρο ελαστικότητας σε απόσταση  $r$  του γεώφωνου (MPa),  $\nu$  ο λόγος Poisson,  $\sigma_0$  η πίεση επαφής κάτω από την πλάκα φόρτισης (KPa),  $a$  η ακτίνα της πλάκας φόρτισης (mm),  $d(r)$  η ελαστική υποχώρηση μετρημένη σε απόσταση  $r$  ( $\mu\text{m}$ ),  $r$  η απόσταση του γεωφώνου (mm).



Σχήμα 1. Επιφανειακό μέτρο ελαστικότητας σε ενδεικτική θέση δοκιμής με το FWD στο οδόστρωμα του Διαδρόμου.

Figure 1. Surface modulus estimated at an indicative FWD test location on the Runway pavement.

### 3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ

#### 3.1 Εκτίμηση μέτρων ελαστικότητας επιμέρους στρώσεων

Στην παρούσα έρευνα εξετάζονται τα οδοστρώματα του Διαδρόμου και του Τροχόδρομου 2. Το Σχήμα 2 δείχνει τις τυπικές διατομές που χρησιμοποιήθηκαν για τον ανάστροφο υπολογισμό και την εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας με το λογισμικό BAKFAA (FAA, 2011). Το οδόστρωμα του Διαδρόμου υποδιαιρείται σε 3 επιμέρους τμήματα, ανάλογα με τα στοιχεία των τυπικών διατομών και την ομοιομορφία που παρουσιάζουν οι καταγραφές του FWD, τα οποία εφεξής αναφέρονται ως Δ1 (Χ.Θ. 0+000 – 0+450), Δ2 (Χ.Θ. 0+450 – 0+950) και Δ3 (Χ.Θ. 0+900 – 1+903). Σε όλα τα υπομήματα, το πάχος της κατώτερης στρώσης από ασύνδετα υλικά θεωρείται ότι μεταβάλλεται ανάλογα με το βάθος του βραχώδους υπεδάφους. Στις διατομές όπου αναγράφεται  $h_{\text{composite}}$  υποδηλώνεται το πάχος που προκύπτει συνδυαστικά από την υφιστάμενη στρώση της βάσης και το πάχος έως όπου συναντηθεί το δύσκαμπτο υπόστρωμα (βραχώδες υπόβαθρο).



Σχήμα 2. Υφιστάμενες διατομές εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίου.  
Figure 2. Existing flexible pavement cross-sections of the airport.

Κατά τη διάρκεια των αναλύσεων του ανάστροφου υπολογισμού, εξετάστηκε τόσο το βάθος του δύσκαμπτου υποστρώματος που εντοπίστηκε επιτόπου, όσο και το θεωρητικό βάθος όπως αυτό προκύπτει βάσει διεθνούς βιβλιογραφίας (π.χ. Rohde and Scullion, 1990). Πραγματοποιήθηκαν αρκετές διερευνητικές αναλύσεις προκειμένου να βελτιστοποιηθούν τα αποτελέσματα. Ενδεικτικά παρατίθενται σε μορφή διαγράμματος στα Σχήματα 3 και 4 οι αποκλίσεις που προκύπτουν κατά την εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων και των στρώσεων της βάσης / υπόβασης ενός τμήματος του οδοστρώματος του Διαδρόμου (που αντιστοιχεί στη Διατομή  $\Delta 1$ ) για διάφορες θεωρήσεις του βάθους του βραχώδους υπεδάφους, δηλαδή για διαφορετικά πάχη της υπερκείμενης από το δύσκαμπτο υπόστρωμα στρώσης των αμμοχάλικων.

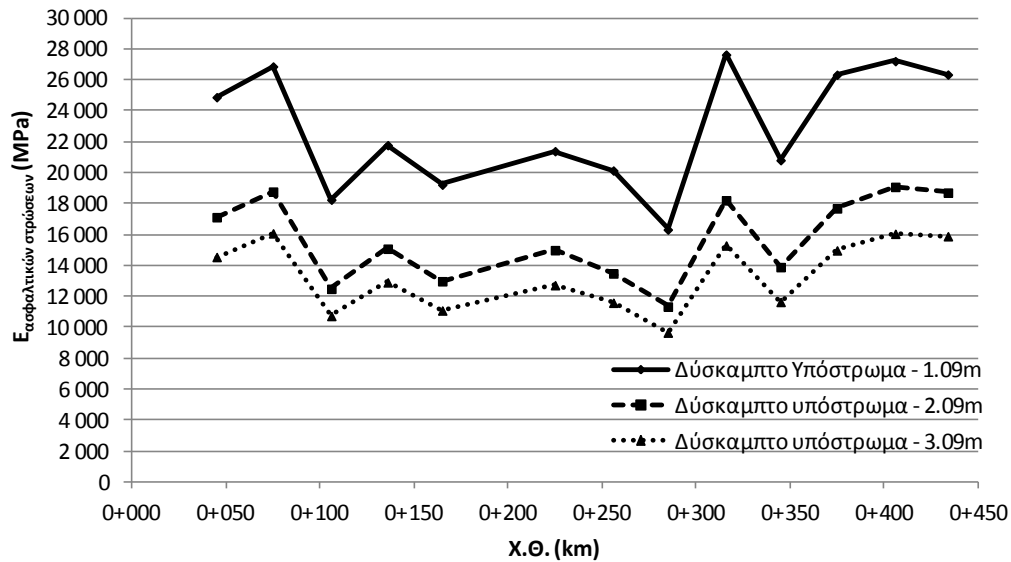
Στα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατηρείται ότι, σε γενικές γραμμές, τα μέτρα ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων είναι ιδιαίτερα υψηλά. Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται καθώς πρόκειται για γηρασμένες (λόγω παλαιότητας) ασφαλτικές στρώσεις, οι οποίες σε αρκετές περιοχές εμφανίζουν και εκτεταμένες ρηγματώσεις που υποδηλώνουν αστοχία λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος. Επίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, μεγαλύτερο βάθος του δύσκαμπτου υποστρώματος οδηγεί και σε μικρότερα μέτρα ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων. Το αντίθετο συμβαίνει για τις υποκείμενες στρώσεις από ασύνδετα υλικά (σχήμα 4), όπου η αύξηση του βάθους του δύσκαμπτου υποστρώματος οδηγεί και σε υψηλότερες τιμές μέτρων ελαστικότητας. Σημειώνεται, επίσης, ότι τόσο στα μέτρα ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων όσο και στα αντίστοιχα των στρώσεων της βάσης/υπόβασης η μεταβολή στις τιμές, όπως αυτές προέκυψαν από τον ανάστροφο υπολογισμό για τις διάφορες προσεγγίσεις, είναι μεγαλύτερη όσο το βάθος του θεωρητικού δύσκαμπτου υποστρώματος αυξάνεται. Όμοιες προσεγγίσεις πραγματοποιήθηκαν και για τα υπόλοιπα τμήματα.

Για τη βέλτιστη επιλογή του υπολογιστικού βάθους του δύσκαμπτου υποστρώματος, αξιολογήθηκαν στοιχεία από πρόσθετους εργαστηριακούς έλεγχους στα υλικά της βάσης / υπόβασης (ΕΔΑΦΟΣ, 2017). Κατόπιν τούτου και σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα στοιχεία για τις ασφαλτικές στρώσεις και την εμπειρία, εκτιμήθηκε ότι για βάθος 3m από τον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, τα μέτρα ελαστικότητας των επιμέρους υλικών ήταν περισσότερο αντιπροσωπευτικά και κατάλληλα για την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων που εξετάστηκαν.

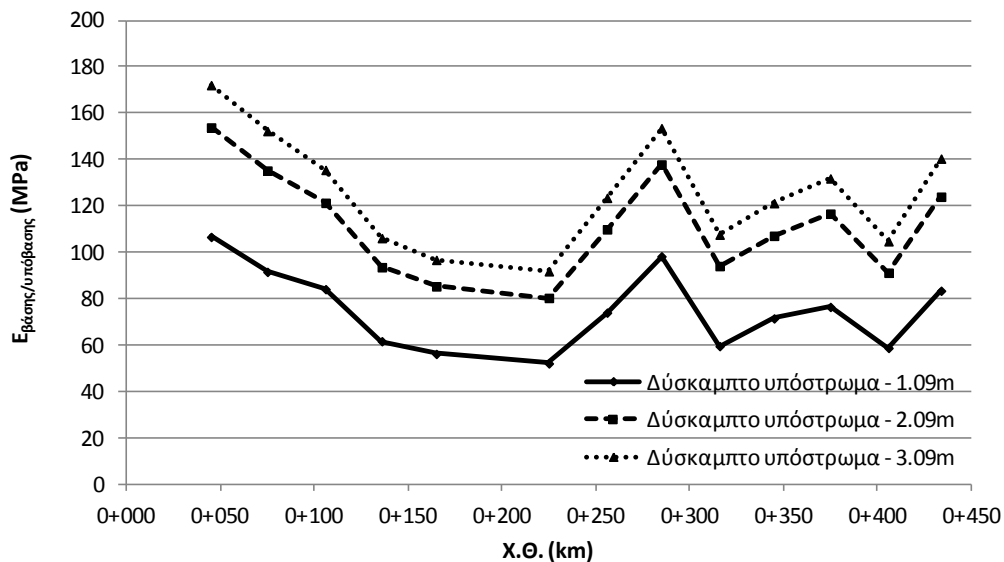
### 3.2 Επίδραση δύσκαμπτου υποστρώματος στη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος.

Σε συνέχεια της αξιολόγησης της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων του αεροδρομίου, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση κατάλληλης λύσης αποκατάστασης και αναβάθμισης των ανωτέρω τμημάτων (Σχήμα 2). Στα οδοστρώματα του Διαδρόμου εξετάστηκε η λύση απόξεσης μέρους των ανώτερων ασφαλτικών στρώσεων και ακολούθως επανεπίστρωσης της επιφάνειας με νέες ασφαλτικές στρώσεις συνολικού πάχους μεγαλύτερου του πάχους απόξεσης, ενώ στο οδόστρωμα του Τροχόδρομου εξετάστηκε η πλήρης αποξήλωση αντικατάσταση των υφιστάμενων ασφαλτικών στρώσεων.

Σύμφωνα με την κλασική προσομοίωση που χρησιμοποιείται διεθνώς, οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος βρίσκονται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων (αστοχία λόγω κόπωσης των ασφαλτικών μιγμάτων) και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (αστοχία λόγω παραμενουσών παραμορφώσεων). Στην παρούσα έρευνα το βραχώδες υπέδαφος που κατά περίπτωση βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του οδοστρώματος πρακτικά λειτουργεί ως η στρώση έδρασης (φυσικό έδαφος), και συνεπώς, όπως επιβεβαιώνεται και από τους σχετικούς υπολογισμούς, το ενδεχόμενο αστοχίας του οδοστρώματος λόγω παραμένουσας παραμόρφωσης της στρώσης έδρασης δεν είναι κρίσιμο.



Σχήμα 3. Μέτρα ελαστικότητας ασφαλτικών στρώσεων για ένα τυπικό τμήμα οδοστρώματος του Διαδρόμου για διαφορετικά βάθη δύσκαμπτου οδοστρώματος – Διατομή 1.  
Figure 3. Asphalt layers moduli for a typical pavement section of the Runway for different bedrock depths – Cross - section 1.



Σχήμα 4. Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων βάσης / υπόβασης σε τυπικό τμήμα οδοστρώματος του Διαδρόμου για διαφορετικά βάθη δύσκαμπτου οδοστρώματος – Διατομή 1.  
Figure 4. Base /Subbase moduli for a typical pavement section of the Runway for different bedrock depths – Cross-section 1.

Στην παρούσα έρευνα εφαρμόστηκαν οι αρχές του προτύπου της FAA (2016), και οι υπολογισμοί της διαστασιολόγησης πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό FAARFIELD. Για τις ανάγκες της σχετικής διερεύνησης διαμορφώθηκαν εναλλακτικές προσεγγίσεις, προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση του δύσκαμπτου υποστρώματος στα πλαίσια της αποκατάστασης των υφιστάμενων ασφαλτικών στρώσεων, ως ακολούθως:

1. Διαστασιολόγηση λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά τρία διαφορετικά βάρη του δύσκαμπτου υποστρώματος και κατά επέκταση τρία διαφορετικά πάχη των στρώσεων της βάσης/υπόβασης άνωθεν του δύσκαμπτου υποστρώματος ( $h_a$ ,  $h_b$  και  $h_v$ ) με ίδιο μέτρο ελαστικότητας (Σχήμα 5).
2. Διαστασιολόγηση με θεώρηση δύσκαμπτου υποστρώματος σε πολύ μεγάλο βάθος - προσομοίωση χωρίς δύσκαμπτο υπόστρωμα (Σχήμα 6).

Δ1	Δ2	Δ3	T2
Νέες ασφαλτικές στρώσεις $h=10\text{cm}$ , $E=4400\text{MPa}$ ( $23^\circ\text{C}$ )	Νέες ασφαλτικές στρώσεις $h=10\text{cm}$ , $E=4400\text{MPa}$ ( $23^\circ\text{C}$ )	Νέες ασφαλτικές στρώσεις $h=10\text{cm}$ , $E=4400\text{MPa}$ ( $23^\circ\text{C}$ )	Νέες ασφαλτικές στρώσεις $h=16\text{cm}$ , $E=4400\text{MPa}$ ( $23^\circ\text{C}$ )
Υφιστάμενες ασφαλτικές στρώσεις $h=5\text{cm}$ , $E=1200\text{MPa}$	Υφιστάμενες ασφαλτικές στρώσεις $h=5\text{cm}$ , $E=1200\text{MPa}$	Υφιστάμενες ασφαλτικές στρώσεις $h=5\text{cm}$ , $E=1200\text{MPa}$	Υφιστάμενες στρώσεις βάσης/υπόβασης $h_a=65\text{cm}$ / $h_b=165\text{cm}$ / $h_v=265\text{cm}$ , $E=130\text{MPa}$
Υφιστάμενες στρώσεις βάσης/υπόβασης $h_a=100\text{cm}$ / $h_b=200\text{cm}$ / $h_v=300\text{cm}$ , $E=130\text{MPa}$	Υφιστάμενες στρώσεις βάσης $h=35\text{cm}$ , $E=210\text{MPa}$	Υφιστάμενες στρώσεις βάσης/υπόβασης $h_a=75\text{cm}$ / $h_b=175\text{cm}$ / $h_v=275\text{cm}$ , $E=120\text{MPa}$	Βραχώδες υπόβαθρο $h= \infty$ , $E=3000\text{MPa}$
Βραχώδες υπόβαθρο $h= \infty$ , $E=3000\text{MPa}$	Υφιστάμενες στρώσεις υπόβασης $h_a=75\text{cm}$ / $h_b=175\text{cm}$ / $h_v=275\text{cm}$ , $E=200\text{MPa}$	Βραχώδες υπόβαθρο $h= \infty$ , $E=3000\text{MPa}$	
	Βραχώδες υπόβαθρο $h= \infty$ , $E=3000\text{MPa}$		

Σχήμα 5. Υπό διερεύνηση διατομές για την αποκατάσταση των υφιστάμενων οδοστρωμάτων του Διαδρόμου και του Τροχόδρομου 2 – θεώρηση δύσκαμπτου υποστρώματος.

Figure 5. Considered cross-sections for pavement rehabilitation design of Runway and Taxiway 2 – bedrock consideration.

Δ1	Δ2	Δ3	T2
Νέες ασφαλτικές στρώσεις $h=10\text{cm}$ , $E=4400\text{MPa}$ ( $23^\circ\text{C}$ )	Νέες ασφαλτικές στρώσεις $h=10\text{cm}$ , $E=4400\text{MPa}$ ( $23^\circ\text{C}$ )	Νέες ασφαλτικές στρώσεις $h=10\text{cm}$ , $E=4400\text{MPa}$ ( $23^\circ\text{C}$ )	Νέες ασφαλτικές στρώσεις $h=16\text{cm}$ , $E=4400\text{MPa}$ ( $23^\circ\text{C}$ )
Υφιστάμενες ασφαλτικές στρώσεις $h=5\text{cm}$ , $E=1200\text{MPa}$	Υφιστάμενες ασφαλτικές στρώσεις $h=5\text{cm}$ , $E=1200\text{MPa}$	Υφιστάμενες ασφαλτικές στρώσεις $h=5\text{cm}$ , $E=1200\text{MPa}$	Στρώση έδρασης $h= \infty$ , $E=130\text{MPa}$
Στρώση έδρασης $h= \infty$ , $E=130\text{MPa}$	Υφιστάμενες στρώσεις βάσης $h=35\text{cm}$ , $E=210\text{MPa}$	Στρώση έδρασης $h= \infty$ , $E=120\text{MPa}$	
	Στρώση έδρασης $h= \infty$ , $E=200\text{MPa}$		

Σχήμα 6. Υπό διερεύνηση διατομές για την αποκατάσταση των υφιστάμενων οδοστρωμάτων του Διαδρόμου και του Τροχόδρομου 2 – θεώρηση χωρίς δύσκαμπτο υπόστρωμα.

Figure 6. Considered cross-sections for pavement rehabilitation design of Runway and Taxiway 2 – no bedrock consideration.

Από τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής η θερμοκρασία σχεδιασμού για τα οδοστρώματα του αεροδρομίου προσδιορίζεται σε  $23^\circ\text{C}$ . Ακολούθως, για τις νέες ασφαλτικές στρώσεις, το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων εκτιμήθηκε βάσει των Ελληνικών Προδιαγραφών και προσαρμόστηκε στη θερμοκρασία των  $23^\circ\text{C}$ , ενώ για τις υφιστάμενες

εναπομένουσες στρώσεις τα μέτρα ελαστικότητας ελήφθησαν υπόψη από τον ανάστροφο υπολογισμό. Για το μέτρο ελαστικότητας του βραχώδους υποστρώματος χρησιμοποιήθηκε συντηρητικά η τιμή των 3000MPa.

### 3.3 Αποτελέσματα

Παρακάτω, παρατίθενται τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης των υπό-διερεύνηση οδοστρωμάτων όπως προέκυψε από την εφαρμογή των διαφορετικών προσεγγίσεων παρουσιάζοντας το συντελεστή αθροιστικής φθοράς των ασφαλτικών στρώσεων (Εξίσωση 3, Πίνακας 1).

$$CDF_i = \frac{\text{αριθμός διελεύσεων}}{\text{αριθμός επιτρεπόμενων διελεύσεων}} \text{ και } CDF = CDF_1 + CDF_2 + \dots + CDF_N \quad (3)$$

όπου:

$CDF_i$  ο συντελεστή αθροιστικής φθοράς για το αεροσκάφος  $i$ ,  $CDF$  ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς για όλα τα αεροσκάφη και  $N$  ο αριθμός των αεροσκαφών.

Πίνακας 1. Συντελεστής αθροιστικής φθοράς των νέων ασφαλτικών στρώσεων κατά την εφαρμογή των δύο προσεγγίσεων (με και χωρίς δύσκαμπτο υπόστρωμα).

Table 1 Cumulative Damage Factor of the new asphalt layers based on the two implemented approaches of bedrock and no-bedrock.

Υποτήμημα	Δύσκαμπτο υπόστρωμα $h_a=65-100\text{cm}$	Δύσκαμπτο υπόστρωμα $h_b=165-200\text{cm}$	Δύσκαμπτο υπόστρωμα $h_v=265-300\text{cm}$	Χωρίς δύσκαμπτο υπόστρωμα
Δ1	0.68	0.69	0.67	0.64
Δ2	0.26	0.25	0.25	0.23
Δ3	0.47	0.51	0.50	0.47
T2	0.79	1.02	1.04	1.01

Γενικά, για την περίπτωση της μερικής αποκατάστασης των ασφαλτικών στρώσεων (διατομές Δ1, Δ2 και Δ3), βάσει των ανωτέρω προκύπτει ότι ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς για τις ασφαλτικές στρώσεις προκύπτει περίπου ίσος και για τις δύο προσεγγίσεις / αναλύσεις (με και χωρίς δύσκαμπτο υπόστρωμα). Δεδομένου ότι στην ανάλυση με δύσκαμπτο υπόστρωμα η κρίσιμη στρώση είναι πάντοτε εκείνη του ασφαλτικού υλικού, στη δεύτερη προσέγγιση (χωρίς δύσκαμπτο υπόστρωμα) το τελικό απαιτούμενο πάχος των ασφαλτικών στρώσεων θα προκύψει από το δυσμενέστερο συντελεστή αθροιστικής φθοράς μεταξύ των ασφαλτικών στρώσεων και της στρώσης έδρασης. Στο οδόστρωμα του Τροχόδρομου (διατομή T2), όπου δεν υπάρχει στρώση υφιστάμενων ασφαλτικών στρώσεων, ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς των ασφαλτικών στρώσεων είναι σημαντικά μικρότερος στην περίπτωση ανάλυσης με δύσκαμπτο υπόστρωμα σε βάθος μικρότερο του ενός μέτρου ενώ δεν παρουσιάζει αξιόλογη διακύμανση στην περίπτωση που το βάθος υπερβαίνει τα 165cm.

Τέλος, βάσει των αναλύσεων για τα διάφορα βάθη δύσκαμπτου υποστρώματος προέκυψε ότι στις διατομές Δ1, Δ2 και Δ3, όπου υπάρχει η ενδιάμεση στρώση του εναπομείναντος ασφαλτικού υλικού ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς των ασφαλτικών στρώσεων είναι πρακτικά ίσος για τις διάφορες αναλύσεις, σε αντίθεση με τη διατομή T2, όπου η υπόψη στρώση δεν υφίσταται.

### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η επίδραση της ύπαρξης δύσκαμπτου υποστρώματος (βραχώδους υποβάθρου) στην εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων οδοστρωμάτων αεροδρομίου και στη διαστασιολόγηση της δομικής αποκατάστασης του. Από τις σχετικές αναλύσεις προέκυψε ότι για την εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας των

στρώσεων των υφιστάμενων οδοστρωμάτων μέσω του ανάστροφου υπολογισμού, το βάθος του δύσκαμπτου υποστρώματος επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα που εξάγονται. Η εφαρμογή βιβλιογραφικών μεθόδων για τον θεωρητικό προσδιορισμό του κατάλληλου, για τις ανάγκες των υπολογισμών, βάθους δύσκαμπτου υποστρώματος μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη δεδομένου ότι στην πράξη το βάθος του φυσικού υποστρώματος που ενδεχομένως υπάρχει μπορεί να παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις.

Σχετικά με την επίδραση του βάθους του δύσκαμπτου υποστρώματος στους υπολογισμούς επεμβάσεων αποκατάστασης οδοστρωμάτων αεροδρομίων με το λογισμικό FAARFIELD διαπιστώθηκε ότι η επίδραση του είναι περιορισμένη στην περίπτωση βάσεων με υψηλό μέτρο ελαστικότητας, ακόμη και αν το πάχος τους είναι μικρό. Επίσης από τις εναλλακτικές που εξετάστηκαν προκύπτει ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης προσδιορισμού της κρίσιμης αθροιστικής φθοράς γενικά δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη δύσκαμπτου υποστρώματος σε βάθος μεγαλύτερο των 160cm. Αντίθετα, στην περίπτωση που το βάθος είναι μικρότερο του ενός μέτρου, η επίδραση του δύσκαμπτου υποστρώματος ενδέχεται να είναι σημαντική.

Επισημαίνεται ότι οι παραπάνω διαπιστώσεις ενδέχεται να διαφοροποιούνται σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου τα δεδομένα αποκλίνουν σημαντικά από τα αντίστοιχα της παρούσας διερεύνησης. Για παράδειγμα η επίδραση του βάθους του δύσκαμπτου υποστρώματος σε αναλύσεις για δυσμενέστερες φορτίσεις από αεροσκάφη μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο επέκτασης της έρευνας που πραγματοποιήθηκε.

## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aouad, M. F., Stokoe, K. H., and Joh, S. (2000). "Estimating Subgrade Stiffness and Bedrock Depth: Combined Falling Weight Deflectometer and Simplified Spectral Analysis of Surface Waves Measurements". DOI - 10.3141/1716-05 Transportation Research Record 1716(1), National Research Council, Washington, D.C., pp. 40-48.
- Christopher, B. R., Schwartz, C. and Boudreau, B. (2006). "Geotechnical Aspects of Pavements", FHWA NHI-05-037, National Highway Institute.
- Federal Aviation Administration (FAA) (2011). "Advisory Circular - Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements", AC 150/5370-11b, Washington D.C.
- Federal Aviation Administration (FAA) (2016). "Advisory Circular - Airport Pavement Design and Evaluation", AC 150/5320-6F, Washington D.C.
- Molenaar A.A.A. (2006). "Structural Evaluation and Strengthening of Flexible Pavements Using Deflection Measurements and Visual Condition Surveys", Lecture Notes, CT 4860, Structural Design of Pavements-Part VI, T.U. Delft.
- Rohde, G. T. and Scullion, T. (1990). "MODULUS 4.0: Expansion and Validation of the MODULUS Backcalculation System", FHWA/TX - 91/1123-3, Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, College Station, Texas.
- Seng, C. R., Stokoe II, K. H. and Roesset, J. M. (1993). "Effect of Depth to Bedrock on the Accuracy of Backcalculated Moduli Obtained with Dynaflect and FWD Tests", FHWA/TX-93+1175-5, Center for Transportation Research Bureau of Engineering Research, The University of Texas at Austin.
- Ullidtz P. (1987). "Pavement Analysis". Elsevier Science Publication, Amsterdam.
- Washington, S.P., Karlaftis, M.G., and Mannering, L.F. (2003). "Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis". Chapman & Hall / CRC Press, Washington D.C.
- ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. (2017). "Επαναξιολόγηση Κατάστασης Οδοστρωμάτων Αεροδρομίου Μυκόνου», B-JMK-A-D-DRG-OX02-MXX-00.
- Λοΐζος Α., Σαριδάκης, Δ., "Συμβολή στον Προσδιορισμό Μέτρων Ελαστικότητας Οδοστρώματος με την Τεχνική του FWD". Δελτίο ΚΕΔΕ τ. 113-116, 1992.