



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

κ.ε.ε.: L6929
α.ρ.: L7053



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ**

Γ. Χαρωνίτης
Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Επιβλέπων: Α. Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2008

Σ' αυτούς που στήριξαν
αυτή την προσπάθεια
με την αγάπη τους

... και στη Νίκη Ψ.
για την “ηθική αυτουργία”

Ευχαριστίες

Κάθε διαδρομή στις λιγότερο εξερευνημένες περιοχές της επιστήμης προϋποθέτει τη διέλευση από δύσβατα ή και (φαινομενικά) αδιέξοδα μονοπάτια. Σε κάθε τέτοια προσπάθεια, η γνώση και η εμπειρία των «αρχαιότερων» που μεταδίδονται μέσω καθοδήγησης, συμβουλών και παροτρύνσεων, αποτελούν πολύτιμα εφόδια για την προσέγγιση του τελικού προορισμού.

Για τους λόγους αυτούς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα της διατριβής, Καθηγητή ΕΜΠ κ. Ανδρέα Λοΐζο, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να πραγματοποιήσω αυτή τη διαδρομή. Σε όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας η συστηματική υποστήριξη, η καθοδήγηση και οι συμβουλές του συνέβαλλαν ώστε οι διερευνήσεις να επικεντρωθούν στις σωστές κατευθύνσεις, να ξεπεραστούν τα προβλήματα και να ολοκληρωθεί η παρούσα διατριβή. Αποτελούν δε παρακαταθήκη για τη συνέχιση της πορείας όχι μόνο στην επιστήμη αλλά και στη ζωή.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ κ. Κωνσταντίνο Αμπακούμκιν, μέλος της τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, για το ενδιαφέρον που έδειξε, το χρόνο που αφιέρωσε, την εποικοδομητική κριτική και τις πολύτιμες, για την αρτιότητα της διατριβής, υποδείξεις του. Θεωρώ βέβαιο ότι οι υποδείξεις και οι παροτρύνσεις του θα αξιοποιηθούν ακόμη περισσότερο στο μέλλον.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Στυλιανό Κόλια, τ. Αν. Καθηγητή ΕΜΠ και μέλος της τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, για τις εύστοχες επισημάνσεις του, ιδιαίτερα ως προς το κείμενο της διατριβής. Ήταν πολύ σημαντικό ότι όπου και όποτε χρειάστηκε ανταποκρίθηκε άμεσα, και με διάθεση μετάδοσης των γνώσεων και της εμπειρίας του, ώστε να υποστηριχθεί η προσπάθεια μου.

Τέλος, θα ήταν παράληψη να μην αναγνωριστεί ο σημαντικός ρόλος που έχει το περιβάλλον σε κάθε προσπάθεια, και οι επιδράσεις του στο αποτέλεσμα της. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω όλα τα μέλη και τους συνεργάτες του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, οι οποίοι αποτέλεσαν το περιβάλλον μέσα στο οποίο δημιουργήθηκαν οι προϋποθέσεις και η δυνατότητα πραγματοποίησης αυτής της εργασίας. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τα μέλη και τους συνεργάτες του Εργαστηρίου Οδοποιίας, το «οικοσύστημα» μέσα στο οποίο ολοκληρώθηκε ο κύκλος της διατριβής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	4
Summary	8
1. Εισαγωγή στη Δομική Κατάταξη Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων.....	11
1.1 Το Πρόβλημα – Σύνομη Ιστορική Αναδρομή.....	11
1.2 Συνοπτική Παρουσίαση της Μεθόδου ACN-PCN (για Ασφαλτικά Οδοστρώματα Αεροδρομίων)	13
2. Διερεύνηση και Σχολιασμός της Μεθόδου ACN-PCN	18
2.1 Παραδοχές για τη Διερεύνηση της Μεθόδου ACN-PCN.....	18
2.2 Διερεύνηση Μεθόδου ACN-PCN σε Ασφαλτικά Οδοστρώματα	23
2.2.1 Οδοστρώματα με Βάση από Ασύνδετο Αμμοχάλικο	24
2.2.2 Οδοστρώματα με Βάση από Αμμοχάλικο Κατεργασμένο με Υδραυλικές Κονίες	30
2.2.3 Διαπιστώσεις.....	33
2.3 Διεθνείς Προβληματισμοί για τη Δομική Κατάταξη και τη Μέθοδο ACN-PCN.....	34
3. Προτεινόμενος Νέος Δείκτης για τη Συγκριτική Αξιολόγηση και Κατάταξη της Επίδρασης των Αεροσκαφών.....	37
3.1 Εισαγωγή.....	37
3.2 Δείκτης Επίδρασης Αεροσκάφους σε Οδόστρωμα ALI (Aircraft Loading Index)	37
3.2.1 Ο Δείκτης ALI για Ασφαλτικά Οδοστρώματα Αεροδρομίων με Βάση από Ασύνδετο Αμμοχάλικο	38
3.2.2 Ο Δείκτης ALI για Ασφαλτικά Οδοστρώματα Αεροδρομίων με Βάση από Αμμοχάλικο Κατεργασμένο με Υδραυλικές κονίες.....	54
4. Διερεύνηση του Δείκτη ALI με Στοιχεία Από Πειραματικές Δοκιμές σε Πραγματικό Κλίμακα	63
4.1 Εισαγωγή – Περιγραφή του Συστήματος Δοκιμών.....	63
4.2 Βασικά Στοιχεία Πειραμάτων	65
4.3 Δεδομένα και Διαδικασία Ανάλυσης Πειραμάτων	69
4.4 Ανάστροφος Υπολογισμός– Εκτίμηση Μηχανικών Χαρακτηριστικών Υλικών	70
4.5 Προσομοίωση Διατομών Πειράματος NAPTf με Τρισδιάστατα Πεπερασμένα Στοιχεία..	75
4.6 Υπολογισμοί και Συγκριτικά Αποτελέσματα Μεταξύ Πραγματικής Φόρτισης και ALI	77
5. Διερεύνηση Αποτελεσμάτων Υπολογισμών από Προσομοιώσεις των Οδοστρωμάτων με Αντίστοιχες Καταγραφές σε Πραγματικό Χρόνο.....	84
5.1 Εισαγωγή.....	84
5.2 Συνοπτικές Πληροφορίες για το Σύστημα Καταγραφής του NAPTf.....	85
5.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης με Επιτόπου Καταγραφές Τάσεων και Παραμορφώσεων.....	87

6. Αξιοποίηση του Δείκτη ALI στη Δομική Κατάταξη Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων ..	92
6.1 Μια Σημαντική Χαρακτηριστική Ιδιότητα του Δείκτη ALI.....	92
6.2 Κατάταξη και Έλεγχος Ασφαλικών Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων με το Δείκτη APCI (Airport Pavement Capacity Index).....	95
6.2.1 Οδοστρώματα με Βάση και Υπόβαση από Ασύνδετο Αμμοχάλικο.....	96
6.2.2 Οδοστρώματα με Βάση από Αμμοχάλικο Κατεργασμένο με Τσιμέντο.....	101
6.3 Εφαρμογές Δεικτών ALI και APCI σε Υφιστάμενα Οδοστρώματα Αεροδρομίων.....	104
6.3.1 Εφαρμογή στο Οδόστρωμα του Κρατικού Αερολιμένα Ρόδου (ΚΑΡΔ)	104
6.3.2 Εφαρμογή σε Οδόστρωμα του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών (ΔΑΑ) «Ελευθέριος Βενιζέλος»	107
6.3.3 Εφαρμογή σε Οδόστρωμα Στρατιωτικού Αεροδρομίου.....	110
7. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	113
7.1 Συμπεράσματα.....	113
7.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	116
Βιβλιογραφία – Παραπομπές.....	117
Συντομογραφίες - Συμβολισμοί.....	123
Παράρτημα 1: Στοιχεία Φορτίου Αεροσκαφών.....	124
Γενικές Διατάξεις Κύριων Φορέων:.....	124
Παράρτημα 2: Δεδομένα και Αποτελέσματα Υπολογισμών Κεφαλαίου 3	127
Πίνακας Π2.1α: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφατικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο (κρίσιμη οριζόντια τάση στον πυθμένα (κάτω ίνα) των ασφαλικών στρώσεων)	127
Πίνακας Π2.1β: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφατικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο (κρίσιμη οριζόντια τάση στον πυθμένα (κάτω ίνα) των ασφαλικών στρώσεων)	129
Πίνακας Π2.2α: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφατικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο (κρίσιμη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα (κάτω ίνα) των ασφαλικών στρώσεων).....	131
Πίνακας Π2.2β: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφατικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο (κρίσιμη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα (κάτω ίνα) των ασφαλικών στρώσεων).....	133
Πίνακας Π2.3: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφατικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο (κρίσιμη οριζόντια τάση στον πυθμένα (κάτω ίνα) της κατεργασμένης στρώσης)	135
Πίνακας Π2.4: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφατικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο (κρίσιμη οριζόντια αν. παραμόρφωση στον πυθμένα (κάτω ίνα) της κατεργασμένης στρώσης).....	136

Παράρτημα 3: Δεδομένα και Αποτελέσματα Κεφαλαίου 4.....	138
Πίνακας Π3.1: Χαρακτηριστικές τιμές μέτρων ελαστικότητας από ανάστροφο υπολογισμό μετρήσεων FWD στα οδοστρώματα των πειραμάτων που εξετάστηκαν.....	138
Πίνακας Π3.2 Μέτρα Ελαστικότητας στρώσεων για τις διατομές που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις των κεφαλαίων 5 και 6 (προέκυψαν από ανάστροφο υπολογισμό με το λογισμικό BACKFAA).....	139
Παράρτημα 4: Αποτελέσματα Κεφαλαίων 5 και 6.....	140
Πίνακας Π4.1: Αναλυτικοί υπολογισμοί και αποτελέσματα για τα κρίσιμα μεγέθη των ασφαλικών στρώσεων στις διατομές που εξετάστηκαν	140
Πίνακας Π4.2: Αναλυτικοί υπολογισμοί και αποτελέσματα για τα κρίσιμα μεγέθη της στρώσης έδρασης στις διατομές που εξετάστηκαν.	142
Πίνακας Π4.3: Σύγκριση υπολογισμένων και μετρημένων κρίσιμων αν. παραμορφώσεων των ασφαλικών στρώσεων	144
Πίνακας Π4.4: Λόγοι τιμών υπολογισμένων κρίσιμων μεγεθών -σύγκριση με λόγους ALI .	145

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με δεδομένη τη συνεχή αύξηση της ζήτησης για αεροπορικές μεταφορές και σε συνδυασμό με την ανάγκη μεγιστοποίησης του οφέλους από την εκμετάλλευση των υποδομών, η υιοθέτηση μιας απλής και αξιόπιστης διαδικασίας για την αξιολόγηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών και τον έλεγχο επάρκειας της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη διαχείριση τους. Παράλληλα, όπως έχει αναγνωριστεί διεθνώς, διευκολύνει σημαντικά την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των εμπλεκομένων στις αεροπορικές μεταφορές (αεροπορικές εταιρείες, κατασκευαστές, αρχές αεροδρομίων).

Στο πλαίσιο αυτό, ο ICAO (International Civil Aviation Organization) έχει εισάγει τη μέθοδο ACN – PCN (Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number), η οποία σήμερα αποτελεί το μόνο διεθνώς αποδεκτό σύστημα αξιολόγησης της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών και κατάταξης της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων. Όμως, παρά την ευρεία αποδοχή της μεθόδου ACN-PCN για τη δημοσίευση της φέρουσας ικανότητας, υπάρχουν ερωτηματικά για την καταλληλότητα της ως προς τη σύγκριση της επίδρασης των διαφορετικών αεροσκαφών και τον έλεγχο επάρκειας των οδοστρωμάτων. Ειδικότερα, όπως παρουσιάζεται και στην παρούσα εργασία, σε αρκετές περιπτώσεις η κατάταξη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών δεν είναι αξιόπιστη καθώς αεροσκάφη με μικρότερο δείκτη ACN αποδεικνύονται δυσμενέστερα για τα οδοστρώματα σε σχέση με άλλα που έχουν μεγαλύτερο ACN. Επίσης κατά τον προσδιορισμό του PCN διαπιστώνεται ότι η εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται διεθνώς δεν προσεγγίζει κάποια σταθερή τιμή (η οποία εκφράζει τη φέρουσα ικανότητα) και κατά συνέπεια είναι δύσκολο να γίνει εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος μέσω του PCN του και μόνο.

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να επισημανθεί ότι με βάση τις παραδοχές τις μεθόδου ACN-PCN η κρισιμότητα της φόρτισης ενός αεροσκάφους για τα ασφαλικά οδοστρώματα καθορίζεται με βάση την αναμενόμενη επίδραση τους στη στρώση έδρασης μόνο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένου ότι δεν αξιολογείται η επίδραση του φορτίου των αεροσκαφών σε άλλες κρίσιμες θέσεις όπου υπάρχει ενδεχόμενο αστοχίας των ασφαλικών στρώσεων (εύκαμπτα οδοστρώματα) ή των στρώσεων από αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κονίες (ημιάκαμπτα οδοστρώματα). Επιπλέον, ο καθορισμός του δείκτη ACN με βάση τη μέθοδο διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων CBR περιορίζει το εύρος και τις δυνατότητες εφαρμογής του δείκτη καθώς είναι δύσκολο να αξιοποιηθεί στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται αναλυτικά εργαλεία για την αξιολόγηση του οδοστρώματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και στο πλαίσιο συμβολής στην συγκριτική αξιολόγηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών και της δομικής κατάταξης των ασφαλικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων, στην παρούσα διατριβή αναπτύσσεται και διερευνάται μία εναλλακτική μέθοδος μέσω της εισαγωγής ενός νέου δείκτη που αφορά τη φόρτιση των αεροσκαφών και ονομάζεται ALI (Aircraft Loading Index). Ο προτεινόμενος δείκτης κατάταξης στηρίζεται στη θεώρηση ενός απλού τροχού με κυκλική επιφάνεια επαφής σταθερής ακτίνας (R), ενώ η επιβαλλόμενη επί του οδοστρώματος πίεση (p) μεταβάλλεται ως συνάρτηση του φορτίου του φορείου του αεροσκάφους, σε αντίθεση με τους παλαιότερους δείκτες LCN και PCN (οι οποίοι χρησιμοποιούν θεώρηση μεταβλητής ακτίνας). Η ακτίνα R του απλού τροχού του ALI εξαρτάται από τον τύπο και την κατηγορία του οδοστρώματος. Οι τιμές των προτεινόμενων R (σταθερή ανά τύπο και κατηγορία οδοστρώματος) και p προκύπτουν από μία υπολογιστική διαδικασία διαδοχικών προσεγγίσεων, ώστε στις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος κάθε τύπου και κατηγορίας οι προκύπτουσες τιμές των εντατικών και παραμορφωσιακών αποτελεσμάτων με τις θεωρήσεις (α) του ισοδυνάμου απλού τροχού και (β) του πραγματικού φορείου να συγκλίνουν στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Όπως δείχθηκε, οι αποκλίσεις κυμαίνονται σε αποδεκτά όρια. Στις διερευνήσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι οδοστρωμάτων (εύκαμπτα – ημιάκαμπτα) και δύο κατηγορίες ανά τύπο, ενώ σύμφωνα και με τη σχετική διεθνή εμπειρία και πρακτική ως κρίσιμες θέσεις για τα εύκαμπτα οδοστρώματα θεωρήθηκαν ο πυθμένας (κάτω ίνα) των ασφαλικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης, ενώ για ημιάκαμπτα οδοστρώματα ο πυθμένας (κάτω ίνα) της στρώσης από κατεργασμένο υλικό.

Οι απαραίτητοι υπολογισμοί εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια αναλυτικών προσομοιωμάτων και εργαλείων υπολογισμού. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό APSA (Airport Pavement Structural Analysis) το οποίο έχει αναπτυχθεί και εξελίσσεται στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ και βασίζεται στην θεωρία ελαστικών επάλληλων στρώσεων, καθώς και το λογισμικό ABAQUS το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των (τρισεδιάστατων) πεπερασμένων στοιχείων.

Για την εμβάθυνση στη διερεύνηση του ALI πραγματοποιήθηκε έλεγχος της καταλληλότητας του με χρήση πειραματικών δεδομένων από εγκαταστάσεις κλίμακας 1:1. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από δοκιμές οδοστρωμάτων αεροδρομίων που πραγματοποιήθηκαν στην εγκατάσταση του NAPTF (National Airport Pavement Testing Facility) από την FAA σε συνεργασία με τη Boeing. Ο έλεγχος του δείκτη ALI πραγματοποιήθηκε με σύγκριση (α) υπολογιστικών αποτελεσμάτων δείκτη και πραγματικών φορέων και (β) δείκτη και μετρηθέντων αποτελεσμάτων από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Όπως διαπιστώθη-

κε οι εκτιμήσεις του ALI για τα κρίσιμα μεγέθη που ελέγχθηκαν δεν διαφέρουν από τις αντίστοιχες που προκύπτουν με χρήση του πραγματικού φορείου και αναλυτικών μεθόδων.

Έχοντας ολοκληρώσει τη διερεύνηση και τον έλεγχο αξιοπιστίας του δείκτη ALI για τη συγκριτική κατάταξη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών, στο πλαίσιο της περαιτέρω αξιοποίησης του για τη δημοσίευση και τον έλεγχο επάρκειας της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων εισάγεται ο αντίστοιχος δείκτης δομικής κατάταξης APCI (Airport Pavement Capacity Index). Ο δείκτης APCI για ένα οδόστρωμα υπολογίζεται με βάση το δείκτη ALI ο οποίος μπορεί να εξυπηρετηθεί από το οδόστρωμα για ένα δεδομένο αριθμό διελεύσεων και μέσω μιας απλής σχέσης-ανισότητας προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου επάρκειας της φέρουσας ικανότητας του, όπως επίσης και μία εκτίμηση της φθοράς και της εναπομένουσας ζωής του. Οι προκαταρκτικές εφαρμογές της μεθόδου ελέγχου με τους δείκτες ALI και APCI θεωρούνται πολύ ενθαρρυντικές για την πρακτική αξιοποίηση και περαιτέρω εξέλιξη τους.

Συνολικά, οι κυριότερες διαπιστώσεις που προκύπτουν από τις διερευνήσεις της παρούσας διατριβής είναι οι ακόλουθες:

- Η εκτίμηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών με κριτήριο το δείκτη ACN δεν είναι επαρκώς αξιόπιστη. Σε αρκετές περιπτώσεις η φόρτιση από αεροσκάφη με μικρότερη τιμή δείκτη ACN αποδείχτηκε δυσμενέστερη σε σχέση με τη φόρτιση αεροσκαφών με μεγαλύτερο ACN.
- Ο προσδιορισμός του δείκτη PCN οδηγεί σε αποτέλεσμα αμφιβόλου πρακτικής αξίας και ακρίβειας δεδομένου ότι για το ίδιο οδόστρωμα η συγκριτική εφαρμογή διεθνώς αποδεκτών μεθόδων οδηγεί σε εντελώς διαφορετικά και μη συγκρίσιμα αποτελέσματα.
- Η μέθοδος ACN-PCN μπορεί να δώσει μόνο ενδεικτική πληροφορία για τη σχετική επίδραση των αεροσκαφών και την επάρκεια της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων, τουλάχιστον στα ασφαλτικά οδοστρώματα. Για το λόγο αυτό και στην πράξη δεν χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της διαχείρισης τους.
- Ο δείκτης ALI είναι κατάλληλος για την εκτίμηση και κατάταξη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών σε οδοστρώματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά και δομική συμπεριφορά.
- Σε σύγκριση με το δείκτη ACN, η εκτίμηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών με κριτήριο το δείκτη ALI προσεγγίζει περισσότερη την αντίστοιχη του πραγματικού φορείου.
- Για τον έλεγχο επάρκειας ενός οδοστρώματος με βάση τους δείκτες ALI και APCI μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελέσματα τόσο από κλασσικές μεθόδους δομικής

αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων όσο και από εξελεγμένες υπολογιστικές μεθόδους.

- Η μέθοδος ALI – APCI μπορεί να απλουστεύει την εκτίμηση των αναμενόμενων συνεπειών στο οδόστρωμα λόγω μεταβολής της κυκλοφορίας και διευκολύνοντας τη διαχείριση του από τον αρμόδιο φορέα.
- Η μέθοδος ALI – APCI μπορεί να δώσει πληροφορίες και εκτιμήσεις για την επάρκεια και τις επιπτώσεις της χρήσης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων από νέους τύπους βαρέων αεροσκαφών όπως το A380.

SUMMARY

Contemporary airport management is under pressure to maximize profits by the most efficient use of the transportation infrastructure, whilst facing an ever increasing demand for air transport. The adoption of a simple and reliable procedure for rating the aircraft load and checking the adequacy of the pavement bearing capacity would form a significant tool in support of effective airport management. In addition, the use of a classification and reporting system may facilitate the information exchange among the different parts involved in air transport matters (airport managers, airline operators, aircraft manufacturers).

Considering this fact, the ICAO (International Civil Aviation Organisation) has introduced the ACN-PCN (Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number) method which currently is the only universally accepted system for rating the aircraft load and reporting the bearing capacity of pavements. However, despite the wide use of the ACN-PCN there are several questions about the suitability and accuracy of the method regarding the comparison of the effect of the different aircraft and the examination the adequacy of the pavement bearing capacity. More specifically, as shown also in this research, there are several cases when aircrafts with lower ACNs proved to be more damaging for pavements compared to aircrafts with higher ACNs. In addition, the estimation of a pavement PCN using several internationally accepted methods provides very different and incomparable results, leading to the conclusion that the PCN of a pavement does not express its bearing capacity in a unique matter. As consequence, it seems not possible to have a reliable indication for the pavement bearing capacity by its PCN reporting.

It should be noted here that according to the ACN-PCN method assumptions, for the asphalt pavements the critical load effect of an aircraft is estimated only for the possibility of the subgrade failure. This is very important since the ACNs do not take into account the potential critical effect for other layers and materials, including the possibility of producing significant damage or failure of the asphalt concrete or hydraulically bound materials. In addition, the adoption of the CBR (California Bearing Ratio) method for the definition of the ACN limits its capabilities, especially in relation with pavement analyses using computational tools.

Taking all these into account, in this research an alternative classification system is introduced, based on a new index named ALI (Aircraft Loading Index) for expressing the relative aircraft load effect. In contrast to older indexes such as the LCN and the ACN which use equivalent single wheel with constant pressure, the ALI utilizes an equivalent single wheel load with constant radius (R) and variable pressure (P) which is a function of the actual air-

craft load. For each pavement type and category, a suggested R value has been estimated and for each aircraft a pressure value P can be estimated after suitable calculations so as to produce a critical effect for the pavement similar to that the actual load. Following the international practice the critical effect for flexible pavements was assumed to take place at the bottom of the asphalt concrete layer (fatigue) and the top of the subgrade (permanent deformation). For semi-rigid pavements, the critical effect is assumed to be at the bottom of the hydraulically bound base layer (fatigue). As shown, in all cases the deviations between the ALI equivalent single wheel estimations and the actual load are acceptable.

The necessary calculations was made using analytical tools and more specifically the APSA (Airport Pavement Structural Analysis) software, which uses the multi-layer elastic theory and has been developed in the NTUA Laboratory of Highway Engineering and the well known ABAQUS 3D finite element software.

Further investigations towards the verification of ALI capability to express the critical effect of aircraft load at a pavement were undertaken using Large Scale Facility (LFC) test data. Data used in the models derives from airport pavement testing undertaken at the National Airport Pavement Facility (NAPTF) by FAA in cooperation with Boeing. The investigation of ALI included comparison of (a) the critical effect of the actual load and the ALI as it is estimated using analytical methods and (b) the ALI estimation and the measured critical stress or strain. The research showed that the ALI estimations for the critical stress and strain values do not differ from the respective of the actual load.

After successfully completing the ALI investigation, it is possible to further utilize it for the classification and checking of the bearing capacity of airport pavements. For this purpose, the Airport Pavement Capacity Index (APCI) is introduced, which expresses the bearing capacity of a pavement in terms of the maximum ALI that can be serviced for a selected number of operations. Through a simple procedure which relates the pavement APCI and the ALI values of the aircrafts that use the pavement it is possible to examine whether the bearing capacity is adequate to serve the requested traffic, as well as to estimate the expected damage or remaining life of the pavement. Preliminary applications of the proposed method seem to be very promising for the practical use and extension of the ALI and APCI indexes.

The major findings from the investigations undertaken are the following:

- The ACN estimation for the aircraft relative effect on a pavement may not be adequately reliable. In several cases aircrafts with lower ACNs proved to have a more severe effect compared to others with higher ACN.

- The PCN estimation provides results which are difficult to use in practice since the different methods provide incompatible, not comparable results.
- At least for the asphalt pavements, the ACN-PCN method provides only rough indications about the relative effect of the aircraft load and the pavement bearing capacity. For this reason in practice it is rarely used as a contribution for the management of airport pavements.
- The proposed, new ALI index is suitable for the estimation and rating of the aircraft load effect for different types of asphalt pavements. Based on investigations using real-time data, the ALI estimation for the critical stresses and strains are similar to those of the actual gear.
- Compared to ACN, the ALI estimation of the critical effect of an aircraft is closer to that of the actual gear.
- By using ALI and APCI it is possible to examine the adequacy of pavement bearing capacity using results from both traditional pavement analyses and modern computational tools.
- The proposed ALI-APCI method can provide useful information for managing airport pavements by investigating the effect of different scenarios for traffic changes.
- The ALI-APCI method can provide information and estimations about the pavement adequacy and the potential effect of serving the new large aircraft types such as the A380.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

1.1 Το Πρόβλημα – Σύντομη Ιστορική Αναδρομή

Παρά τα προβλήματα και τις δυσκολίες (τρομοκρατικές ενέργειες, πόλεμοι, ασθένειες, διεθνές οικονομικό περιβάλλον κλπ) που επιδρούν αρνητικά στις μετακινήσεις, οι επιβατικές αεροπορικές μεταφορές τις τελευταίες δύο δεκαετίες εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη αύξηση ζήτησης από τις επίγειες και τις θαλάσσιες μεταφορές. Σύμφωνα με τις προβλέψεις της διεθνούς ένωσης διαχειριστών αεροδρομίων (Airport Council International - ACI) σε παγκόσμιο επίπεδο και μέχρι το 2020 η επιβατική κίνηση αναμένεται να αυξάνει ετησίως κατά μέσο όρο σε ποσοστό 3,6% [1], ενώ τα σχετικά στοιχεία για τα ευρωπαϊκά αεροδρόμια δείχνουν ότι στην Ευρωπαϊκή Ένωση η αύξηση της ζήτησης για αεροπορικές μεταφορές συνεχώς υπερβαίνει τις σχετικές προβλέψεις [2], [3].

Λόγω της ραγδαίας αύξησης της ζήτησης, ήδη από τη δεκαετία του '80 [4] είχε γίνει αντιληπτό ότι ο ενδεδειγμένος και συστηματικός έλεγχος της συμβατότητας μεταξύ της καταπόνησης που προκαλούν τα φορτία των αεροσκαφών με τη φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων, αποτελεί μια αναγκαιότητα για τις αρχές κάθε αεροδρομίου [5]. Παράλληλα, ο έλεγχος αυτός ενδιαφέρει σημαντικά τους κατασκευαστές οι οποίοι εισαγάγουν νέους τύπους μεγαλύτερων και βαρύτερων αεροσκαφών, καθώς και τους διαχειριστές των αεροπορικών εταιριών / μεταφορών οι οποίοι θέλουν σε κάθε περίπτωση να μπορούν να επιλέγουν το βέλτιστο τύπο αεροσκάφους για να εξυπηρετήσουν την εκάστοτε ζήτηση και τις μεταβολές αυτής. Είναι προφανές ότι όλα τα εμπλεκόμενα μέρη συμφωνούν σε ένα κοινό στόχο που δεν είναι άλλος από την πλήρη εκμετάλλευση του κυκλοφοριακού φόρτου που μπορεί να εξυπηρετηθεί χωρίς να διακυβεύεται τόσο η ασφάλεια των πτήσεων όσο και πρόκληση εκτεταμένων φθορών στο οδόστρωμα οι οποίες επισύρουν σημαντική οικονομική ζημία που επαυξάνεται από τη διακοπή της χρήσης ενός διαδρόμου για εργασίες αποκατάστασης.

Στο πλαίσιο αυτό, η εισαγωγή ενός συστήματος ελέγχου της δομικής επάρκειας του οδοστρώματος με τη βοήθεια του οποίου θα είναι εφικτό να συγκριθεί η επίδραση του φορτίου των αεροσκαφών σε σχέση με τη φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων, από πολύ νωρίς αποτέλεσε ένα βασικό ζητούμενο για τη διαχείριση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων [6]. Επισημαίνεται ότι το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την Ελλάδα, δεδομένου ότι λόγω των γεωπολιτικών παραμέτρων και συνθηκών διαθέτει πάρα πολλά αεροδρόμια (σχήμα 1.1) τα οποία οφείλει να διαχειριστεί. Παράλληλα η εξάρτηση της μεταφορικής ζήτησης

από την αύξηση αλλά και τις περιοδικές διακυμάνσεις της τουριστικής κίνησης υπογραμμίζει την ανάγκη ύπαρξης μιας αξιόπιστης διαδικασίας ελέγχου επάρκειας των οδοστρωμάτων των Ελληνικών αεροδρομίων.



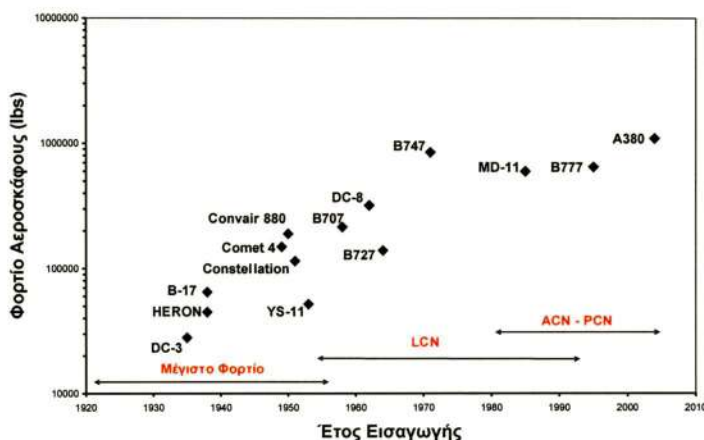
Σχήμα 1.1: Κυριότερα Ελληνικά Αεροδρόμια.

Οι πρώτες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τη δομική κατάταξη και τον έλεγχο επάρκειας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων ήταν πολύ απλές και χρησιμοποιούσαν ως δείκτη αναφοράς το μέγιστο συνολικό βάρος του αεροσκάφους ή το μέγιστο βάρος ενός φορείου τροχών το οποίο μπορούσε να εξυπηρετηθεί με ασφάλεια [6]. Σήμερα, η εφαρμογή αυτών των απλών μεθόδων έχει περιοριστεί σε οδοστρώματα που εξυπηρετούν μικρά και ελαφρά αεροσκάφη, ενώ για τα οδοστρώματα των πολιτικών και στρατιωτικών αεροδρομίων αναπτύχθηκαν πληρέστερες μέθοδοι, οι οποίες χαρακτηρίζουν τη σχετική επίδραση των φορτίων και τη φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων με βάση τον αριθμό κατάταξης τους σε ένα καθορισμένο σύστημα αναφοράς φορτίων.

Η πρώτη σχετική μέθοδος είναι η γνωστή LCN (Load Classification Number) [6], η οποία εισήχθη από τον ICAO (International Civil Aviation Organization) στα τέλη της δεκαετίας 1940-1950 [7] και στα επόμενα χρόνια χρησιμοποιήθηκε στις περισσότερες χώρες του κόσμου. Παρά την καθιέρωση της η μέθοδος LCN, παρουσίασε αρκετές αδυναμίες στην εφαρμογή της [8] με χαρακτηριστικότερο μειονέκτημα την εξάρτηση του δείκτη LCN αεροσκάφους από τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος που ελέγχεται, δηλαδή για κάθε οδόστρωμα και για κάθε αεροσκάφος πρέπει να γίνεται υπολογισμός της τιμής του. Ακολούθως, για να χρησιμοποιηθεί μία τιμή LCN για ένα αεροσκάφος πρέπει να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά του

οδοστρώματος στο οποίο υπολογίστηκε. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η δυσκολία υπολογίστηκαν και αρχειοθετήθηκαν τιμές LCN αεροσκαφών για διάφορες τυπικές διατομές οδοστρωμάτων. Παράλληλα εμφανίστηκε και μία εναλλακτική προσπάθεια βελτίωσης της μεθόδου LCN με την εισαγωγή διαδικασίας ομαδοποίησης των δεικτών για τα διαφορετικά αεροσκάφη και οδοστρώματα (Load Classification Groups - LCG) [6]. Όμως οι τιμές LCN του συστήματος LCG δεν ήταν συμβατές με αυτές της κλασσικής θεώρησης του LCN και στην πράξη αυτό οδήγησε σε περαιτέρω προβλήματα λόγω της σύγχυσης που προκλήθηκε [9].

Παράλληλα με το πέρασμα των χρόνων υπήρξε (και συνεχίζει να υπάρχει) αλματώδης αύξηση των απαιτήσεων του ελέγχου επάρκειας των αεροδρομίων (κυρίως εξ' αιτίας της αύξησης της κυκλοφορίας και των νέων τύπων α/φ και των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των οδοστρωμάτων) οπότε ο ICAO εισήγαγε για το σκοπό αυτό, μια νεότερη, βελτιωμένη μέθοδο την ACN-PCN [10]. Η χρονική εξέλιξη των συστημάτων κατάταξης οδοστρωμάτων σε σχέση με την αύξηση του φορτίου των αεροσκαφών παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Εισαγωγή και χρήση μεθόδων δομικής κατάταξης σε σχέση με τη μεταβολή του συνολικού βάρους των αεροσκαφών.

1.2 Συνοπτική Παρουσίαση της Μεθόδου ACN-PCN (για Ασφαλτικά Οδοστρώματα Αεροδρομίων)

Αξιοποιώντας την εμπειρία από τα προβλήματα και τις δυσκολίες που εμφανίστηκαν στη μέθοδο LCN, η μέθοδος ACN – PCN εισήγαγε ένα νέο δείκτη έκφρασης της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών ο οποίος είναι ανεξάρτητος από τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος που ελέγχεται. Βασικό χαρακτηριστικό της νεότερης μεθόδου ACN - PCN είναι, όπως

και στην LCN, ότι δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στη δημιουργία του δείκτη που χαρακτηρίζει το φορτίο του α/φ και πολύ μικρότερη στην έκφραση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος, η οποία εκτιμάται σε σχέση με το φορτίο του α/φ που μπορεί να εξυπηρετηθεί χωρίς περιορισμό διελεύσεων.

Αναλυτικότερα, ο ICAO εισήγαγε το δείκτη ACN (Aircraft Classification Number) ο οποίος εκφράζει τη σχετική επίδραση ενός α/φ σε ένα οδόστρωμα για μια προκαθορισμένη φέρουσα ικανότητα του εδάφους έδρασης. Αριθμητικά προσδιορίζεται ως το διπλάσιο φορτίο (σε χιλιάδες Kgr) ενός απλού τροχού (DSWL) που έχει πίεση 1.25 MPa και προκαλεί την ισοδύναμο κρίσιμο αποτέλεσμα με το πραγματικό σύστημα τροχών του α/φ σε ένα οδόστρωμα πάχους ίσου με το πάχος αναφοράς (t_r) [10]. Στα ασφαλικά οδοστρώματα, το πάχος αναφοράς, ορίζεται ίσο με το πάχος που απαιτείται να έχει ένα οδόστρωμα ώστε να επιτρέπει 10^4 διελεύσεις του πραγματικού συστήματος τροχών του α/φ για μια συγκεκριμένη κατηγορία αντοχής του εδάφους. Η επιλογή των 10^4 διελεύσεων έγινε από τον ICAO στο πλαίσιο μιας ασφαλούς εκτίμησης της βαριάς φόρτισης από τα διαφορετικά α/φ που πρέπει να εξυπηρετεί το οδόστρωμα ενός αεροδρομίου.

Η ουσιαστική προσφορά του πάχους αναφοράς είναι η απεξάρτηση του ACN από το πάχος του εκάστοτε οδοστρώματος που μελετάται ή ελέγχεται. Ο υπολογισμός του γίνεται σε κάθε μία από τις τέσσερις, κατά ICAO καθορισμένες κατηγορίες αντοχής του εδάφους, οι οποίες χαρακτηρίζονται ανάλογα με το δείκτη CBR της στρώσης έδρασης ως υψηλής (A) αντοχής, αν $CBR \geq 13\%$ με χαρακτηριστική τιμή το 15%, μέτριας (B) αντοχής, αν $13\% > CBR \geq 8\%$ (χαρακτηριστική τιμή 10%), χαμηλής (C) αντοχής, αν $8\% > CBR \geq 4\%$ (χαρακτηριστική τιμή 6%) και πολύ χαμηλής (D) αντοχής, αν $CBR < 4\%$ (χαρακτηριστική τιμή 3%).

Για κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες το πάχος αναφοράς είναι προφανώς διαφορετικό, που σημαίνει ότι και η τιμή του ACN ενός αεροσκάφους μεταβάλλεται αντίστοιχα. Επιπλέον, η τιμή μεταβάλλεται ανάλογα και με το φορτίο που φέρει το αεροσκάφος, οπότε, για κάθε κατηγορία φέρουσας ικανότητας του εδάφους, συχνά πρέπει να υπολογίζονται διάφορες περισσότερες από μία τιμές ACN για κάθε αεροσκάφος. Σε περίπτωση που απαιτείται ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ακριβέστερες προσεγγίσεις μέσω κατάλληλων διαγραμμάτων που παρέχονται για τα αεροσκάφη από τους κατασκευαστές ή με χρήση ειδικού λογισμικού [10], [11]. Προκειμένου για εφαρμογή της μεθόδου στην πράξη, οι τιμές ACN λαμβάνονται επίσης και από πίνακες που υπάρχουν στο εγχειρίδιο της μεθόδου [10] οι οποίες έχουν υπολογιστεί με τα προγράμματα H/Y τα οποία διατίθενται από τον ICAO.

Για να προσδιοριστεί αναλυτικά το ACN ενός αεροσκάφους, αρχικά υπολογίζεται το πάχος αναφοράς (t_f) με τη μέθοδο CBR των United States Army Engineers [12], [13]. Στη συνέχεια από τη σχέση 1.1 ή από το σχήμα 1.3 υπολογίζεται η αριθμητική τιμή ACN. Οι σχετικές εξισώσεις έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια της μεθόδου CBR και βασίζονται στη θεωρία του Boussinesq.

$$t_f = \sqrt{\frac{DSWL}{C_1 * CBR} - \frac{DSWL}{C_2 * 1.25}} \quad (1.1)$$

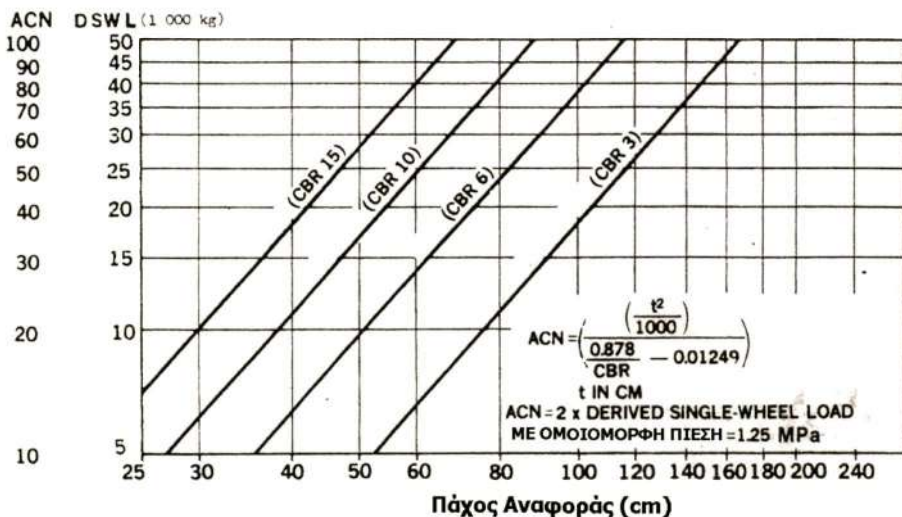
όπου: t_f το πάχος αναφοράς σε εκατοστά.

DSWL το φορτίο απλού τροχού με ομοιόμορφη πίεση 1.25 MPa και κυκλική επιφάνεια επαφής.

CBR η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του εδαφικού υλικού ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει.

C_1 , C_2 σταθερές διόρθωσης με τιμές $C_1=0.5695$ και $C_2=32.035$.

Η χρήση των σταθερών διόρθωσης εξασφαλίζει την ισοδυναμία μεταξύ της επίδρασης των φορείων με πολλούς τροχούς και την επίδραση του απλού τροχού που χρησιμοποιείται από τη μέθοδο CBR [13].



Σχήμα 1.3: Υπολογισμός ACN αεροσκαφών με βάση το πάχος αναφοράς σε ασφαλτικά οδοστρώματα [10].

Η έκφραση της αντοχής του οδοστρώματος εκτιμάται σε σχέση με το δείκτη κατάταξης του φορτίου του αεροσκάφους που μπορεί με ασφάλεια να εξυπηρετήσει για απεριόριστο αριθμό διελεύσεων. Με αυτό το σκεπτικό, ο δείκτης PCN (Pavement Classification Number), που

εκφράζει τη φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος, προσδιορίζεται ως η μέγιστη τιμή ACN που μπορεί να εξυπηρετηθεί από το οδόστρωμα χωρίς περιορισμό του αριθμού των διελεύσεων του αντίστοιχου αεροσκάφους.

Για τον προσδιορισμό της τιμής PCN του οδοστρώματος ενός αεροδρομίου, ο ICAO δεν προτείνει κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία, αλλά επιτρέπει στις αρχές του αεροδρομίου να επιλέγουν την (κατά την κρίση τους) πιο κατάλληλη. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να επισημανθεί ότι στην Ελλάδα δεν υπάρχει κάποια επίσημα προτεινόμενη ή αποδεκτή μέθοδος για τον προσδιορισμό του PCN στα Ελληνικά αεροδρόμια. Στο πλαίσιο αυτό έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί πιλοτικά προτάσεις προσδιορισμού του PCN οι οποίες αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ [14].

Εκτός από την αριθμητική τιμή του, το PCN ενός οδοστρώματος συνοδεύεται και από τέσσερις ακόμη παραμέτρους, οι οποίες αναφέρονται στα εξής:

α) Τύπος οδοστρώματος: Χαρακτηρισμός του οδοστρώματος ως ευκάμπτου (F-Flexible), ή δύσκαμπτου (R-Rigid).

β) Κατηγορία αντοχής εδάφους: Ανάλογα με το CBR της στρώσης έδρασης το οδόστρωμα κατατάσσεται σε μία από τις κατηγορίες αντοχής εδάφους (A,B,C,D), όπως ακριβώς αυτές έχουν καθοριστεί για το ACN.

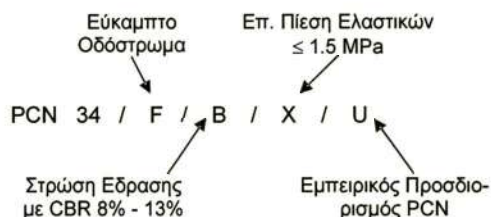
γ) Μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση ελαστικών: Τα οδοστρώματα κατατάσσονται σύμφωνα με τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση των αεροθαλάμων των τροχών σε μία από τις κατηγορίες πίεσης (W υψηλή - χωρίς περιορισμούς, X μέση - έως 1.5MPa, Y χαμηλή - έως 1.0MPa, πολύ χαμηλή - έως 0.5 MPa).

δ) Μεθοδολογία υπολογισμού: Χαρακτηρίζεται με τον κωδικό U, αν το PCN ενός οδοστρώματος προσδιορίζεται εμπειρικά, με βάση τη χρήση του αεροδρομίου για αρκετό χρόνο από συγκεκριμένο(ους) τύπο(ους) α/φ και με τον κωδικό T, αν ο προσδιορισμός έχει γίνει με υπολογιστική μέθοδο.

Έτσι η τελική έκφραση του PCN έχει τη μορφή :

αριθ. τιμή / τύπος οδ/τος / κατ. αντοχής εδάφους / μεγ. επ. πίεση / μέθ. υπολογισμού.

Παράδειγμα:



Εφόσον είναι γνωστό το PCN του οδοστρώματος ενός αεροδρομίου είναι δυνατό να ελεγχθεί αν το συγκεκριμένο οδόστρωμα μπορεί να εξυπηρετήσει χωρίς προβλήματα ένα δεδομένο τύπο α/φ χρησιμοποιώντας την ανισότητα (1.2) :

$$PCN_{οδ/τος} \geq ACN_{α/φους} \quad (1.2)$$

Αν η ανισότητα ισχύει, τότε οι αρχές του αεροδρομίου μπορούν να επιτρέψουν τη χρήση του από το α/φ καθώς η αντοχή του οδοστρώματος είναι επαρκής (δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας). Στην αντίθετη περίπτωση το οδόστρωμα δεν μπορεί να παραλάβει ασφαλώς το φορτίο του α/φ (είναι πιθανή η πρόκληση εκτεταμένης φθορά ή και αστοχίας), οπότε συστήνεται να μην επιτρέπεται η χρήση του συγκεκριμένου στοιχείου (διάδρομος, τροχόδρομος, δάπεδο κλπ) υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας του αεροδρομίου.

Σε περίπτωση όπου υπάρχει ανάγκη χρήσης ενός οδοστρώματος από α/φ με ACN μεγαλύτερο του PCN, ο ICAO προτείνει τις ακόλουθες πρακτικές οδηγίες για την αποφυγή εκτεταμένων φθορών:

1. Περιστασιακές κινήσεις α/φ με ACN μέχρι 10% μεγαλύτερο από το PCN οδοστρώματος γενικά δεν αναμένεται να προκαλέσουν φθορά μείζονος σημασίας στο οδόστρωμα.
2. Ο αριθμός των κινήσεων των υπέρβαρων α/φ κατ' έτος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% των συνολικών ετήσιων κινήσεων που εξυπηρετεί το οδόστρωμα.

Έκτος από ειδικές περιπτώσεις (όπως για παράδειγμα χρήση του αεροδρομίου για έκτακτη ανάγκη), η υπερφόρτωση των οδοστρωμάτων πρέπει να απαγορεύεται εάν εμφανιστούν ενδείξεις φθοράς ή αστοχίας των υλικών του οδοστρώματος. Επίσης η υπερφόρτωση πρέπει να αποφεύγεται κατά τα διαστήματα όπου το οδόστρωμα είναι περισσότερο ευάλωτο λόγω των συνθηκών που επικρατούν (παγετός, μείωση αντοχής ασύνδετων υλικών λόγω υδάτων, εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες κλπ).

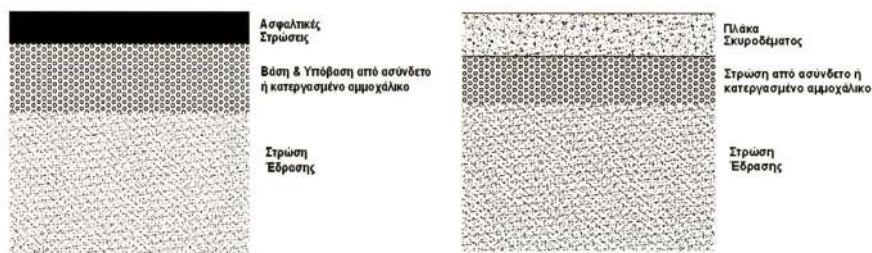
Τέλος, σε οδοστρώματα που πραγματοποιείται εξυπηρέτηση υπέρβαρων α/φ είναι αναγκαίο να πραγματοποιούνται τακτικοί προληπτικοί έλεγχοι ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα εμφάνισης εκτεταμένων φθορών, σημαντικής μείωσης της εναπομένουσας ζωής και υπερβολικής αύξησης των απαιτήσεων συντήρησης / αποκατάστασης τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ACN-PCN

2.1 Παραδοχές για τη Διερεύνηση της Μεθόδου ACN-PCN

Με βάση το διαχωρισμό που χρησιμοποιήθηκε κυρίως στις ΗΠΑ και υιοθετήθηκε από τη μέθοδο ACN – PCN, για τις ανάγκες της κατάταξης τα οδοστρώματα αεροδρομίων διαχωρίζονται σε ασφαλικά (ή εύκαμπτα) και δύσκαμπτα. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται τα οδοστρώματα που αποτελούνται από μία ή περισσότερες ασφαλικές στρώσεις εδραζόμενες πάνω σε βάση από αμμοχάλικο ή κατεργασμένο υλικό, ενώ στη δεύτερη τα οδοστρώματα που αποτελούνται από πλάκα σκυροδέματος εδραζόμενη στο έδαφος ή σε υπόβαση από αμμοχάλικο ή κατεργασμένο υλικό (σχήμα 2.1). Ο διαχωρισμός αυτός είχε σαν αποτέλεσμα και την επιλογή των αντίστοιχων κριτηρίων αστοχίας των οδοστρωμάτων όπου για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα υιοθετήθηκαν τα κριτήρια της θεωρίας του Westergaad [15], [16] ενώ για τα ασφαλικά οδοστρώματα υιοθετήθηκαν τα κριτήρια της μεθόδου CBR (US Army Engineers, 1977) [13].



Σχήμα 2.1: Τυπική διατομή ασφαλικού και δύσκαμπτου οδοστρώματος.

Με δεδομένες τις εξελίξεις που έχουν προκύψει τόσο στα υλικά όσο και στην ανάλυση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης κρίθηκε σκόπιμο να επικαιροποιηθεί η σχετική κατηγοριοποίηση και τα ασφαλικά οδοστρώματα των αεροδρομίων να διαχωριστούν σε δύο επιμέρους υποκατηγορίες ανάλογα με το υλικό της βάσης τους (ασύνδετο αμμοχάλικο ή αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κόνιες). Η διαφορετικότητα στη συμπεριφορά μεταξύ των δύο αυτών τύπων οδοστρωμάτων έχει γίνει αποδεκτή διεθνώς και λαμβάνεται υπόψη για πάρα πολλά χρόνια στην κατηγοριοποίηση των οδοστρωμάτων των οδών, ενώ περιλαμβάνεται στα περισσότερα σύγχρονα συγγράμματα και σε σχετικές επιστημονικές εργασίες. Σύμφωνα με το σκεπτικό στο οποίο βασίζεται αυτή η προσέγγιση, η διαφορετικότητα μεταξύ των δύο τύπων ασφαλικών οδοστρωμάτων μπορεί

να γίνει ευκολότερα αντιληπτή λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο με τον οποίο τα φορτία της κυκλοφορίας μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις.

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κατανομές των τάσεων κάτω από μια στρώση από εύκαμπτο (ασφαλτικό) υλικό και δύσκαμπτο υλικό (σκυροδέμα). Στην πρώτη περίπτωση οι εύκαμπτες (ασφαλτικές) ανώτερες στρώσεις παραμορφώνονται υπό την επίδραση του φορτίου παραλαμβάνοντας ένα μεγάλο μέρος των τάσεων που αναπτύσσονται και μειώνοντας την τάση που τελικά μεταφέρεται στη στρώση έδρασης. Δεδομένου ότι λόγω της ευκαμψίας (σχετικά μικρό μέτρο ελαστικότητας) των υλικών η παραμόρφωση των ανώτερων στρώσεων περιορίζεται σε μία ζώνη γύρω από την περιοχή της φόρτισης, υπάρχει και ανάλογη συγκέντρωση των τάσεων που μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση λόγω της ακαμψίας της πλάκας σκυροδέματος (σχετικά μεγάλο μέτρο ελαστικότητας) η οποία παραμορφώνεται πολύ λιγότερο, οι τάσεις που μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις είναι κατανεμημένες σε πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια και συνεπώς σημαντικά μειωμένες.



Σχήμα 2.2: Ποιοτική κατανομή τάσεων κάτω από εύκαμπτη και δύσκαμπτη στρώση [17].

Αντίστοιχα με τα παραπάνω, η ύπαρξη κάτω από την ασφαλτική στρώση μίας στρώσης βάσης από κατεργασμένο υλικό με υψηλό μέτρο ελαστικότητας αναμένεται να έχει μια ανάλογη επίδραση στην μεταφορά των τάσεων στις υποκείμενες στρώσεις ενώ παράλληλα, λόγω της μικρότερης παραμόρφωσης της βάσης περιορίζεται και η κάμψη της ασφαλτικής στρώσης. Αποτέλεσμα αυτής της επίδρασης είναι η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς της διατομής από την κλασική περίπτωση του ευκάμπτου οδοστρώματος (ασφαλτικές στρώσεις σε βάση από αμμοχάλικο) [17], [18], [19].

Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε και έγινε ευρέως αποδεκτό το συνθετικό «ημί» (και κατ' επέκταση «ημιάκαμπτο») ώστε να αποδοθεί ως όρος η «ενδιάμεση» συμπεριφορά των ασφαλτικών οδοστρωμάτων με βάση από αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κόνιες. Ακολούθως, η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ημιακάμπτων οδοστρωμάτων

και οι ιδιαιτερότητες που τη χαρακτηρίζουν οδήγησε την πλειονότητα των ερευνητών στο συμπέρασμα ότι είναι σκόπιμο να αποτελέσουν ανεξάρτητη κατηγορία οδοστρωμάτων. Μεταξύ άλλων ο διαχωρισμός αυτός ακολουθείται στη νεότερη έκδοση του εγχειριδίου οδοστρωμάτων του Τέξας [19], στις εκθέσεις του Ευρωπαϊκού προγράμματος ELLPAG (European Long-Life Pavement Group) όπου πραγματοποιήθηκε διακριτή διερεύνηση για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα [20], και από την διεθνή ένωση οδοστρωμάτων PIARC [21]. Υπάρχουν βέβαια και ορισμένες περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε κάποια κλασσικά συγγράμματα οδοστρωμάτων, όπου ο διαχωρισμός αυτός δεν έχει υιοθετηθεί και τα ασφαλικά οδοστρώματα με βάση από κατεργασμένο αμμοχάλικο κατατάσσονται είτε στα εύκαμπτα είτε στα δύσκαμπτα με βάση τη συμπεριφορά που προσεγγίζουν περισσότερο. Σπανιότερα τα οδοστρώματα αυτού τύπου αναφέρονται και ως σύνθετα οδοστρώματα (composite pavements).

Συνέπεια της διαφορετικής δομής και συμπεριφοράς των ημιακάμπτων οδοστρωμάτων είναι η αντίστοιχη διαφοροποίηση των κρίσιμων εντατικών μεγεθών που καταπονούν τα υλικά και προκαλούν τη φθορά ή και αστοχία τους όπως αναφέρεται σε σχετικά εγχειρίδια σχεδιασμού, [18], [20], [21] και αντίστοιχες επιστημονικές ανακοινώσεις [22]. Η διαφοροποίηση αυτή των εντατικών μεγεθών είναι ακόμη εντονότερη στις περιπτώσεις που κατεργασμένο υλικό της βάσης έχει υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τα ασφαλτομίγματα των υπερκείμενων στρώσεων [18], [23]. Στη γενική περίπτωση ένα ημιακάμπτο οδοστρώμα ακολουθεί το προσομοίωμα που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3. Σύμφωνα με τη διεθνή έρευνα και πρακτική, στα οδοστρώματα που ακολουθούν αυτό το προσομοίωμα η βάση αποτελεί την κύρια δομική στρώση η οποία αναλαμβάνει να φέρει τα φορτία της κυκλοφορίας. Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη εφελκυστική τάση (λόγω κάμψης) που αναλαμβάνει η στρώση βάσης από κατεργασμένο αμμοχάλικο πρέπει να περιορίζεται με κριτήριο την αντοχή του υλικού της, έτσι ώστε να αποφεύγεται η άμεση αστοχία του η οποία αναμένεται να προκαλέσει εκτεταμένη φθορά στην κατασκευή σε ελάχιστο χρονικό διάστημα. Ο προσδιορισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης εφελκυστικής τάσης γίνεται μέσω κατάλληλου νόμου κόπωσης του υλικού. Στα ημιακάμπτα οδοστρώματα, ο ρόλος των ασφαλικών στρώσεων κατά περίπτωση μπορεί είτε να περιορίζεται στην εξασφάλιση των απαιτούμενων λειτουργικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος είτε να επεκτείνεται στο να συνεισφέρει στη δομική λειτουργία του οδοστρώματος μειώνοντας το μέγεθος της μέγιστης κρίσιμης τάσης που παραλαμβάνεται από την κύρια δομική στρώση (βάση). Παράλληλα οι ασφαλικές στρώσεις είναι σκόπιμο να συμβάλουν στη μείωση του κινδύνου (και της συχνότητας) εμφάνισης στην επιφάνεια κύλισης των ρωγμών που προέρχονται από τις μετακινήσεις των κατεργασμένων στρώσεων και είναι γνωστές ως ρωγμές από ανάδυση.



Σχήμα 2.3: Ενδεικτικό προσομοίωμα ημιακάμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου.

Με βάση τα παραπάνω, τα οποία έχουν επιβεβαιωθεί και από σχετικές έρευνες, όπως για παράδειγμα [22], [23], ως κρίσιμα μεγέθη για την εκτίμηση της φθοράς και τον έλεγχο αστοχίας των ημιακάμπτων οδοστρωμάτων θεωρούνται η οριζόντια εφελκυστική τάση και παραμόρφωση στον πυθμένα της βάσης από κατεργασμένο αμμοχάλικο. Εφόσον το οδόστρωμα έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σωστά, η διεπιφάνεια μεταξύ ασφαλτικών στρώσεων και στρώσης βάσης δεν θεωρείται κρίσιμη καθώς αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις (με την προϋπόθεση συνεργασίας των στρώσεων) ενώ η επιφάνεια της στρώσης έδρασης δεν θεωρείται κρίσιμη λόγω των συνήθως πολύ μικρών (έως ελάχιστων) τάσεων που αναλαμβάνει [18], [22], [24].

Αντίθετα, για τα ασφαλτικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο (εύκαμπτα) η επιφάνεια της στρώσης έδρασης αποτελεί κρίσιμη θέση αστοχίας και για πάρα πολλά χρόνια αποτέλεσε το κύριο μέλημα του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Αυτό συμβαίνει διότι η ενδεχόμενη αστοχία της στρώσης έδρασης (λόγω παραμενουσών παραμορφώσεων) στην πράξη οδηγεί σε αστοχία και της επιφάνειας του οδοστρώματος για την αποτελεσματική θεραπεία της οποίας συχνά δεν επαρκεί η αποκατάσταση των ανώτερων στρώσεων της κατασκευής. Στην περίπτωση αυτή, πέραν του υψηλού κόστους, απαιτείται και σημαντικό χρονικό διάστημα για το οποίο το οδόστρωμα πρέπει να είναι εκτός λειτουργίας, το οποίο δεν είναι εύκολο να διατεθεί σε ένα αεροδρόμιο.

Προς τούτο, αξιοποιώντας την εξέλιξη των μεθόδων σχεδιασμού και της τεχνολογίας υλικών και κατασκευής οδοστρωμάτων στην πράξη λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα προστασίας της στρώσης έδρασης με αποτέλεσμα να περιοριστεί στο ελάχιστο η εμφάνιση τέτοιου είδους αστοχιών. Σημειώνεται επίσης ότι στη γενική περίπτωση η εξασφάλιση ενός οδοστρώματος

έναντι αστοχίας της στρώσης έδρασης είναι ευκολότερη και έχει μικρότερο κόστος σε σχέση με την εξασφάλιση έναντι αστοχίας των ασφαλικών στρώσεων.

Κατά συνέπεια στις περισσότερες περιπτώσεις τυχόν αστοχία των ασφαλικών οδοστρωμάτων με βάση από αμμοχάλικο αναμένεται να προέλθει από τη δεύτερη κρίσιμη θέση τους, δηλαδή από την αστοχία των ασφαλικών στρώσεων λόγω κόπωσης. Η κόπωση προέρχεται από την κάμψη της ασφαλικής στρώσης και προκαλεί στον πυθμένα της (κάτω ίνα) σημαντικές εφελκυστικές οριζόντιες τάσεις και παραμορφώσεις οι οποίες δεν μπορούν να μεταβιβαστούν στα ασύνδετα υλικά των υποκείμενων στρώσεων. Συνεπώς σε αντίθεση με την περίπτωση της βάσης από κατεργασμένο υλικό σε αυτή την περίπτωση οι ασφαλικές στρώσεις αναλαμβάνουν εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις οι οποίες πρέπει να αξιολογούνται και στο πλαίσιο του ελέγχου της επάρκειας του οδοστρώματος. Η κρίσιμη θέση για τον έλεγχο αυτής της πιθανότητας αστοχίας είναι η βάση των ασφαλικών στρώσεων και τα αντίστοιχα κρίσιμα μεγέθη είναι η οριζόντια εφελκυστική τάση και ανηγμένη παραμόρφωση (σχήμα 2.4).

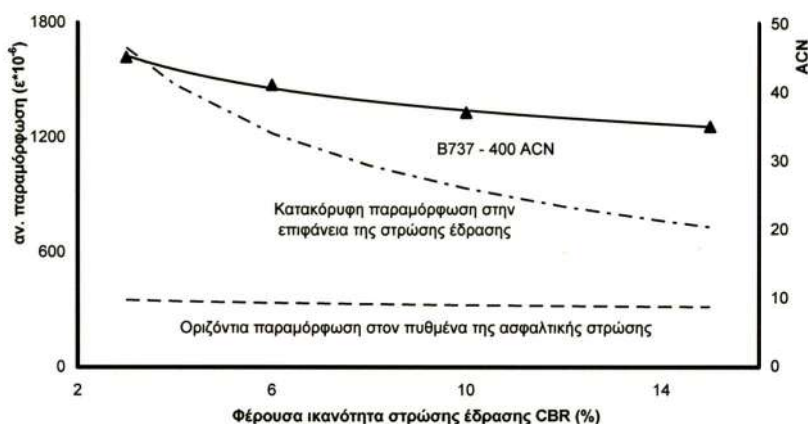


Σχήμα 2.4: Ενδεικτικό προσομοίωμα στρώσεων ασφαλικού οδοστρώματος αεροδρομίου με βάση από αμμοχάλικο (εύκαμπτο).

Δεδομένου ότι η συγκριτική εκτίμηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών όπως και η κατάταξη των οδοστρωμάτων έχουν ως στόχο τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης και την αποφυγή αστοχίας τους, είναι σκόπιμο σε κάθε περίπτωση οι σχετικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται να συνδέονται με τα κρίσιμα μεγέθη αστοχίας. Δηλαδή, ο δείκτης επίδρασης του αεροσκάφους πρέπει να αξιολογεί αξιόπιστα το αποτέλεσμα της φόρτισης στο οδοστρώμα σε σχέση με το εκάστοτε κρίσιμο μέγεθος αστοχίας, ενώ ο δείκτης κατάταξης του οδοστρώματος να δίδει μια αντίστοιχα αξιόπιστη εικόνα για τη φέρουσα ικανότητα του και τη συμβατότητα της με το αποτέλεσμα της επίδρασης του αεροσκάφους.

2.2 Διερεύνηση Μεθόδου ACN-PCN σε Ασφαλτικά Οδοστρώματα

Όπως ήδη αναφέρθηκε η μέθοδος ACN-PCN δίνει μεγαλύτερη έμφαση στο δείκτη κατάταξης της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών σε ένα οδόστρωμα, συγκριτικά με το δείκτη αναφοράς της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων. Το στοιχείο αυτό εμφανίζεται ποιοτικά στο σχήμα 2.5 όπου παρουσιάζεται η μεταβολή του ACN ενός α/φ σε σχέση με την αντίστοιχη μεταβολή των κρίσιμων παραμορφωσιακών μεγεθών σε εύκαμπτα οδοστρώματα. Η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης όπως είναι αναμενόμενο οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος συνολικά, η οποία όμως εκφράζεται μέσω της μείωσης του δείκτη σχετικής επίδρασης του α/φ δηλαδή του ACN και όχι μέσω της αύξησης του PCN.



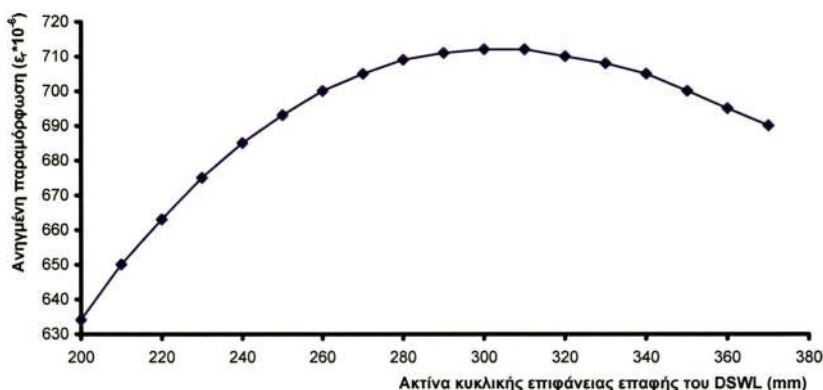
Σχήμα 2.5: Μεταβολή ACN και ενδεικτική διακύμανση ανηγμένης παραμόρφωσης για το B737-400 σε εύκαμπτα οδοστρώματα.

Είναι αξιοσημείωτο ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης ενός οδοστρώματος μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε μείωση της αριθμητικής τιμής του PCN, δεδομένου ότι το PCN εξαρτάται από το ACN των α/φ που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα. Δηλαδή αν μια διατομή οδοστρώματος έχει αριθμητική τιμή PCN ίση με X στην κατηγορία αντοχής εδάφους B, η ίδια ακριβώς διατομή στην κατηγορία D σύμφωνα με την προσέγγιση του ICAO θα έχει μικρότερη αριθμητική τιμή PCN η οποία όμως αντιστοιχεί σε υψηλότερη φέρουσα ικανότητα λόγω της αλλαγής της κατηγορίας (μείωση των δεικτών ACN των αεροσκαφών). Σε πρακτικό επίπεδο η ιδιαιτερότητα αυτή είναι δυνατό να δημιουργήσει σύγχυση (σχετικά παραδείγματα έχουν περιληφθεί στις αναφορές [14], [25], [26], [27]) καθώς δεν είναι σύμφωνη με τη συνήθη σύμβαση που χρησιμοποιείται «αύξηση της φέρουσας ικανότητας αντιστοιχεί σε αύξηση της αριθμητικής τιμής του δείκτη έκφρασης της».

2.2.1 Οδοστρώματα με Βάση από Ασύνδετο Αμμοχάλικο

Με δεδομένη την έμφαση που δίδεται στο δείκτη ACN (και συνεπώς στο ισοδύναμο φορτίο απλού τροχού DSWL) η ακρίβεια και η καταλληλότητα του ως προς την εκτίμηση της σχετικής επίδρασης του πραγματικού φορείου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την αξιοπιστία της μεθόδου ACN-PCN. Σύμφωνα με το σχετικό ορισμό, ο απλός τροχός DSWL έχει σταθερή πίεση 1.25 MPa και (προφανώς) μεταβλητή ακτίνα επιφάνειας επαφής ώστε να προσεγγίζει το κρίσιμο εντατικό αποτέλεσμα του πραγματικού συστήματος τροχών του a/ϕ σε οδόστρωμα πάχους ίσου με το πάχος αναφοράς.

Πρακτικά από τον ορισμό συμπεραίνεται ότι προκειμένου να προσεγγιστεί το κρίσιμο εντατικό αποτέλεσμα του πραγματικού φορτίου, όσο αυξάνει το βάρος του a/ϕ αυξάνεται αντίστοιχα και η ακτίνα του ισοδύναμου απλού τροχού. Όμως σε αρκετές περιπτώσεις η προσέγγιση αυτή δεν είναι αποτελεσματική δεδομένου ότι το σχετικό προσομοίωμα αποτυγχάνει να προκαλέσει σε ένα οδόστρωμα ισοδύναμο εντατικό αποτέλεσμα με αυτό του πραγματικού συστήματος τροχών. Για παράδειγμα στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται ενδεικτικά η διακύμανση της κρίσιμης οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της ενοποιημένης ασφαλικής στρώσης ευκάμπτου οδοστρώματος με πάχος ασφαλικών στρώσεων 120mm και βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο 500mm. Τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας για τα υλικά των στρώσεων ελήφθησαν 3500 MPa και 250 MPa, ενώ η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης θεωρήθηκε ίση με 8% σύμφωνα με το δείκτη CBR. Το φορτίο με τα χαρακτηριστικά του "DSWL" που χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση έχει σταθερή πίεση 1.25 MPa και ακτίνα που μεταβάλλεται από 200 έως 370mm.



Σχήμα 2.6: Ενδεικτική μεταβολή κρίσιμης οριζόντιας παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων υπό σταθερή πίεση 1.25 MPa και μεταβλητή ακτίνα φορτίου.

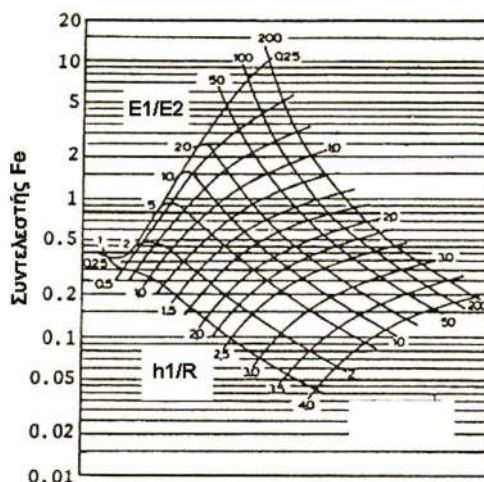
Στο σχήμα 2.6 παρατηρείται σταδιακή μείωση του κρίσιμου μεγέθους, όταν η ακτίνα αυξάνεται περισσότερο από 290mm περίπου. Αυτό συμβαίνει διότι όσο μεγαλύτερη ακτίνα έχει το DSWL, τόσο αναπτύσσονται συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης στον υποκείμενο κεντρικό «πυρήνα» λόγω εγκιβωτισμού του από το παράπλευρο υλικό. Σε συνθήκες πλήρους εγκιβωτισμού οι οριζόντιες παραμορφώσεις είναι μηδενικές [28], και οι μέγιστες τιμές τους εμφανίζονται εκτός του κεντρικού «πυρήνα». Εφόσον μέσω του DSWL επιδιώκεται η επίτευξη του ίδιου κρίσιμου εντατικού και παραμορφωσιακού μεγέθους με το πραγματικό σύστημα τροχών και επειδή η πίεση του παραμένει σταθερή (σύμφωνα με τον ορισμό των ACN και DSWL) θα πρέπει να μεταβληθεί η ακτίνα του απλού τροχού. Η αύξηση της ακτίνας μετά από ένα όριο επιτείνει το πρόβλημα του «κεντρικού πυρήνα» με αποτέλεσμα σε ορισμένες να μην είναι δυνατό να προσεγγιστούν τα κρίσιμα μεγέθη του πραγματικού φορείου.

Το φαινόμενο αυτό έχει επίσης καταγραφεί σε νομογραφήματα υπολογισμού τάσεων για οδοστρώματα όπως για παράδειγμα αυτό του σχήματος 2.7. Το νομογράφημα αυτό έχει προταθεί από τον Huang [29] για τον υπολογισμό των ανηγμένων παραμορφώσεων σε συστήματα δύο στρώσεων σύμφωνα με τη σχέση:

$$\varepsilon_r = \frac{p}{E_1} * F_e$$

Όπου ε_r η μέγιστη οριζόντια παραμόρφωση που προκαλείται στον πυθμένα της ανώτερης στρώσης υπό τη φόρτιση από ομοιόμορφο κυκλικό φορτίο απλού τροχού, p η πίεση του φορτίου, E_1 το μέτρο ελαστικότητας της ανώτερης στρώσης και F_e συντελεστής που προσδιορίζεται από το νομογράφημα του σχήματος 2.7 σύμφωνα με το λόγο των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων (E_1/E_2) και του πάχους της ανώτερης στρώσης προς την ακτίνα του επιβαλλόμενου φορτίου (h_1/R).

Από το σχήμα 2.7 προκύπτει ότι για τιμές E_1/E_2 μικρότερες του 20, οι οποίες είναι συνήθεις στα ασφαλικά οδοστρώματα με βάση ασύνδετο αμμοχάλικο όταν ο λόγος h_1/R είναι μικρότερος από 0.75 αναμένεται μη αύξηση ή ακόμη και μείωση του συντελεστή F_e και συνεπώς μείωση των υπολογιζόμενων κρίσιμων οριζόντιων παραμορφώσεων στον πυθμένα της ανώτερης στρώσης.



Σχήμα 2.7: Νομογράφημα υπολογισμού μέγιστης κρίσιμης οριζόντιας παραμόρφωσης σε συστήματα δύο στρώσεων υπό την επίδραση κυκλικού φορτίου απλού τροχού [29].

Τέτοιες περιπτώσεις είναι πιθανό να συναντηθούν κατά τη φόρτιση οδοστρωμάτων με βαρέα α/φ (π.χ. B747, B777, A380), ιδιαίτερα όταν η στρώση έδρασης αποτελείται από υλικό με σχετικά χαμηλή φέρουσα ικανότητα (κατηγορίες αντοχής εδάφους C και D κατά ICAO). Για παράδειγμα το B777-300ER στην κατηγορία D έχει μέγιστο ACN 120 (πλήρες φορτίο), οπότε:

$$DSWL = \frac{ACN}{2} = \frac{120 * 10kN}{2} = 600 kN$$

Δεδομένου ότι το φορτίο κατανέμεται σε κυκλική επιφάνεια με σταθερή ομοιόμορφη πίεση 1.25 MPa, η αντίστοιχη ακτίνα υπολογίζεται:

$$DSWL = 1.25MPa * \pi * R^2 \Leftrightarrow R = \sqrt{\frac{DSWL}{\pi * 1.25MPa}} = \sqrt{\frac{600kN}{\pi * 1.25MPa}} \Leftrightarrow R = 391 mm$$

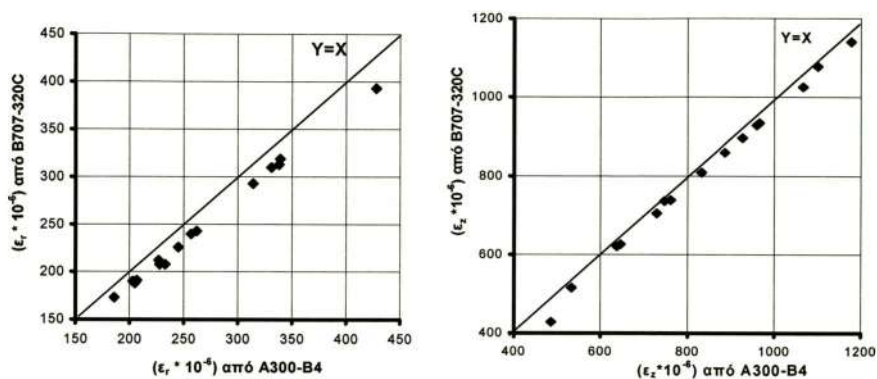
Με την ίδια διαδικασία για την κατηγορία αντοχής εδάφους C η ακτίνα του DSWL υπολογίζεται σε 337mm ενώ οι αντίστοιχες τιμές για το B747-200C είναι 342mm στην κατηγορία D και 295mm στην κατηγορία C το οποίο αποδεικνύει ότι τέτοιες περιπτώσεις είναι δυνατό να προκύψουν στην πράξη.

Συνολικά από τα παραπάνω προκύπτει ότι η παραδοχή του ICAO [10] ότι το DSWL παράγει σε οδόστρωμα πάχους ίσου με το πάχος αναφοράς την ίδια εντατική κατάσταση με το πραγματικό σύστημα τροχών του α/φ, δεν ισχύει σε κάποιες περιπτώσεις τουλάχιστον όσον αφορά τα εντατικά μεγέθη στην οριζόντια διεύθυνση. Σε αντίθεση με το πραγματικό φορείο η μεγάλη επιφάνεια επαφής του DSWL (σε σχέση με το πάχος / ακαμψία των ανώτερων

στρώσεων) είναι πιθανό να υποεκτιμά τα υπόψη μεγέθη. Το στοιχείο αυτό είναι σημαντικό, ιδιαίτερα για τον έλεγχο επάρκειας της φέρουσας ικανότητας των ανώτερων στρώσεων των οδοστρωμάτων. Επισημαίνεται ότι το πρόβλημα αυτό δεν εμφανίζεται στα ασφαλικά οδοστρώματα με βάση από κατεργασμένο αμμοχάλικο, όπως και στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, τα οποία έχουν διαφορετική συμπεριφορά λόγω της ύπαρξης στρώσης με πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας σχετικά κοντά στην επιφάνεια και αυξημένο λόγο E_1/E_2 .

Περαιτέρω διερευνήσεις έδειξαν ότι και η κατάταξη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών με βάση το δείκτη ACN δεν είναι πάντοτε ακριβής. Για παράδειγμα στο σχήμα 2.8 παρουσιάζονται συγκριτικά οι μέγιστες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων (ϵ_r) και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (ϵ_z) ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων για τα B707-320C και A300-B4 [26]. Οι υπολογισμοί των παραμορφωσιακών μεγεθών αναφέρονται στο πραγματικό φορείο των αεροσκαφών και για μέγιστο φορτίο σε διάφορες διατομές ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Στις διατομές που χρησιμοποιήθηκαν τα πάχη των ασφαλικών στρώσεων κυμαίνονται από 120 έως 300mm και των στρώσεων από ασύνδετο αμμοχάλικο από 250 έως 600mm. Όσον αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, το μέτρο ελαστικότητας των ασφαλικών στρώσεων κυμαίνεται από 2500-9000 MPa, των στρώσεων βάσης από 250 έως 700MPa ενώ για τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης η διακύμανση ήταν από 5%-20% σύμφωνα με το δείκτη CBR.

Με κριτήριο τις τιμές ACN των δύο α/φ (πίνακας 2.1) θα ήταν αναμενόμενο τα δύο α/φ να έχουν παραπλήσια επίδραση στα οδοστρώματα, όμως από τα αποτελέσματα των αναλύσεων (σχήμα 2.8) προκύπτει ότι το A300-B4 έχει σε όλες τις περιπτώσεις εμφανώς δυσμενέστερη επίδραση από το B707-320C. Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν [30] και για άλλες συγκρίσεις (π.χ. μεταξύ των A300-600, A300-B4, B727-200 και B707-320C) επιβεβαιώνοντας ότι ο δείκτης ACN είναι δυνατό να δώσει ανακριβείς εκτιμήσεις για τη σχετική επίδραση των αεροσκαφών σε ένα οδόστρωμα. Η αναντιστοιχία αυτή του δείκτη ACN με την επίδραση του αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα έχει επισημανθεί και από τους Gervais et.al [31] οι οποίοι μελετώντας καταγραφές και παρατηρήσεις από πειράματα σε πραγματική κλίμακα (1:1) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι χρησιμοποιούμενες σταθερές διόρθωσης της ισοδυναμίας μεταξύ των συστημάτων τροχών των αεροσκαφών και του απλού τροχού DSWL δεν είναι ακριβείς σε περιπτώσεις φορείων με περισσότερους από δύο τροχούς και είναι σκόπιμο να επανεξεταστούν.



Σχήμα 2.8: Σύγκριση κρίσιμης ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων (αριστερά) και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (δεξιά).

Τύπος α/φ	Κατηγορία Αντοχής Εδάφους			
	A – CBR 15%	B – CBR 10%	C – CBR 6%	D – CBR 3%
A300-B4	43	49	59	76
B707-320C	44	49	60	76

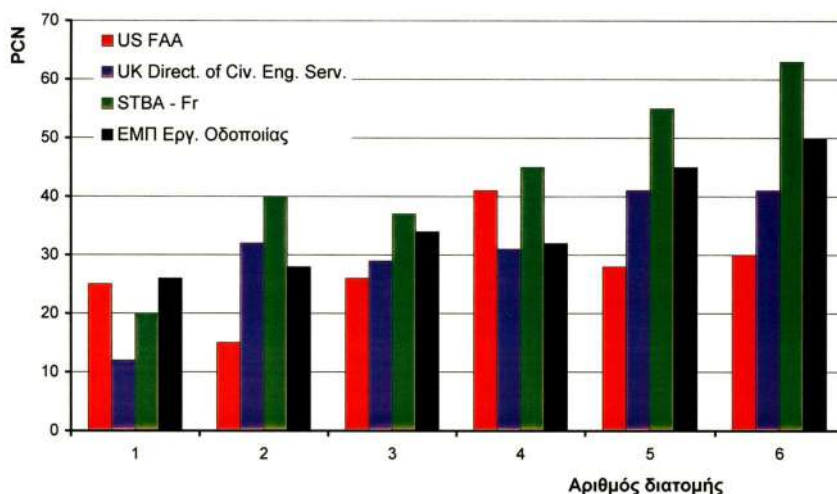
Πίνακας 2.1: Τιμές ACN των A300-B4 και B707-320C για εύκαμπτα οδοστρώματα [10].

Είναι προφανές ότι οι παραπάνω διαπιστώσεις για το δείκτη ACN έχουν αλυσιδωτή αρνητική επίδραση στον έλεγχο της δυνατότητας εξυπηρέτησης ενός α/φ από ένα οδόστρωμα, αλλά και στον προσδιορισμό του δείκτη PCN. Υπενθυμίζεται ότι ο ICAO δεν έχει προτείνει συγκεκριμένη διαδικασία προσδιορισμού του PCN ενός οδοστρώματος και το ορίζει ως «το μέγιστο ACN που μπορεί να εξυπηρετήσει με ασφάλεια χωρίς περιορισμό του αριθμού των διελεύσεων του αντίστοιχου αεροσκάφους».

Συνέπεια αυτού ήταν η εισαγωγή αρκετών μεθόδων προσδιορισμού του PCN οι οποίες αναπτύχθηκαν και εφαρμόζονται σε διάφορες χώρες. Γενικά βασίζονται στην τοπική εμπειρία και πρακτική, αποτελώντας επέκταση των ήδη υπάρχουσών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Στην Ελλάδα το Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ έχει αναπτύξει σχετικές προτάσεις για τον υπολογισμό του PCN λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των Ελληνικών αεροδρομίων (τυπικές διατομές, υλικά, πάχη κλπ) [14], [25], [32].

Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζονται αποτελέσματα κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων με ορισμένες από τις πλέον χαρακτηριστικές και διεθνώς αποδεκτές μεθόδους (FAA – ΗΠΑ [33], STBA – Γαλλία [34], Directorate of Civil Eng. Services – Ηνωμένο Βασίλειο [9]) καθώς και με

τη διαδικασία που προτείνεται από το Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ [14]. Τα στοιχεία των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν στο σχήμα 2.9 προέρχονται από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ και αποτελούν παραδείγματα ευκάμπτων οδοστρωμάτων και μπορούν να συναντηθούν τόσο σε Ελληνικά όσο και διεθνή αεροδρόμια. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι διατομές 2 και 4 προέρχονται από τμήματα των διαδρόμων των κρατικών αερολιμένων Ρόδου και Μυτιλήνης [35].



Σχήμα 2.9: Προσδιορισμός του PCN με 4 μεθόδους σε ασφαλτικά οδοστρώματα με βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο.

Στο σχήμα 2.9 είναι εμφανής η διασπορά και η ασυμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων των διαφορετικών μεθόδων. Οι αποκλίσεις είναι πολύ μεγάλες και αποδεικνύουν ότι στην πράξη δεν έχει επιτευχθεί σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των μεθόδων. Όμως η φέρουσα ικανότητα αποτελεί φυσικό χαρακτηριστικό του εκάστοτε εξεταζόμενου οδοστρώματος και συνεπώς θα ήταν εύλογο να αντιστοιχεί σε μία μοναδική τιμή PCN στην οποία θα έπρεπε να συγκλίνουν οι διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της. Στα παραδείγματα που διερευνήθηκαν αλλά και από τη σχετική εμπειρία δεν υπάρχει κάποια παράμετρος που να υποδηλώνει ότι κάποια από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται διεθνώς υπερτερεί των άλλων και συνεπώς λόγω των αποκλίσεων που παρατηρήθηκαν η κατάταξη με βάση μία μέθοδο ενδεχομένως να μην αντανάκλα την πραγματική φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Συνεπώς, οι υπεύθυνοι λειτουργίας του αεροδρομίου δεν έχουν τη δυνατότητα να καθορίσουν με αξιοπιστία το στόλο των αεροσκαφών που μπορεί να χρησιμοποιεί το οδόστρωμα με βάση το PCN του και στην περίπτωση που το επιλέγουν αναλαμβάνουν σημαντικό κίνδυνο. Τούτο προφανώς

μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτες συνέπειες για το οδόστρωμα, αλλά και σε σπατάλη πόρων και κονδυλίων, δεδομένου ότι υπάρχει κίνδυνος τόσο για την υπερφόρτωση του οδοστρώματος, όσο και για τη μειωμένη αξιοποίηση της φέρουσας ικανότητας του. Με άλλα λόγια στην πράξη το πρόβλημα μεταφέρεται στη διαχείριση της συντήρησης και των κονδυλίων που απαιτούνται για αυτή, δεδομένου ότι η αδυναμία πρόβλεψης και καθορισμού του στόλου που μπορεί να εξυπηρετείται ασφαλώς σε κάθε περίοδο καθιστά εξαιρετικά δύσκολο τον ορθολογικό καθορισμό των εργασιών συντήρησης και συνεπάγεται αύξηση του κόστους συντήρησης και λειτουργίας του οδοστρώματος.

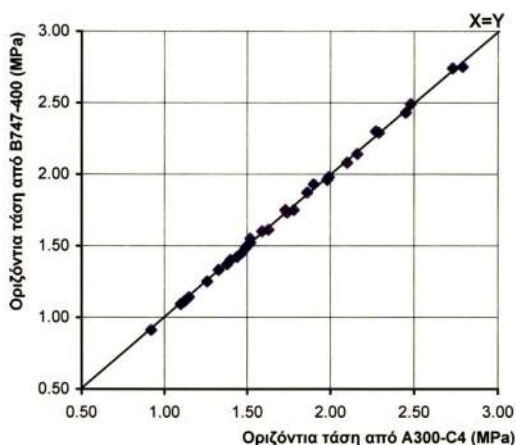
2.2.2 Οδοστρώματα με Βάση από Αμμοχάλικο Κατεργασμένο με Υδραυλικές Κονίες

Όπως ακριβώς στην περίπτωση των ασφαλικών οδοστρωμάτων με βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο, και στην περίπτωση που η βάση αποτελείται από αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κονίες η κατάταξη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών σύμφωνα με το δείκτη ACN δεν είναι πάντοτε ακριβής. Για παράδειγμα, από τα στοιχεία του πίνακα 2.2 αναμένεται ότι η φόρτιση από το B747-400 σε κάθε περίπτωση θα είναι αρκετά δυσμενέστερη από του A300-C4 δεδομένου ότι σε όλες τις κατηγορίες αντοχής του εδάφους η τιμή ACN είναι πολύ υψηλότερη. Όμως στο σχήμα 2.10 όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων τάσεων σε ημιάκαμπτα οδοστρώματα για τα δύο αυτά αεροσκάφη διαπιστώνεται ότι η επίδραση τους είναι περίπου η ίδια, τουλάχιστον όσον αφορά το υπόψη κρίσιμο μέγεθος (οριζόντια εφελκυστική τάση στον πυθμένα της στρώσης βάσης). Οι διατομές από τις οποίες ελήφθησαν οι τιμές του σχήματος 2.10 είχαν τα εξής χαρακτηριστικά: Ασφαλική στρώση πάχους από 150mm έως 280mm και μέτρου ελαστικότητας από 3000MPa έως 8500MPa, βάση από αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο πάχους από 180mm έως 300mm και μέτρου ελαστικότητας από 10000MPa έως 20000MPa, στρώση έδρασης απείρου πάχους και δείκτη φέρουσα ικανότητας CBR από 3% έως 20%.

Η σύγκριση του σχήματος 2.10, η οποία έχει δημοσιευτεί σε σχετική ανακοίνωση [36], είναι ενδεικτική των ενδεχομένων συνεπειών της απλουστευτικής παραδοχής της μεθόδου ACN-PCN για τον καθορισμό της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών με μόνο κριτήριο το πάχος αναφοράς τους (δηλαδή την επίδραση τους στη στρώση έδρασης). Συγκεκριμένα, η παραδοχή αυτή ενδέχεται να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα σε περιπτώσεις όπου τα κρίσιμα μεγέθη ελέγχου αστοχίας διαφοροποιούνται, όπως συμβαίνει στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Για το λόγο αυτό ένας δείκτης κατάταξης της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών είναι σκόπιμο να έχει τη δυνατότητα προσαρμογής σε περισσότερα κριτήρια αστοχίας, ιδιαίτερα δε στο πλαίσιο της αξιοποίησης του σε συνδυασμό με σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης οδοστρωμάτων αεροδρομίων που εφαρμόζονται διεθνώς.

Τύπος α/φ	Κατηγορία Αντοχής Εδάφους			
	A – CBR 15%	B – CBR 10%	C – CBR 6%	D – CBR 3%
B747-400	57	64	79	101
A300-C4	48	55	67	85

Πίνακας 2.2: Τιμές δείκτη ACN για τα B747-400 και A300-C4 (ασφαλτικά οδοστρώματα) [10].

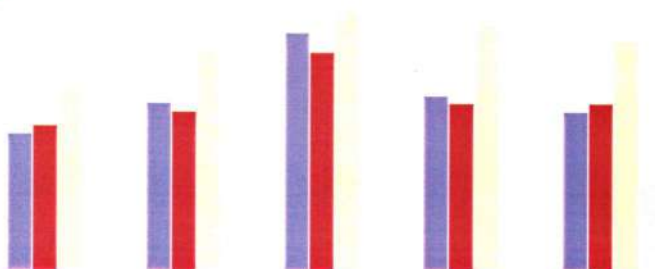


Σχήμα 2.10: Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα της στρώσης βάσης από κατεργασμένο αμμοχάλικο.

Για την διερεύνηση της εκτίμησης του δείκτη PCN ενός ασφαλτικού οδοστρώματος με βάση από κατεργασμένο αμμοχάλικο και χρησιμοποιώντας τα ίδια χαρακτηριστικά με τη διερεύνηση του σχήματος 2.10, εφαρμόστηκαν 4 διεθνείς μέθοδοι (US FAA [33], US UFC (μέθοδος πολεμικής αεροπορίας ΗΠΑ) [37], STBA (Γαλλία) [34] και το UK Directorate of Civil Engineering Services [9] (Μεγ. Βρετανία)) χαρακτηριστικά αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο σχήμα 2.11. Στο σχήμα 2.11 είναι εμφανές ότι υπάρχουν διαφορές μεταξύ των μεθόδων προσδιορισμού του PCN και επίσης ότι σε σχέση με την περίπτωση της βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των μεθόδων έχουν αμβλυνθεί. Το αποτέλεσμα αυτό πιθανότατα προέρχεται από την τάση των διαφορετικών μεθόδων να ακολουθούν τις παραδοχές της ACN-PCN και να συνεκτιμούν σε μεγάλο βαθμό την κρισιμότητα της φόρτισης της στρώσης έδρασης (η οποία στην περίπτωση των ημιακάμπτων οδοστρωμάτων συνήθως είναι αμελητέα).

■

■



Η δυσκολία καθορισμού της αριθμητικής τιμής του PCN μέσω εφαρμογής του σχετικού ορισμού σε οδοστρώματα με πολύ υψηλή φέρουσα ικανότητα αποτελεί άλλο ένα ενδιαφέρον στοιχείο που επισημάνθηκε σε σχετική έρευνα [39]. Αυτό συμβαίνει διότι σύμφωνα με το σχετικό ορισμό ότι οι τιμές PCN καθορίζονται και ταυτόχρονα περιορίζονται από τα ACN των αεροσκαφών (το PCN ορίζεται ως το μέγιστο ACN που μπορεί να εξυπηρετήσει το οδόστρωμα). Στο υπόψη παράδειγμα του ΔΑΑ που εντάσσεται στην κατηγορία αντοχής εδάφους Β οι μεγαλύτερες τιμές ACN ανήκουν στις παραλλαγές των B777, B747 και A380 και είναι της τάξεως του 65. Συνεπώς εάν ένα οδόστρωμα έχει φέρουσα ικανότητα η οποία υπερβαίνει αρκετά αυτή την τιμή είναι πρακτικά αδύνατο να καταταχθεί με βάση την προτεινόμενη διαδικασία του ICAO.

2.2.3 Διαπιστώσεις

Με βάση την παραπάνω διερεύνηση οι κυριότερες σχετικές διαπιστώσεις συνοψίζονται ως εξής:

- Η εκτίμηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών στο οδόστρωμα με κριτήριο το δείκτη ACN δεν είναι επαρκώς αξιόπιστη. Αεροσκάφη με μικρότερο ACN ενδέχεται να έχουν δυσμενέστερη επίδραση στα οδοστρώματα από αεροσκάφη με μεγαλύτερο ACN.
- Το ACN και το αντίστοιχο ισοδύναμο φορτίο απλού τροχού DSWL εκτιμώνται με μόνο κριτήριο την επίδραση του αεροσκάφους στη στρώση έδρασης με αποτέλεσμα να μην λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των αεροσκαφών σε σχέση με άλλα σημαντικά κριτήρια αστοχίας υλικών οδοστρωμάτων (π.χ. κόπωση ασφαλικών στρώσεων ή βάσεων από αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κονίες). Κατά συνέπεια δεν είναι κατάλληλα για τον έλεγχο επάρκειας των οδοστρωμάτων εφόσον συντρέχουν τα αντίστοιχα ενδεχόμενα αστοχίας.
- Ακολουθως, η υιοθέτηση και αποδοχή των παραπάνω παραδοχών έμμεσα επηρεάζει και την εκτίμηση του δείκτη PCN των οδοστρωμάτων ο οποίος ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζει τη φέρουσα ικανότητα τους. Επίσης, αποτελεί πρόβλημα ότι τα εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα κατατάσσονται με κοινά κριτήρια δεδομένου ότι στην πραγματικότητα μπορεί να έχουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά.
- Με βάση τη μέχρι σήμερα εμπειρία και πρακτική ο προσδιορισμός του δείκτη PCN οδηγεί σε αποτέλεσμα αμφιβόλου χρησιμότητας δεδομένου ότι για το ίδιο οδόστρωμα η εφαρμογή διεθνώς αποδεκτών μεθόδων οδηγεί σε εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα τα οποία δε συγκλίνουν σε κάποια τιμή. Τούτο υποδηλώνει ότι στην πράξη το PCN δεν χαρακτηρίζει μονοσήμαντα τη φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων και κατά συνέπεια δεν ανταποκρίνεται στο ρόλο του.

- Με βάση τον ορισμό του ICAO το εύρος εφαρμογής της μεθόδου ACN-PCN περιορίζεται από τα ACN των αεροσκαφών που χρησιμοποιούνται δηλαδή υπάρχει μία μέγιστη τιμή PCN. Αυτό δυσχεραίνει τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου για τον προσδιορισμό και την εκμετάλλευση της φέρουσας ικανότητας ισχυρών οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Συνολικά, τα παραπάνω δείχνουν ότι το θέμα αναζήτησης καλύτερων δεικτών για την κατάταξη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών και της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων είναι ανοικτό και η περαιτέρω σχετική έρευνα αναγκαία.

2.3 Διεθνείς Εξελίξεις και Προβληματισμοί για τη Δομική Κατάταξη και τη Μέθοδο ACN-PCN

Οι προαναφερθείσες αδυναμίες και οι πρακτικές δυσχέρειες που έχουν διεθνώς επισημανθεί [26], [27], [31] από την εμπειρία εφαρμογής της μεθόδου ACN-PCN αποτελούν ένα από τα κύρια θέματα έρευνας και προβληματισμού στην περιοχή των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Επιπλέον, οι αρνητικές εκτιμήσεις για το μέγεθος της διακύβευσης από την υιοθέτηση της μεθόδου ACN-PCN ως κυρίου εργαλείου υποστήριξης για τη διαχείριση της χρήσης των οδοστρωμάτων από τα διαφορετικά αεροσκάφη έχουν επιδράσει αρνητικά στην εφαρμογή της για το σκοπό αυτό.

Η διαπιστωμένη ανεπάρκεια της μεθόδου ACN-PCN και τα προβλήματα που παρουσιάζει έχει θέσει σε αμφισβήτηση τη σκοπιμότητα ύπαρξης διαδικασίας για την κατάταξη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών και της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων. Η πλήρης εγκατάλειψη της κατάταξης υποστηρίζεται διεθνώς από ορισμένους ερευνητές και έχει ως κύριο επιχείρημα τη δυνατότητα ενδεδειγμένου και αναλυτικού ελέγχου της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Ειδικότερα με βάση τις σύγχρονες υπολογιστικές μεθόδους και τα εξελιγμένα λογισμικά που είναι διαθέσιμα, υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων και της εκτίμησης της επίδρασης των διαφορετικών φορτίων. Συνεπώς, οι συνέπειες κάθε μεταβολής της κυκλοφορίας μπορούν να υπολογιστούν και να προσδιοριστούν με επαρκή ακρίβεια, αποφεύγοντας τις αβεβαιότητες των εκτιμήσεων της μεθόδου ACN-PCN.

Όμως, η προσέγγιση αυτή δεν καλύπτει ορισμένες σημαντικές πρακτικές ανάγκες. Για παράδειγμα, οι υπεύθυνοι για τη διαχείριση των αεροδρομίων θεωρούν σημαντικό εργαλείο την ύπαρξη μιας απλής μεθόδου με την οποία μπορούν να έχουν άμεση εκτίμηση για τη δυνατότητα ενός αεροσκάφους να χρησιμοποιήσει ένα οδόστρωμα χωρίς να χρειάζεται να προ-

σφεύγουν σε συστηματικές, ακριβείς αλλά και χρονοβόρες διερευνήσεις. Όπως έχει αναφερθεί κατά τη διάρκεια σχετικών συζητήσεων σε διεθνείς εκδηλώσεις (π.χ. Workshop on PCN Calculations for Heavier Aircraft / Lisbon 2002, 1st European Workshop on Airport Pavements, Amsterdam 2005) σε πολλές περιπτώσεις (και ιδιαίτερα σε σχετικώς μικρά ή χαμηλής κυκλοφορίας αεροδρόμια) ο χρόνος που απαιτείται και το κόστος εφαρμογής των αναλυτικών μεθόδων ελέγχου επάρκειας της φέρουσας ικανότητας θεωρούνται ιδιαίτερα υψηλά ώστε να αναλαμβάνονται σε κάθε μεταβολή ή διερεύνηση σεναρίου μεταβολής της κυκλοφορίας.

Εκτός από τους φορείς διαχείρισης των αεροδρομίων, η ύπαρξη συστήματος κατάταξης εξυπηρετεί σημαντικά και τις αεροπορικές εταιρείες οι οποίες με βάση τους δημοσιευμένους δείκτες για την επίδραση των αεροσκαφών και τη φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων μπορούν να βελτιστοποιήσουν την κατανομή του στόλου τους στα αεροδρόμια που εξυπηρετούν. Επίσης συμβάλλει σε θέματα επιλογής για ενδεχόμενες προμήθειες αεροσκαφών, με βάση την πληροφορία για τη δυνατότητα παραλαβής του φορτίου των διαφορετικών αεροσκαφών από τα οδοστρώματα στους προορισμούς που εξυπηρετούν ή σχεδιάζουν να εξυπηρετήσουν.

Για τους κατασκευαστές, οι οποίοι εισάγουν νέους τύπους αεροσκαφών συχνά μεγαλύτερων και βαρύτερων, η χρήση ενός διεθνώς αποδεκτού δείκτη (ή δεικτών) για την σχετική επίδραση των αεροσκαφών είναι ιδιαίτερα σημαντική και για το λόγο αυτό υποστηρίζουν σε μεγάλο βαθμό τη διατήρηση της χρήσης τους. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν [40], [41] για κάθε νέο τύπο αεροσκάφους που εισάγεται είναι απαραίτητο να δίδονται στους λοιπούς αρμοδίους φορείς (αρχές αεροδρομίων, αεροπορικές εταιρείες) πληροφορίες για τις απαιτήσεις των αεροσκαφών από τα οδοστρώματα και αυτό μπορεί να γίνει πολύ ευκολότερα με τη χρήση καθορισμένων και κοινά αποδεκτών δεικτών όπως είναι το ACN.

Συνολικά από τα παραπάνω επιβεβαιώνονται η ανάγκη ύπαρξης δεικτών κατάταξης επίδρασης φορτίων και φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων, οι οποίοι στην πράξη λειτουργούν και ως κώδικας επικοινωνίας μεταξύ των εμπλεκόμενων στις αεροπορικές μεταφορές. Για το λόγο αυτό ο ICAO έχει θεσμοθετήσει τη χρήση της μεθόδου ACN-PCN (και παλαιότερα της LCN) έτσι ώστε να υπάρχει να έχουν ένα εναρμονισμένο σύστημα κατάταξης. Παράλληλα, αρκετοί ερευνητές στην περιοχή των οδοστρωμάτων αεροδρομίων διερευνούν την υπόψη επιστημονική περιοχή, και σε συνεργασία με τα λοιπά εμπλεκόμενα μέρη πραγματοποιούνται συστηματικές εκτεταμένες ερευνητικές δραστηριότητες. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στη βελτίωση [31] ή και αντικατάσταση του δείκτη ACN [42], ενώ τα σημαντικά κονδύλια που επενδύονται για έρευνα αποτελούν μία επιπλέον ένδειξη της ανάγκης που υπάρχει για συμβολή στο

διερεύνηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών στα οδοστρώματα. Χαρακτηριστικά αναφέρονται:

- Η συνεργασία της Airbus με το Εργαστήριο LCPC και την αρμόδια διεύθυνση του Υπουργείου Μεταφορών της Γαλλίας στο πλαίσιο των πειραμάτων του προγράμματος A380 Pavement Experimental Programme (PEP) [43].
- Η συνεργασία της Boeing με την FAA που οδήγησε στην δημιουργία της εγκατάστασης μεγάλης κλίμακας National Airport Pavement Test Facility (NAPTF) και την πραγματοποίηση πειραμάτων σε κλίμακα 1:1.
- Οι έρευνες εφαρμογής που υποστηρίζονται από τα Υπουργεία Άμυνας αρκετών χωρών στο πλαίσιο της υιοθέτησης της μεθόδου ACN-PCN για την αναφορά της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων των στρατιωτικών αεροδρομίων [40].

Λαμβάνοντας υπόψη τα προβλήματα της μεθόδου ACN-PCN (ενότητα 2.2), και τη διεθνώς καταγεγραμμένη ανάγκη ύπαρξης ενός αξιόπιστου συστήματος κατάταξης, η παρούσα διατριβή στοχεύει στην ανάπτυξη ενός νέου δείκτη για τον προσδιορισμό της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών και μίας αναβαθμισμένης, σε σχέση με την ACN-PCN, μεθόδου για τον έλεγχο της επάρκειας των οδοστρωμάτων. Βασικό ζητούμενο του νέου δείκτη ALI (Aircraft Loading Index) είναι η αξιόπιστη έκφραση της αναμενόμενης επίδρασης ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα και η δυνατότητα σύγκρισης της επίδρασης των διαφορετικών αεροσκαφών. Για την κατάταξη της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων, εισάγεται ο δείκτης APCI (Airport Pavement Capacity Index), ο οποίος δίδει τη δυνατότητα ελέγχου της επάρκειας της, σε σχέση με τους δείκτες ALI των αεροσκαφών που το χρησιμοποιούν ή αναμένεται να το χρησιμοποιήσουν. Η ανάπτυξη και διερεύνηση των νέων δεικτών περιλαμβάνεται στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΝΕΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Από τα προηγούμενα κεφάλαια προέκυψε ότι είναι σκόπιμο οι σχετικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται να καθορίζονται σε σχέση με τα κρίσιμα μεγέθη αστοχίας. Δηλαδή, ο δείκτης επίδρασης του αεροσκάφους πρέπει να αξιολογεί αξιόπιστα το αποτέλεσμα της φόρτισης στο οδόστρωμα λαμβάνοντας υπόψη ένα ή περισσότερα κατάλληλα κρίσιμα μεγέθη αστοχίας, ενώ ο δείκτης κατάταξης του οδοστρώματος να δίδει μια αντίστοιχα αξιόπιστη πληροφορία για τη φέρουσα ικανότητα του και την επάρκεια της σε σχέση με το αποτέλεσμα της επίδρασης του αεροσκάφους.

Με βάση τα παραπάνω, κρίνεται σκόπιμη η υιοθέτηση νέων δεικτών για τη συγκριτική αξιολόγηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών και τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Στο πλαίσιο συμβολής σε αυτή την επιστημονική περιοχή πραγματοποιείται συστηματική διερεύνηση ενός προτεινόμενου νέου δείκτη εκτίμησης και κατάταξης της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών και σε επόμενο στάδιο ανάπτυξη σχετικής μεθόδου ελέγχου δομικής επάρκειας των οδοστρωμάτων. Ειδικότερα διερευνάται η καταλληλότητα του νέου δείκτη για την εκτίμηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών μέσω της σύγκρισης της με την αντίστοιχη του πραγματικού φορέιου στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης της ακρίβειας των εκτιμήσεων και του πεδίου εφαρμογής του.

3.2 Δείκτης Σχετικής Επίδρασης Αεροσκάφους σε Οδόστρωμα ALI (Aircraft Loading Index)

Ο δείκτης ALI (Aircraft Loading Index) αποτελεί μια πρόταση για τη συγκριτική αξιολόγηση και κατάταξη της σχετικής επίδρασης των διαφόρων τύπων αεροσκαφών σε ένα οδόστρωμα, η οποία έχει εισαχθεί από τους Α. Λοϊζο και Γ. Χαρωνίτη [44]. Στην παρούσα εργασία γίνεται επέκταση, συστηματική εμβάθυνση και διερεύνηση της καταλληλότητας του δείκτη ALI για τη δομική αξιολόγηση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων με χρήση εξελιγμένων αναλυτικών εργαλείων και προσομοιωμάτων υπολογισμού.

Ο δείκτης ALI βασίζεται σε πρότυπο ισοδύναμο απλού τροχού όπως και οι δείκτες LCN και ACN, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί φορτίο σταθερής ακτίνας και μεταβλητής πίεσης προκειμένου να μην εμφανιστούν δυσκολίες καθορισμού του και προβλήματα αξιοπιστίας όπως

αυτά που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 1 και 2 για τους δείκτες LCN και ACN. Επιπλέον για την αποφυγή προβλημάτων ανάλογα με αυτά που παρουσιάζει η μέθοδος ACN-PCN (ανατιστοιχία ACN με κρίσιμα μεγέθη αστοχίας, προσδιορισμός PCN κλπ), ο προτεινόμενος δείκτης καθορίστηκε και ελέγχθηκε με χρήση αναλυτικών προσομοιωμάτων σε συνδυασμό με ευρέως αποδεκτά κριτήρια ελέγχου της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων. Με βάση αυτό το σκεπτικό καθορίστηκαν και βελτιστοποιήθηκαν οι σταθερές και μεταβλητές παράμετροι του δείκτη ALI, δηλαδή η ακτίνα και η πίεση του απλού τροχού.

Στη γενική του μορφή ο δείκτης ορίζεται ως η τιμή της πίεσης απλού τροχού σταθερής ακτίνας ο οποίος όταν φορτίζει ένα οδόστρωμα αεροδρομίου δίνει το ίδιο μέγιστο κρίσιμο μέγεθος (τάση ή ανηγμένη παραμόρφωση) με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους. Όπως προκύπτει από τον ορισμό, ο δείκτης ALI προσδιορίζεται διαφορετικά για κάθε τύπο οδοστρώματος σύμφωνα με τον αντίστοιχο μηχανισμό αστοχίας. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην παρουσίαση και διερεύνηση του ALI για τα ασφαλικά οδοστρώματα αεροδρομίων (εύκαμπτα και ημιάκαμπτα).

Σημειώνεται ότι στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ έχει πραγματοποιηθεί προκαταρκτική διερεύνηση και έχουν καθοριστεί οι παράμετροι και η διαδικασία εφαρμογής του προτεινόμενου εναλλακτικού δείκτη σε οδοστρώματα αεροδρομίων από σκυρόδεμα. Αναλυτικά στοιχεία και πληροφορίες για τον προσδιορισμό και τη χρήση του δείκτη ALI στον έλεγχο επάρκειας των δυσκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων είναι διαθέσιμα στις σχετικές βιβλιογραφικές παραπομπές [45], [46].

3.2.1 Ο Δείκτης ALI για Ασφαλτικά Οδοστρώματα Αεροδρομίων με Βάση από Ασύνδετο Αμμοχάλικο

Σύμφωνα με το στατικό προσομοίωμα των ασφαλικών οδοστρωμάτων με βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας του ευρίσκονται στη βάση της (ενοποιημένης) ασφαλικής στρώσης και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (σχήμα 3.1). Αναλυτικότερα στην πρώτη περίπτωση ελέγχεται το ενδεχόμενο αστοχίας λόγω κόπωσης της ασφαλικής στρώσης ενώ στη δεύτερη το ενδεχόμενο αστοχίας λόγω παραμένουσας παραμόρφωσης στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Ως κρίσιμα μεγέθη για τη διερεύνηση των ανωτέρω θεωρούνται οι οριζόντιες τάσεις / ανηγμένες παραμορφώσεις στη βάση της ασφαλικής στρώσης και οι κατακόρυφες τάσεις / ανηγμένες παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης.



Σχήμα 3.1: Ενδεικτικό προσομοίωμα στρώσεων και κρίσιμων θέσεων ελέγχου αστοχίας ασφαλτικού οδοστρώματος αεροδρομίου με βάση από αμμοχάλικο (εύκαμπτο).

Ακολουθώντας τον ορισμό του ALI στην υπόψη περίπτωση (εύκαμπτα οδοστρώματα) ο δείκτης καθορίζεται ως η πίεση απλού τροχού σταθερής ακτίνας η οποία προκαλεί κρίσιμη τάση ή/και ανηγμένη παραμόρφωση στη βάση των ασφαλτικών στρώσεων και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης ίση με αυτή του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους. Πρακτικά για το υπολογισμό του ALI ενός αεροσκάφους υπολογίζονται οι κρίσιμες τάσεις και παραμορφώσεις σε ένα οδόστρωμα που προκαλεί το φορείο του και ακολουθώντας μέσω διαδικασίας διαδοχικών προσεγγίσεων προσδιορίζεται η πίεση του απλού τροχού σταθερής ακτίνας που προκαλεί τα ίδια κρίσιμα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη.

Προϋπόθεση για την εφαρμογή αυτής της διαδικασίας στα ασφαλτικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο είναι ο καθορισμός της σταθερής ακτίνας του απλού τροχού. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες διερευνήσεις σε μεγάλο αριθμό αντιπροσωπευτικών διατομών οδοστρωμάτων αεροδρομίων με στόχο να εξεταστεί η επιρροή της σταθερής τιμής της ακτίνας σε σχέση με τα χαρακτηριστικά και την απόκριση του οδοστρώματος ώστε να βελτιστοποιηθεί η τιμή της. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι κρίσιμες τάσεις και παραμορφώσεις που προκαλούνται από τα πραγματικά συστήματα τροχών διαφόρων τύπων αεροσκαφών καθώς και από μία σειρά φορτίων ισοδυνάμου απλού τροχού σταθερής ακτίνας. Τα στοιχεία για τις διατομές των οδοστρωμάτων ελήφθησαν από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ ή και αντίστοιχες διεθνείς τράπεζες δεδομένων και η διακύμανση τους παρουσιάζεται στον πίνακα 3.1. Σημειώνεται ότι τιμές εντός του εύρους που εξετάστηκε έχουν καταγραφεί και σε επιτόπου δοκιμές οδοστρωμάτων κατά τη διάρκεια ή μετά το πέρας της κατασκευής, όπως και κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους.

Στρώση	Συνολικό Πάχος (mm)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)
Ασφαλτικές Στρώσεις	120 – 300	2500 – 10000
Ενοποιημένη Βάση – Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο	250 -600	200 -700
Στρώση Έδρασης	∞	40 – 200 (CBR 4-20%)

Πίνακας 3.1: Στοιχεία διατομών ασφαλτικών οδοστρωμάτων με βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο.

Από τις σχετικές διερευνήσεις παρατηρήθηκε ότι το πάχος του οδοστρώματος και των επιμέρους στρώσεων αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την ακρίβεια του ισοδυνάμου απλού τροχού σταθερής ακτίνας. Ειδικότερα για μεγαλύτερα πάχη είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται αντίστοιχα αυξημένη τιμή για την ακτίνα του απλού τροχού. Τούτο είναι εύλογο και αναμενόμενο, δεδομένου ότι όπως είναι γνωστό από την (εδάφο)μηχανική [28] το βάθος που επηρεάζει ένα φορτίο κατανεμημένο σε κυκλική επιφάνεια αυξάνει όσο μεγαλώνει η ακτίνα επαφής. Ακολουθώντας τα εύκαμπτα οδοστρώματα χωρίστηκαν σε δύο υποκατηγορίες ανάλογα με πάχη των στρώσεων τους (πίνακας 3.2) σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.

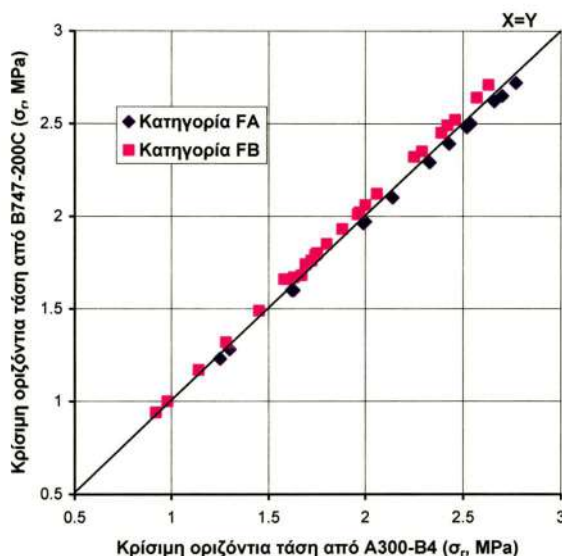
Συνολικό Πάχος Οδοστρώματος		
400-800 mm		>800mm
Πάχος ασφαλτικών στρώσεων		FB
≤170 mm	>170 mm	
FA	FB	

Πίνακας 3.2: Κατηγοριοποίηση ασφαλτικών οδοστρωμάτων με βάση από αμμοχάλικο για τον υπολογισμό του δείκτη ALI.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2 η κατηγορία FA αναφέρεται σε μικρότερου πάχους οδοστρώματα σε σχέση με την κατηγορία FB. Τούτο αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιλογή της κατάλληλης ακτίνας για το δείκτη ALI δεδομένου ότι πρέπει να επαρκεί για την απαιτούμενη επιρροή στα κρίσιμα βάθη και ταυτόχρονα να αποφεύγεται το ενδεχόμενο τοπικής ανάπτυξης συνθηκών μονοδιάστατης συμπίεσης στις ανώτερες στρώσεις του οδοστρώματος η οποία μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της κρίσιμης τάσης/παραμόρφωσης για την ασφαλική στρώση [44]. Επίσης όπως παρατηρήθηκε από τις σχετικές διερευνήσεις τα αεροσκάφη που διαθέτουν φορεία με σχετικά μικρές διαμέτρους ελαστικών και μεγάλες πιέσεις (π.χ. A300-B4, B777-300) είναι συγκριτικά αρκετά δυσμενέστερα για τα οδοστρώμα-

τα της κατηγορίας FA σε σχέση με αυτά της κατηγορίας FB ως προς την επίδραση τους στις ασφαλικές στρώσεις. Αντίθετα τα αεροσκάφη με σχετικά μεγάλες διαμέτρους τροχών εμφανίζονται να έχουν συγκριτικά δυσμενέστερο αποτέλεσμα για τα οδοστρώματα της κατηγορίας FB, ακόμη και με μικρότερες τιμές πίεσης.

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα αυτής της παρατήρησης με τη σύγκριση των κρίσιμων τάσεων οριζόντιων τάσεων που προκαλούν τα A300-B4 και B747-200C στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων ευκάμπτων οδοστρωμάτων. Όπως φαίνεται σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν το A300-B4 είναι δυσμενέστερο του για τα οδοστρώματα της κατηγορίας FA ενώ το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει για τα οδοστρώματα της κατηγορίας FB. Σημειώνεται ότι και τα δύο αεροσκάφη έχουν φορείο διπλού τροχού με διπλό άξονα, με τη διαφορά ότι οι τροχοί του A300-B4 έχουν ακτίνα 209mm και πίεση 1.42MPa ενώ του B747-200C έχουν ακτίνα 218mm και πίεση 1.39MPa (τα αναλυτικά στοιχεία των φορείων των αεροσκαφών παρουσιάζονται στο παράρτημα 1).



Σχήμα 3.2: Σύγκριση κρίσιμης οριζόντιας τάσης στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων ευκάμπτων οδοστρωμάτων μεταξύ των A300-B4 και B747-200C.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις έγινε ο διαχωρισμός των οδοστρωμάτων σε κατηγορίες και καθορίστηκαν οι σχετικές οριακές τιμές. Ειδικότερα έγιναν υπολογισμοί με διάφορες «μικρές» και «μεγάλες» ακτίνες ALI από όπου διαπιστώθηκε όταν το πάχος του οδοστρώματος ή των ασφαλικών στρώσεων κατά περίπτωση υπερβεί μια οριακή τιμή, μόνο η «μεγά-

λες» τιμές ακτίνων δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε πάχη μικρότερα της οριακής τιμής. Έπειτα από συστηματικές παρατηρήσεις για διάφορα αεροσκάφη και διατομές ευκάμπτων οδοστρωμάτων και με διαδοχικές προσεγγίσεις προέκυψαν τα όρια για το διαχωρισμό στις κατηγορίες του πίνακα 3.2.

Η σταθερή τιμή της ακτίνας του απλού τροχού ο οποίος με βάση το σχετικό ορισμό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής του δείκτη ALI για την κατηγορία FA έπεται από διαδοχικές προσεγγίσεις προσδιορίστηκε σε 225mm ενώ για την κατηγορία FB σε 245mm. Όπως θα δειχθεί στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές και τον ορισμό του ALI για τα εύκαμπτα οδοστρώματα, επίσης με διαδοχικές προσεγγίσεις είναι δυνατό να υπολογιστεί η τιμή της πίεσης του δείκτη ALI για ένα δεδομένο αεροσκάφος. Σύμφωνα με τον ορισμό και τις προϋποθέσεις με βάση τις οποίες δημιουργήθηκε, η αριθμητική τιμή του δείκτη ALI ενός αεροσκάφους για μία δεδομένη κατηγορία οδοστρωμάτων είναι σταθερή και συνεπώς ο υπολογισμός της πίεσης του ισοδύναμου απλού τροχού χρειάζεται να γίνει μόνο μία φορά. Ο προσδιορισμός της αριθμητικής τιμής του ALI μπορεί να γίνει με τα στοιχεία από οποιαδήποτε διατομή της κατηγορίας οδοστρωμάτων που εξετάζεται, όμως κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι οι διατομές με σχετικά μεγάλη φέρουσα ικανότητα είναι καταλληλότερες για την ακριβέστερη εκτίμηση του δείκτη ALI των βαρέων αεροσκαφών.

Για τον υπολογισμό του δείκτη ALI ενός αεροσκάφους ακολουθείται η εξής διαδικασία:

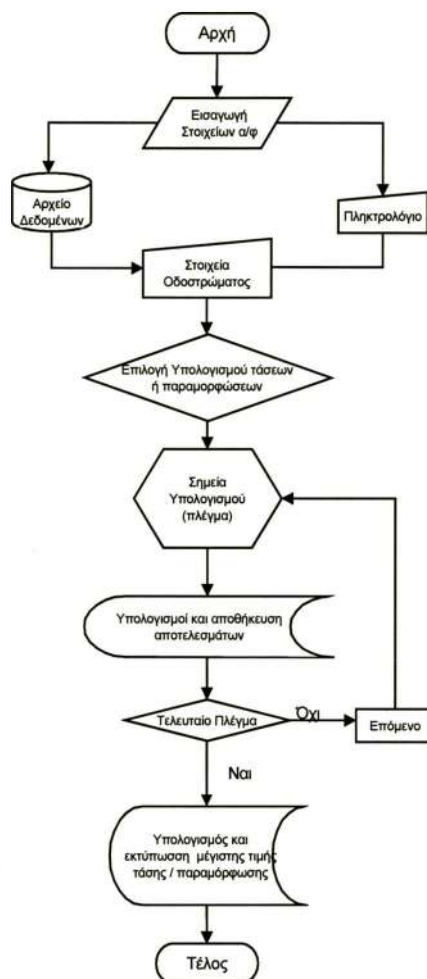
- Υπολογίζονται τα κρίσιμα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη που αναμένεται να προκαλέσει το πραγματικό φορείο σε ένα οδόστρωμα της κατηγορίας που εξετάζεται (στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν οι διατομές του πίνακα 3.3)
- Μέσω διαδοχικών προσεγγίσεων, υπολογίζεται η τιμή της πίεσης του απλού τροχού σταθερής ακτίνας (ALI) η οποία δίδει το ίδιο κρίσιμο αποτέλεσμα στον πυθμένα της ενοποιημένης ασφαλτικής στρώσης του οδοστρώματος.
- Ελέγχεται η καταλληλότητα / επάρκεια της υπολογισθείσας τιμής και για την εκτίμηση των κρίσιμων μεγεθών για τη στρώση έδρασης.

	Κατηγορία FA		Κατηγορία FB	
	Πάχος(mm)	E (MPa)	Πάχος (mm)	E (MPa)
Ασφαλτικές στρώσεις	150	6500	220	6500
Βάση από αμμοχάλικο	400	500	500	500

Στρώση έδρασης	∞	120	∞	120
----------------	----------	-----	----------	-----

Πίνακας 3.3: Στοιχεία διατομών που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη ALI των αεροσκαφών σε ασφαλικά οδοστρώματα με βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο.

Για τους υπολογισμούς των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών στα οδοστρώματα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Airport Pavement Structural Analysis (APSA) το οποίο έχει αναπτυχθεί και εξελίσσεται στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ [44]. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί τη θεωρία ελαστικών επάλληλων στρώσεων και έχει δημιουργηθεί ειδικά για υπολογισμούς οδοστρωμάτων με φόρτιση από τα σύνθετα φορεία των αεροσκαφών. Χαρακτηριστικό στοιχείο του APSA είναι ο αυτόματος εντοπισμός του σημείου όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές των κρίσιμων εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών, ο οποίος επιτυγχάνεται με τη δημιουργία τριών διαδοχικών πλεγμάτων (καννάβου) σημείων υπολογισμού. Σε κάθε βήμα το κέντρο του πλέγματος τοποθετείται στο σημείο όπου εντοπίστηκε η μέγιστη τιμή κατά το προηγούμενο βήμα. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.3. Για τη διευκόλυνση των χρηστών το λογισμικό επίσης διαθέτει αρχείο (βάση) δεδομένων για τα στοιχεία των φορείων των αεροσκαφών. Διευκρινίζεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος δεν προϋποθέτει τη χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να ελεγχθεί με οποιοδήποτε σχετικό λογισμικό / προσομοίωμα που διαθέτει τη δυνατότητα ανάλυσης οδοστρωμάτων αεροδρομίων και υπολογισμού των απαραίτητων εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών.

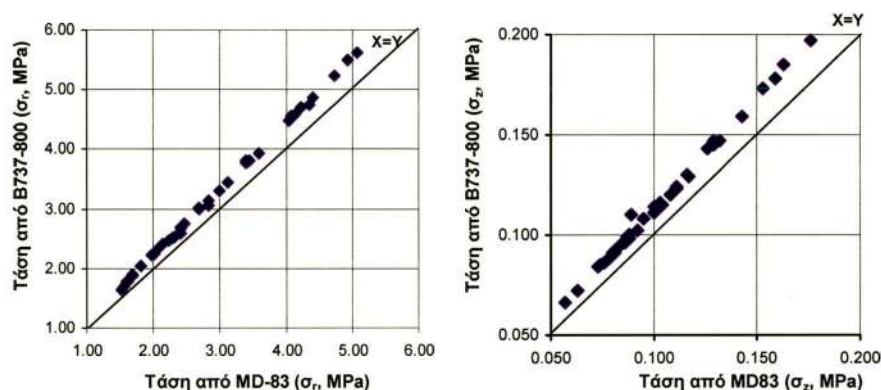


Σχήμα 3.3: Απλοποιημένο διάγραμμα ροής του λογισμικού APSA [44].

Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι τιμές του ALI που υπολογίστηκαν για διάφορα αεροσκάφη ενώ παρατίθενται για σύγκριση και οι αντίστοιχες τιμές ACN. Παρατηρώντας τον πίνακα 3.4 διαπιστώνονται διαφορές μεταξύ των δεικτών όσον αφορά την εκτίμηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών στα οδοστρώματα. Για παράδειγμα σύμφωνα με το δείκτη ACN τα B737-800 και MD-83 έχουν παραπλήσια επίδραση ενώ σύμφωνα με το δείκτη ALI το B737-800 αναμένεται να είναι αρκετά δυσμενέστερο του MD-83. Για τον έλεγχο των διαφορετικών εκτιμήσεων, στα διαγράμματα του σχήματος 3.4 παρατίθεται η σύγκριση των κρίσιμων εντατικών μεγεθών μεταξύ των B737-800 και MD-83.

Τύπος α/φ	ALI Κατηγορία FA	ALI Κατηγορία FB	ACN (A/B/C/D)
B737-400	1.13	1.04	35/37/41/45
B727-200	1.17	1.16	49/51/58/63
A300-B4	1.24	1.11	43/49/59/76
B747-200C	1.22	1.14	52/57/70/92
A300-C4	1.19	1.11	48/55/67/85
A300-600	1.15	1.07	49/56/68/84
MD-83	1.30	1.23	42/46/50/54
B737-800	1.44	1.37	42/45/50/55
B747-400	1.31	1.20	57/64/79/101
B777-300	1.52	1.44	46/59/76/100
B787-8	1.58	1.52	61/64/82/105
A380	1.42	1.27	63/69/83/102

Πίνακας 3.4: Τιμές δείκτη ALI για ασφαλικά οδοστρώματα αεροδρομίων με βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο.



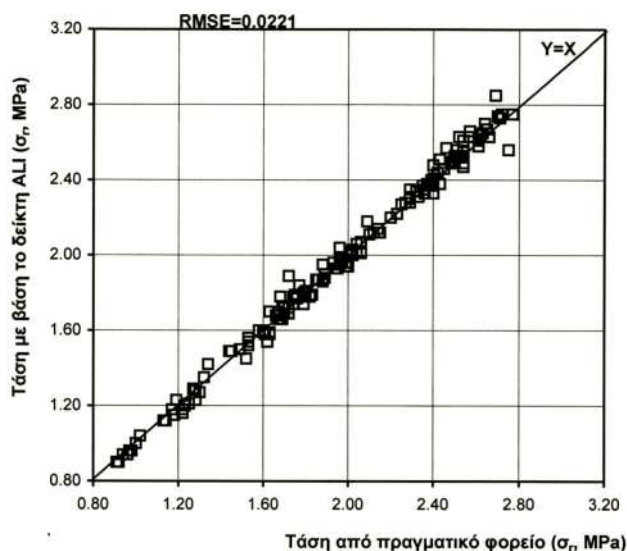
Σχήμα 3.4: Σύγκριση κρίσιμης οριζόντιας τάσης στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης (αριστερά) και κρίσιμης κατακόρυφης τάσης στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (δεξιά) από B737-800 και MD-83.

Από το σχήμα 3.4 είναι εμφανές ότι τόσο για την περίπτωση ελέγχου επάρκειας της φέρουσας ικανότητας της ασφαλτικής στρώσης όσο και της στρώσης έδρασης το B737-800 είναι δυσμενέστερο του MD-83 και κατά συνέπεια η εκτίμηση του δείκτη ALI είναι στη σωστή κατεύθυνση σε αντίθεση με αυτή του δείκτη ACN. Επισημαίνεται ότι τα δύο αεροσκάφη έχουν ίδιο σύστημα τροχών στα φορεία τους και κατά συνέπεια δεν τίθεται θέμα ισοδυναμίας μεταξύ των διελεύσεων τους.

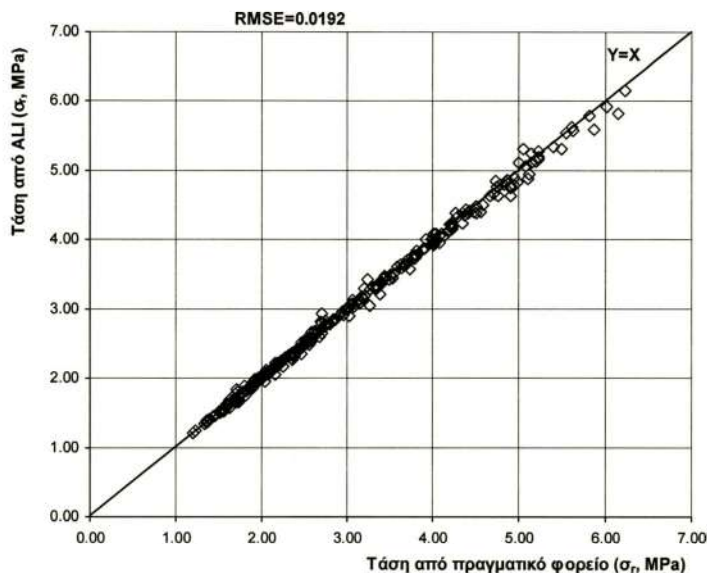
Για την επαλήθευση της καταλληλότητας και επάρκειας του δείκτη ALI πραγματοποιήθηκαν διερευνήσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν τα αεροσκάφη του πίνακα 3.4 και συνολικά περίπου 50 τυπικές διατομές οδοστρωμάτων αεροδρομίων (πίνακας 3.1). Τα αναλυτικά στοιχεία των διατομών, οι συνδυασμοί (περισσότεροι από 600 συνολικά) και τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται σε πίνακες στο παράρτημα 2. Η διαδικασία που ακολουθείται και παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια είναι η εξής:

1. Υπολογίζονται τα μέγιστα κρίσιμα μεγέθη για την ενοποιημένη ασφαλική στρώση και τη στρώση έδρασης όπως προκύπτουν από τη φόρτιση με τα πραγματικά συστήματα τροχών των αεροσκαφών.
2. Τα αντίστοιχα κρίσιμα μεγέθη υπολογίζονται και με τα φορτία ισοδύναμου απλού τροχού (ALI).
3. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα 1 και 2.
4. Αξιολογούνται οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων του πραγματικού φορείου και του ALI.

Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, στα διαγράμματα των σχημάτων 3.5 και 3.6 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα μεταξύ των οριζοντίων τάσεων στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης όπως προκύπτουν από υπολογισμό με βάση το πραγματικό φορείο και το δείκτη ALI. Στο διάγραμμα του σχήματος 3.6 σε σχέση με το παλαιότερο του σχήματος 3.5 (το οποίο έχει δημοσιευτεί στην εργασία [44]) έχουν συμπεριληφθεί αποτελέσματα με περισσότερους και νεότερους τύπους βαρέων αεροσκαφών, καθώς και σε μεγαλύτερο εύρος παραμέτρων των υλικών των οδοστρωμάτων. Για τους αναγκαίους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό APSA και επιπλέον έχουν πραγματοποιηθεί σε μικρή κλίμακα τυχαίοι έλεγχοι με λογισμικό και προσομοίωση με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Και τα δύο διαγράμματα υποδηλώνουν ότι το προσομοίωμα που χρησιμοποιεί ο δείκτης ALI μπορεί να προσεγγίσει το κρίσιμο αποτέλεσμα του πραγματικού συστήματος τροχών και κατά συνέπεια ο δείκτης μπορεί να είναι κατάλληλος για την κατάταξη των αεροσκαφών σύμφωνα με την αναμενόμενη σχετική επίδραση τους σε ένα ασφαλικό οδόστρωμα με βάση από αμμοχάλικο. Η πολύ καλή σύγκλιση των εκτιμήσεων του ALI με την επίδραση του πραγματικού φορείου επιβεβαιώνεται και από τη χαμηλή τιμή του δείκτη RMSE (Root Mean Square of Errors).



Σχήμα 3.5: Σύγκριση οριζόντιων τάσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης τυπικών διατομών οδοστρωμάτων – παλαιότεροι τύποι α/φ.



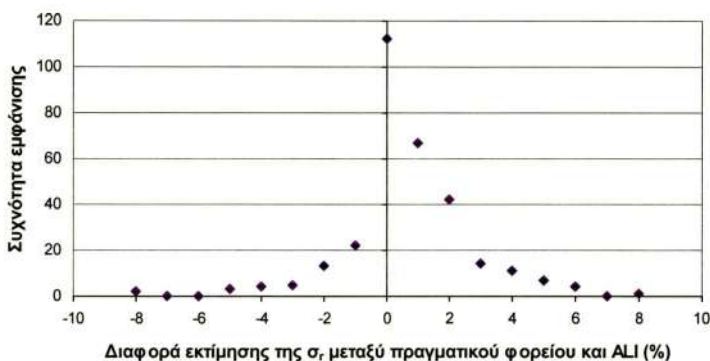
Σχήμα 3.6: Σύγκριση οριζόντιων τάσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης τυπικών διατομών οδοστρωμάτων – νεότεροι τύποι α/φ.

Ο δείκτης RMSE ορίζεται ως [47]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}} \quad (3.1)$$

όπου n το πλήθος των περιπτώσεων που εξετάστηκαν και $\varepsilon = \frac{\sigma_{\text{πραγμ}} - \sigma_{\text{ALI}}}{\sigma_{\text{πραγμ}}}$ η διαφορά μεταξύ των τάσεων που προκαλούνται από το πραγματικό φορείο ($\sigma_{\text{πραγμ}}$) και από τον ισοδύναμο απλό τροχό του δείκτη ALI (σ_{ALI}). Όσο μικρότερη είναι η τιμή του δείκτη RMSE τόσο καλύτερη είναι η σύγκλιση μεταξύ των συγκρινόμενων μεγεθών. Στα διαγράμματα 3.5 και 3.6 είναι χαρακτηριστικό ότι ο δείκτης RMSE δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτη μεταβολή, παρά το γεγονός ότι στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τύποι αεροσκαφών (τα B727-200, A300-B4, B747-200C και A300-C4 για το σχήμα 3.5 και τα A300-600, B737-400, MD-83, B737-800, B747-400, B777-300, B787-8, A380 για το σχήμα 3.6). Το στοιχείο αυτό υποδηλώνει ότι ο δείκτης ALI διατηρεί την ακρίβεια του και στις δύο περιπτώσεις ελέγχου.

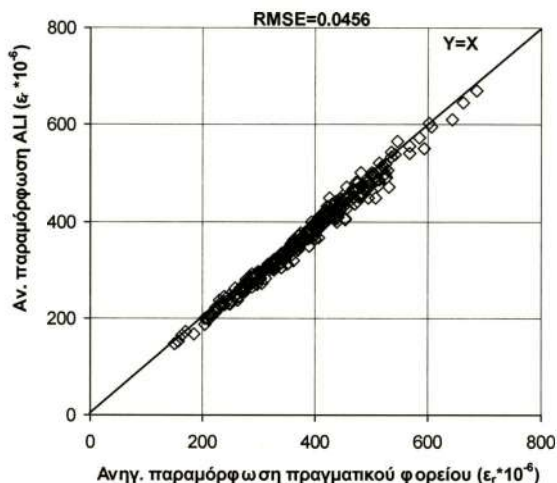
Από τους σχετικούς υπολογισμούς για το σφάλμα των εκτιμήσεων του δείκτη ALI (απόλυτη τιμή) υπολογίστηκε μέση τιμή 1.2% και τυπική απόκλιση 1.4%. Όπως παρατηρήθηκε (σχήμα 3.7) στους συνδυασμούς που εξετάστηκαν (περισσότεροι από 300) το μέγιστο σφάλμα της εκτίμησης του ALI δεν υπερβαίνει το 9%.



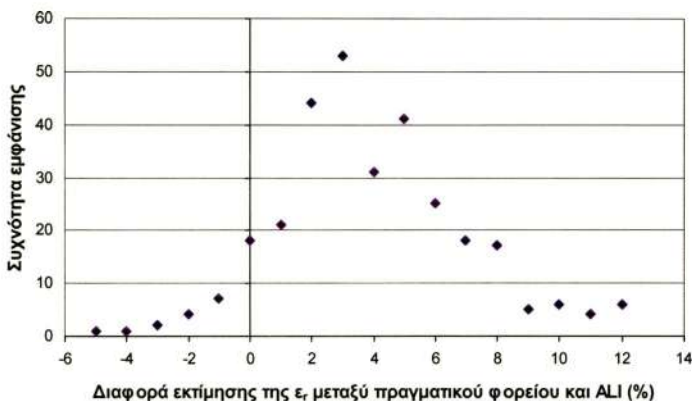
Σχήμα 3.7: Διαφορά (σφάλμα εκτίμησης) μεταξύ πραγματικού φορτίου και δείκτη ALI για την κρίσιμη οριζόντια τάση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης.

Αντίστοιχα αποτελέσματα ελήφθησαν και από τους υπολογισμούς των οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων στη βάση των ασφαλτικών στρώσεων, τα οποία παρουσιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 3.8. Και αυτή η περίπτωση επιβεβαιώνει την πολύ ικανοποιητική σύγκλιση των εκτιμήσεων από το δείκτη ALI με τα κρίσιμα μεγέθη που προκύπτουν από τη

φόρτιση με το πραγματικό σύστημα των αεροσκαφών. Το σφάλμα (διαφορά) των εκτιμήσεων του ALI για τις ανηγμένες παραμορφώσεις έχει μέση τιμή 3.7% και τυπική απόκλιση 2.6% και η κατανομή του παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9.



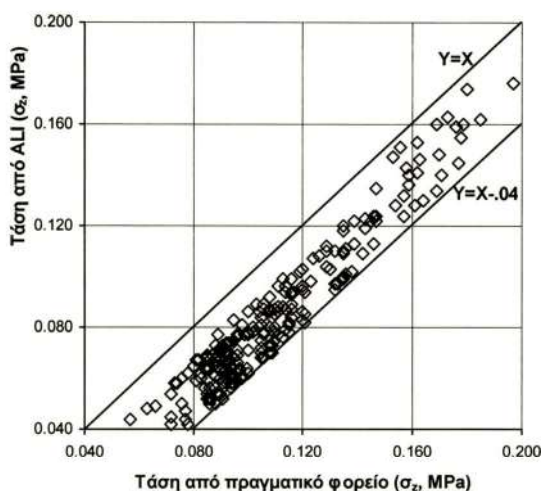
Σχήμα 3.8: Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων στη βάση της ασφαλτικής στρώσης τυπικών διατομών οδοστρωμάτων – νεότεροι τύποι α/φ.



Σχήμα 3.9: Διαφορά (σφάλμα εκτίμησης) μεταξύ πραγματικού φορτίου και δείκτη ALI για την κρίσιμη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης.

Όσον αφορά τον έλεγχο της καταλληλότητας του δείκτη ALI για σύγκριση της επίδρασης των αεροσκαφών στη στρώση έδρασης από τις σχετικές διερευνήσεις παρατηρείται (σχήμα 3.10) ότι στις κατακόρυφες τάσεις η εκτίμηση της επίδρασης από το ALI είναι αντίστοιχη με αυτή

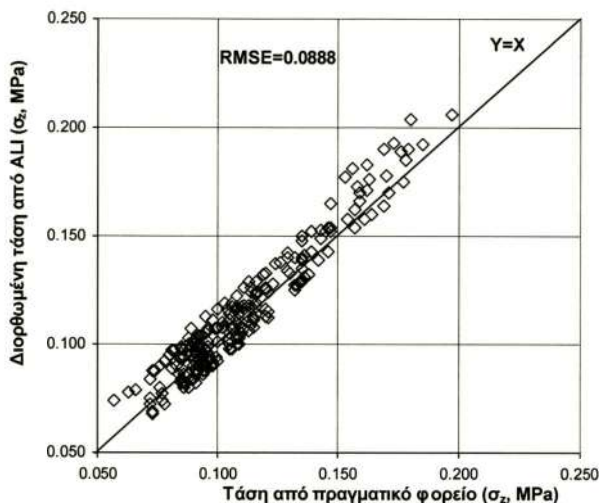
του πραγματικού συστήματος υπολειπόμενη κατά 0.02 – 0.04 MPa, κάτι το οποίο είχε επισημανθεί από τα πρώτα στάδια της σχετικής διερεύνησης [44]. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι το φορτίο του απλού τροχού του ALI υπολογίζεται αρχικά με βάση την κρίσιμη οριζόντια τάση/παραμόρφωση η οποία αναπτύσσεται σχετικά κοντά στην περιοχή εφαρμογής του φορτίου και συνεπώς είναι μικρότερο από το συνολικό φορτίο των τροχών του φορείου καθώς η αλληλεπίδραση των τροχών περιορίζει την αύξηση των οριζόντιων τάσεων και παραμορφώσεων. Όμως, σε σχετικά μεγάλο βάθος επιφάνεια του οδοστρώματος η εντατική κατάσταση καθορίζεται κυρίως από το συνολικό φορτίο και όχι από τη διάταξη εφαρμογής του (αρχή Saint-Venant [48]) και συνεπώς το μικρότερο φορτίο του απλού τροχού δίδει αντίστοιχα μικρότερες κατακόρυφες τάσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης.



Σχήμα 3.10: Σύγκριση κατακόρυφων τάσεων στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης οδοστρωμάτων (νεότεροι τύποι α/φ).

Για το λόγο αυτό προτείνεται διόρθωση (προσαύξηση) των εκτιμήσεων του ALI κατά 0.03 MPa μετά την οποία η προσέγγιση των τάσεων του πραγματικού είναι ικανοποιητική όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 3.11. Στο πλαίσιο του ελέγχου δομικής επάρκειας οδοστρωμάτων αεροδρομίων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και μια περισσότερο συντηρητική προσέγγιση (προσαύξηση κατά 0.04 MPa) έτσι ώστε να διασφαλιστεί περισσότερο το ενδεχόμενο αστοχίας της στρώσης, το οποίο είναι ιδιαίτερα κρίσιμο. Εξάλλου, στην πράξη λόγω ακριβώς αυτής της κρισιμότητας δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στην προστασία της στρώσης έδρασης με συνέπεια ακόμη και η προτεινόμενη συντηρητική προσέγγιση συνήθως να

απέχει αρκετά από την οριακή τιμή για την αστοχία της στρώσης. Το στοιχείο αυτό διαπιστώθηκε και σε σχετικές προκαταρκτικές εφαρμογές [49], [50].

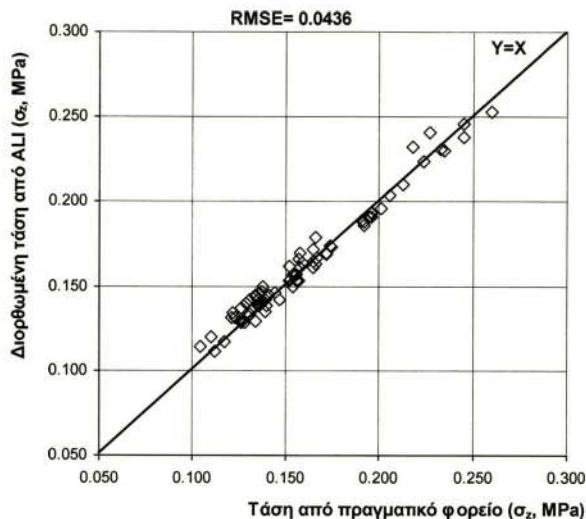


Σχήμα 3.11: Σύγκριση διορθωμένων εκτιμήσεων από ALI με τις αντίστοιχες κατακόρυφες τάσεις του πραγματικού φορτίου στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης οδοστρωμάτων (νεότεροι τύποι α/φ).

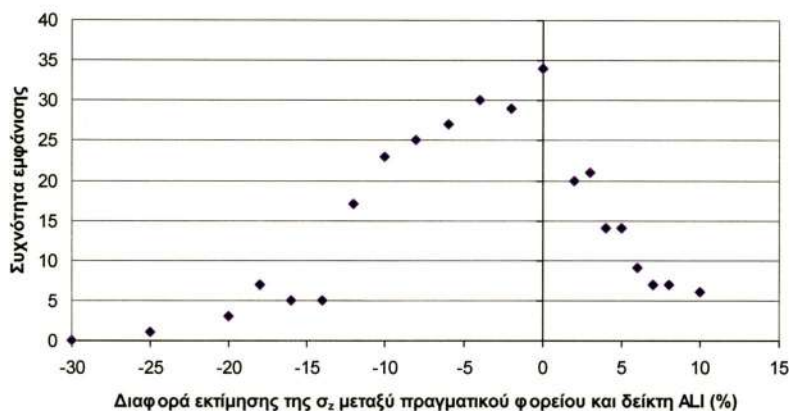
Στο πλαίσιο του ελέγχου των παραπάνω με νεότερους τύπους αεροσκαφών (σχήμα 3.11), διαπιστώθηκε ότι η προτεινόμενη διόρθωση (0.03 – 0.04 MPa) είναι κατάλληλη για αεροσκάφη με φορτίο τροχού μικρότερο από 300 kN. Στην αντίθετη περίπτωση, συνεχίζει να ισχύει η αντιστοιχία μεταξύ των εκτιμήσεων του ALI και των υπολογισμών του πραγματικού φορτίου, η διαφορά τους είναι και πάλι περίπου σταθερή, αλλά στην περίπτωση κυμαίνεται μεταξύ 0.05 – 0.07 MPa. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.12 μια διόρθωση των εκτιμήσεων του ALI κατά 0.06 MPa μπορεί να είναι ικανοποιητική και κατάλληλη για χρήση στο πλαίσιο του ελέγχου δομικής επάρκειας οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Επισημαίνεται ότι η περίπτωση αυτή αναφέρεται σε ένα σχετικά μικρό αριθμό αεροσκαφών, πρόκειται κυρίως για ορισμένες παραλλαγές νεότερων τύπων όπως π.χ. το B777-300 και το B787-8.

Συνολικά, για τον έλεγχο των οδοστρωμάτων αεροδρομίων οι προτεινόμενες προσεγγίσεις (σχήματα 3.11 και 3.12) δίνουν αποδεκτές αποκλίσεις από τις τιμές του πραγματικού φορτίου (μέση τιμή σφάλματος 7.3% και 3.4% αντίστοιχα, με τυπική απόκλιση 5% και 2.8%), ενώ η πλειοψηφία των περιπτώσεων πάνω από την ευθεία ισότητας (προς την πλευρά του ALI) δηλαδή υπέρ της ασφαλείας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.13, σε πολύ λίγες περιπτώσεις (λιγότερες από 20 σε περισσότερους από 300 συνδυασμούς) η υπολογισμένη με το πραγμα-

τικό φορείο κατακόρυφη ανηγμένη παραμόρφωση υπερβαίνει την αντίστοιχη του ALI περισσότερο από 10%.



Σχήμα 3.12: Σύγκριση κατακόρυφων τάσεων στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης ευκάμπτων οδοστρωμάτων (νεότεροι τύποι α/φ με φορτίο ανά τροχό >300kN).



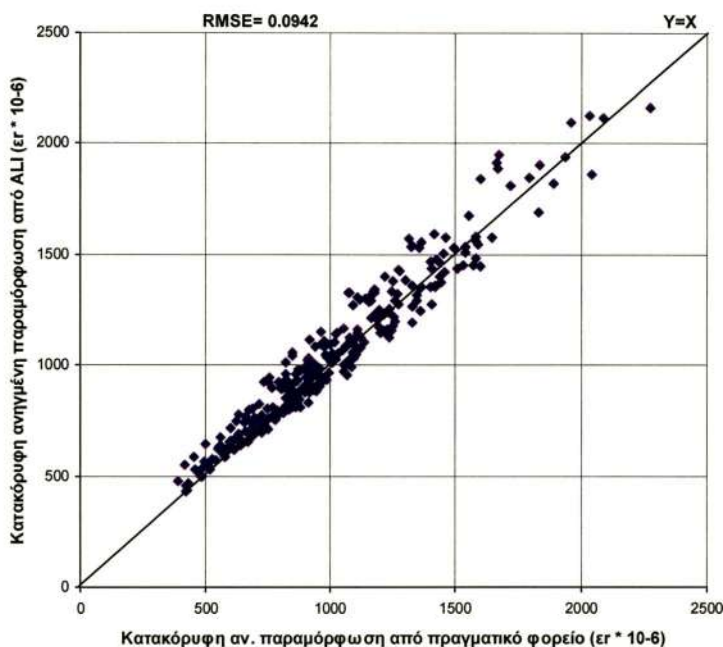
Σχήμα 3.13: Διαφορά (σφάλμα εκτίμησης) μεταξύ πραγματικού φορτίου και δείκτη ALI για την κρίσιμη κατακόρυφη τάση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης.

Ακριβώς αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα για την κρίσιμη κατακόρυφη ανηγμένη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Και στην περίπτωση αυτή απαιτείται διόρθωση τιμών η οποία πραγματοποιείται σύμφωνα με τη σχέση:

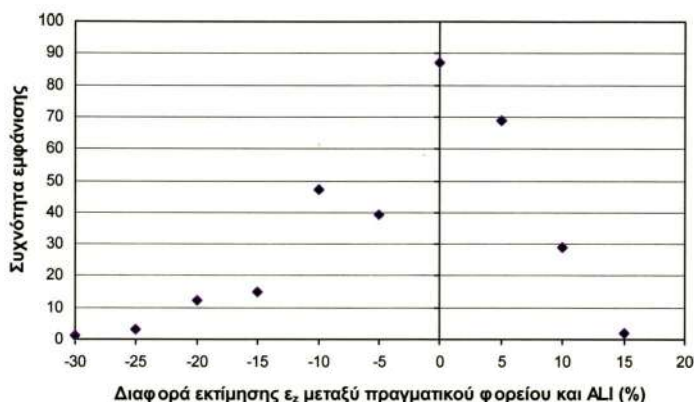
$$\varepsilon_{z(\delta)} = \varepsilon_{zALI} + \frac{\Delta\sigma}{E_{sub}} \quad (3.2)$$

Όπου $\varepsilon_{z(\delta)}$ η διορθωμένη τιμή της κατακόρυφης ανηγμένης παραμόρφωσης ε_{zALI} η μη διορθωμένη τιμή, $\Delta\sigma$ η διόρθωση της κρίσιμης κατακόρυφης τάσης όπως αναφέρθηκε προγενέστερα και E_{sub} το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της στρώσης έδρασης.

Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η σύγκριση της παραπάνω εκτίμησης των κρίσιμων κατακόρυφων παραμόρφωσεων σε σχέση με τις τιμές που υπολογίζονται από το πραγματικό φορείο. Όπως διαπιστώνεται και επιβεβαιώνεται από τον έλεγχο των διαφορών (μέση τιμή 7.1%, τυπική απόκλιση 6.2% - σχήμα 3.15) η προσέγγιση είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 3.14: Σύγκριση κατακόρυφων ανηγμένων παραμορφώσεων στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης ευκάμπτων οδοστρωμάτων



Σχήμα 3.15: Διαφορά (σφάλμα εκτίμησης) μεταξύ πραγματικού φορτίου και δείκτη ALI για την κρίσιμη κατακόρυφη ανηγμένη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης.

3.2.2 Ο Δείκτης ALI για Ασφαλτικά Οδοστρώματα Αεροδρομίων με Βάση από Αμμο-χάλικο Κατεργασμένο με Υδραυλικές κόνιες.

Όπως έχει αναφερθεί τα ασφαλτικά οδοστρώματα με βάση από κατεργασμένο υλικό παρουσιάζουν διαφορετική απόκριση στα επιβαλλόμενα φορτία σε σχέση με αυτά που διαθέτουν βάση από ασύνδετο υλικό, δεδομένου ότι η ύπαρξη μίας ή περισσότερων στρώσεων βάσης με υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας από αυτό των ασφαλτικών στρώσεων έχει ως αποτέλεσμα τη διαφορετική κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό της κατασκευής η οποία συνεπάγεται και την αντίστοιχα διαφορετική συμπεριφορά της. Συνεπώς ο δείκτης ALI πρέπει να προσδιορίζεται με βάση τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη της διατομής του σχετικού προσομοιώματος που είναι η επαναλαμβανόμενη εφελκυστική τάση ή η ανηγμένη παραμόρφωση που αναπτύσσεται στην κάτω ίνα της σταθεροποιημένης στρώσης λόγω της διέλευσης του φορτίου του αεροσκάφους (σχήμα 3.16). Στην περίπτωση που η βάση αποτελείται από δύο στρώσεις κατεργασμένου υλικού τότε απαιτείται αντίστοιχος έλεγχος και στη διεπιφάνεια μεταξύ των στρώσεων (κάτω ίνα επάνω στρώσης). Η περίπτωση αυτή δεν εξετάστηκε στην παρούσα διερεύνηση αλλά μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ίδια ακριβώς διαδικασία.



Σχήμα 3.16: Ενδεικτικό προσομοίωμα ημιακάμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου.

Σε αναλογία με τα ασφαλτικά οδοστρώματα με βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο, για τη βελτιστοποίηση του καθορισμού των παραμέτρων του ALI (ακτίνα, πίεση) έγινε διερεύνηση μεγάλου αριθμού διατομών ημιακάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων από την οποία προέκυψε η ανάγκη κατηγοριοποίησης τους σύμφωνα με τον πίνακα 3.5. Τα στοιχεία των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ καθώς και από διεθνείς σχετικές βάσεις δεδομένων και παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6. Και σε αυτή την περίπτωση τιμές εντός του εύρους που εξετάστηκε έχουν καταγραφεί σε επιτόπου δοκιμές οδοστρωμάτων κατά τη διάρκεια ή μετά το πέρας της κατασκευής, όπως και κατά την περίοδο λειτουργίας τους.

Συνολικό πάχος βάσης και ασφαλτικών στρώσεων		
>420mm		≤ 420mm
Δείκτης CBR στρώσης έδρασης		Κατηγορία SRB
<12%	≥12%	
Κατηγορία SRA	Κατηγορία SRB	

Πίνακας 3.5: Κατηγορίες ασφαλτικών οδοστρωμάτων με βάση από κατεργασμένο υλικό.

Σε επόμενο στάδιο έγινε διερεύνηση για την επιλογή της βέλτιστης (σταθερής) ακτίνας του δείκτη ALI από όπου προέκυψαν οι τιμές 380mm και 320mm για τις κατηγορίες SRA και SRB αντίστοιχα. Με βάση αυτές τις τιμές ο υπολογισμός της τιμής της πίεσης του ALI για έκαστη κατηγορία μπορεί να προσδιοριστεί με βάση οποιοδήποτε οδόστρωμα αυτής. Όμως κατ' αναλογία με τα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι σκόπιμο ο προσδιορισμός να γίνεται με βάση μια διατομή η οποία να μπορεί να εξυπηρετήσει ικανό αριθμό διελεύσεων χωρίς κίνδυνο

αστοχίας. Στο πλαίσιο αυτό για τις αναλύσεις επιλέχθηκαν οι διατομές του πίνακα 3.7 στις οποίες υπολογίστηκαν οι μέγιστες οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις από τα πραγματικά συστήματα τροχών των αεροσκαφών. Στη συνέχεια, με διαδικασία διαδοχικών προσεγγίσεων υπολογίστηκε η αντίστοιχη πίεση του απλού τροχού του ALI. Στον πίνακα 3.8 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τιμές ALI για διάφορα αεροσκάφη. Σημειώνεται ότι τιμές του πίνακα 3.8 πέραν της κατάταξης της φόρτισης των αεροσκαφών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την εκτίμηση της σχετικής φθοράς που προκαλείται από κάθε αεροσκάφος σε ένα δεδομένο οδόστρωμα.

Στρώση	Συνολικό Πάχος (mm)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)
Ασφαλτικές Στρώσεις	120 – 250	3000 – 8500
Βάση από αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κόνιες	180 - 300	10000-20000
Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο	150 - 400	200 -700
Στρώση Έδρασης	∞	40 – 200 (CBR 4-20%)

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά διατομών οδοστρωμάτων με βάση από αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο.

Υλικό Στρώσης	Πάχος (mm)	
	Κατηγορία SRA	Κατηγορία SRB
Ασφαλτικό Σκυρόδεμα	200	200
Βάση από αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο	300	250
Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο	200	200
Στρώση έδρασης	∞	∞

Πίνακας 3.7: Διατομές υπολογισμού δείκτη ALI για ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

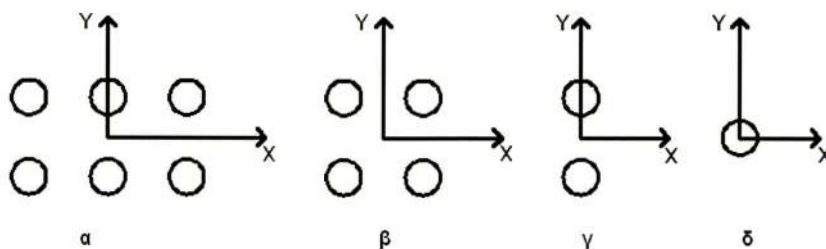
Για τη διερεύνηση της καταλληλότητας και αξιοπιστίας του ALI ως δείκτη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών στα οδοστρώματα και της σύγκρισης των διαφορετικών τύπων αεροσκαφών πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες αναλύσεις σε διατομές ασφαλτικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων με βάση από κατεργασμένο υλικό, αντιπροσωπευτικές διατομών που χρησιμοποιούνται σε διαδρόμους και τροχοδρόμους αεροδρομίων. Τα στοιχεία ελήφθησαν από τη Βάση Δεδομένων Οδοστρωμάτων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ καθώς και από τη διεθνή εμπειρία και το εύρος τιμών των χαρακτηριστικών παραμέτρων τους έχει παρουσιαστεί στον πίνακα 3.6.

Τύπος α/φ	ALI Κατηγορία SRA	ALI Κατηγορία SRB	ACN (A/B/C/D)
B737-400	0.64	0.82	35/37/41/45
MD-83	0.73	0.93	42/46/50/54
A300-C4	0.75	0.85	48/55/67/85
B747-400	0.75	0.85	57/64/79/101
A380	0.81	0.90	63/69/83/101

Πίνακας 3.8: Τιμές δείκτη ALI α/φ για ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

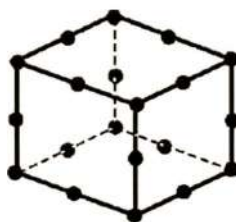
Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με τους δείκτες κατάταξης που χρησιμοποιούνται σήμερα (π.χ. ACN) οι αναλύσεις των διατομών για τον καθορισμό των παραμέτρων και τον έλεγχο καταλληλότητας του δείκτη ALI έχουν πραγματοποιηθεί με εξελιγμένα υπολογιστικά εργαλεία βασισμένα στην ελαστική θεωρία πολλαπλών επάλληλων στρώσεων και στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σε όλες τις περιπτώσεις τα υλικά των στρώσεων θεωρηθήκαν ομογενή, ελαστικά και ισότροπα. Οι υπολογισμοί έγιναν και με τις δύο μεθόδους όπου στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό APSA του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, ενώ στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν ειδικά λογισμικά προσομοίωσης με δισδιάστατα και τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία όπως CAPA 3D [51], ABAQUS [52] και NASTRAN [53]. Το σύνολο των υπολογισμών πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό ABAQUS ενώ τα δύο άλλα χρησιμοποιήθηκαν σε μικρή κλίμακα για έλεγχο των αποτελεσμάτων.

Ως προς την προσομοίωση των διατομών και των φορτίσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, για τη βελτιστοποίηση των προσομοιώσεων σε τρεις διαστάσεις αξιοποιήθηκε η συμμετρία του φορέα και των φορτίων των φορέων των αεροσκαφών με στόχο τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου (σχήμα 3.17). Όπως φαίνεται και στις τέσσερις διατάξεις του σχήματος 3.17 υπάρχει συμμετρία της φόρτισης ως προς τα επίπεδα XZ και YZ (ο άξονας Z είναι κάθετος στο επίπεδο XY) και κατά συνέπεια οι οριζόντιες μετατοπίσεις στα επίπεδα συμμετρίας είναι μηδενικές. Προς τούτο δεσμεύτηκαν οι αντίστοιχοι βαθμοί ελευθερίας των κόμβων του προσομοιώματος.

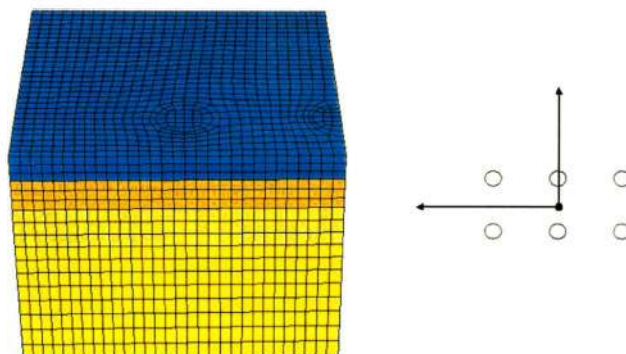


Σχήμα 3.17: Συμμετρία τυπικών συστημάτων τροχών αεροσκαφών – α: διπλός τροχός με τριπλό άξονα, β: διπλός τροχός με διπλό άξονα, γ: διπλός τροχός, δ: απλός τροχός

Η κατασκευή του πλέγματος του φορέα έγινε με χρήση εξαεδρικών πρισματικών στοιχείων 20 κόμβων (τύπος C3D20 του ABAQUS – σχήμα 3.18) τα οποία εξασφαλίζουν υψηλή ακρίβεια για υπολογισμούς συνεχούς μέσου σε τρεις διαστάσεις. Περαιτέρω βελτιστοποίηση της ακρίβειας πραγματοποιήθηκε με κατάλληλη πύκνωση του πλέγματος στις περιοχές εφαρμογής του φορτίου καθώς και στις κρίσιμες θέσεις υπολογισμού των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών (σχήμα. 3.19). Τα όρια του πλέγματος στην οριζόντια διεύθυνση (επιφάνεια οδοστρώματος) καθορίστηκαν σε τουλάχιστον 3 μέτρα από την περιοχή του φορτίου ενώ στην κατακόρυφη διεύθυνση σε τουλάχιστον 7 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Όπως επιβεβαιώθηκε και από τις διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν οι τάσεις και παραμορφώσεις μηδενίζονται σε μικρότερη απόσταση από τη διάσταση που επιλέχθηκε για το προσομοίωμα του φορέα. Στα άκρα του πλέγματος οι κόμβοι που ευρίσκονται σε επίπεδα παράλληλα των XZ, YZ δεσμεύτηκαν ως προς την οριζόντια μετακίνηση τους ενώ οι μετακινήσεις των κόμβων που ευρίσκονται στο επίπεδο της «βάσης» που πλέγματος δεσμεύτηκαν προς όλες τις διευθύνσεις.

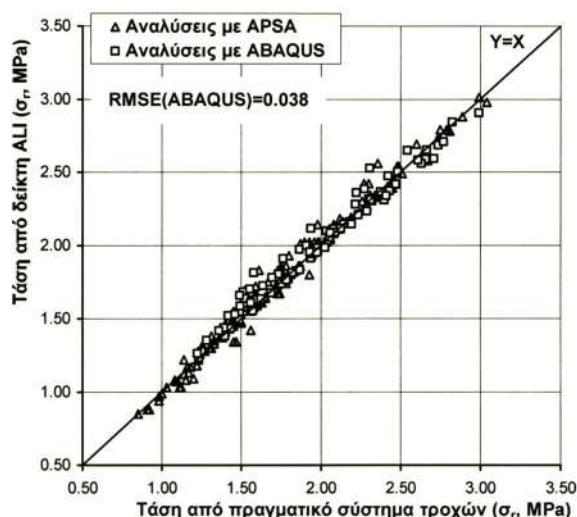


Σχήμα 3.18: Εξαεδρικό πρισματικό στοιχείο συνεχούς μέσου με 20 κόμβους (τύπος C3D20 του λογισμικού ABAQUS).



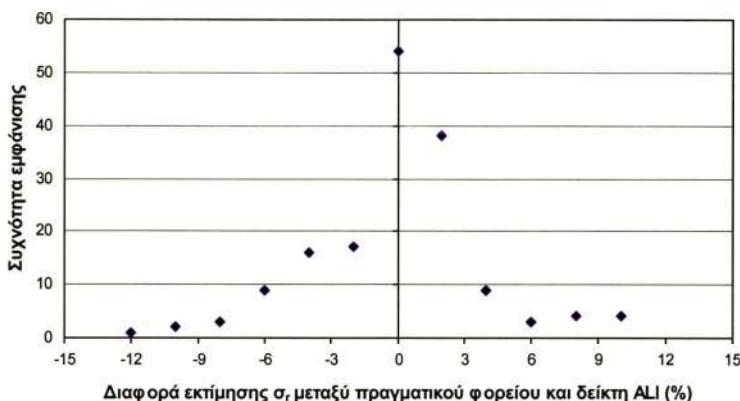
Σχήμα 3.19: Τυπικό πλέγμα τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων για φορείο διπλού τροχού με τριπλό άξονα.

Από την παραπάνω υπολογιστική διαδικασία έγιναν συγκριτικές διερευνήσεις για τις κρίσιμες οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη βάση των κατεργασμένων στρώσεων από τα πραγματικά συστήματα τροχών και τα ισοδύναμα προσομοιώματα του δείκτη ALI. Τα εύρος τιμών για τα χαρακτηριστικά στοιχεία των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνονται στον πίνακα 3.6 ενώ οι τύποι των αεροσκαφών στον πίνακα 3.8. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 3.20 και οι τιμές στον πίνακα 2.3 του παραρτήματος 2.



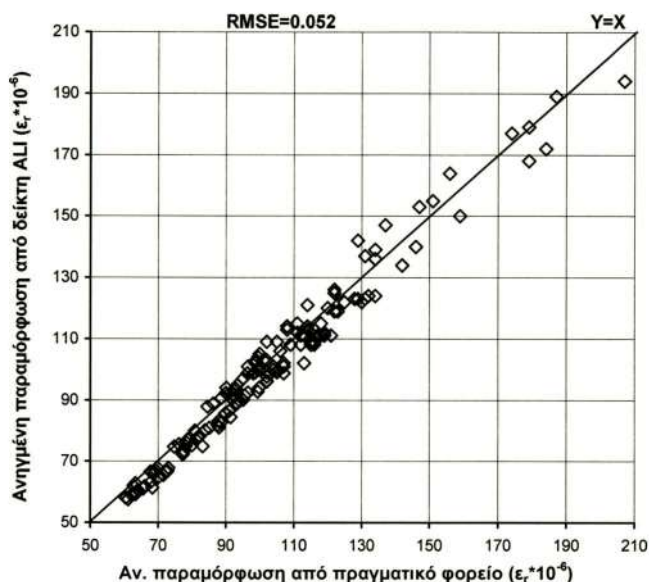
Σχήμα 3.20: Σύγκριση κρίσιμης οριζόντιας τάσης στον πυθμένα της στρώσης βάσης από κατεργασμένο αμμοχάλικο (συνολικά αποτελέσματα αναλύσεων).

Από το διάγραμμα του σχήματος 3.20 φαίνεται ότι το προσομοίωμα που βασίζεται στο δείκτη ALI προσεγγίζει τις κρίσιμες τάσεις του πραγματικού συστήματος τροχών, όπως επιβεβαιώνεται και από το δείκτη RMSE. Η μέση τιμή της διαφοράς (σχήμα 3.21) μεταξύ της πραγματικής και της εκτιμώμενης τάσης από το ALI (σφάλμα) δεν ξεπερνά το 3%, και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση είναι 2.8.

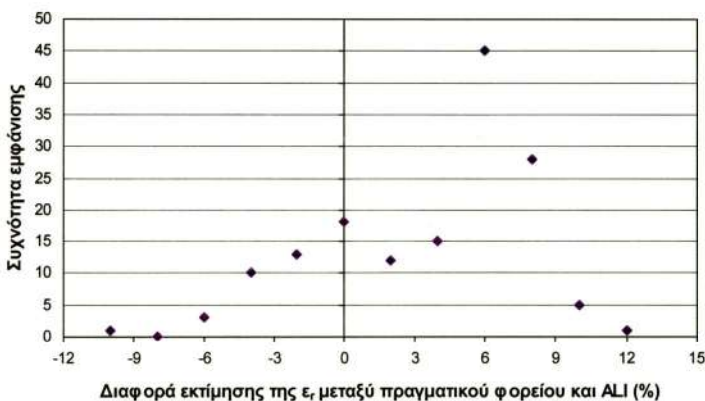


Σχήμα 3.21: Διαφορά (σφάλμα εκτίμησης) μεταξύ πραγματικού φορτίου και δείκτη ALI για την κρίσιμη οριζόντια τάση στον πυθμένα της στρώσης από αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κόνιες.

Αντίστοιχα αποτελέσματα εξάγονται και από τη σύγκριση των ανηγμένων παραμορφώσεων (σχήμα 3.22). Με βάση τη σχετική εμπειρία το υπόψη σφάλμα κρίνεται αποδεκτό όχι μόνο για κατάταξη και σύγκριση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών σε ένα οδόστρωμα αλλά και για πολλές από τις συνήθεις αναλύσεις οδοστρωμάτων αεροδρομίων (π.χ. για θέματα σχεδιασμού, ελέγχου δομικής επάρκειας κλπ). Σημειώνεται, ότι σε κανένα από τους 150 συνδυασμούς αεροσκαφών - οδοστρωμάτων που εξετάστηκαν οι διαφορές (σχήμα 3.23) δεν ξεπέρασαν το 12%, που σημαίνει ότι ο δείκτης ALI μπορεί να χρησιμοποιηθεί ασφαλώς (χωρίς ιδιαίτερο κίνδυνο) για τις υπόψη πρακτικές εφαρμογές.



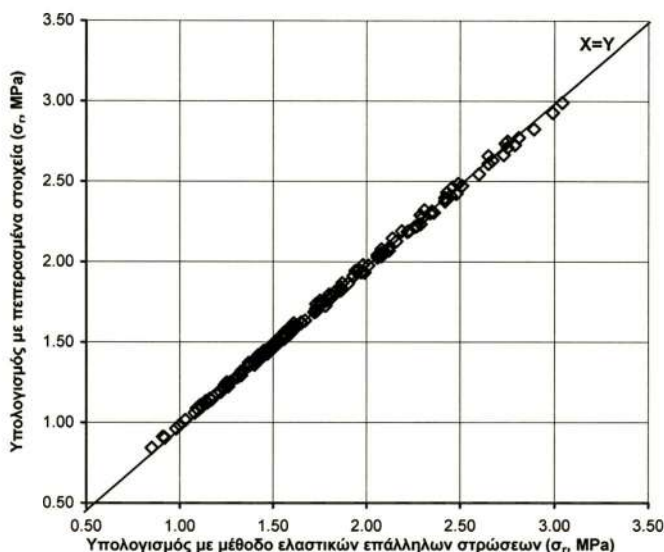
Σχήμα 3.22: Σύγκριση κρίσιμης οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της στρώσης βάσης από κατεργασμένο αμμοχάλικο (αποτελέσματα αναλύσεων με ABAQUS).



Σχήμα 3.23: Διαφορά (σφάλμα εκτίμησης) μεταξύ πραγματικού φορτίου και δείκτη ALI για την κρίσιμη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση της στρώσης από αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κόνιες.

Τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν δημοσιευτεί σε σχετική ανακοίνωση [36] και έχουν εξαχθεί από αναλύσεις βασισμένες στη θεωρία των πολλαπλών ελαστικών επάλληλων στρώσεων καθώς και από λογισμικά βασισμένα στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων.

Συνολικά, από τους σχετικούς υπολογισμούς διαπιστώθηκε ότι και οι δύο θεωρήσεις δίνουν εξίσου αποδεκτά αποτελέσματα παρόλο που μετά από εμβάθυνση διαπιστώνεται ότι παρουσιάζουν ορισμένες μικρές διαφοροποιήσεις όπως φαίνεται στα σχήματα 3.20 και 3.24. Με βάση τη διεθνή εμπειρία και πρακτική οι διαφορές αυτές κρίνονται εύλογες και αναμενόμενες [54], [55], ενώ η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των διαφορετικών θεωρήσεων η οποία παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος 3.24 που ακολουθεί δείχνει ότι στις περιπτώσεις που η οριζόντια τάση υπερβαίνει τα 2.5 MPa η ελαστική θεωρία πολλαπλών επάλληλων στρώσεων δίνει ελαφρά μεγαλύτερες τιμές, αλλά αυτή η διαφορά (<3%) είναι πρακτικά αμελητέα. Συνεπώς και οι δύο θεωρήσεις επιβεβαιώνουν στον ίδιο βαθμό την καταλληλότητα του ALI ως δείκτη έκφρασης της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών σε ένα οδόστρωμα.



Σχήμα 3.24: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την κρίσιμη οριζόντια τάση μεταξύ των διαφορετικών προσομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς (πραγματικό σύστημα τροχών α/φ).

Για τον συστηματικότερο έλεγχο της αξιοπιστίας του δείκτη ALI κρίθηκε σκόπιμο η επαληθευτική διαδικασία να επεκταθεί και σε διατομές οδοστρωμάτων στις οποίες έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές και μετρήσεις σε ειδικές εγκαταστάσεις διεξαγωγής πειραμάτων σε κλίμακα 1:1. Οι σχετικές διερευνήσεις και έλεγχοι παρουσιάζονται στα κεφάλαια 4 και 5 που ακολουθούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΑΛΙ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ

4.1 Εισαγωγή – Περιγραφή του Συστήματος Δοκιμών

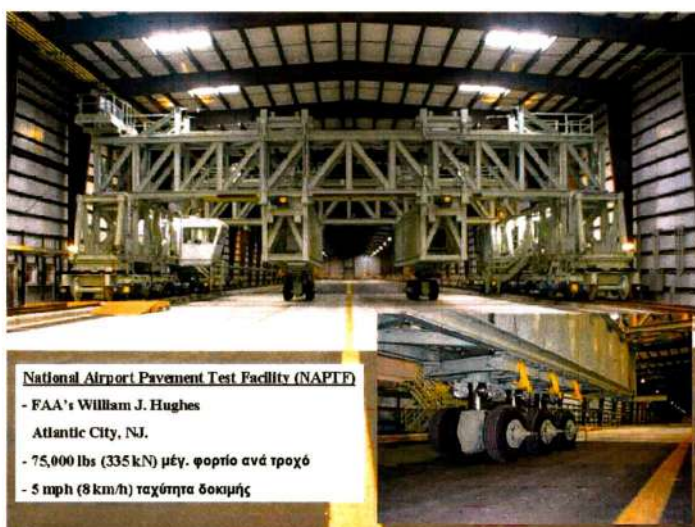
Οι εγκαταστάσεις δοκιμών οδοστρωμάτων πραγματικής κλίμακας (Large Scale Facilities – LSF) αποτελούν διεθνώς μια σημαντική πηγή πληροφοριών για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων και μεθόδων ανάλυσης των. Στο πλαίσιο των σχετικών προσπαθειών για τα οδοστρώματα των αεροδρομίων ανήκει και η εγκατάσταση του NAPTF (National Airport Pavement Testing Facility) [56], η οποία αποτελεί προϊόν συνεργασίας μεταξύ της εταιρίας κατασκευής αεροσκαφών Boeing η οποία χρηματοδότησε την κατασκευή και της Federal Aviation Administration (FAA) η οποία ανέλαβε σε συνεργασία με τη Boeing τη διαχείριση και συντήρηση του. Η εγκατάσταση του NAPTF κατασκευάστηκε για να δώσει τη δυνατότητα διεξαγωγής πειραμάτων σε οδοστρώματα αεροδρομίων σε πραγματική κλίμακα (1 προς 1) έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση των φορτίων και η συμπεριφορά των οδοστρωμάτων στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης παραμέτρων που σχετίζονται με θέματα κατασκευής των αεροσκαφών καθώς και με θέματα σχεδιασμού, συντήρησης και διαχείρισης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Πειράματα διενεργούνται και από τους δύο φορείς. Από τα πρώτα πειράματα ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διερεύνηση της επίδρασης των σύγχρονων και υπό ανάπτυξη νέων μεγάλων αεροσκαφών (New Large Aircrafts – NLA) στα οδοστρώματα και για το λόγο αυτό οι περισσότερες δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί συμβάλλουν προς αυτή την κατεύθυνση και ειδικότερα:

- Στη συλλογή στοιχείων επίδρασης κυκλοφορίας βαρέων αεροσκαφών στο πλαίσιο της αναβάθμισης / εισαγωγής νέων μεθόδων σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων από την FAA.
- Στην παροχή δεδομένων απόκρισης και συμπεριφοράς οδοστρωμάτων υπό πραγματική φόρτιση για χρήση σε μελέτες βελτιστοποίησης του σχεδιασμού των φορέων των αεροσκαφών.
- Στην επανεξέταση και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των κλασσικών μεθόδων σχεδιασμού ασφαλικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων που βασίζονται στον Καλιφορνιακό Δείκτη CBR (California Bearing Ratio) με σύγχρονα δεδομένα.



Σχήμα 4.1: Εικόνες από την κατασκευή της εγκατάστασης NAPTF.

Η κατασκευή της εγκατάστασης (σχ. 4.1) ολοκληρώθηκε τον Απρίλιο του 1999 και αποτελείται από πειραματικό τμήμα οδοστρώματος συνολικού μήκους 274.3m και πλάτους 18.3m και έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης επιβολής φορτίου σε δύο τροχιές (βόρεια και νότια). Το φορείο της κάθε τροχιάς μπορεί να αποτελείται από 1 μέχρι 12 τροχούς με μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο ανά τροχό έως 334kN ενώ υπάρχει και η δυνατότητα της εγκάρσιας μετατόπισης του κατά τη διάρκεια της κίνησης (vehicle wander) (σχ. 4.2). Για τη συστηματική παρακολούθηση των πειραμάτων η εγκατάσταση είναι εξοπλισμένη με πλήρες σύστημα αισθητήρων καταγραφής θερμοκρασίας, πιέσεων και παραμορφώσεων από την επιβολή κινουμένων φορτίων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εγκατάσταση είναι στεγασμένη αλλά δεν διαθέτει σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας και των λοιπών κλιματολογικών παραγόντων.



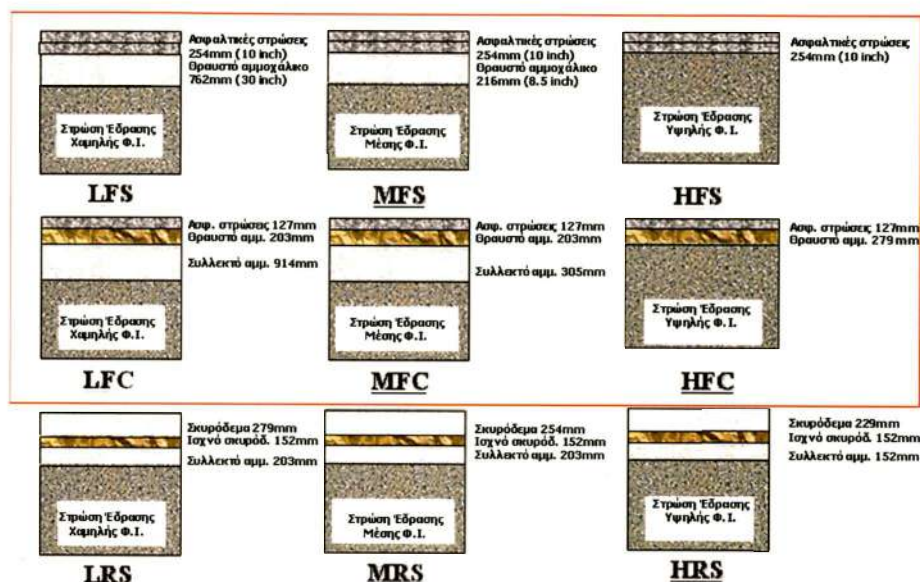
Σχήμα 4.2: Η εγκατάσταση NAPTF.

Αξιοποιώντας τις δυνατότητες της εγκατάστασης είναι εφικτή η ταυτόχρονη πραγματοποίηση δοκιμών σε διαφορετικές διατομές οδοστρωμάτων και με διαφορετικά φορτία. Η πρώτη πλήρης σειρά πειραμάτων υπό την επίδραση κυκλοφορίας πραγματοποιήθηκε με διακοπές στο διάστημα μεταξύ του Φεβρουαρίου 2000 και Σεπτεμβρίου του 2001. Στη συνέχεια και μέχρι σήμερα στην εγκατάσταση πραγματοποιούνται δοκιμές σε μικρότερη έκταση οι οποίες έχουν ως στόχο συμπληρωματικές μετρήσεις καθώς και τη διερεύνηση ειδικών θεμάτων απόκρισης ή συμπεριφοράς οδοστρωμάτων.

Αναλυτικά στοιχεία (κατασκευαστικά δεδομένα, δοκιμές, καταγραφές κλπ) που αφορούν τα πειράματα της πλήρους σειράς δοκιμών στην εγκατάσταση του NAPTF (Φεβ. 2000 – Σεπ. 2001) καθώς και τα συμπληρωματικά πειράματα που ακολούθησαν είναι διαθέσιμα δωρεάν από την FAA για χρήση σε ερευνητικές και εκπαιδευτικές δραστηριότητες.

4.2 Βασικά Στοιχεία Πειραμάτων

Η πλήρης σειρά πειραμάτων του NAPTF περιλάμβανε 3 τύπους οδοστρωμάτων αεροδρομίων οι οποίοι εδράζονται σε εδάφη που ανήκουν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες αντοχής, οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως χαμηλή, μεσαία και υψηλή. Από τις 9 συνολικά διατομές οι 3 αναφέρονται σε οδοστρώματα από σκυρόδεμα (δύσκαμπτα) ενώ οι 6 σε ασφαλτικά οδοστρώματα, ο οποίος και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του δείκτη ALI. Τα αναλυτικά στοιχεία των διατομών παρουσιάζονται στο σχήμα 4.3. Η κωδικοποίηση των διατομών γίνεται με 3 γράμματα: Το πρώτο αναφέρεται στη φέρουσα ικανότητα του εδάφους έδρασης και λαμβάνει τις τιμές L=χαμηλή (low), M=μέση (medium) και H=υψηλή (high) ενώ τα δύο επόμενα αναφέρονται στη δομή των κύριων στρώσεων του οδοστρώματος (FS= διατομή με 2 κύριες στρώσεις ασφαλομίγματος και υπόβαση από αμμοχάλικο, FC=διατομή με 1 κύρια στρώση ασφαλομίγματος και στρώση βάσης και υπόβασης από αμμοχάλικο, RS=διατομή με 1 κύρια στρώση από σκυρόδεμα, βάση από ισχνό σκυρόδεμα και υπόβαση από αμμοχάλικο).

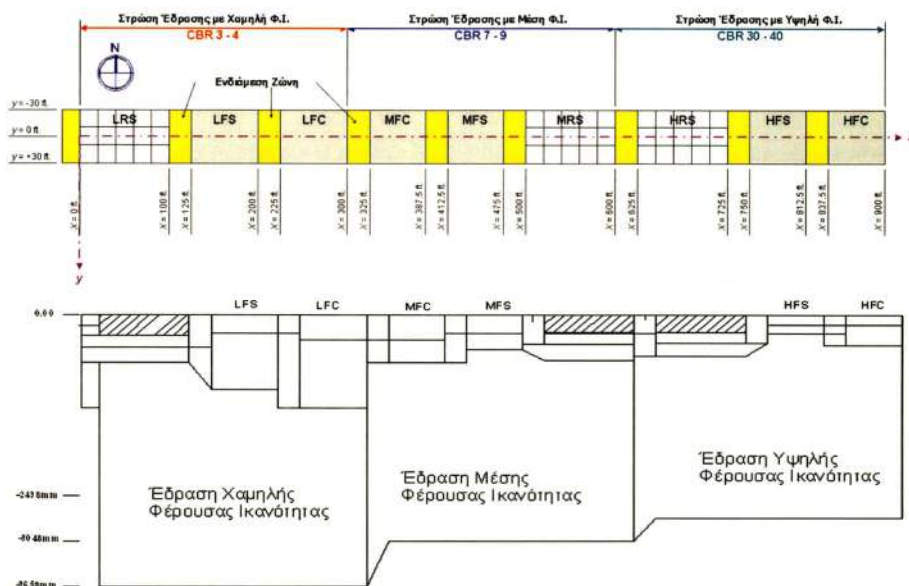


Σχήμα 4.3: Διατομές οδοστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα NAPTF.

Σημειώνεται ότι το πάχος του υλικού της εκάστοτε στρώσης έδρασης είναι μεταβαλλόμενο (2.4 – 2.9m) έτσι ώστε η επιφάνεια όλων των διατομών να ευρίσκεται στο ίδιο επίπεδο. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των στρώσεων έδρασης σύμφωνα με την FAA κατατάσσονται ως εξής:

- Υλικό SW-SM (ιλυώδες αμμοχάλικο καλής ποιότητας) για τη στρώση έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας με CBR σχεδιασμού 30-40% (κατηγορία A κατά ICAO)
- Υλικό CL-CH (άργилος μέτριας πλαστικότητας χωρίς οργανικές προσμίξεις / ιλυώδης άργιλος) για τη στρώση μέσης φέρουσας ικανότητας με CBR σχεδιασμού 7-9% (κατηγορία C-B κατά ICAO)
- Υλικό MH-CH (άμμος με λεπτόκοκκο υλικό, ιλύς ή άργιλοι υψηλής πλαστικότητας, χωρίς οργανικές προσμίξεις) για τη στρώση χαμηλής φέρουσας ικανότητας, με CBR σχεδιασμού 3-4% (κατηγορία D κατά ICAO). Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι στην πράξη η τιμή αυτή δεν επιτεύχθηκε, δεδομένου ότι αποδείχτηκε εξαιρετικά δύσκολο να κατασκευαστεί σωστά στρώση με τόσο χαμηλή φέρουσα ικανότητα. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα των επιτόπου δοκιμών (διαθέσιμα από την FAA) και οι σχετικές έρευνες στην πράξη το CBR της στρώσης χαμηλής φέρουσας κυμάνθηκε από 4-6% [57] η οποία την κατατάσσει στην κατηγορία C κατά ICAO.

Η διάταξη των διατομών του NAPTF παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4. Οι διατομές δεν φορτίστηκαν αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής τους (Απρίλιος 1999), αλλά ακολούθησε ένα διάστημα 10 μηνών στο οποίο πραγματοποιήθηκαν κυρίως έλεγχοι και μη καταστρεπτικές επιτόπου δοκιμές για τα υλικά, οι οποίες συνεχίστηκαν και κατά τη διάρκεια της φόρτισης των οδοστρωμάτων. Τα σχετικά στοιχεία των καταγραφών και δοκιμών όπως και τα αναλυτικά κατασκευαστικά στοιχεία των οδοστρωμάτων είναι διαθέσιμα από την FAA.

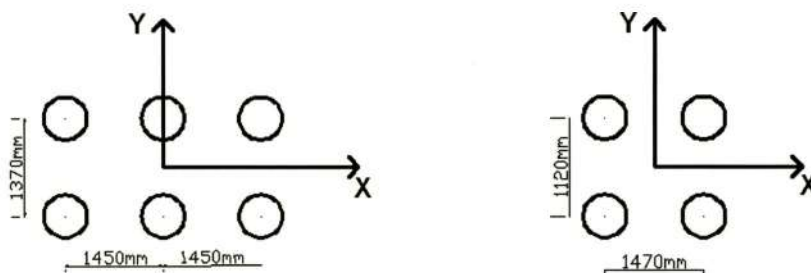


Σχήμα 4.4: Διάταξη διατομών οδοστρωμάτων στο πλήρες πείραμα.

Η φόρτιση από κυκλοφορία στις πειραματικές διατομές του NAPTF ξεκίνησε το Φεβρουάριο του 2000. Στη βόρεια τροχιά χρησιμοποιήθηκε φορείο διπλού τροχού με τριπλό άξονα (dual tridem) 6 τροχών, αντίστοιχο των φορείων της σειράς B777 ενώ στη νότια τροχιά χρησιμοποιήθηκε φορείο διπλού τροχού με διπλό άξονα (dual tandem) 4 τροχών, αντίστοιχο των φορείων της σειράς B747. Τα στοιχεία των διατάξεων τροχών που χρησιμοποιήθηκαν στην πρώτη σειρά των πειραμάτων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.5 και στον πίνακα 4.1, στην πρώτη στήλη του οποίο φαίνεται ο κωδικός που αποδόθηκε για κάθε φορτίο. Στην περαιτέρω διαδικασία επαλήθευσης του ALI χρησιμοποιήθηκαν τα φορτία DT1, DT2 και TR1.

Κωδικός	Διάταξη	Ακτίνα επιφάνειας επαφής (mm)	Πίεση (MPa)
DT1	Διπλός τροχός με διπλό άξονα	221	1.30
DT2	Διπλός τροχός με διπλό άξονα	233	1.30
DT3	Διπλός τροχός με διπλό άξονα	245	1.30
TR1	Διπλός τροχός με τριπλό άξονα	221	1.30
TR2	Διπλός τροχός με τριπλό άξονα	233	1.30
TR3	Διπλός τροχός με τριπλό άξονα	245	1.30

Πίνακας 4.1: Στοιχεία διατάξεων φόρτισης στα φορεία φόρτισης του NAPTF.



Σχήμα 4.5: Διατάξεις τροχών στα φορεία φόρτισης του NAPTF (τροχιά κίνησης στον άξονα X).

Από τις πρώτες διελεύσεις των φορτίων παρατηρήθηκαν έντονες ρηγματώσεις στα τμήματα με δύσκαμπτο οδόστρωμα. Η κυκλοφορία διακόπηκε για ελέγχους των οδοστρωμάτων και άρχισε ξανά στις αρχές Μαρτίου (2000) μόνο στα τμήματα με δύσκαμπτο οδόστρωμα και στα ασφαλικά οδοστρώματα με στρώση έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας έως τις αρχές Απριλίου του 2000 οπότε και διακόπηκε λόγω της πλήρους αστοχίας των δυσκάμπτων οδοστρωμάτων. Κατά συνέπεια από τις αρχές Απριλίου η κυκλοφοριακή φόρτιση περιορίστηκε στα τμήματα LFS, LFC, MFC και MFS μέχρι το Νοέμβριο του 2000 οπότε και διακόπηκε λόγω της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας η οποία θεωρήθηκε ότι επιδρά αρνητικά στην αξιοπιστία των δοκιμών ασφαλικών οδοστρωμάτων. Οι δοκιμές στα υπόψη τμήματα ξεκίνησαν ξανά το Μάιο του 2001 και συνεχίστηκαν μέχρι το Σεπτέμβριο της ίδιας χρονιάς οπότε και διακόπηκε οριστικά και ξεκίνησε η κατασκευή των διατομών για συμπληρωματικά πειράματα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες και στοιχεία από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα ασφαλικά οδοστρώματα κατά το διάστημα του Φεβρουαρίου – Ιουνίου 2000.

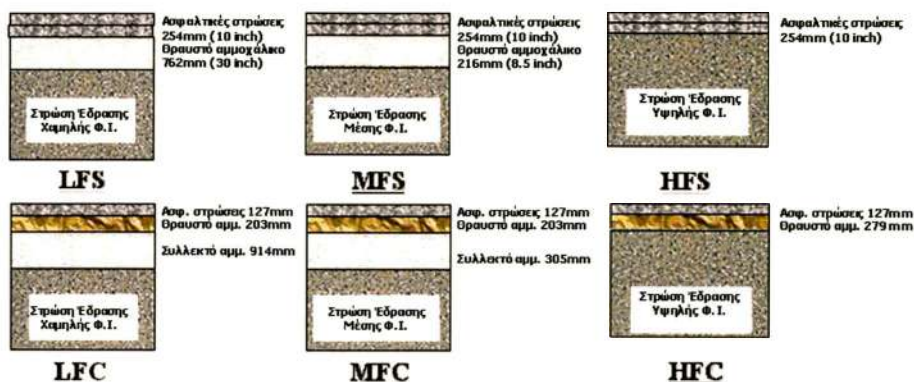
4.3 Δεδομένα και Διαδικασία Ανάλυσης Πειραμάτων

Οι διατομές της πρώτης σειράς των πειραμάτων στην εγκατάσταση NAPTF των οποίων τα στοιχεία και οι καταγραφές των επιτόπου μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διερεύνηση ήταν οι LFS, LFC, MFC και MFS. Οι διατομές ασφαλικών οδοστρωμάτων σε στρώση έδρασης με υψηλή αντοχή (HFS) λόγω του περιορισμένου χρονικού διαστήματος των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν δεν ήταν δυνατό να αναλυθούν συγκριτικά και στον ίδιο βαθμό με τις υπόλοιπες, οπότε και χρησιμοποιήθηκαν επικουρικά και προς επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις αναλύσεις των διατομών που προαναφέρθηκαν.

Τα στοιχεία των πειραμάτων αναλύθηκαν με στόχο να γίνει έλεγχος καταλληλότητας του δείκτη ALI για την εκτίμηση και κατάταξη της σχετικής επίδρασης ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα. Ειδικότερα, με βάση τα δεδομένα του πειράματος και τα στοιχεία των επιτόπου καταγραφών και μετρήσεων διερευνήθηκε εάν ο δείκτης ALI μπορεί να εκτιμήσει επαρκώς την επίδραση του πραγματικού φορτίου στο οδόστρωμα και να την κατατάξει ανάλογα. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται με τη σύγκριση της επίδρασης του πραγματικού φορτίου και της αντίστοιχης εκτίμησης του δείκτη ALI.

Σε επόμενο στάδιο για την επιβεβαίωση και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, διερευνήθηκε και η συμφωνία των υπολογισμών από τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν με τα αντίστοιχα μεγέθη των κρίσιμων εντατικών ή παραμορφωσιακών μεγεθών τα οποία καταγράφηκαν σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Για την υλοποίηση των απαραίτητων αναλύσεων και τον προσδιορισμό της απόκρισης των οδοστρωμάτων του πειράματος, έγινε προσομοίωση των διατομών του σχήματος 4.5 με χρήση τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων. Τα πάχη των στρώσεων ελήφθησαν όπως αναφέρονται στο σχήμα 4.5 ενώ κάτω από τη στρώση έδρασης όλων των διατομών θεωρήθηκε ότι υπάρχει δύσκαμπτο υπόστρωμα απείρου πάχους με μέτρο ελαστικότητας 7000 MPa και λόγο Poisson 0.50. Η θεώρηση αυτή είναι σύμφωνη με τα κατασκευαστικά δεδομένα της εγκατάστασης ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και σε σχετικές ερευνητικές εργασίες που έχουν δημοσιευτεί διεθνώς [58], [59].



Σχήμα 4.5: Διατομές οδοστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις διερευνήσεις.

Για το καθορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών των επιμέρους στρώσεων οι απαραίτητες παράμετροι (μέτρα ελαστικότητας) προέκυψαν από αναλύσεις δεδομένων των επιτόπου μη καταστρεπτικών δοκιμών στα υπόψη οδοστρώματα, σε συνδυασμό με αντίστοιχα δεδομένα και δοκιμές που έλαβαν χώρα κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή τους. Υπενθυμίζεται ότι στις διατομές του NAPTF σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιούνταν συστηματικές δοκιμές με Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους Βαρέως Τύπου (HWD) το οποίο δίδει τη δυνατότητα προσδιορισμού των παραμέτρων συμπεριφοράς των στρώσεων και του οδοστρώματος σε συνθήκες όμοιες με αυτές της φόρτισης. Αξιοποιώντας αυτή τη δυνατότητα πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε πέντε διαφορετικές περιόδους (Φεβρουάριος, Μάρτιος, Απρίλιος, Μάιος και Ιούνιος 2000) έτσι ώστε να διερευνηθεί έμμεσα η ενδεχόμενη επίδραση της θερμοκρασίας.

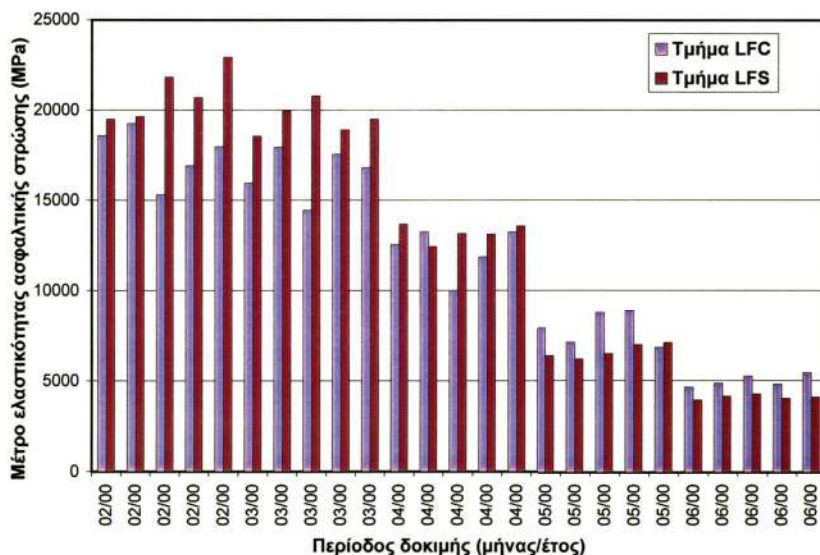
Για τον προσδιορισμό των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων μέσω της ανάλυσης μετρήσεων της συσκευής χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού με τη βοήθεια του ειδικού λογισμικού BACKFAA [60]. Το λογισμικό αυτό έχει δημιουργηθεί και εξελίσσεται από την FAA για την επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων με Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους σε οδοστρώματα αεροδρομίων. Παράλληλα με το BACKFAA και για τον έλεγχο των σχετικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν σε μικρή κλίμακα αναλύσεις και με το λογισμικό MODCOMP 5 [61].

4.4 Ανάστροφος Υπολογισμός– Εκτίμηση Μηχανικών Χαρακτηριστικών Υλικών

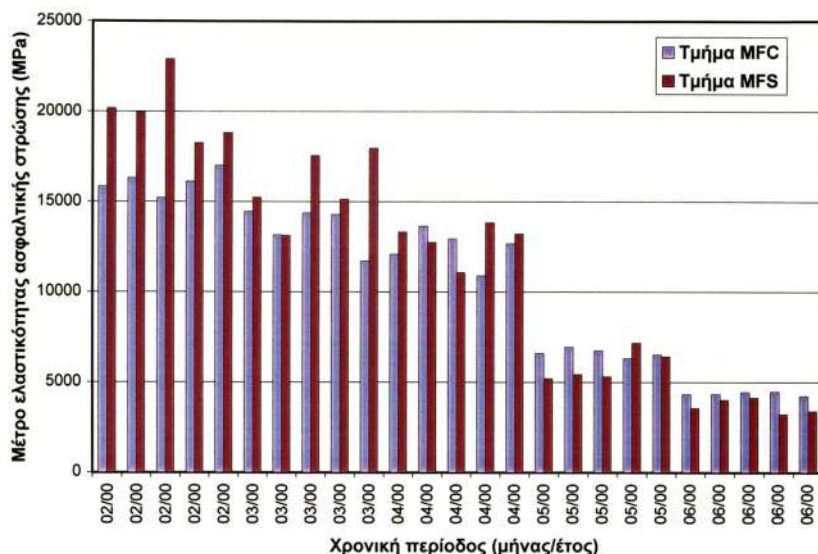
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και ανά τακτά χρονικά διαστήματα πραγματοποιούνταν δοκιμές ελαστικών υποχωρήσεων στα οδοστρώματα με χρήση Παραμορφωσίμετρου Πίπτο-

ντος Βάρους. Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων για τμήματα LFS και LFC όπως προέκυψε από τη διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού των σχετικών μετρήσεων, ενώ στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η αντίστοιχη μεταβολή για τα τμήματα MFS1 και MFC1. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των υπολογισμών περιλαμβάνονται σε πίνακες του παραρτήματος 3.

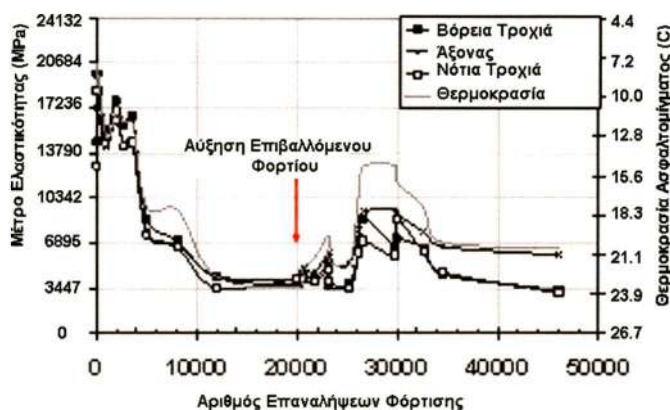
Όπως ήταν αναμενόμενο και παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι διατομές MFS και LFS κατά την «ψυχρή» περίοδο (Φεβρουάριος) παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων σε σχέση με τις MFC και LFC. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει κατά τη θερμή περίοδο (Μάιος – Ιούνιος). Σημειώνεται ότι οι τιμές των μέτρων δυσκαμψίας που έχουν υπολογιστεί στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης έχουν συγκριθεί και συμφωνούν με αντίστοιχα αποτελέσματα από άλλες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για το ίδιο πείραμα όπως για παράδειγμα από τους Gopalakrishnan και Thompson [58], ενδεικτικά αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.8. Αντιστοιχίζοντας τις επαναλήψεις φόρτισης στις χρονικές περιόδους (μήνες) που πραγματοποιήθηκαν από το διάγραμμα προκύπτουν διαστήματα τιμών για το μέτρο ελαστικότητας ανά χρονική περίοδο. Στον πίνακα 4.2 οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκαν για τους περαιτέρω υπολογισμούς εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών.



Σχήμα 4.6: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας των ασφαλικών στρώσεων στα τμήματα LFS και LFC.



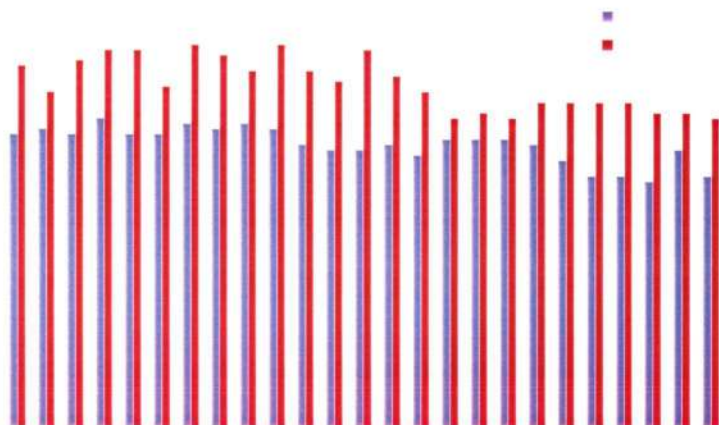
Σχήμα 4.7: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων στα τμήματα MFS1 και MFC1.



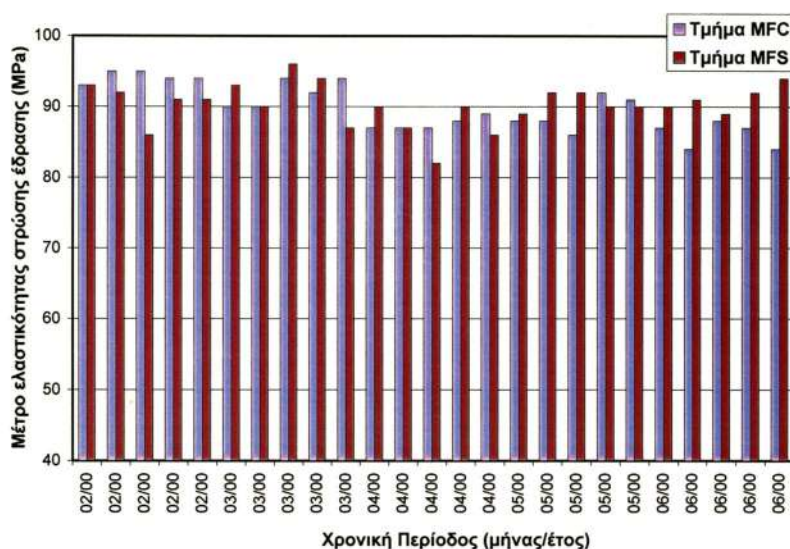
Σχήμα 4.8: Διακύμανση μέτρου ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης στο τμήμα LFS [58].

Χρονική Περίοδος (μήνας)	Διακύμανση μέτρου ελαστικότητας (MPa)	
	Gopalakrishnan και Thompson [58]	Ανάστροφος Υπολογισμός
02-03/2000	16000-20500	18551 – 22943
04/2000	10500 -16000	12425 – 13568
05/2000	6500 -10500	6186 – 7091
06/2000	3500 -6500	3948 - 4268

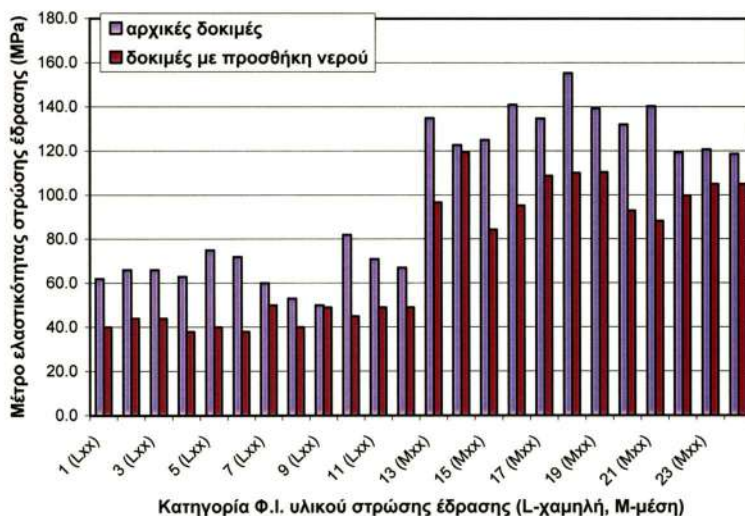
Πίνακας 4.2: Σύγκριση μέτρου ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης στο τμήμα LFS.



επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή (σχήμα 4.11). Ο υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας στο σχήμα 4.11 έγινε μέσω της εμπειρικής σχέσης $E=10 \cdot \text{CBR}$, η ισχύς της οποίας έχει ελεγχθεί στα υπόψη πειράματα από τους McQueen et. al. [59].



Σχήμα 4.10: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης στα τμήματα MFS και MFC.



Σχήμα 4.11: Αποτελέσματα εκτίμησης μέτρου ελαστικότητας με βάση δοκιμές CBR που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής των στρώσεων έδρασης.

Κατ' αναλογία με τις ασφαλικές στρώσεις και σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού που πραγματοποιήθηκε έχουν ελεγχθεί και συμφωνούν με τα αντίστοιχα από άλλες έρευνες για τα ίδια πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί διεθνώς όπως για παράδειγμα από τους Gopalakrishnan και Thompson [58] και τους McQueen et. al. [59]. Ενδεικτικά σχετικά αποτελέσματα περιλαμβάνονται στον πίνακα 4.3.

Τμήμα	Εύρος Διακύμανσης Μέσου Μέτρου Ελαστικότητας Στρώσης Έδρασης (MPa) από McQueen et. al. [59]			Ανάστροφος Υπολογισμός (Μέση τιμή και εύρος διακύμανσης αποτελεσμάτων)
	Μετά την Κατασκευή	Πριν τις Δοκιμές	Κατά τη Διάρκεια	
LFC	49-51	-	-	54 (47-59)
LFS	46-48	69-72	74-78	66 (59-73)
MFC	89	-	-	90 (84-94)
MFS	101-102	100-104	97-103	90 (82-96)

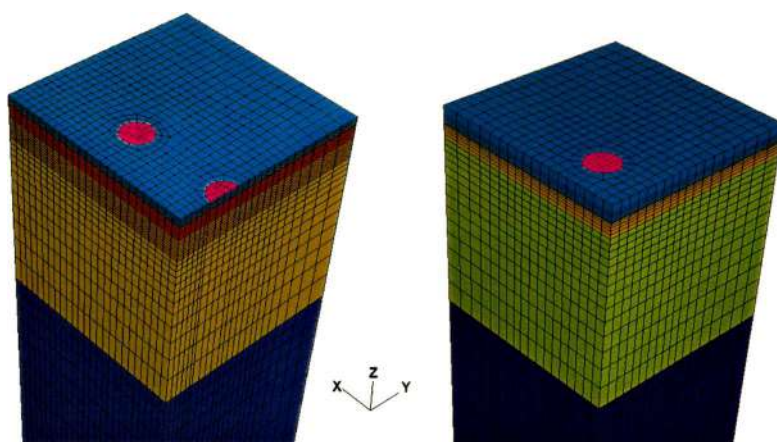
Πίνακας 4.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάστροφου υπολογισμού μέτρων ελαστικότητας για τη στρώση έδρασης με αποτελέσματα των McQueen et. al. [59].

4.5 Προσομοίωση Διατομών Πειράματος NARTF με Τρισδιάστατα

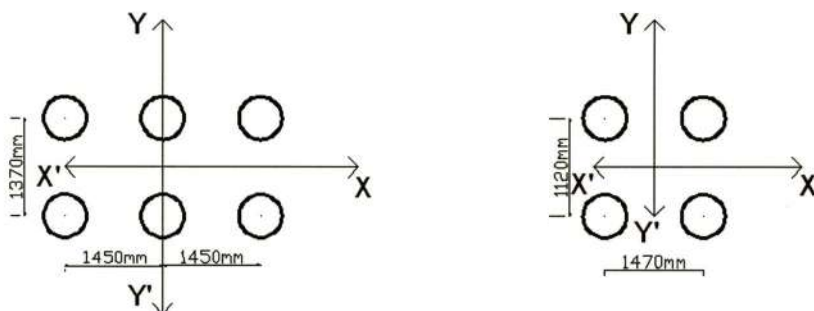
Πεπερασμένα Στοιχεία

Έχοντας εκτιμήσει τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των στρώσεων των διατομών του NARTF, και σε συνδυασμό με τα πάχη των στρώσεων και τα δεδομένα των συστημάτων φόρτισης τα οποία είναι διαθέσιμα στη βάση δεδομένων του NARTF, είναι εφικτό να προσομοιωθεί το σύστημα οδοστρώματος – φόρτισης με τη βοήθεια των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων. Τα σχετικά πλέγματα για τη βόρεια τροχιά όπου το φορτίο επιβάλλεται μέσω διπλών τροχών σε τριπλό άξονα όπως και για τη νότια τροχιά (διπλός τροχός και διπλός άξονας) παρουσιάζονται στο σχήμα 4.11.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα σχήματα σε όλες τις περιπτώσεις αξιοποιήθηκε η συμμετρία του φορέα και της φόρτισης έτσι ώστε να μειωθεί ο όγκος των υπολογισμών. Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζονται σε κάτοψη οι άξονες συμμετρίας των δύο φορέων. Στο τρισδιάστατο προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς οι άξονες αυτοί σε συνδυασμό με τον κάθετο στο επίπεδο άξονα δημιουργούν τα επίπεδα συμμετρίας του φορέα. Όπως είναι γνωστό, στα σημεία των επιπέδων συμμετρίας μηδενίζεται οριζόντια επιτόπιση και συνεπώς ο αντίστοιχος βαθμός ελευθερίας των κόμβων του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων είναι ίσος με μηδέν.



Σχήμα 4.11: Πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων στη βόρεια τροχιά του τμήματος LFS (διπλός τροχός, τριπλός άξονας) και στη νότια τροχιά του τμήματος MFS (διπλός τροχός, διπλός άξονας).



Σχήμα 4.12: Συμμετρία των φορείων της εγκατάστασης NAPTF ως προς τους άξονες X και Y.

Όσον αφορά τις λοιπές συνοριακές συνθήκες του πεπερασμένου πλέγματος, έγινε δέσμευση των κάθετων μετατοπίσεων σε επίπεδα παράλληλα των XZ και YZ σε απόσταση τουλάχιστον 3m από την περιοχή της φόρτισης, η οποία υπερβαίνει το δεκαπλάσιο της ακτίνας φόρτισης που προτείνεται με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και πρακτική. Τέλος, όσον αφορά τη βάση του φορέα, έγινε πλήρης πάκτωση των κόμβων ενός επιπέδου παράλληλο προς το XY σε κατάλληλο βάθος, έτσι ώστε το πάχος της «άκαμπτης» στρώσης κάτω από την έδραση (rigid bottom) να είναι της τάξεως των 7m. Είναι προφανές, και επιβεβαιώνεται και από τους σχετικούς υπολογισμούς ότι σε κάθε περίπτωση οι τάσεις λόγω του φορτίου πρακτικά μηδενίζονται σε πολύ μικρές αποστάσεις σε σχέση με άκρα του προσομοιώματος.

Με ακριβώς αντίστοιχες παραδοχές αναπτύχθηκαν και τα προσομοιώματα με φόρτιση των διατομών του NAPTF από το δείκτη ALI τα οποία πρακτικά δε διαφέρουν από τα συνήθη που χρησιμοποιούνται διεθνώς για φόρτιση οδοστρώματος από απλό τροχό (ανάλογα των οποίων έχουν χρησιμοποιηθεί στα κεφάλαια 2 και 3). Οι τιμές του δείκτη ALI για τα φορτία των πειραμάτων υπολογίστηκαν ακολουθώντας τη διαδικασία της ενότητας 3.2.1 με χρήση του λογισμικού ABAQUS και παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

Κωδικός	Στοιχεία Φορτίου	Κατηγορία Οδοστρώματος	
		FA	FB
DT1	Βόρεια τροχιά (Διπλός τροχός με διπλό άξονα, ακτίνα 221mm, πίεση 1.30MPa)	1.27	1.16
DT2	Βόρεια τροχιά (Διπλός τροχός με διπλό άξονα, ακτίνα 233mm, πίεση 1.30MPa)	1.31	1.23
TR1	Νότια τροχιά (Διπλός τροχός με τριπλό άξονα, ακτίνα 221mm, πίεση 1.30MPa)	1.26	1.15

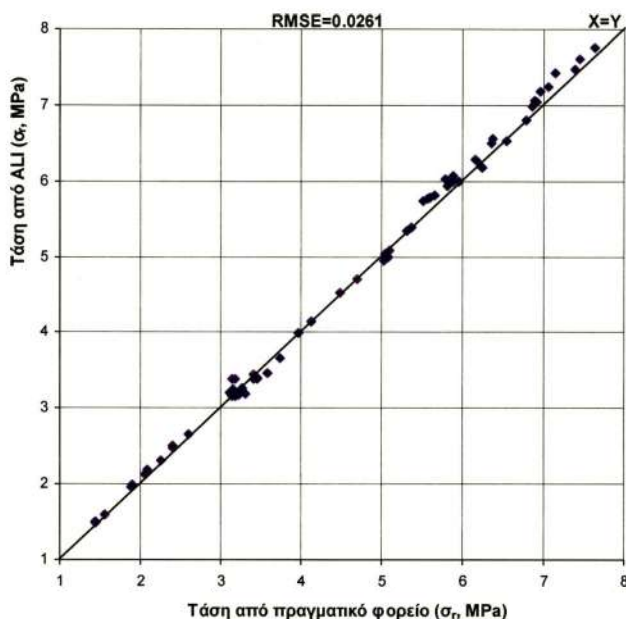
Πίνακας 4.3: Τιμές δείκτη ALI για φορτία που χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα της εγκατάστασης NAPTF και στην παρούσα εργασία.

4.6 Υπολογισμοί και Συγκριτικά Αποτελέσματα Μεταξύ Πραγματικής Φόρτισης και ALI.

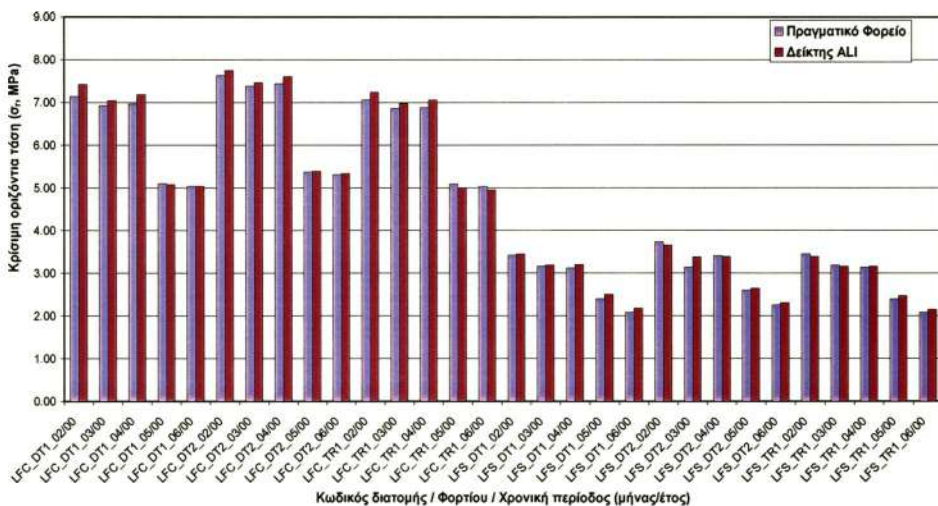
Με βάση τα παραπάνω προσομοιώματα και στο πλαίσιο της διερεύνησης του δείκτη ALI στα οδοστρώματα του NAPTF, υπολογίστηκαν και συγκρίθηκαν τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από τα πραγματικά συστήματα φόρτισης και τα ισοδύναμα του δείκτη ALI. Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζονται συγκριτικά οι κρίσιμες οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα της ενοποιημένης ασφαλικής στρώσης των διατομών που εξετάστηκαν. Όπως φαίνεται από το σχήμα, τα αποτελέσματα είναι πάρα πολύ ενθαρρυντικά και υποδηλώνουν ότι το προσομοίωμα που βασίζεται στο δείκτη ALI προσεγγίζει αξιόπιστα τις κρίσιμες τάσεις στην ασφαλική στρώση. Τούτο επιβεβαιώνεται τόσο από την τιμή του δείκτη RMSE [47] όσο και από την αναλυτική σύγκριση ανά διατομή η οποία φαίνεται στα σχήματα 4.14 και 4.15, ενώ τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα περιλαμβάνονται στο παράρτημα 4.

Αναλυτικότερα, η μέση τιμή του σφάλματος υπολογισμού των οριζόντιων τάσεων στις διατομές του σχήματος 4.13 είναι 2.1% και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση 1.5% το οποίο υποδηλώνει τη μεγάλη ακρίβεια της προσέγγισης, αλλά και την υψηλή αξιοπιστία του δείκτη ALI ως κριτήριο αξιολόγησης της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών στα οδοστρώματα. Με αμιγώς πρακτικά κριτήρια, η αξιοπιστία του δείκτη ALI φαίνεται από το ότι σε καμία από τις

περιπτώσεις που εξετάστηκαν το σφάλμα της εκτίμησης του δεν ήταν μεγαλύτερο από 8% (σχήμα 4.16).

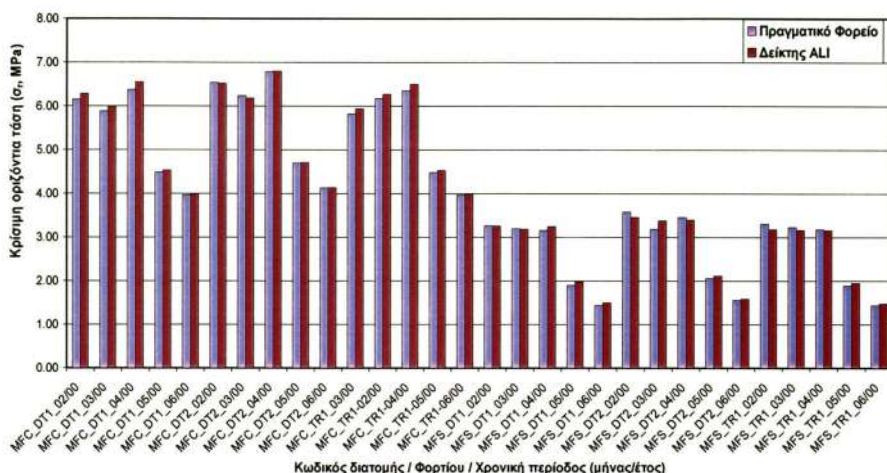


Σχήμα 4.13: Συγκεντρωτική σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα (κάτω ίνα) των ασφαλτικών στρώσεων.

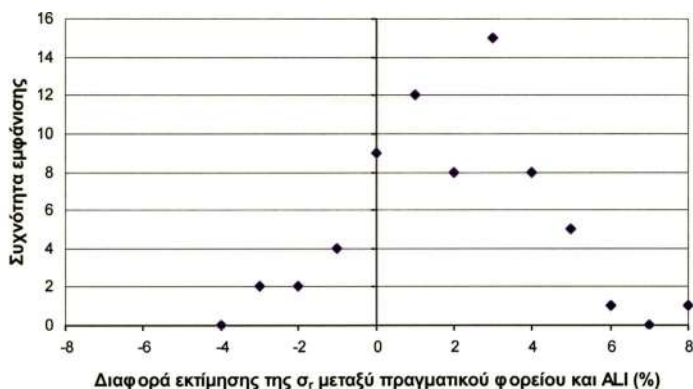


Σχήμα 4.14: Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα (κάτω ίνα) των ασφαλτικών

στρώσεων ανά δοκιμή (διατομή, φορτίο, χρονική περίοδος) για διατομές με στρώση έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας.



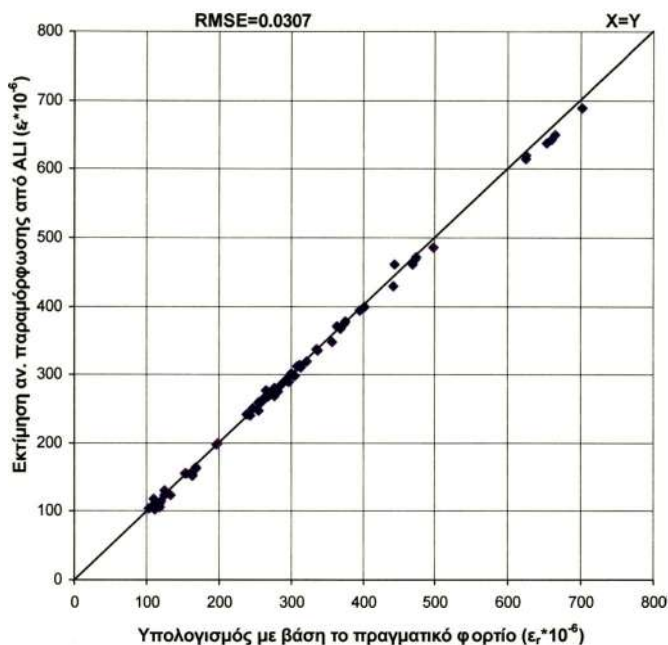
Σχήμα 4.15: Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα (κάτω ίνα) των ασφαλτικών στρώσεων ανά δοκιμή (διατομή, φορτίο, χρονική περίοδος) για διατομές με στρώση έδρασης μέσης φέρουσας ικανότητας.



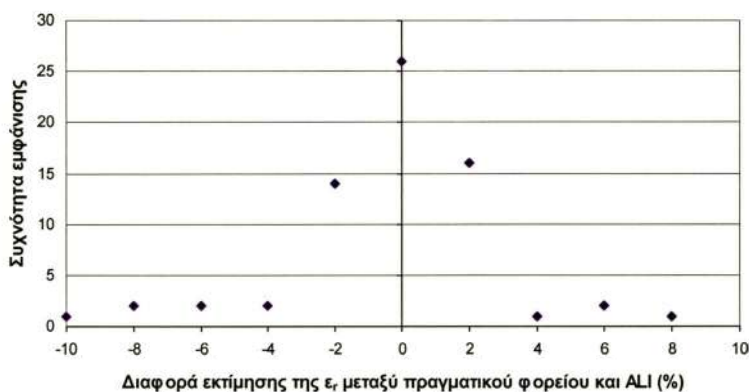
Σχήμα 4.16: Διαφορά (σφάλμα εκτίμησης) μεταξύ πραγματικού φορτίου και δείκτη ALI για την κρίσιμη οριζόντια τάση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης.

Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν και για τις οριζόντιες ανηγμένες παραμορφώσεις (σχήματα 4.17 και 4.18) στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης των διατομών που εξετάστηκαν όπου η μέση τιμή του σφάλματος της εκτίμησης του ALI είναι 2.1% και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση 2.3%. Και σε αυτή την περίπτωση από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων

επιβεβαιώνεται η καταλληλότητα του δείκτη ALI για την εκτίμηση της σχετικής επίδρασης ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα.

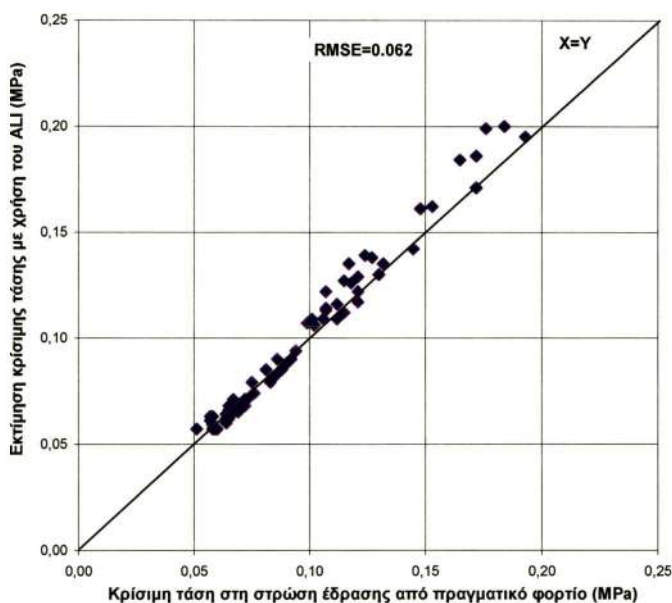


Σχήμα 4.17: Συγκεντρωτική σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων

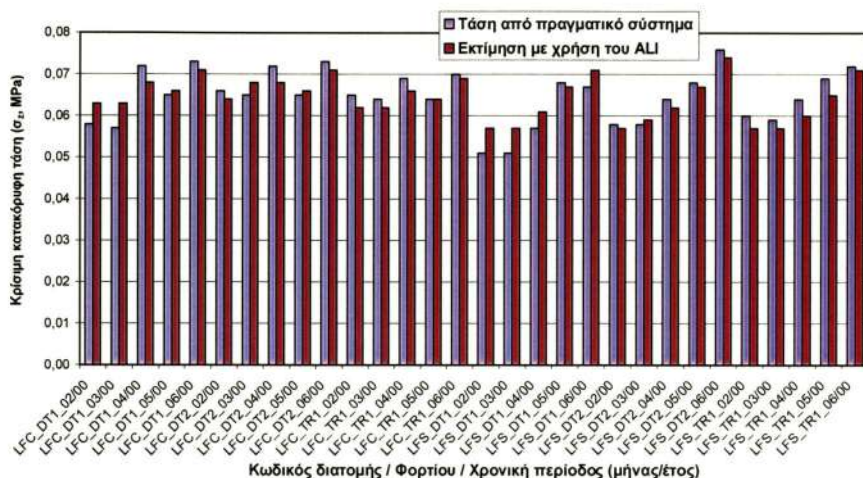


Σχήμα 4.18: Διαφορά (σφάλμα εκτίμησης) μεταξύ πραγματικού φορτίου και δείκτη ALI για την κρίσιμη οριζόντια τάση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης.

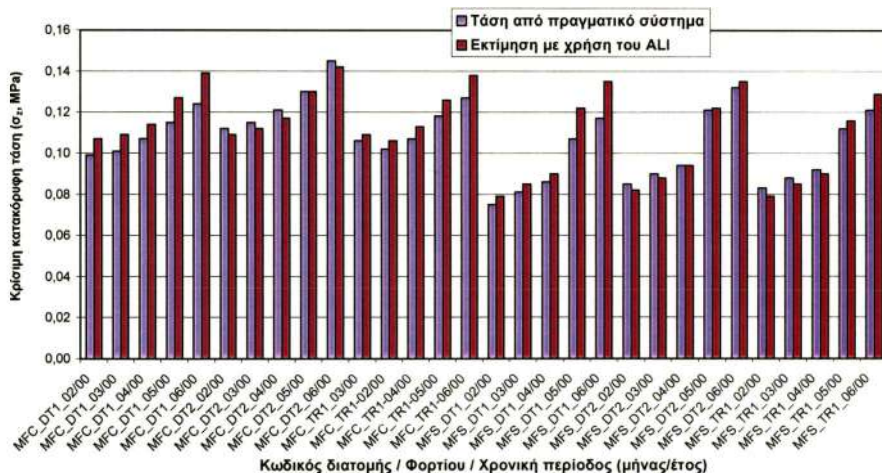
Πέραν της κρίσιμης οριζόντιας τάσης / ανηγμένης παραμόρφωσης για τις ασφαλικές στρώσεις, έγινε και έλεγχος των εκτιμήσεων του ALI σε σχέση με το πραγματικό σύστημα φόρτισης για τις κατακόρυφες τάσεις και παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης των διατομών που εξετάστηκαν. Στα σχήματα 4.19, 4.20 και 4.21 παρουσιάζονται συγκριτικά οι κατακόρυφες τάσεις που αναπτύσσονται από πραγματικό σύστημα τροχών και οι αντίστοιχες εκτιμήσεις μέσω του δείκτη ALI στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης των διατομών του NAPTf. Όπως φαίνεται η εκτίμηση του δείκτη ALI για τις υπόψη κρίσιμες τάσεις είναι αρκετά ικανοποιητική και κρίνεται αποδεκτή για αξιολόγηση / κατάταξη οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Σ' αυτό συμβάλλει και το ότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι αποκλίσεις ευρίσκονται πάνω από την ευθεία ισότητας (σχήμα 4.19) που σημαίνει ότι η εκτίμηση του ALI είναι ελαφρά δυσμενέστερη της επίδρασης του πραγματικού φορτίου και συνεπώς υπέρ της ασφαλείας κατά τη διαδικασία ελέγχου επάρκειας του οδοστρώματος. Οι διαφορές των αποκλίσεων μεταξύ των υπολογισμένων τιμών του πραγματικού φορέου και του δείκτη ALI παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο σχήμα 4.22.



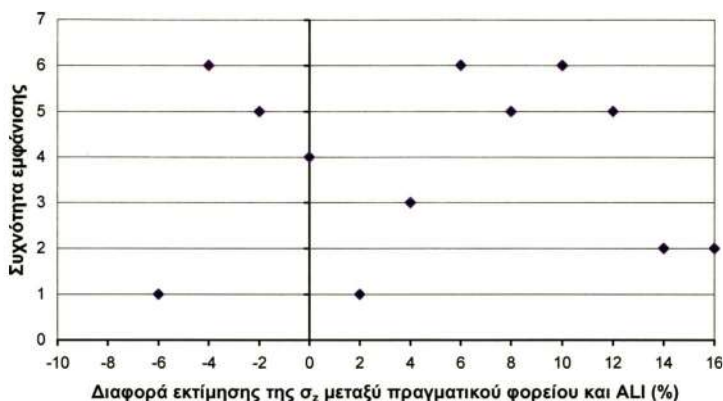
Σχήμα 4.19: Συγκεντρωτική σύγκριση κατακόρυφων τάσεων στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης



Σχήμα 4.20: Σύγκριση κατακόρυφων τάσεων στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης ανά δοκιμή (διατομή, φορτίο, χρονική περίοδος) για διατομές σε έδαφος χαμηλής φέρουσας ικανότητας.



Σχήμα 4.21: Σύγκριση κατακόρυφων τάσεων στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης ανά δοκιμή (διατομή, φορτίο, χρονική περίοδος) για διατομές σε έδαφος μέσης φέρουσας ικανότητα.



Σχήμα 4.22: Διαφορά (σφάλμα εκτίμησης) μεταξύ πραγματικού φορτίου και δείκτη ALI για την κρίσιμη οριζόντια τάση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης.

Συνολικά, από όλα τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι ο δείκτης ALI αποτελεί μία αξιόπιστη βάση συγκριτικής αξιολόγησης και κατάταξης τους της σχετικής επίδρασης του αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα και μπορεί να αξιοποιηθεί με ασφάλεια για τον έλεγχο της δομικής επάρκειας των ασφαλτικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΑΠΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ

5.1 Εισαγωγή

Η καταγραφή εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών των οδοστρωμάτων σε πραγματικό χρόνο αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα των πειραματικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας δεδομένου ότι μπορούν να προσφέρουν χρήσιμα δεδομένα για τον έλεγχο προσομοιωμάτων και αναλύσεων. Οι καταγραφές αυτές πραγματοποιούνται με ειδικά μηχανισιόμετρα, και διάφορους αισθητήρες καταγραφής μετατοπίσεων, πίεσης κλπ οι οποίοι τοποθετούνται κατά τη διάρκεια της κατασκευής της υπό έλεγχο διατομής οδοστρώματος. Εναλλακτικά η τοποθέτηση μπορεί να γίνει και σε μεταγενέστερη περίοδο με την πραγματοποίηση κατάλληλων τομών (πυρήνων) στο οδόστρωμα.

Διεθνώς, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες σε ασφαλικά οδοστρώματα οι οποίες αξιοποιούν στοιχεία από καταγραφές τάσεων ή/και παραμορφώσεων σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, όπως αναφέρει ο Groenendijk, J. [62], μελέτες στην εγκατάσταση LINTRACK (Ολλανδία) έδειξαν ότι η κρίσιμη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση, τόσο η ελαστική όσο και η παραμένουσα, παρουσιάζει υψηλότερα μέγιστα στην εγκάρσια διεύθυνση της κίνησης του φορτίου. Στην ίδια ανακοίνωση αναφέρεται επίσης ότι οι παράγοντες που επηρέασαν τις παραμένουσες παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τα μηχανισιόμετρα ήταν η προηγούμενη φόρτιση, η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση, η θερμοκρασία και η τοποθέτηση και διεύθυνση των αισθητήρων. Όσον αφορά τη διεύθυνση κατά μήκος του φορτίου, παρατηρήθηκε μειωμένη παραμένουσα παραμόρφωση, αποτέλεσμα της εναλλαγής εφελκυσμού-θλίψης που λαμβάνει χώρα σε αυτή τη διεύθυνση όπως επιβεβαιώνεται από τους Bhattacharjee et. al. [63].

Ανάλογες καταγραφές εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών σε πραγματικό χρόνο έχουν γίνει και σε πειράματα και δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην εγκατάσταση του NARTF. Οι Garg και Hayhoe [64] μελέτησαν την επίδραση της χαμηλής ταχύτητας βαρέων αεροσκαφών στις κρίσιμες παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τους αισθητήρες της εγκατάστασης. Όπως έδειξε η σχετική διερεύνηση, η αύξηση της ταχύτητας του φορείου από 0.08 m/sec σε 2.2 m/sec επιφέρει μείωση της τάξεως του 45-55% στην κρίσιμη ανηγμένη παραμόρφωση των ασφαλικών στρώσεων, ενώ επισημάνθηκε ότι ο ρυθμός μεταβολής της

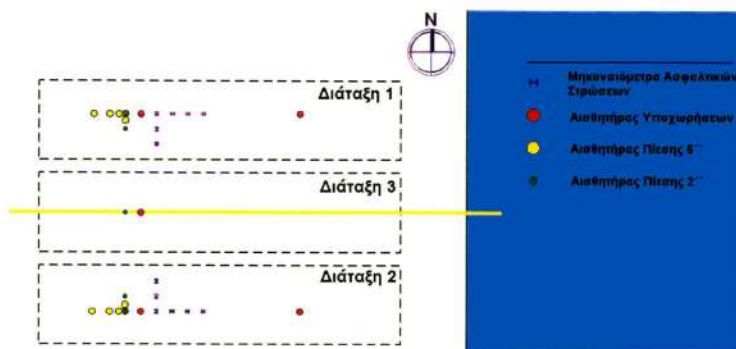
παραμόρφωσης σε σχέση με την ταχύτητα είναι μεγαλύτερος στις χαμηλές ταχύτητες (μικρότερες των 0.61m/s). Χρησιμοποιώντας τα ίδια στοιχεία, οι Gomez-Ramirez και Thompson [65] προχώρησαν στη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των τροχών των βαρέων αεροσκαφών ως προς την κρίσιμη ανηγμένη παραμόρφωση των ασφαλικών στρώσεων που αναπτύσσεται κατά τη φόρτιση των οδοστρωμάτων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία από τις καταγραφές των αισθητήρων για τα οδοστρώματα του NAPTf με στόχο να ελεγχθεί περαιτέρω η επάρκεια και η καταλληλότητα του δείκτη ALI για την εκτίμηση των κρίσιμων εντατικών / παραμορφωσιακών μεγεθών.

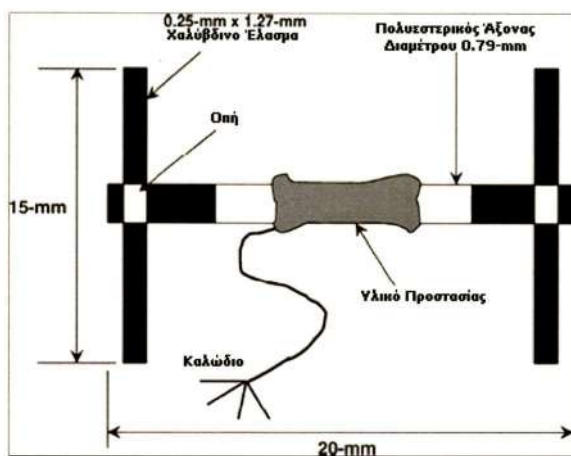
5.2 Συνοπτικές Πληροφορίες για το Σύστημα Καταγραφής του NAPTf

Για την καταγραφή των δεδομένων συμπεριφοράς και απόκρισης των οδοστρωμάτων του NAPTf εγκαταστάθηκε σύστημα «στατικών» και «δυναμικών» αισθητήρων. Οι στατικοί αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν για τη συνεχή καταγραφή στοιχείων ανά τακτά χρονικά διαστήματα και αφορούν κυρίως τις μεταβολές των κλιματολογικών παραμέτρων, ενώ οι δυναμικοί ενεργοποιούνται από τη φόρτιση των οδοστρωμάτων και καταγράφουν στοιχεία της απόκρισης και συμπεριφοράς τους (τάσεις, παραμορφώσεις, υποχωρήσεις).

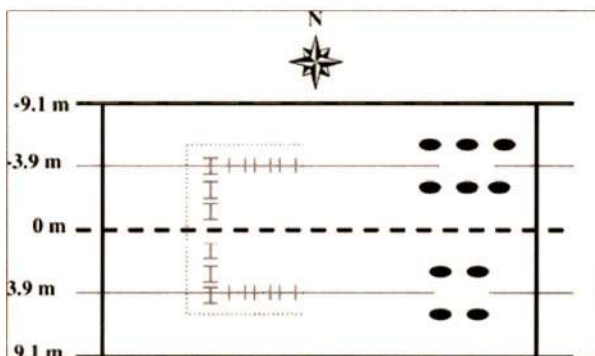
Ειδικότερα, για τις διατομές ασφαλικών οδοστρωμάτων που δοκιμάστηκαν χρησιμοποιήθηκε η τυπική διάταξη του σχήματος 5.1 η οποία αποτελείται από αισθητήρες καταγραφής υποχωρήσεων (Multi-Depth Deflectometers), αισθητήρες κατακόρυφης πίεσης (Pressure Cells) 2 και 6 ιντσών καθώς και αισθητήρες οριζοντίων ανηγμένων παραμορφώσεων για τις ασφαλικές στρώσεις (Asphalt Strain Gages). Οι αισθητήρες κατακόρυφης πίεσης τοποθετήθηκαν στις στρώσεις από ασύνδετα αμμοχάλικα σε διάφορα βάθη, ενώ οι αισθητήρες οριζόντιας παραμόρφωσης τοποθετήθηκαν στις ασφαλικές στρώσεις σε απόσταση περίπου 13mm ψηλότερα από τον πυθμένα έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ο εγκιβωτισμός τους. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν παραμορφωσίμετρα τύπου «H», (σχ. 5.2) με ακρίβεια $1 \cdot 10^{-6}$ (mm/mm) και εύρος μετρήσεως $2000 \cdot 10^{-6}$ (mm/mm) σε θερμοκρασίες από 0 έως 150°C. Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η διάταξη των παραμορφωσιμέτρων σε σχέση με τους άξονες κίνησης των φορτίων.



Σχήμα 5.1: Τυπική κάτοψη διάταξης αισθητήρων απόκρισης ασφαλτικών οδοστρωμάτων στην εγκατάσταση NAPTf



Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστικά αισθητήρα καταγραφής παραμορφώσεων ασφαλτικών στρώσεων



Σχήμα 5.3: Διάταξη αισθητήρων καταγραφής παραμορφώσεων ασφαλτικών στρώσεων σε σχέση με τους άξονες κίνησης των φορτίων.

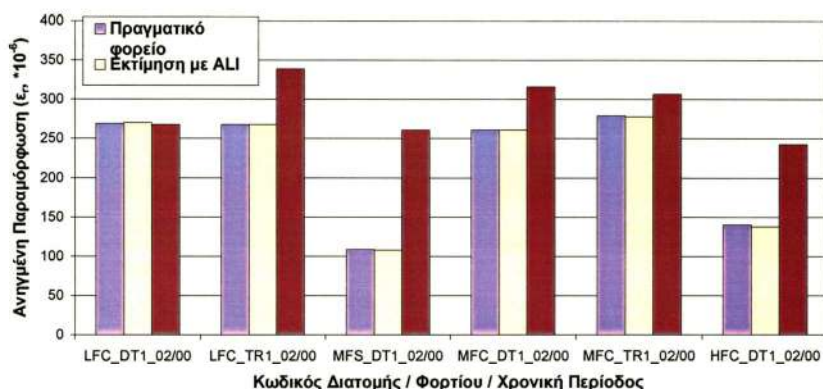
Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις οι καταγραφές των «δυναμικών» αισθητήρων είναι πιθανό να είναι ανακριβείς ή λανθασμένες, σύμφωνα και με τις σχετικές επιστημονικές που έχουν καταχωρηθεί στη βάση δεδομένων του NAPTf. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να είναι μόνιμο λόγω αστοχίας του αισθητήρα ή του οδοστρώματος ή και παροδικό όπως για παράδειγμα λόγω πιθανής φθοράς κάποιου από τα καλώδια του δικτύου συλλογής και μεταφοράς δεδομένων η οποία ενδέχεται να επηρεάσει την καταγραφή ενός ή περισσότερων αισθητήρων. Τα παραπάνω προβλήματα παρατηρήθηκαν περισσότερο στους αισθητήρες των ασφαλικών στρώσεων όπου η πιθανή δημιουργία και εξέλιξη ρωγμών στην περιοχή των αισθητήρων επηρεάζει την καταγραφή της απόκρισης του οδοστρώματος. Η εγκατάσταση αισθητήρων παραμορφώσεων ασφαλικών στρώσεων διεθνώς θεωρείται από τις πλέον δύσκολες και εμφανίζει υψηλό βαθμό αστοχίας των αισθητήρων λόγω της έκθεσης τους σε υψηλές θερμοκρασίες, σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση και σε κραδασμούς που δημιουργούνται κατά τη διέλευση των φορτίων. Για τους λόγους αυτούς έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα ανθεκτικοί αισθητήρες και έχουν εισαχθεί κατάλληλες διαδικασίες εγκατάστασης τους έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα καταστροφής τους [66]. Εξοπλισμός αυτού του τύπου χρησιμοποιήθηκε και στην εγκατάσταση του NAPTf.

5.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης με Επιτόπου Καταγραφές Τάσεων και Παραμορφώσεων

Από τη βάση δεδομένων του NAPTf, ελήφθησαν στοιχεία μετρήσεων για τις καταγραφές των κρίσιμων εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών των οδοστρωμάτων κατά τις περιόδους όπου έγιναν οι υπολογισμοί ελέγχου καταλληλότητας του δείκτη ALI για την κατάταξη της σχετικής επίδρασης ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα. Στην παρούσα διερεύνηση τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται για σύγκριση με τα αποτελέσματα από τα υπολογιστικά προσομοιώματα τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν και αναπτύχθηκαν λεπτομερώς στο κεφάλαιο 4. Ειδικότερα γίνεται σύγκριση των υπολογισθέντων κρίσιμων εντατικών ή παραμορφωσιακών μεγεθών με τις αντίστοιχες καταγραφές των αισθητήρων της εγκατάστασης.

Στις ασφαλικές στρώσεις, δεδομένου ότι οι καταγραφές των παραμορφωσιμέτρων δεν έγιναν στον πυθμένα των στρώσεων αλλά σε απόσταση 13mm πάνω από αυτή, οι συγκρίσεις έγιναν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων στην ανάλογη θέση και όχι με τα κρίσιμα μεγέθη στη βάση των στρώσεων. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζονται συγκριτικά οι ανηγμένες παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και οι υπολογισμένες με βάση το πραγματικό φορείο και το δείκτη ALI. Όπως παρατηρήθηκε γενικά δεν υπάρχει ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των υπολογισμένων και μετρημένων τιμών και στα δύο τμή-

ματα. Οι διαφορές είναι μικρότερες κατά την αρχική περίοδο και αυξάνονται σημαντικά στη συνέχεια και σύμφωνα με τη σχετική εμπειρία αυτό μπορεί να οφείλεται εν μέρει στην ακρίβεια των συστημάτων καταγραφής και στην παραδοχή ελαστικής και ισότροπης συμπεριφοράς των υλικών. Ειδικότερα η αυξανόμενη (με την πάροδο του χρόνου) διαφορά που παρατηρείται είναι πιθανό αποτέλεσμα των μικρορηγματώσεων που δημιουργούνται στην ασφαλτική στρώση από τη φόρτιση του οδοστρώματος, η οποία επηρεάζει τη συμπεριφορά του υλικού αλλά και τις ενδείξεις των παραμορφωσιμέτρων. Όπως αναφέρουν και οι Gopalakhishnan και Thompson [67] οι οποίοι διερεύνησαν την επίδραση της φόρτισης στις καταγραφές των παραμορφωσιμέτρων του NAPTf, στην περίπτωση όπου στην περιοχή του παραμορφωσιμέτρου δημιουργηθούν μικρορηγματώσεις οι οποίες υπό την επήρεια των φορτίων διευρύνονται και εξελίσσονται επηρεάζουν απρόβλεπτα την ένδειξη του οργάνου η οποία πλέον δεν μπορεί να θεωρηθεί επαρκώς αξιόπιστη.



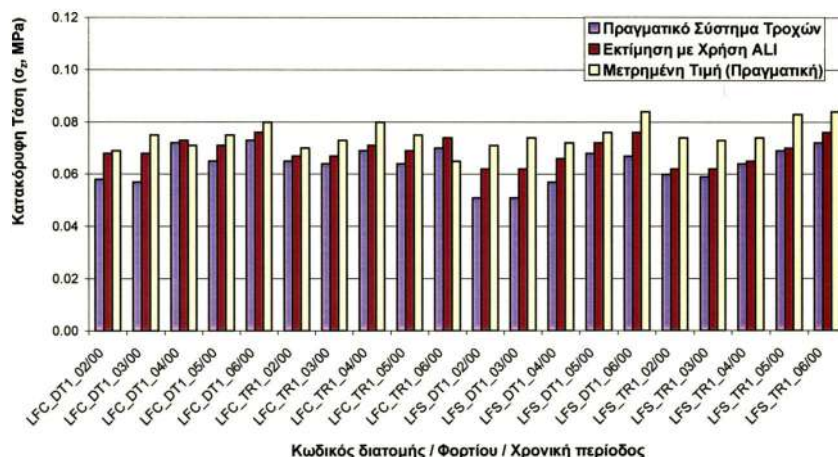
Σχήμα 5.4: Ενδεικτικά αποτελέσματα σύγκρισης μεταξύ μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο και υπολογισμών με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία για τις οριζόντιες εφελκυστικές ανηγμένες παραμορφώσεις.

Ανάλογες παρατηρήσεις έχουν γίνει και για τα οδοστρώματα των οδών όπου τα συστήματα φόρτισης είναι απλούστερα σε σχέση με τα οδοστρώματα των αεροδρομίων. Όπως αναφέρεται και σε σχετικές διεθνείς επιστημονικές εκδηλώσεις [68], η σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικών προσομοιωμάτων με καταγραφές σε πραγματικό χρόνο, ιδιαίτερα για τα παραμορφωσιακά μεγέθη, ενδέχεται να παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις τα αίτια των οποίων δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί επαρκώς.

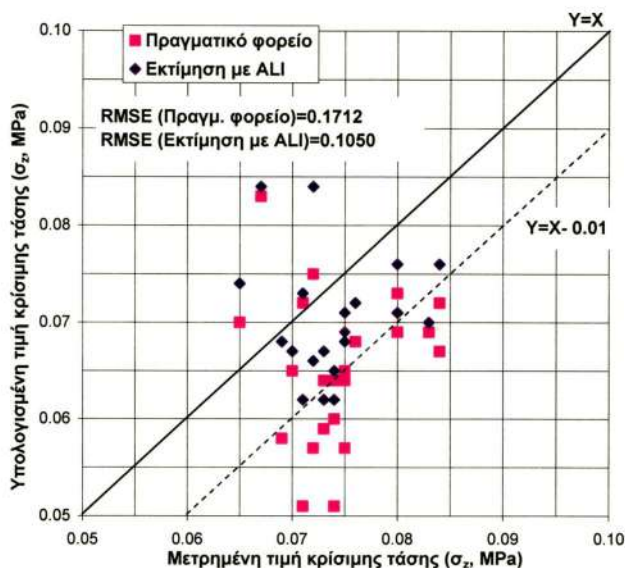
Για την επιφάνεια των στρώσεων έδρασης των διατομών έγινε καταγραφή των κατακόρυφων τάσεων σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Στο πλαίσιο της διερεύνησης του δείκτη ALI ως προς τη δυνατότητα αξιολόγησης της σχετικής επίδρασης των αεροσκα-

φών σε ένα οδόστρωμα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των τιμών που μετρήθηκαν για το υπόψη κρίσιμο μέγεθος για τη στρώση έδρασης και των τιμών που εκτιμήθηκαν από την προσομοίωση που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις.

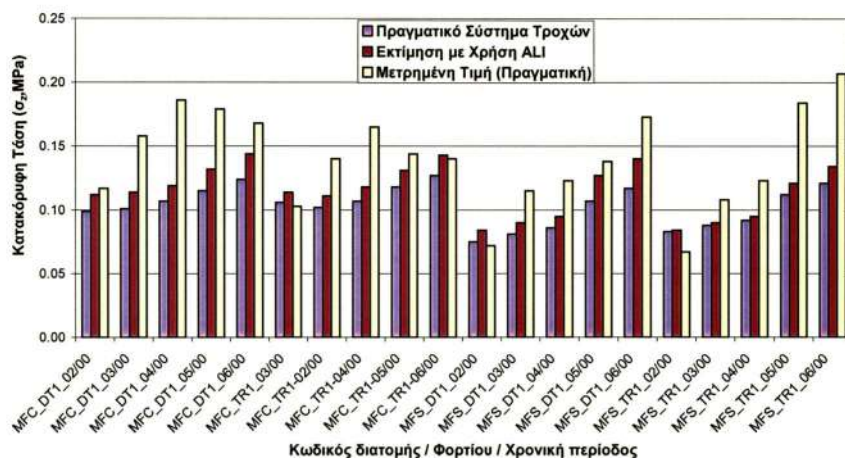
Ειδικότερα, στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται συγκριτικά οι κατακόρυφες τάσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης για τις διατομές με χαμηλή φέρουσα ικανότητα στρώσης έδρασης (LFS και LFC). Όπως φαίνεται οι αναλυτικές εκτιμήσεις τόσο από το πραγματικό φορείο όσο και από το δείκτη ALI προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις καταγεγραμμένες τιμές, ενώ οι μέγιστες διαφορές είναι της τάξεως του 15-20%. Οι εκτιμήσεις πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στην ενότητα 3.2 στην οποία προβλέπεται προσαύξηση 0.04 MPa επί της από τον απλό τροχό υπολογισμένης κρίσιμης τάσης. Είναι αξιοσημείωτο ότι η εκτίμηση μέσω του δείκτη ALI είναι ελαφρά καλύτερη από αυτή του πραγματικού φορείου (σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.5: Σύγκριση μεταξύ μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο και υπολογισμών για τις κατακόρυφες τάσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης των οδοστρωμάτων που εδράζονται σε έδαφος χαμηλής φέρουσας ικανότητας.



Σχήμα 5.6: Σύγκριση υπολογισμένης κρίσιμης τάσης με αντίστοιχη μετρημένη σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 5.7: Σύγκριση μεταξύ μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο και υπολογισμών για τις κατακόρυφες τάσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης των οδοστρωμάτων που εδράζονται σε έδαφος μέσης φέρουσας ικανότητας.

Δεδομένου ότι με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία δεν ήταν δυνατό να διερευνηθεί πλήρως και να εκτιμηθεί η συμβολή των διαφόρων παραγόντων στις αποκλίσεις μεταξύ των υπολογισμένων και μετρημένων τιμών, η έρευνα είναι σκόπιμο να επεκταθεί και σε άλλα ανάλογα πειράματα.

Παρόλα αυτά, με βάση την παρούσα διερεύνηση δεν υπάρχουν ενδείξεις που να υποδηλώνουν ότι οι εκτιμήσεις των κρισίμων μεγεθών με βάση το δείκτη ALI διαφέρουν από αυτές που υπολογίζονται από πραγματικά φορεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ALI ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

6.1 Μια Σημαντική Χαρακτηριστική Ιδιότητα του Δείκτη ALI

Στο πλαίσιο των διερευνήσεων του δείκτη ALI εξετάστηκε και η σχέση μεταξύ των τιμών κατάταξης ALI διαφορετικών αεροσκαφών και της αντίστοιχης επίδρασης που έχουν τα αεροσκάφη αυτά στα ασφαλτικά οδοστρώματα, με κριτήριο τη μέγιστη κρίσιμη τάση ή παραμόρφωση που προκαλούν στο οδόστρωμα. Όπως διαπιστώθηκε τα κρίσιμα μεγέθη που προκαλούνται στο οδόστρωμα είναι ακριβώς ανάλογα των ALI των αεροσκαφών, δηλαδή για δύο διαφορετικά αεροσκάφη “1” και “2” ισχύει:

$$\frac{ALI_1}{ALI_2} = \frac{\sigma_{r1}}{\sigma_{r2}} = \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} \quad (6.1)$$

Όπου ALI_1 , ALI_2 , σ_{r1} , σ_{r2} , ε_{r1} , ε_{r2} η τιμή του δείκτη ALI, της κρίσιμης οριζόντιας εφελκυστικής τάσης και της ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης ή της στρώσης βάση από κατεργασμένο αμμοχάλικο ανάλογα με τον τύπο του οδοστρώματος.

Η ισχύς της σχέσεως 6.1 μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενη δεδομένου ότι σε ελαστικό, ισότροπο και ομογενή ημίχωρο (Boussinessq) υπό την επίδραση φορτίου ομοιόμορφα κατανεμμένου σε κυκλική επιφάνεια επάφης ισχύει [24]:

$$\sigma_r = p \times \left(\frac{1 + 2 \times \nu}{2} - \frac{1 + \nu}{\left(1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{2 \times \left(1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (6.2)$$

Όπου σ_r η οριζόντια τάση, p η πίεση του φορτίου που ασκείται, ν ο λόγος Poisson του υλικού, R η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας επαφής και z το βάθος για το οποίο υπολογίζεται η τάση.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι στην εξεταζόμενη περίπτωση το p της σχέσης 6.2 ισούται με το ALI και ότι το ισοδύναμο φορτίο απλού τροχού έχει σταθερή ακτίνα, αυτό σημαίνει ότι για ένα δεδομένο βάθος σε ελαστικό ημίχωρο ο λόγος των οριζόντιων τάσεων ισούται με το λόγο των πιέσεων (ALI) καθώς ο όρος στην παρένθεση της σχέσης 6.2 απαλείφεται.

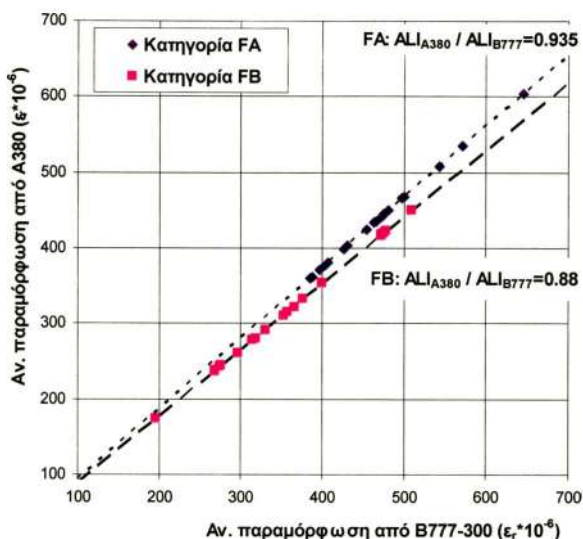
Ακριβώς αντίστοιχα ισχύουν και για τις κατακόρυφες τάσεις οι οποίες στον άξονα που διέρχεται από το κέντρο φορτίου με κυκλική επιφάνεια επαφής (μέγιστη τάση) σε ελαστικό ημίχωρο υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\sigma_z = p \times \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (6.3)$$

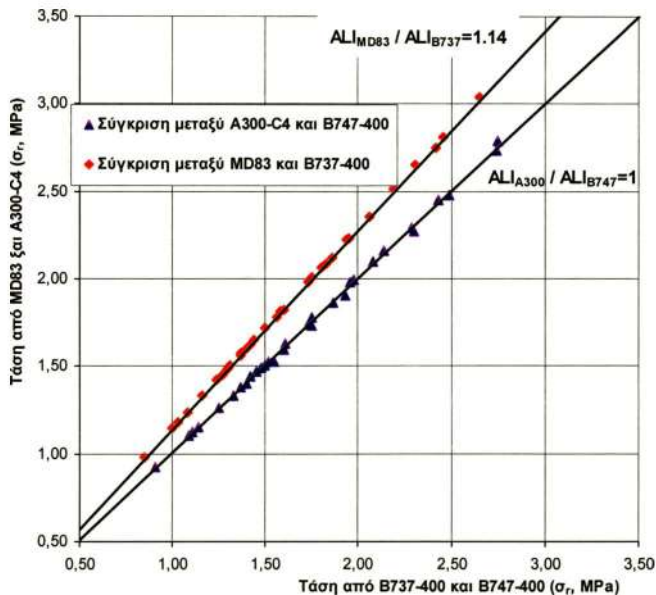
Όπου σ_z η οριζόντια τάση, p η πίεση του φορτίου που ασκείται, ν ο λόγος Poisson του υλικού, R η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας επαφής και z το βάθος για το οποίο υπολογίζεται η τάση. Σε αναλογία με τις οριζόντιες τάσεις, συγκρίνοντας τα ALI δύο διαφορετικών αεροσκαφών «1» και «2» ισχύει:

$$\frac{ALI_1}{ALI_2} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{\sigma_{z1}}{\sigma_{z2}} = \frac{\varepsilon_{z1}}{\varepsilon_{z2}} \quad (6.4)$$

Σε όλες τις περιπτώσεις η ισχύς των αναλογιών (6.1) και (6.4) και στα προσομοιώματα πολλαπλών ελαστικών στρώσεων που χρησιμοποιούνται επιβεβαιώθηκε με τις συστηματικές διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του ALI τόσο στα εύκαμπτα όσο και στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Στα σχήματα 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα ελέγχου ισχύος της αναλογίας με βάση τα αποτελέσματα από διατομές με τα χαρακτηριστικά των σχετικών πινάκων του κεφαλαίου 3 (3.1 και 3.8). Όπως φαίνεται τα σημεία που προκύπτουν από τη σύγκριση των κρίσιμων μεγεθών που προκαλούνται από τα δύο αεροσκάφη ευρίσκονται στην ευθεία που απεικονίζει τον αντίστοιχο λόγο των ALI τους. Στον πίνακα Π4.4 του παρατήματος 4 παρουσιάζονται περισσότερα σχετικά παραδείγματα.



Σχήμα 6.1: Απεικόνιση σύγκρισης των κρίσιμων οριζόντιων παραμορφώσεων που προκαλούνται από τα A380 και B737-300 και συσχέτισή τους με το λόγο των αντίστοιχων ALI σε ασφαλτικά οδοστρώματα με βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο.



Σχήμα 6.2: Απεικόνιση σύγκρισης των κρίσιμων οριζόντιων τάσεων από διαφορετικά ζεύγη α/φ και των αντίστοιχων λόγων των δεικτών ALI σε ασφαλτικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο.

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.2 είναι εμφανές ότι στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα ο λόγος των κρίσιμων τάσεων που παράγονται από τα διαφορετικά αεροσκάφη είναι ίσος με το λόγο των αντίστοιχων τιμών ALI των αεροσκαφών. Αναλυτικότερα, διερευνήθηκαν περισσότερες από 200 περιπτώσεις με διαφορετικά ζεύγη αεροσκαφών και διατομές οδοστρωμάτων. Στο 99% αυτών των περιπτώσεων η μέση διαφορά μεταξύ του λόγου των κρίσιμων τάσεων και του λόγου των ALI είναι μικρότερη του 0.4% με αντίστοιχη τυπική απόκλιση 0.9%. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι εφόσον είναι γνωστή η κρίσιμη τάση που προκαλείται από το φορτίο ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα είναι δυνατό να υπολογιστεί με αρκετή ακρίβεια η αντίστοιχη τάση ενός άλλου αεροσκάφους μέσω του λόγου των δεικτών ALI. Το στοιχείο αυτό είναι σημαντικό και χρήσιμο, δεδομένου ότι μπορεί να αξιοποιηθεί στο πλαίσιο της εκτίμησης της διαφοράς της επίδρασης των αεροσκαφών σε περιπτώσεις μεταβολών της κυκλοφορίας (εισαγωγή νέων τύπων, μεταβολή σύνθεσης κυκλοφορίας κλπ), προσφέροντας επαρκώς αξιόπιστη πληροφορία μέσω μίας απλής και γρήγορης διαδικασίας η οποία προτείνεται στην παρούσα εργασία.

6.2 Κατάταξη και Έλεγχος Ασφαλικών Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων με το Δείκτη APCI (Airport Pavement Capacity Index)

Έχοντας τη δυνατότητα συγκριτικής κατάταξης της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών, είναι σκόπιμο να καθοριστεί και κατάλληλη διαδικασία για τον έλεγχο της ασφαλούς εξυπηρέτησης τους από ένα οδόστρωμα. Η συνήθης πρακτική που ακολουθείται για το σκοπό αυτό, είναι η εισαγωγή ενός δείκτη κατάταξης της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος ο οποίος εκφράζεται μέσω του μέγιστου δείκτη κατάταξης της σχετικής επίδρασης αεροσκάφους που μπορεί να εξυπηρετηθεί από το οδόστρωμα σε βάθος χρόνου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και με βάση το δείκτη ALI εισάγεται ένας νέος δείκτης κατάταξης της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων ο οποίος ονομάζεται APCI (Airport Pavement Capacity Index). Στη γενική περίπτωση για τα ασφατικά οδοστρώματα αεροδρομίων ο δείκτης κατάταξης οδοστρώματος APCI (Airport Pavement Capacity Index) ορίζεται ως ο μέγιστος δείκτης ALI που μπορεί να εξυπηρετήσει το οδόστρωμα για ένα επιλεγμένο αριθμό επαναλήψεων φόρτισης. Ο δείκτης APCI μπορεί να υπολογιστεί απλά με ένα οποιοδήποτε υπολογιστικό προσομοίωμα ασφατικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων το οποίο είναι σύμφωνο με τις παραδοχές της ενότητας 3.1.

Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης έχει καθοριστεί αναλυτικά και παρουσιάζεται στη συνέχεια η μέθοδος προσδιορισμού του δείκτη APCI τόσο για ασφατικά οδοστρώματα με βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο [44], όσο και με αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο [36].

Ακολουθώς, προτείνεται και κατάλληλη μέθοδος για τον έλεγχο επάρκειας της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος και την προεκτίμηση των επιπτώσεων από ενδεχόμενες μεταβολές στο στόλο και τις κινήσεις που εξυπηρετεί [45], [50], [36]. Σε κάθε περίπτωση οι διερευνήσεις για τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας έχουν βασιστεί στα κρίσιμα εντατικά ή/και παραμορφωσιακά μεγέθη της διατομής που κάθε φορά εξετάζεται (σχήματα 3.1 και 3.10), σύμφωνα με όσα αναφέρονται στις ενότητες 2.1, 3.1, 3.2 και τη σχετική βιβλιογραφία.

6.2.1 Οδοστρώματα με Βάση και Υπόβαση από Ασύνδετο Αμμοχάλικο.

Σύμφωνα με το προσομοίωμα του σχήματος 6.3 στην πρώτη κρίσιμη θέση για τον έλεγχο επάρκειας των ασφαλικών οδοστρωμάτων με βάση και υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο ελέγχεται εάν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας λόγω κόπωσης του υλικού της ασφαλικής στρώσης από τις επαναλαμβανόμενες επαναλήψεις της φόρτισης. Ανάλογα με τον κατάλληλο νόμο αστοχίας του υλικού που θα επιλεγεί, ως κρίσιμο μέγεθος λαμβάνεται η οριζόντια εφελκυστική τάση ή παραμόρφωση στον πυθμένα (κάτω ίνα) της ασφαλικής στρώσης του οδοστρώματος.



Σχήμα 6.3: Ενδεικτικό προσομοίωμα στρώσεων και κρίσιμων θέσεων ελέγχου αστοχίας ασφαλικού οδοστρώματος αεροδρομίου με βάση από αμμοχάλικο (εύκαμπτο).

Κατά τη διέλευση του φορτίου σε ένα οδοστρώμα, η φθορά του ασφαλιστικού μίγματος ξεκινά με τη δημιουργία μικρών ρωγμών που γίνονται αντιληπτές μόνο με τη μελέτη της μικροδομής του υλικού [69]. Σταδιακά, με τις επαναλήψεις της φόρτισης οι μικροσκοπικές ρωγμές διευρύνονται και επεκτείνονται οπότε έχουμε δημιουργία μακροσκοπικών ρωγμών. Η δημιουργία ρωγμών, μειώνει την επιφάνεια του “υγιούς” υλικού μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά του φορτίου. Έτσι το φορτίο μεταφέρεται μέσω της απομένουσας επιφάνειας (ανακατανομή). Η

φθορά (d) του υλικού, εξ' αιτίας της ρηγμάτωσης προσδιορίζεται ως η σχετική μείωση της "υγιούς" επιφάνειας [69], [70]:

$$d = \frac{\Delta A}{A_0} = \frac{A_0 - A}{A_0} \quad (6.5)$$

Όπου A_0 η αρχική επιφάνεια και A η απομένουσα "υγιής" επιφάνεια.

Αν το συνολικό φορτίο που εφαρμόζεται είναι P , τότε η αντίστοιχη μέση (φαινόμενη) τάση σ θα είναι:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (6.6)$$

Ενώ η πραγματική, ενεργός τάση σ_a , καθώς το φορτίο αναλαμβάνεται από το "υγιές" τμήμα είναι ίση με:

$$\sigma_a = \frac{P}{A} = \sigma \cdot \frac{A_0}{A} \quad (6.7)$$

Θεωρώντας ότι η φθορά του υλικού προκαλεί μόνο ρηγμάτωση (μείωση της διατομής) και δε μεταβάλλει τη μηχανική συμπεριφορά του υγιούς υλικού, για την αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση ισχύει ότι:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} = \frac{\sigma_a}{E} \Rightarrow \sigma_a = \sigma \cdot \frac{E_0}{E} \quad (6.8)$$

Όπου E_0 το αρχικό μέτρο ελαστικότητας της διατομής του μη ρηγματωμένου υλικού και E το μέτρο ελαστικότητας της διατομής του ρηγματωμένου υλικού. Από τις σχέσεις 6.7 και 6.8 προκύπτει ότι:

$$\frac{A_0}{A} = \frac{E_0}{E} \quad (6.9)$$

Ακολουθώντας, αντικαθιστώντας στη σχέση 6.5 από την 6.9 προκύπτει ότι:

$$d = \frac{E_0 - E}{E_0} \quad (6.10)$$

Δηλαδή η φθορά του ασφαλτομίγματος, είναι δυνατό να εκφράζεται ως το ποσό της σχετικής μείωσης του μέτρου ελαστικότητας του [70]. Θεωρώντας ότι ένας αριθμός επαναλήψεων φόρτισης προκαλεί μια φθορά d στο υλικό και συμβολίζοντας ως d_d τη μέγιστη επιτρεπόμενη φθορά του υλικού της ασφαλικής στρώσης, για να μην υπάρχει αστοχία πρέπει να ισχύει η σχέση 6.11:

$$d \leq d_d \Leftrightarrow \frac{d}{d_d} \leq 1 \quad (6.11)$$

Από την ανάλυση ενός τυπικού νόμου αστοχίας για ασφαλτομίγματα που ακολουθεί τη γενική μορφή ($N_{fail} = \kappa_1 \cdot \varepsilon_r^{-\kappa_2}$), η οποία μπορεί να γραφεί και ως ($N_{fail} = \kappa_1 \cdot \varepsilon_r^{-\kappa_2} \cdot \frac{d}{d_d}$) όπου $d=d_d$ τη

στιγμή αστοχίας, ο Ullidtz κατέληξε σε σχέση υπολογισμού της φθοράς που προκαλείται στο υλικό από έναν αριθμό επαναλήψεων (N) της φόρτισης. Η γενική μορφή της σχέσης η οποία περιλαμβάνεται σε σχετικές επιστημονικές ανακοινώσεις όπως οι [70] και [71] είναι:

$$d = \frac{d_d \cdot N}{\kappa_1 \cdot \varepsilon_r^{-\kappa_2}} \quad (6.12) \quad \text{ή} \quad d = \frac{d_d \cdot N}{\kappa_1 \cdot \sigma_r^{-\kappa_2}} \quad (6.13)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης,

d_d , d η μέγιστη επιτρεπόμενη και η προκαλούμενη φθορά αντίστοιχα,

ε_r , σ_r η οριζόντια εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση / τάση στον πυθμένα (κάτω ίνα) της ασφαλικής στρώσης και

κ_1 , κ_2 σταθερές οι οποίες συνήθως εκτιμώνται από εργαστηριακές δοκιμές υλικών.

Αντικαθιστώντας στη σχέση 6.11 τα d και d_d σύμφωνα με τη σχέση 6.12 εξάγεται η σχέση 6.14, μέσω της οποίας συσχετίζονται ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων φόρτισης χωρίς αστοχία του υλικού με ένα τυχαίο αριθμό επαναλήψεων.

$$\frac{d}{d_d} = \frac{\frac{d_d \cdot N}{\kappa_1 \cdot \varepsilon_r^{-\kappa_2}}}{\frac{d_d \cdot N_d}{\kappa_1 \cdot \varepsilon_{rd}^{-\kappa_2}}} \Leftrightarrow \left(\frac{\varepsilon_{rd}}{\varepsilon_r} \right)^{-\kappa_2} \cdot \frac{N}{N_d} \leq 1 \quad (6.14)$$

Όπου N_d είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων φόρτισης χωρίς αστοχία του υλικού και ε_{rd} η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση

d_d , d η μέγιστη επιτρεπόμενη και η προκαλούμενη φθορά αντίστοιχα,

N είναι ο αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης, ε_r η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση.

Για την εφαρμογή της σχέσης 6.14 σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα αεροδρομίου τα N_d και ε_{rd} αναφέρονται στη φέρουσα ικανότητα του ενώ τα N και ε_r στο αποτέλεσμα της φόρτισης από ένα τυχαίο αεροσκάφος. Αντικαθιστώντας το λόγο των ανηγμένων παραμορφώσεων με τον αντίστοιχο λόγο των δεικτών ALI και APCI (σχέση 6.1), η σχέση 6.14 μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\left(\frac{ALI}{APCI} \right)^{\kappa_2} \cdot \frac{N}{N_d} \leq 1 \quad (6.15)$$

Αξιοποιώντας τη σχέση 6.15 μπορεί να ελεγχθεί εάν ένα αεροσκάφος μπορεί να χρησιμοποιήσει το (εύκαμπτο) οδόστρωμα ενός αεροδρομίου για ένα αριθμό επαναλήψεων φόρτισης χωρίς να υπερβεί τη μέγιστη επιτρεπόμενη φθορά των ασφαλικών στρώσεων. Σημειώνεται ότι για τις ανάγκες πρακτικών εφαρμογών σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει εμπειρία χρήσης κατάλληλου νόμου αστοχίας ή εργαστηριακά στοιχεία, η σταθερά κ_2 μπορεί να εκτιμάται με βάση δεδομένα από βιβλιογραφικές πηγές όπως για παράδειγμα [74], [75]. Ακριβώς

αντίστοιχη σχέση με την ίδια διαδικασία μπορεί να προκύψει και για νόμο αστοχίας με βάση την κρίσιμη εφελκυστική τάση. Στην περίπτωση αυτή αντικαθιστούμε στη σχέση 6.11 τα d και d_d σύμφωνα με τη σχέση 6.13.

Μία άλλη δυνατότητα που συχνά απαιτείται στις πρακτικές εφαρμογές της σχέσης 6.15 και της προτεινόμενης μεθόδου, είναι ο συνδυασμένος έλεγχος της φέρουσας ικανότητας για μικτή κυκλοφορία από διάφορους τύπους αεροσκαφών. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να υπολογιστεί η επάρκεια για την αθροιστική φθορά [72], [73] που προκαλείται από τα διάφορα αεροσκάφη η οποία είναι:

$$\frac{d_1 + d_2 + \dots + d_l}{d_d} \leq 1 \quad (6.16)$$

ή διαφορετικά συνδυάζοντας αντικαθιστώντας με βάση τις σχέσεις 6.12 και 6.1:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (ALI_i^{k_2} \cdot N_i)}{APCI^{k_2} \cdot N_d} \leq 1 \quad (6.17)$$

Είναι αξιοσημείωτο ότι στον αριθμητή των σχέσεων 6.16 και 6.17 μπορούν να περιλαμβάνονται η φθορά από παλαιότερη κυκλοφορία, από μελλοντική κυκλοφορία ή ακόμη συνδυασμό και των δύο. Επιπλέον σχετική φθορά από άλλους παράγοντες (π.χ. από περιβαλλοντικές επιπτώσεις) μπορεί ληφθεί υπόψη εάν απλώς προστεθεί στον αριθμητή της σχέσης 6.11, οπότε η σχέση προσφέρει τη δυνατότητα ακόμη πληρέστερου ελέγχου επάρκειας της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος ως προς την πιθανότητα αστοχίας της ασφαλικής στρώσης.

Όσον αφορά τον έλεγχο επάρκειας της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης μπορεί να ακολουθείται μια ακριβώς αντίστοιχη διαδικασία, ξεκινώντας από ένα κατάλληλο νόμο αστοχίας της μορφής:

$$N = a \cdot \sigma_z^{-b} \quad (6.18) \quad \text{ή} \quad N = a \cdot \varepsilon_z^{-b} \quad (6.19)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των επαναλήψεων της φόρτισης, a και b σταθερές υπολογιζόμενες από εργαστηριακές δοκιμές και σ_z , ε_z η αντίστοιχη κατακόρυφη τάση ή ανηγμένη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης. Ακολουθώντας τις ίδιες παραδοχές και τη διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για τις σχέσεις 6.12 και 6.13 στην εξεταζόμενη περίπτωση η έκφραση της φθοράς από ένα αριθμό επαναλήψεων για τη στρώση έδρασης είναι:

$$d = \frac{d_d \cdot N}{a \cdot \sigma_z^{-b}} \quad (6.20) \quad \text{ή} \quad d = \frac{d_d \cdot N}{a \cdot \varepsilon_z^{-b}} \quad (6.21)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης,

d_d , d η μέγιστη επιτρεπόμενη και η προκαλούμενη φθορά αντίστοιχα,

ε_z , σ_z η κατακόρυφη ανηγμένη παραμόρφωση / τάση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης και

a , b σταθερές οι οποίες συνήθως εκτιμώνται από εργαστηριακές δοκιμές υλικών.

Από το λόγο μεταξύ της φθοράς ενός τυχαίου αεροσκάφους και της μέγιστης επιτρεπόμενης φθοράς σχεδιασμού συσχετίζονται ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων φόρτισης της από το αεροσκάφος χωρίς αστοχία της στρώσης έδρασης:

$$\frac{d}{d_d} = \frac{\frac{d_d \cdot N}{\kappa_l \cdot \sigma_z^{-b}}}{\frac{d_d \cdot N_d}{\kappa_l \cdot \sigma_{zd}^{-b}}} \Leftrightarrow \left(\frac{\sigma_{zd}}{\sigma_z} \right)^{-b} \cdot \frac{N}{N_d} \leq 1 \quad (6.22)$$

Όπου N_d είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων φόρτισης χωρίς αστοχία του υλικού και ε_{zd} η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση

d_d , d η μέγιστη επιτρεπόμενη και η προκαλούμενη φθορά αντίστοιχα,

N είναι ο αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης, σ_z η αντίστοιχη κατακόρυφη τάση.

Για την εφαρμογή της σχέσης 6.22 σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα αεροδρομίου τα N_d και σ_{zd} αναφέρονται στη φέρουσα ικανότητα του ενώ τα N και σ_z στο αποτέλεσμα της φόρτισης από ένα τυχαίο αεροσκάφος. Αντικαθιστώντας το λόγο των κατακόρυφων τάσεων με τον αντίστοιχο λόγο των δεικτών ALI (σχέση 6.4), η σχέση 6.22 μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\left(\frac{ALI}{APCI} \right)^b \cdot \frac{N}{N_d} \leq 1 \quad (6.23)$$

Με βάση τη σχέση 6.23 μπορεί να ελεγχθεί η επάρκεια της στρώσης έδρασης για ένα αεροσκάφος. Ακριβώς αντίστοιχη σχέση με την ίδια διαδικασία μπορεί να προκύψει και για νόμο αστοχίας με βάση την κρίσιμη ανηγμένη παραμόρφωση. Σημειώνεται ότι για τις ανάγκες πρακτικών εφαρμογών σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει εμπειρία χρήσης κατάλληλου νόμου αστοχίας ή εργαστηριακά στοιχεία, η σταθερά b μπορεί να λαμβάνεται με βάση βιβλιογραφικά δεδομένα όπως για παράδειγμα οι πηγές [24] και [76].

Στην περίπτωση μικτής κυκλοφορία από διάφορους τύπους αεροσκαφών, ο έλεγχος της φέρουσας επάρκεια της στρώσης έδρασης γίνεται για την αθροιστική φθορά [72], [73] που προκαλείται από τα αεροσκάφη η οποία είναι:

$$\frac{d_1 + d_2 + \dots + d_i}{d_d} \leq 1 \quad (6.24)$$

ή διαφορετικά αντικαθιστώντας με βάση τις σχέσεις 6.20 και 6.4:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (ALI_i^b \cdot N_i)}{APCI^b \cdot N_d} \leq 1 \quad (6.25)$$

6.2.2 Οδοστρώματα με Βάση από Αμμοχάλικο Κατεργασμένο με Τσιμέντο.

Κατ' αντιστοιχία με τα παραπάνω, έχει επίσης αναπτυχθεί κατάλληλη διαδικασία και για τον έλεγχο της δυνατότητας εξυπηρέτησης των αεροσκαφών από ασφαλτικά οδοστρώματα που έχουν βάση από αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο [36]. Από τη σχετική θεωρία και τις παραδοχές που αναπτύχθηκαν στην ενότητα 2.1 για τα υπόψη ασφαλτικά οδοστρώματα ως κρίσιμη για τον έλεγχο αστοχίας θεωρείται η στρώση βάσης από κατεργασμένο αμμοχάλικο (σχήμα 6.4). Διεθνώς, έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια για τον έλεγχο αστοχίας λόγω κόπωσης της βάσης από κατεργασμένο αμμοχάλικο [17], [24], [77], [78], [79].



Σχήμα 6.4: Ενδεικτικό προσομοίωμα ημιακάμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου.

Στη γενική τους μορφή, οι συνήθεις νόμοι αστοχίας για υλικά βάσεων οδοστρωμάτων από αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο ακολουθούν τη σχέση 6.26:

$$\log N = b_1 - b_2 \frac{\sigma_r}{f} \quad (6.26)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης, b_1 και b_2 είναι σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και συνήθως εξάγονται από πειράματα, σ_r η οριζόντια εφελκυστική τάση στον πυθμένα της στρώσης και f είναι η εφελκυστική αντοχή του υλικού.

Εάν συμβολίσουμε με N_{APCI} και σ_{APCI} τον αριθμό των επαναλήψεων φόρτισης και την αντίστοιχη εφελκυστική τάση στον πυθμένα της στρώσης βάσης οι οποίες προκαλούνται από το ισοδύναμο φορτίο που εκφράζεται με το δείκτη APCI του οδοστρώματος, και ακολούθως με N_1 και σ_1 τα αντίστοιχα μεγέθη που προκαλούνται από ένα τυχαίο αεροσκάφος, τότε για να μην έχουμε αστοχία σε κάθε περίπτωση πρέπει να ισχύει:

$$\log N_{APCI} = b_1 - b_2 \frac{\sigma_{APCI}}{f} \quad (6.27) \quad \text{και} \quad \log N_1 = b_1 - b_2 \frac{\sigma_1}{f} \quad (6.28)$$

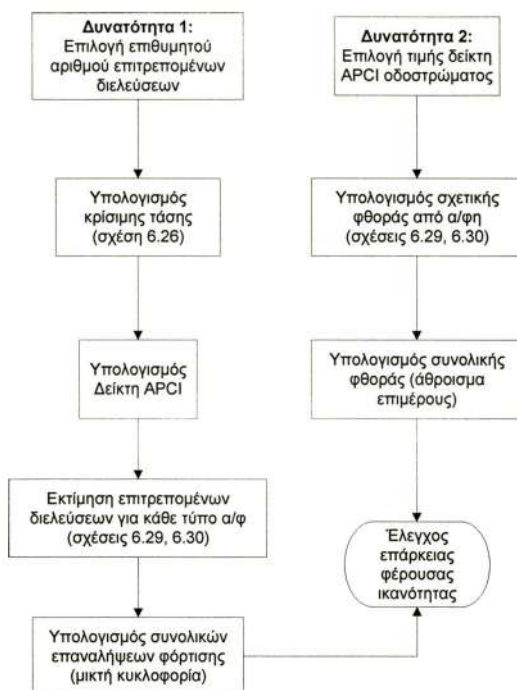
Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις 6.27 και 6.28 και αντικαθιστώντας το λόγο των κρίσιμων τάσεων με το λόγο ALI αεροσκάφους προς APCI οδοστρώματος (σύμφωνα με τη σχέση 3.1), προκύπτει μία σχέση που συνδέει το δείκτη κατάταξης APCI του οδοστρώματος και το δείκτη φόρτισης ALI ενός τυχαίου αεροσκάφους:

$$\frac{N_1}{N_{APCI}} = \frac{ALI_1}{APCI} 10^{b_1(1 - \frac{ALI_1}{APCI})} \quad (6.29)$$

Εάν ο λόγος μεταξύ του δείκτη ALI ενός αεροσκάφους και του δείκτη APCI του οδοστρώματος ($ALI / APCI$) συμβολιστεί ως σχετική φθορά του αεροσκάφους d_r και αφού λυθεί ως προς N_{APCI} η σχέση 6.29 μπορεί να γραφεί:

$$N_{APCI} = \frac{10^{b_1(d_r-1)}}{d_r} N_1 \quad (6.30)$$

Με βάση τη σχέση 6.30 οι επαναλήψεις φόρτισης από ένα τυχαίο αεροσκάφος μπορούν να μετατραπούν σε ισοδύναμες του φορτίου που εκφράζεται από το δείκτη APCI του οδοστρώματος. Ακολούθως, ο συνολικός αριθμός ισοδύναμων επαναλήψεων της φόρτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της επάρκειας του οδοστρώματος ως προς την φθορά από την προβλεπόμενη κυκλοφορία των αεροσκαφών. Η σχετική διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους οι οποίοι περιγράφονται στο διάγραμμα του σχήματος 6.5.



Σχήμα 6.5: Εναλλακτικές δυνατότητες ελέγχου επάρκειας φέρουσας ικανότητας ημιάκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου.

Σύμφωνα με την πρώτη δυνατότητα επιλέγεται ένας αριθμός επαναλήψεων φόρτισης (π.χ. με κριτήριο τις προβλεπόμενες κινήσεις αεροσκαφών για ένα διάστημα) και με βάση αυτόν καθορίζεται ο δείκτης APCI του οδοστρώματος. Επισημαίνεται ότι ο έλεγχος βασίζεται στη σύγκριση της σχετικής φθοράς, το τελικό αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται από τον αριθμό επαναλήψεων που θα επιλεγεί. Αυτό γίνεται ευκολότερα αντιληπτό στη δεύτερη δυνατότητα, όπου επιλέγεται ένα δείκτης APCI «αναφοράς» για το οδόστρωμα ο οποίος με κατάλληλη επιλογή μπορεί να εκφράζει ένα τυπικό μέγεθος φόρτισης ως προς τις παραμέτρους σχεδιασμού, λειτουργίας και τη φέρουσα ικανότητα.

Σε κάθε περίπτωση, η σχετική φθορά, καθώς και οι ισοδύναμες επαναλήψεις υπολογίζονται από τις σχέσεις 6.29 και 6.30. Για περιπτώσεις με μικτή κυκλοφορία από διάφορους τύπους αεροσκαφών, η σχετική φθορά των αεροσκαφών μπορεί να αθροιστεί και το σύνολο να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για τον έλεγχο της συμβατότητας της κυκλοφορίας με τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Στην πρώτη δυνατότητα του σχήματος 6.5 τούτο επιτυγχάνεται συγκρίνοντας το συνολικό αριθμό ισοδυνάμων διελεύσεων που προκύπτει με την επιλεγμένη τιμή για N_{APCI} για το υπόψη οδόστρωμα και εφόσον είναι μικρότερη τότε επαρκεί, ενώ

στη δεύτερη δυνατότητα υπολογίζεται η συνολική σχετική φθορά όλων των αεροσκαφών η οποία πρέπει να είναι μικρότερη του 1 για να μην υπάρξουν προβλήματα επάρκειας της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος.

6.3 Εφαρμογές Δεικτών ALI και APCI σε Υφιστάμενα Οδοστρώματα Αεροδρομίων

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των εναλλακτικών δεικτών της μεθόδου αξιολόγησης της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών και της κατάταξης των οδοστρωμάτων, είναι σκόπιμη η πραγματοποίηση προκαταρκτικών διερευνητικών εφαρμογών τους σε προβλήματα που συναντώνται στην πράξη. Οι πειραματικές διατάξεις σε πραγματική κλίμακα όπως αυτή του NARTF, αποτελούν βέβαια μία εξαιρετική βάση δεδομένων όμως παραμένουν πειραματικές διατάξεις με ελεγχόμενες και συχνά «ιδανικές» συνθήκες κατασκευής, λειτουργίας και φόρτισης, σε αντίθεση με τα πραγματικά οδοστρώματα των αεροδρομίων όπου η κατασκευή, η λειτουργία και η συντήρηση τους είναι εκτεθειμένες σε απρόβλεπτους παράγοντες. Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις σε ένα πραγματικό πρόβλημα δεν είναι διαθέσιμη η πληθώρα των στοιχείων που συλλέγονται ή είναι γνωστά στις πειραματικές διατάξεις μεγάλης κλίμακας, γεγονός που σε ορισμένες περιπτώσεις δυσχεραίνει τις αναλύσεις και την εφαρμογή των δεικτών καθιστώντας τη μέθοδο μη εφαρμόσιμη στην πράξη.

Για τους λόγους αυτούς κρίθηκε σκόπιμο η συστηματική διερεύνηση της καταλληλότητας των δεικτών ALI και APCI να συμπληρωθεί και με διερευνητικά παραδείγματα εφαρμογής σε οδοστρώματα που βρίσκονται σε λειτουργία. Από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία για τα οδοστρώματα από διεθνές αεροδρόμιο της νησιωτικής Ελλάδας (Κρατικός Αερολιμένας Ρόδου), από το διεθνές αεροδρόμιο Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος» και από στρατιωτικό αεροδρόμιο της Ολλανδίας.

6.3.1 Εφαρμογή στο Οδόστρωμα του Κρατικού Αερολιμένα Ρόδου (ΚΑΡΔ)

Το αεροδρόμιο της Ρόδου αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αερολιμένα ο οποίος γνωρίζει ραγδαία ανάπτυξη από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 λόγω της αυξανόμενης τουριστικής ζήτησης. Η αύξηση του αριθμού των επισκεπτών καθώς και η υιοθέτηση της πρακτικής των απευθείας ναυλωμένων πτήσεων από αεροδρόμια του εξωτερικού οδήγησε στη σημαντική αύξηση της συχνότητας και του μεγέθους του φορτίου των αεροσκαφών που εξυπηρετούνται.

Αποτέλεσμα αυτών των εξελίξεων, ήταν η αύξηση των φθορών στο υφιστάμενο οδόστρωμα, η οποία οδήγησε στην ανάγκη ενίσχυσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης του η οποία

άρχισε να μελετάται μετά τα μέσα της δεκαετίας του '90. Στο πλαίσιο της συμβολής σε ένα πιλοτικό σύγχρονο σύστημα διαχείρισης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, το Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ (ΕΜΠ, 1998) πραγματοποίησε επιτόπου μετρήσεις και καταγραφές στο διάδρομο του υπόψη αεροδρομίου (σχήμα 6.6), ενώ παράλληλα διετέθησαν και στοιχεία από παλαιότερες μετρήσεις και καταγραφές. Αναλυτικότερα, στη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας υπάρχουν στοιχεία από επιτόπου μη καταστρεπτικές μετρήσεις με FWD, στοιχεία από εργαστηριακές δοκιμές πυρήνων που ελήφθησαν από το οδόστρωμα, στοιχεία από παλαιότερες επιτόπου μετρήσεις CBR για τη στρώση έδρασης καθώς και κυκλοφοριακά δεδομένα.



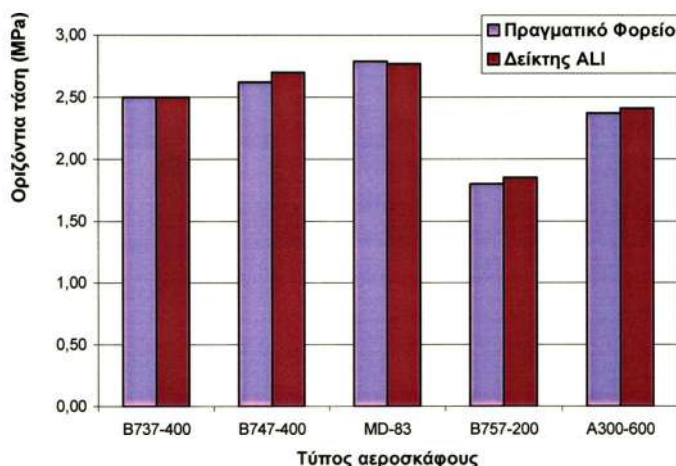
Σχήμα 6.6: Γενική άποψη του διαδρόμου του Κρατικού Αερολιμένα Ρόδου.

Στο σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η τελική διατομή του οδοστρώματος όπως προτάθηκε στο πλαίσιο των σχετικών διερευνήσεων. Για την υπόψη διατομή υπολογίστηκαν κρίσιμα εντατικά μεγέθη για τυπικά αεροσκάφη που εξυπηρετεί το οδόστρωμα με χρήση προσομοιώματος ελαστικών επάλληλων στρώσεων και ειδικότερα του λογισμικού APSA [35]. Για τη διερευνητική εφαρμογή της μεθόδου ALI-APCI στο υπόψη οδόστρωμα, έγινε ο υπολογισμός των αντιστοίχων μεγεθών με βάση το δείκτη ALI. Για λόγους συμβατότητας και συγκρισιμότητας των αποτελεσμάτων, διατηρήθηκε το προσομοίωμα και οι παράμετροι μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών του οδοστρώματος που προέκυψαν από τις αναλύσεις των μη καταστρεπτικών δοκιμών [35].

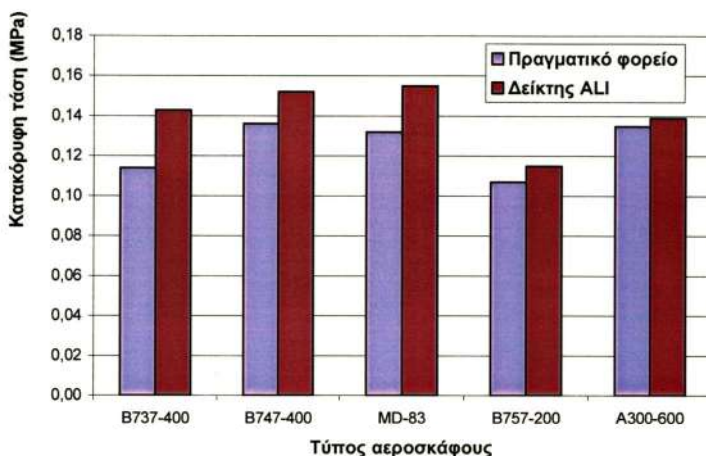


Σχήμα 6.7: Στατικό προσομοίωμα του οδοστρώματος του διαδρόμου του ΚΑΡΔ.

Στα σχήματα 6.8 και 6.9 παρουσιάζονται διαγράμματα από τους υπολογισμούς των εντατικών μεγεθών. Όπως φαίνεται και για τις δύο κρίσιμες θέσεις, η εκτίμηση και κατάταξη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών με βάση το δείκτη ALI πρακτικά δεν διαφέρει από αυτή του πραγματικού φορείου, το οποίο υποδηλώνει ότι ο υπόψη δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια για τη διαχείριση του αεροδρομίου.



Σχήμα 6.8: Μείγιστη οριζόντια τάση στον πυθμένα της ενοποιημένης ασφαλτικής στρώσης του οδοστρώματος του διαδρόμου του ΚΑΡΔ.



Σχήμα 6.9: Μέγιστη κατακόρυφη τάση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος του διαδρόμου του ΚΑΡΔ.

Συνεπώς, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που αναλύθηκε στην παράγραφο 6.2.1 οι αρχές του αεροδρομίου μπορούν να αξιοποιήσουν το δείκτη ALI για την κατάταξη και διαχείριση των οδοστρώματων όπως και για την εκτίμηση των επιπτώσεων από ενδεχόμενες μεταβολές της κυκλοφορίας. Σχετικές διερευνήσεις και προτάσεις για το υπόψη οδόστρωμα έχουν πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της συνεργασίας του Τομέα ΜΣΥ του ΕΜΠ και της ΥΠΑ [49].

6.3.2 Εφαρμογή σε Οδόστρωμα του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών (ΔΑΑ) «Ελευθέριος Βενιζέλος»

Το διεθνές αεροδρόμιο Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος» (σχήμα 6.10) είναι ένα από τα μεγαλύτερα και σημαντικότερα αεροδρόμια της νοτιοανατολικής Ευρώπης το οποίο ετησίως εξυπηρετεί περισσότερους από 15 εκατομμύρια επιβάτες και 120 χιλιάδες τόνους εμπορευμάτων και ταχυδρομείου. Η στρατηγική θέση του αεροδρομίου το καθιστά ένα φυσικό σημείο διασύνδεσης τριών ηπείρων και προσφέρει στην Ευρώπη αλλά και Διεθνώς ένα κόμβο διασύνδεσης μετακινήσεων από και προς την Ανατολική Μεσόγειο, τη Μέση Ανατολή, τη Βαλκανική Χερσόνησο και την Αφρική.

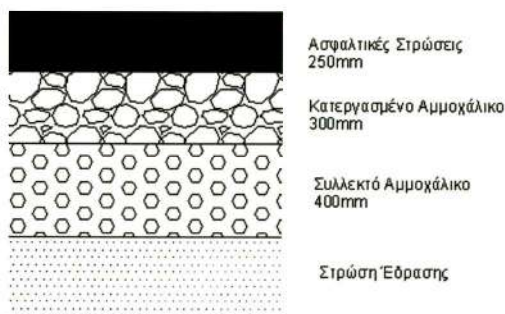


Σχήμα 6.10: Αποψη του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών «Ελευθέριος Βενιζέλος».

Όπως γίνεται αντιληπτό, η συνεχής αύξηση και οι συχνές μεταβολές της μεταφορικής κίνησης, η οποία σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από τις διακυμάνσεις της τουριστικής κίνησης, δίνουν ένα πρόσθετο ενδιαφέρον στην εκτίμηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών στα οδοστρώματα του ΔΑΑ. Για τους λόγους αυτούς, και αξιοποιώντας στοιχεία που διατέθηκαν στο πλαίσιο της συνεργασίας του ΔΑΑ με τον Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του ΕΜΠ έγινε έλεγχος καταλληλότητας του δείκτη ALI με για το οδόστρωμα των διαδρόμων του υπόψη αεροδρομίου.

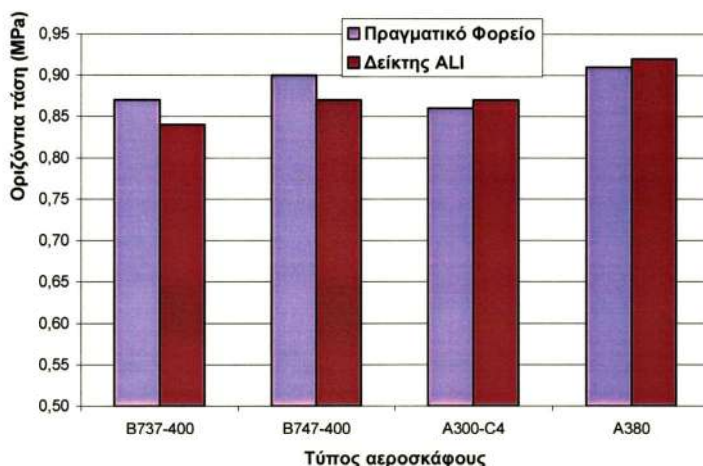
Ο ΔΑΑ έχει δύο διαδρόμους το μεγαλύτερο μέρος των οποίων καλύπτεται από ασφαλικό οδόστρωμα το οποίο αποτελείται από τις ακόλουθες στρώσεις: ασφαλική στρώση πάχους 250mm, στρώση βάσης από αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο συνολικού πάχους 300mm, υπόβαση από συλλεκτό αμμοχάλικο πάχους 400mm και τη στρώση έδρασης απείρου πάχους με Καλιφορνιακό δείκτη φέρουσας ικανότητας CBR 9% (σχήμα 6.11). Σύμφωνα με τη σχετική κατάταξη που προτείνεται στην διαδικασία που διερευνάται στην παρούσα διατριβή, το υπόψη οδόστρωμα ανήκει στην κατηγορία SRA (πιν. 3.5). Ακολουθώντας για τη διατομή του σχήματος 6.11 και τα φορτία των κυριότερων αεροσκαφών που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα υπολογίστηκαν οι κρίσιμες τάσεις και παραμορφώσεις αστοχίας, δηλαδή οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα της στρώσης βάσης από κατεργασμένο αμμοχάλικο. Οι υπολογισμοί έγιναν χρησιμοποιώντας προσομοιώματα τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων και την ίδια διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε και περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3. Για τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών των επιμέρους στρώσεων χρησι-

μποιήθηκαν στοιχεία από επιτόπου μη καταστρεπτικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ [39].



Σχήμα 6.11: Το οδόστρωμα των διαδρόμων του ΔΑΑ.

Ακολούθως, με χρήση του δείκτη ALI υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα μεγέθη τα οποία παρουσιάζονται στο σχήμα 6.12. Όπως προκύπτει από τη σύγκριση και σε αυτή την περίπτωση όπου για τη βάση του οδοστρώματος έχει χρησιμοποιηθεί στρώση από κατεργασμένο αμμοχάλικο, ο δείκτης ALI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μία πολύ ικανοποιητική εκτίμηση της σχετικής επίδρασης του αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα.



Σχήμα 6.12: Μείγιστη οριζόντια τάση στον πυθμένα της στρώσης από κατεργασμένο αμμοχάλικο για το οδόστρωμα του διαδρόμου του ΔΑΑ.

Σε επόμενο στάδιο πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική διερεύνηση της καταλληλότητας της μεθόδου ALI-APCI για τον έλεγχο επάρκειας της φέρουσας ικανότητας και την υποστήριξη της διαχείρισης των οδοστρωμάτων του ΔΑΑ. Με βάση τα κυκλοφοριακά στοιχεία του αερο-

δρομίου και τα αποτελέσματα των επιτόπου μετρήσεων [39] ο δείκτης ALI των διαδρόμων του ΔΑΑ υπολογίστηκε ίσος με 0.67 με κριτήριο την εξυπηρέτηση της κυκλοφορίας έως το 2025. Με βάση το δείκτη ALI, διερευνήθηκαν διάφορα σενάρια ενδεχόμενων μεταβολών της κυκλοφορίας και των επιπτώσεων τους στο οδόστρωμα. Μεταξύ αυτών περιελήφθησαν και οι εκτιμήσεις των επιπτώσεων από την ενδεχόμενη εξυπηρέτηση νέων τύπων βαρέων αεροσκαφών όπως είναι το A380, καθώς και η συγκριτική εκτίμηση της φθοράς τους, μέσω της οποίας μπορεί επίσης να υποστηριχθεί η διαδικασία τιμολόγησης της χρήσης του αεροδρομίου. Για παράδειγμα, η σχέση 6.29 για τα MD83 και B737-400 και το A380 γράφεται ως εξής:

$$\frac{N_{MD83}}{N_{APCI}} = \frac{ALI_{MD83}}{APCI} 10^{b_1(1 - \frac{ALI_{MD83}}{APCI})} \quad (6.31)$$

$$\frac{N_{B737}}{N_{APCI}} = \frac{ALI_{B737}}{APCI} 10^{b_1(1 - \frac{ALI_{B737}}{APCI})} \quad (6.32)$$

$$\frac{N_{A380}}{N_{APCI}} = \frac{ALI_{A380}}{APCI} 10^{b_1(1 - \frac{ALI_{A380}}{APCI})} \quad (6.33)$$

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις σταθερές b_1 και b_2 (1.667, 1.205) προέρχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία [17], [21]. Από τις παραπάνω σχέσεις μπορούν να υπολογιστούν οι επιτρεπόμενες διελεύσεις και η σχετική φθορά που προκαλεί το κάθε αεροσκάφος. Επιπλέον, διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις 6.31 και 6.32 με την 6.33 μπορεί να εκτιμηθεί συγκριτικά η επίδραση τους:

$$N_{A380} \approx 1.22 * N_{MD83} \quad (6.34)$$

$$N_{A380} \approx 0.80 * N_{B737} \quad (6.35)$$

Λαμβάνοντας υπόψη και την αναλογία 1:3 λόγω της διαφοράς των φορέων των αεροσκαφών (διπλός τροχός – τριπλός άξονας του A380 έναντι διπλού τροχού), υπολογίζεται ότι στο υπόψη οδόστρωμα το A380 προκαλεί 4 φορές μεγαλύτερη φθορά από το B737-400 και 2.5 φορές μεγαλύτερη από το MD83. Σημειώνεται ότι συμπέρασμα αυτής της μορφής δεν μπορεί να εξαχθεί με χρήση της συμβατικής μεθόδου ACN-PCN.

6.3.3 Εφαρμογή σε Οδόστρωμα Στρατιωτικού Αεροδρομίου

Τα στοιχεία του υπόψη στρατιωτικού αεροδρομίου κεντρικής ευρωπαϊκής χώρας τα οποία διετέθησαν στο πλαίσιο των διεθνών δραστηριοτήτων και συνεργασιών του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ προέρχονται από μια πλήρη επιτόπου έρευνα για την αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας του. Ειδικότερα περιλαμβάνουν στοιχεία από το σχεδιασμό του οδοστρώματος και από τις επιτόπου μη καταστρεπτικές καταγραφές και δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.

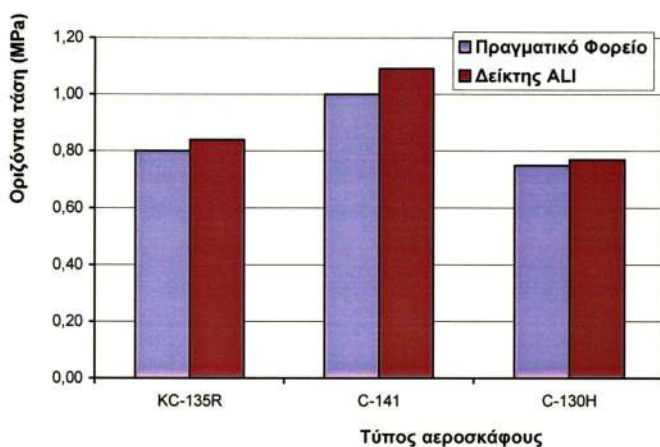
Το οδόστρωμα του διαδρόμου αποτελείται από ημιάκαμπτο οδόστρωμα με ασφαλική στρώση πάχους 195mm, στρώση βάσης από υλικό κατεργασμένο με τσιμέντο συνολικού πάχους 300mm, υπόβαση από άμμο πάχους 1500mm και τη στρώση έδρασης απείρου πάχους. Κατά τη διάρκεια του ελέγχου στο οδόστρωμα πραγματοποιήθηκαν μεταξύ άλλων δοκιμές με παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD) καθώς και εξαγωγή πυρήνων για τον προσδιορισμό της υφιστάμενης κατάστασης των υλικών και του πάχους των επιμέρους στρώσεων.

Η επεξεργασία των στοιχείων των επιτόπου μετρήσεων και καταγραφών για τον υπολογισμό των παραμέτρων συμπεριφοράς των υλικών πραγματοποιήθηκε με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4, ενώ η απόκριση του οδοστρώματος στα φορτία των αεροσκαφών προσδιορίστηκε με τα υπολογιστικά εργαλεία και προσομοιώματα των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν χαρακτηριστικοί τύποι στρατιωτικών αεροσκαφών με βάση τα (περιορισμένα για λόγους απορρήτου) στοιχεία που διετέθησαν για το αεροδρόμιο. Ο δείκτης ALI των υπόψη αεροσκαφών υπολογίστηκε με βάση τη διαδικασία του κεφαλαίου 3 και παρουσιάζεται στον πίνακα 6.1.

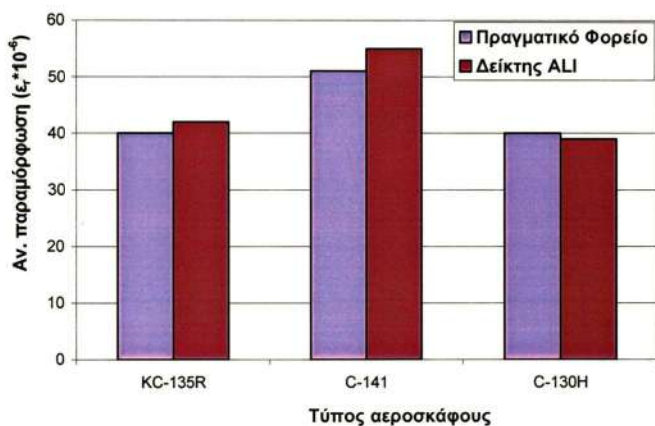
Τύπος α/φ	ALI Κατηγορία SRA	ALI Κατηγορία SRB
KC 135R	0.98	0.73
C 141	1.28	0.94
C 130H	0.86	0.67

Πίνακας 6.1: Τιμές δείκτη ALI στρατιωτικών α/φ για ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

Όπως φαίνεται από τα σχήματα 6.13 και 6.14 και στην περίπτωση των στρατιωτικών αεροσκαφών η εκτίμηση του δείκτη ALI όπου σε γενικές γραμμές τα φορτία είναι σχετικά μικρότερα αλλά τα συστήματα τροχών είναι περισσότερο σύνθετα και ασυνήθιστα σε σχέση με των πολιτικών αεροσκαφών, οι εκτιμήσεις του δείκτη ALI ως προς τα κρίσιμα μεγέθη για τον έλεγχο αστοχίας του οδοστρώματος είναι ισοδύναμες με αυτές του πραγματικού φορτίου. Το στοιχείο αυτό υποδηλώνει ότι η μέθοδος ALI-APCI μπορεί να αξιοποιηθεί και σε στρατιωτικά αεροδρόμια για τον έλεγχο επάρκειας και τη διαχείρισης της φέρουσας ικανότητας τους.



Σχήμα 6.13: Μέγιστη οριζόντια τάση στον πυθμένα της στρώσης από κατεργασμένο αμμοχάλικο σε ημιάκαμπτο οδόστρωμα διαδρόμου στρατιωτικού αεροδρομίου.



Σχήμα 6.14: Μέγιστη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα της στρώσης από κατεργασμένο αμμοχάλικο σε ημιάκαμπτο οδόστρωμα διαδρόμου στρατιωτικού αεροδρομίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Με δεδομένη τη συνεχή αύξηση της ζήτησης για αεροπορικές μεταφορές και τις προβλέψεις για περαιτέρω μεγέθυνση της στο μέλλον [1], [2], [3], η εκτίμηση σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών και ο έλεγχος επάρκειας της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων είναι απαραίτητος για την εύρυθμη λειτουργία, την ορθολογική διαχείριση και τη βελτιστοποίηση της ανταποδοτικότητας των σχετικών επενδύσεων χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια των πτήσεων. Στο πλαίσιο αυτό είναι σκόπιμη η ύπαρξη μιας απλής και αξιόπιστης διαδικασίας για τη συγκριτική κατάταξη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών και την δομική κατάταξη της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων [5].

Η μέθοδος ACN-PCN του ICAO [10] που χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα για αυτό το σκοπό έχει δεχτεί σημαντική κριτική, δεδομένου ότι παρουσιάζει σημαντικές ανακρίβειες και συχνά δυσκολίες στην εφαρμογή της. Με βάση τη διεθνή έρευνα, πρακτική και τις σχετικές διερευνήσεις που πραγματοποιηθήκαν στην παρούσα ερευνητική εργασία έχουν καταγραφεί εσφαλμένες εκτιμήσεις για τη σχετική επίδραση των αεροσκαφών σε ένα οδόστρωμα, μειωμένη αξιοπιστία του αντίστοιχου δείκτη ACN και προβλήματα εκτίμησης του δείκτη κατάταξης των οδοστρωμάτων ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που απαιτείται συνδυασμός με σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Ειδικότερα οι κυριότερες σχετικές διαπιστώσεις είναι οι εξής:

- Η εκτίμηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών με κριτήριο το δείκτη ACN δεν είναι επαρκώς αξιόπιστη. Για παράδειγμα σχετικές διερευνήσεις έδειξαν ότι αεροσκάφη με μικρότερο ACN έχουν δυσμενέστερη επίδραση στα οδοστρώματα από αεροσκάφη με μεγαλύτερο ACN.
- Το ACN και το αντίστοιχο ισοδύναμο φορτίο απλού τροχού DSWL εκτιμώνται με μόνο κριτήριο την επίδραση του αεροσκάφους στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης με αποτέλεσμα να μην λαμβάνουν υπόψη σημαντικά κριτήρια αστοχίας υλικών οδοστρωμάτων (π.χ. κόπωση ασφαλικών στρώσεων ή βάσεων από αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κονίες). Κατά συνέπεια δεν είναι κατάλληλα για τον έλεγχο επάρκειας των οδοστρωμάτων εφόσον συντρέχουν τα υπόψη ενδεχόμενα αστοχίας.
- Η υιοθέτηση και αποδοχή ορισμένων απλουστευτικών παραδοχών έμμεσα επηρεάζει την εκτίμηση του δείκτη PCN των οδοστρωμάτων ο οποίος ενδέχεται να μην είναι

σύμφωνος με τη φέρουσα ικανότητα. Για παράδειγμα τα εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα κατατάσσονται με κοινά κριτήρια ενώ στην πραγματικότητα μπορεί να έχουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά.

- Ο προσδιορισμός του δείκτη PCN οδηγεί σε αποτέλεσμα αμφιβόλου ακρίβειας και πρακτικής χρησιμότητας, δεδομένου ότι για το ίδιο οδόστρωμα η εφαρμογή διεθνώς αποδεκτών μεθόδων οδηγεί σε εντελώς διαφορετικά, μη συγκρίσιμα αποτελέσματα. Τούτο υποδηλώνει ότι στη φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος δεν αντιστοιχεί μία μοναδική τιμή PCN αλλά εξαρτάται από τη μέθοδο προσδιορισμού του περιορίζοντας την αξιοπιστία του ελέγχου επάρκειας με βάση το δείκτη και μόνο.
- Συμπερασματικά, η μέθοδος ACN-PCN μπορεί να δώσει μόνο ενδεικτική πληροφορία για τη σχετική επίδραση των αεροσκαφών και την επάρκεια της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων, τουλάχιστον στα ασφαλικά οδοστρώματα. Για το λόγο αυτό και στην πράξη δεν χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της διαχείρισής των.

Ανεξάρτητα από τις αμφιβολίες ορισμένων ερευνητών για τη σκοπιμότητα της χρήσης της, η ζήτηση της δομικής κατάταξης των οδοστρωμάτων δεν έχει μειωθεί αλλά αντιθέτως έχει αυξηθεί δεδομένου ότι αποτελεί ένα εργαλείο επικοινωνίας μεταξύ των φορέων που συμμετέχουν στις αεροπορικές μεταφορές (διαχειριστές αεροδρομίων, αεροπορική βιομηχανία, τουριστική βιομηχανία, αεροπορικές εταιρείες, μηχανικοί και τεχνικοί οδοστρωμάτων). Αναγνωρίζοντας την ανάγκη συμβολής στη δημιουργία μιας επικαιροποιημένης αλλά απλής και αξιόπιστης διαδικασίας για τον έλεγχο της συμβατότητας μεταξύ του φορτίου των αεροσκαφών και της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων, και σε συνέχεια σχετικών διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία εισάγεται και προτείνεται ένας νέος δείκτης για την κατάταξη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών στα οδοστρώματα που ονομάστηκε ALI (Aircraft Loading Index). Στο πλαίσιο διερεύνησης της αξιοπιστίας του προτεινόμενου δείκτη ALI αξιολογήθηκε η δυνατότητα του να εκφράσει τη σχετική επίδραση των αεροσκαφών σε ασφαλικά οδοστρώματα με κριτήριο τα κρίσιμα εντατικά και παραμορφωσιμικά μεγέθη των διατομών τους, όπως αυτά υπολογίζονται με χρήση αναλυτικών μεθόδων. Από τη σχετική διερεύνηση προέκυψε ότι:

- Ο δείκτης ALI είναι κατάλληλος για την εκτίμηση και κατάταξη της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών σε ασφαλικά οδοστρώματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά και δομική συμπεριφορά.
- Σε σύγκριση με το δείκτη ACN, η εκτίμηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών με κριτήριο το δείκτη ALI είναι περισσότερο αξιόπιστη.

- Ο καθορισμός της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών βασίζεται σε σύγχρονα αναλυτικά προσομοιώματα και κατά συνέπεια ο δείκτης ALI μπορεί να συνδυαστεί τόσο με κλασσικές μεθόδους σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων όσο και με εξελιγμένες υπολογιστικές μεθόδους. Επίσης μπορεί να εξελίσσεται ακολουθώντας την εξέλιξη των αναλυτικών εργαλείων και προσομοιωμάτων.

Σε επόμενο στάδιο πραγματοποιήθηκε εμβάθυνση στη διερεύνηση της αξιοπιστίας των εκτιμήσεων της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών μέσω του δείκτη ALI αξιοποιώντας στοιχεία από διεθνή πειράματα σε κλίμακα 1:1. Τα στοιχεία αυτά προέρχονται από δοκιμές οδοστρωμάτων αεροδρομίων που εκτελέστηκαν στις ΗΠΑ από την FAA (Federal Aviation Administration) σε συνεργασία με τη Boeing στην εγκατάσταση του NAPTf (National Airport Pavement Testing Facility). Ειδικότερα διερευνήθηκε η καταλληλότητα του δείκτη ALI για την εκτίμηση των κρίσιμων εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών που προκαλούνται στα οδοστρώματα από τα φορτία των αεροσκαφών σε σύγκριση με την (υπολογιστική) επίδραση του πραγματικού φορέιου και σε συνδυασμό με αντίστοιχα στοιχεία από επιτόπου καταγραφές. Από τις διερευνήσεις των πειραμάτων σε πραγματική κλίμακα προέκυψαν τα εξής:

- Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν (διαφορετικά φορτία, διατομές οδοστρωμάτων και θερμοκρασιακές συνθήκες), οι εκτιμήσεις του δείκτη ALI για τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη ήταν αντίστοιχες με αυτές των πραγματικών φορέιων τόσο για την ασφαλτική στρώση όσο και για τη στρώση έδρασης.
- Από τη σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με τα μετρημένα μεγέθη σε αρκετές περιπτώσεις προέκυψε ικανοποιητική σύγκλιση για τις κατακόρυφες τάσεις και ιδιαίτερα κατά την αρχική περίοδο φόρτισης των οδοστρωμάτων. Η σύγκλιση μεταξύ των υπολογισμένων και μετρημένων τιμών διατηρείται για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα στις περιπτώσεις των διατομών όπου η φθορά εξελίχθηκε με βραδύτερο ρυθμό

Μετά την ολοκλήρωση της διερεύνησης για το δείκτη ALI, αναπτύσσεται και προτείνεται σχετική μέθοδος ελέγχου επάρκειας της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Για το σκοπό αυτό εισάγεται ο δείκτης APCI ο οποίος εκφράζει τη φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων και μέσω κατάλληλης συγκριτικής σχέσης μεταξύ ALI και APCI μπορεί να ελέγχεται η δυνατότητα ενός οδοστρώματος να εξυπηρετήσει μία δεδομένη κυκλοφορία. Με βάση τη διερεύνηση και την εμπειρία από τις προκαταρκτικές εφαρμογές της προτεινόμενης εναλλακτικής μεθόδου ALI-APCI σε οδοστρώματα αεροδρομίων, διαπιστώνονται ορισμένα ενθαρρυντικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα όπως:

- Ο δείκτης APCI είναι κατάλληλος για την κατάταξη και τον έλεγχο επάρκειας της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων.
- Η μέθοδος ALI-APCI δεν χρειάζεται ειδική διαδικασία για την εφαρμογή της, καθώς οι σχετικοί δείκτες μπορούν να υπολογιστούν με οποιαδήποτε από τις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των οδοστρωμάτων. Σημειώνεται ότι μέσω του δείκτη APCI γίνεται μονοσήμαντη ποσοτικοποίηση της υπολογισμένης φέρουσας ικανότητας σε ένα σύστημα αναφοράς σε αντίθεση με το δείκτη PCN.
- Η μέθοδος ALI – APCI μπορεί να συμβάλει στη διαχείριση των αεροδρομίων διερευνώντας τις επιπτώσεις των μεταβολών της κυκλοφορίας στη φθορά και κατ' επέκταση στη διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων.
- Η μέθοδος ALI – APCI μπορεί να δώσει πληροφορίες και εκτιμήσεις για την επάρκεια και τις επιπτώσεις της χρήσης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων από νέους τύπους βαρέων αεροσκαφών όπως το A380.

7.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Οι δείκτες ALI και APCI που εισάγονται στην παρούσα εργασία θα μπορούσαν να επεκταθούν και να αξιοποιηθούν για περαιτέρω ερευνητική δραστηριότητα στην περιοχή των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Στο πλαίσιο αυτό προτείνεται:

- Να διερευνηθεί η επέκταση της μεθόδου ALI-APCI στα δύσκαμπτα οδοστρώματα με βάση την προκαταρκτική διερεύνηση της ανακοίνωσης [46]. Επίσης έχει ενδιαφέρον και η επέκταση της μεθόδου σε σύνθετες διατομές οδοστρωμάτων, καθώς και σε οδοστρώματα με νέα ή ανακυκλωμένα υλικά.
- Να πραγματοποιηθεί έλεγχος της μεταβλητότητας των δεικτών ALI και APCI στην περίπτωση χρήσης διαφορετικών αναλυτικών προσομοιωμάτων (π.χ. θεώρηση μη ελαστικής συμπεριφοράς υλικών) ή/και κριτηρίων αστοχίας υλικών.
- Να εφαρμοστεί πιλοτικά η προτεινόμενη μέθοδος σε υφιστάμενο αεροδρόμιο για επαρκές χρονικό διάστημα στο πλαίσιο της επαλήθευσης και βελτιστοποίησης της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

- [1] Airport Council International (ACI) Europe, (2004). "Study on the Use of Airport Capacity". ACI Europe Study, pp. 1–15, Brussels, Belgium.
- [2] Gillen D., (2007). "Comparative Political Economy of Airport Infrastructure in the European Union: Evolution of Privatization, Regulation and Slot Reform". *Working Paper 2007-6, Centre for Transportation Studies, Sauder School of Business, University of British Columbia, Vancouver, BC.*
- [3] "Supporting Platform for Airport Decision-making and Efficiency Analysis", (2006). Final Report of SPADE project, European Union DG-TREN, Brussels.
- [4] Sandhawalia, P. S. (1988). "Evaluation of airport pavements, part I. Classification, Rating and Evaluation." *Airport Forum Vol 3.*
- [5] Gendreau M. and Soriano, P. (1998) "Airport Pavement Management Systems: An Appraisal of Existing Methodologies", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol 32 no 3.
- [6] Αμπακούμκιν Κ. (1990). "Αεροδρόμια". Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- [7] ICAO. (1965). "Aerodrome manual (Part 2 - physical characteristics)". International Civil Aviation Organization, Montreal.
- [8] Λοΐζος Α. (2007). «Οδοστρώματα Αεροδρομίων». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [9] Directorate of Civil Engineering Services. (2003). "A Guide to Airfield Pavement Design and Evaluation", Property Services Agency, Department of the Environment, United Kingdom.
- [10] ICAO. (1983). "Aerodrome Design Manual (Part 3 – Pavements)", 2nd edition, International Civil Aviation Organization, Montreal.
- [11] Kawa I., Hayhoe F. G. (2002). "Development of a Computer Program to Compute Pavement Thickness and Strength". *Proceedings, FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, New Jersey.
- [12] W. I. Turbull, Engineer Chief and R. G. Ahlvin. (1956). "Mathematical Expression of the C.B.R. (California Bearing Ratio) Relations", Flexible Pavements Branch, Waterways Experiment, Station Corps of Engineers, Vicksburg Mississippi USA.
- [13] US Army Engineers, Waterways Experiment Station. (1977). "Procedures for Development of CBR Design Curves". Instructions report S-77.
- [14] Loizos, A., Charonitis, G. and Chasiotou I. (2000). "Classification of Airport Pavements: A Simple Methodology" *Journal of Public Works Management & Policy*, Vol 5, No 2.

- [15] Westergaard, H.M. (1927). "Theory of Concrete Pavement Design". *Proceedings, Highway Research Board*, Washington D.C.
- [16] Westergaard, H.M. (1948). "New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields". *Transactions*, ASCE.
- [17] Balbo, J.T. and Cintra J.P. (1996). "Fatigue Verification Criteria for Semi-Rigid Pavements". *Proc., 2nd Conf. on Asphalt Mixtures and Pavements*, AUTH, Thessaloniki
- [18] Williams, R.I.T. (1986). "Cement – Treated Pavements: Materials, Design and Construction". Elsevier, London.
- [19] Texas Department of Transportation (TxDOT). (2004). "Pavement Design Manual". Austin.
- [20] European Long-Life Pavement Group (ELLPAG). (2006). "A Guide to the use of Long-Life Semi-Rigid Pavements". Final Report, FEHRL, Brussels.
- [21] PIARC, World Road Association. (2001). "Semi-Rigid Pavements". Paris.
- [22] Thompson M. R. (1994). "High Strength Stabilized Base (HSSB) Thickness Design Procedure" *Preprint Paper No 940135, Transportation Research Board 73rd Annual Meeting*. Washington DC.
- [23] Centre for Pavement Engineering Education (CPEE) (2001). "Insitu Stabilisation. SEC 608 Unit Guide and Study Guide". Deakin University in conjunction with the Centre for Pavement Engineering Education (CPEE). Kew.
- [24] Λοΐζος Α. (2008). "Σημειώσεις Οδοστρωμάτων". Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [25] Λοΐζος Α., Αμπακούμκιν Κ. και Χαρωνίτης Γ. (2001) "Εναλλακτικές Δυνατότητες Κατάταξης Ασφαλτικών Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων με Βάση τη Διεθνή Εμπειρία", 3^ο Διεθνές Συνέδριο Ασφαλτικών Μιγμάτων και Οδοστρωμάτων, Θεσ/νικη.
- [26] Loizos A., Abacoumkin C. and Charonitis G. (2002). "Inconsistencies in Rating the Effect of Aircraft Load and Reporting the Bearing Capacity of Pavements". *Proceedings, 6th International Conference of Roads, Railways and Airports*, Lisbon.
- [27] Loizos A. and Charonitis G. (2005). "Investigation of Classification Parameters and Assumptions for Rigid and Flexible Airfield Pavements", *Proceedings, 7th International Conference of Roads, Railways and Airports*, Trondheim.
- [28] Γκαζέτας Γ. (1996), "Σημειώσεις Εδαφομηχανικής". Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [29] Huang, Y.H. (1973). "Critical Tensile Strain in Asphalt Pavements", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE Vol 99, No TE3.

- [30] Λοΐζος Α., Αμπακούμκιν Κ. και Χαρωνίτης Γ., (1998). "Διερεύνηση της Μεθόδου ACN – PCN στο Πλαίσιο της Δομικής Αξιολόγησης Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων", *Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Τόμος 1 τεύχος 2*.
- [31] Gervais E. L., Hayhoe G.F., Garg N. (2003). "Towards a Permanent ACN Solution for 6-Wheel Landing Gear Aircraft". *ASCE 2003 Airfield Pavement Speciality Conference*, Las Vegas, Nevada, USA.
- [32] Loizos A., and Charonitis G. (2002). "PCN Estimation at Airfield Pavements". *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol 3. No 4.
- [33] FAA. (2006). "Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN". Advisory Circular AC 50/5335-5A, Federal Aviation Administration, Washington DC.
- [34] STBA (2001). "Instruction Technique Sur Les Aérodomes Civils". The Airports and Airforce Base Engineering (STBA), Paris. (στη Γαλλική)
- [35] ΕΜΠ. (1998). «Ανάπτυξη Συστήματος Αξιολόγησης Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων στο Πλαίσιο της Διαδικασίας Συντήρησης των», Ερευνητικό Πρόγραμμα ΥΠΑ - ΕΜΠ, 1^η και 2^η (τελική) Έκθεση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής.
- [36] Charonitis G. and Loizos A. (2007) "Aircraft Load Rating and Pavement Structural Reporting Based on Analytical Models". *Proc., International Conference on the Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials*, Athens.
- [37] UFC, (2001). "Airfield Pavement Evaluation". Report No 3-260-3. Unified Facilities Criteria - Engineer Research and Development Center (ERDC). Mississippi.
- [38] NTUA, (2006). *Preliminary Investigation of the Athens International Airport (AIA) Runway Pavements*. Summary Report, Department of Transportation Planning and Engineering, National Technical University of Athens.
- [39] Loizos A., Charonitis G. and Armeni A. (2007). "Investigation of semi-rigid airport pavement bearing capacity using computational tools". *Proceedings, int. conf. on the Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials, Vol 1, 401-409*. Athens.
- [40] Gervais E.L. (2005). "What Does an Aircraft Expect From the Pavement?". Keynote Lecture, *Proceedings, 7th International Conference of Roads, Railways and Airports*, Trondheim.
- [41] Gervais E.L. (2003). "A Manufacturer's Point of View of ACN / PCN". *Proceedings of the XXIIInd PIARC World Road Congress*. Durban.
- [42] Thompson M., Gomez-Ramirez F., Gervais E., Roginski M., (2006). "Concepts for Developing a Mechanistic-Empirical Based ACN Procedure for New Generation Aircraft 10th International Conference on Asphalt Pavements (ISAP), Québec.

- [43] Fabre C. (2005) "New Large Aircraft Pavement Loading: A Manufacturer Answer, The A380 Pavement Experimental Programme". *Proceedings, 1st European Airport Pavement Workshop*, Amsterdam.
- [44] Loizos, A. and Charonitis, G. (1999). "Alternative aircraft loading index for pavement structural analysis" *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 125(3).
- [45] Loizos A. and Charonitis G. (2005). "Alternative Procedure for the Structural Classification of Airport Pavements". *Proceedings, 1st European Workshop on Airport Pavements*, Amsterdam.
- [46] Loizos A., Charonitis, G. and Katsoulas P. (2006). "Rating the Aircraft Load and Reporting the Bearing Capacity of Rigid Airport Pavements" *Int. J. of Road Materials and Pavement Design*, 7(3).
- [47] Washington S., Karlaftis M. and Mannering F. (2003). *"Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis"*. Chapman & Hall / CRC Press.
- [48] Τσαμασφύρος Γ., (1991). *"Μηχανική Παραμορφωσίμων Σωμάτων Ι"*, Εκδόσεις Συμμετρία Αθήνα.
- [49] Loizos A. and Charonitis, G. (2004). "Bearing Capacity and Structural Classification of Flexible Airport Pavements", *Journal of Transportation Engineering ASCE*, Vol. 130, No. 1.
- [50] Loizos, A. and Charonitis, G. (2001). "An Alternative Proposal for Reporting the Bearing Capacity of Flexible Airfield Pavements". *Int. J. of Pavement Engineering*, 2(1).
- [51] Scarpas, A., Blaauwendraad, J., de Bondt, A.H. and Molenaar A.A.A. (1993). "CAPA: A Modern Tool For The Analysis And Design Of Pavements". *Proceedings, 2nd International RILEM Conference on the Reflective Cracking In Pavements – State Of The Art And Design Recommendations*, Liege,
- [52] HKS (2001). *"ABAQUS Theory Manual"*. Pawtucket
- [53] Noran Engineering (2006). *"Nastran Finite Element Analysis and Simulation Software"*. Westminster.
- [54] AMADEUS. (2000). *"Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures"*. Final Report. European Union, Brussels.
- [55] Thompson M.R. & Garg N. (1999). *"Wheel Load Interaction: Critical Airport Pavement Responses"*. COE Report No. 7. University of Illinois, Urbana.
- [56] <http://www.airporttech.tc.faa.gov/naptf/> (08/05/2008)
- [57] Hayhoe, F.G., (2004). "Traffic Testing Results from the FAA's National Airport Pavement Test Facility". *Proceedings, 2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing*, Minneapolis, Minnesota.

- [58] Gopalakrishnan K. and Thompson M. R. (2004). "Comparative Effect of B777 and B747 Trafficking on Elastic Moduli of NAPTF Flexible Pavements", *FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, New Jersey.
- [59] McQueen R.D., Marsey W. and Arze J.M. (2001). "Analysis of Nondestructive Test Data on Flexible Pavements Acquired at the National Airport Pavement Test Facility" *Proceedings of the 2001 ASCE Airfield Pavement Specialty Conference*, Chicago, Illinois.
- [60] FAA (2004). "Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements", Advisory Circular No 150/5370-11A, Federal Aviation Administration, Washington DC.
- [61] Irwin, L.H. (1993). "Instructional Guide for Back-Calculation and the Use of MODCOMP 3". Cornell University Local Roads Program, CLRP Publication No. 93-6, Cornell University, Ithaca N.Y.
- [62] Groenendijk, J. (1998). "Accelerated Testing and Surface Cracking of Asphaltic Concrete Pavements," PhD Dissertation, Delft University of Technology, Netherlands.
- [63] Bhattacharjee, S., Gould, J. S., Mallick, R. B., and Hugo, F. (2004). "Use of MMLS3 Scaled Accelerated Loading for Fatigue Characterization of Hot Mix Asphalt HMA in the laboratory," *Proceedings of the Second International Conference on Accelerated Pavement Testing*, University of Minnesota, Minneapolis, MN.
- [64] Garg N. and Hayhoe, F.G. (2001). "Asphalt Concrete Strain Responses at High Loads and Low Speeds at the National Airport Pavement Test Facility (NAPTF)" *Proceedings of the 2001 ASCE Airfield Pavement Specialty Conference*, Chicago, IL.
- [65] Gomez-Ramirez, F. M., and Thompson, M. R. (2002). "Characterizing Aircraft Multiple Wheel Load Interaction for Airport Flexible Pavement Design," FAA COE Research Report No. 20, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
- [66] Weinmann, T. L., Lewis, A. E., and Tayabji, S. D. (2004). "Pavement Sensors used at Accelerated Pavement Test Facilities," *Proceedings of the Second International Conference on Accelerated Pavement Testing*, University of Minnesota, Minneapolis, MN.
- [67] Gopalakrishnan K. and Thompson M. R. (2006). "Effect of Dynamic Aircraft Gear Loads on Asphalt Concrete Strain Responses". *Journal of ASTM International*, Vol. 3, No. 8.
- [68] "In Situ Stress-Strain, Moisture and Temperature Measurement", (2002) Workshop Proceedings, 6th International Conference of Roads, Railways and Airports, Lisbon.
- [69] Kachanov, L. M. (1986). "Introduction to Continuum Damage Mechanics", Mechanics of Elastic Stability, Martinus Nijhoff Publishers, 1986.
- [70] Ullidtz P. (1994), "Prediction of Load Associated Damage in Asphalt Layers", 4th International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Minneapolis, Minnesota.

- [71] Ullidtz P., Battiato G., Larsen B.K., Stubstad R.N., (1987), "Verification of the Analytical - Empirical Method of Pavement Evaluation Based on FWD Testing", Proceedings, Volume One, 6th International Conference on Asphalt Pavements, Ann Arbor.
- [72] Miner, M.A., (1945) "Cumulative Damage in Fatigue", *Journal of Applied Mechanics Vol 12*.
- [73] Brown S. F., (1978). "*Material Characteristics for Analytical Pavement Design*". P.S. Pell ed., Applied Science Publishers Ltd, London.
- [74] Tseng, K. H., and Lytton, R. L. (1990). "Fatigue damage properties of asphaltic concrete pavements." *Transp. Res. Rec. 1286, Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C.
- [75] Jayawickrama, P. W., Smith, R. E., Lytton, R. L., and Tirado, M. R. (1987). "*Development of asphalt concrete overlay design equations, Vol. 1—Development of design procedures.*" *Final Rep. No. FHWA/RD-86*, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
- [76] PIARC. (1987). "*Technical Committee on Flexible Roads Report No 8*", XVIII World Road Congress, Brussels.
- [77] Danish Road Directorate. (2004). "*Mechanistic Design of Semi-Rigid Pavements*". VI Report 138. Copenhagen.
- [78] Judycki J. (1997). "Comparison of Fatigue Criteria for Flexible and Semi Rigid Pavements. Proceedings", *Int. Conf. on Asphalt Pavements Vol II*, Ann Arbor.
- [79] Corte J-F. and Goux M-T. (1996) "Design of Pavement Structures: The French Technical Guide". *Transportation Research Record 1539*, Washington DC.

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ - ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

A : επιφάνεια

ϵ : ανηγμένη παραμόρφωση

E : μέτρο ελαστικότητας

ϵ_r : ανηγμένη παραμόρφωση στην οριζόντια διεύθυνση

ϵ_z : ανηγμένη παραμόρφωση στην κατακόρυφη διεύθυνση

K_1, K_2 : σταθερές νόμου αστοχίας ασφαλικών υλικών – καθορίζονται από εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές και πειράματα

σ : τάση

σ_0 : αρχική (φαινόμενη) τάση

σ_a : πραγματική (ενεργός) τάση

σ_r : τάση στην οριζόντια διεύθυνση

σ_z : τάση στην κατακόρυφη διεύθυνση

a, b : σταθερές νόμου αστοχίας στρώσης έδρασης – καθορίζονται από εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές και πειράματα

ACN : Aircraft Classification Number

ALI : Aircraft Loading Index

APCI : Airport Pavement Capacity Index

b_1, b_2 : σταθερές νόμου αστοχίας αμμοχαλικών κατεργασμένων με τσιμέντο – καθορίζονται από εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές και πειράματα

C_1, C_2 : σταθερές διόρθωσης για την ισοδυναμία μεταξύ απλού τροχού και πραγματικού φορείου

CBR : California Bearing Ratio

d : φθορά

d_d : μέγιστη δυνατή φθορά (αστοχία υλικού)

DSWL : Derived Single Wheel Load (μέθοδος ACN – PCN)

FA, FB : εύκαμπτο οδόστρωμα κατηγορίας A, B

HWD : Heavy Weight Deflectometer – Παραμορφωσίμετρο πύπτοντος βάρους (βαρέως τύπου)

LCG : Load Classification Number

LCN : Load Classification Number

N_d : μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων φόρτισης

p : πίεση επιβαλλόμενου φορτίου

R : ακτίνα επιβαλλόμενου φορτίου

PCN : Pavement Classification Number

RMSE : Root Mean Square of Errors

SRA, SRB : ημιάκαμπτο οδόστρωμα κατηγορίας A, B

t_f : πάχος αναφοράς (μέθοδος ACN – PCN)

N : αριθμός επαναλήψεων φόρτισης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

Γενικές Διατάξεις Κύριων Φορείων:



(από αριστερά προς δεξιά): μονός τροχός, διπλός τροχός, διπλός τροχός με διπλό άξονα, διπλός τροχός με τριπλό άξονα

Τύπος α/φους: B737-400 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός a (mm): 780 b (mm): - c (mm): - Ακτίνα τροχού (mm): 198 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.30	Τύπος α/φους: A300-B4 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός με διπλό άξονα a (mm): 978 b (mm): 1524 c (mm): - ακτίνα τροχού (mm): 209 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.42
Τύπος α/φους: B727-200 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός a (mm): 863 b (mm): - c (mm): - Ακτίνα τροχού (mm): 231 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.15	Τύπος α/φους: B747-200C Τύπος φορείου: Διπλός τροχός με διπλό άξονα a (mm): 1118 b (mm): 1468 c (mm): - ακτίνα τροχού (mm): 218 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.39

Τύπος α/φους: A300-C4 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός με διπλό άξονα a (mm): 978 b (mm): 1524 c (mm): - ακτίνα τροχού (mm): 228 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.24	Τύπος α/φους: A300-600 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός με διπλό άξονα a (mm): 930 b (mm): 1400 c (mm): - ακτίνα τροχού (mm): 222 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.24
Τύπος α/φους: MD-83 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός a (mm): 715 b (mm): - c (mm): - ακτίνα τροχού (mm): 206 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.34	Τύπος α/φους: B 737-800 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός a (mm): 860 b (mm): - c (mm): - ακτίνα τροχού (mm): 224 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.41
Τύπος α/φους: B777-300 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός με τριπλό άξονα a (mm): 1400 b (mm): 1450 c (mm): 1450 ακτίνα τροχού (mm): 254 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.48	Τύπος α/φους: B787-8 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός με διπλό άξονα a (mm): 1300 b (mm): 1500 c (mm): - ακτίνα τροχού (mm): 262 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.52
Τύπος α/φους: A 380 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός με τριπλό άξονα a (mm): 1530 b (mm): 1700 c (mm): 1700 ακτίνα τροχού (mm): 216 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.50	Τύπος α/φους: NAPTf DT1 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός με διπλό άξονα a (mm): 1473 b (mm): 1118 c (mm): - ακτίνα τροχού (mm): 221 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.30

Τύπος α/φους: NAPTF TR1 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός με τριπλό άξονα a (mm): 1370 b (mm): 1450 c (mm): 1450 ακτίνα τροχού (mm): 221 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.30	Τύπος α/φους: NAPTF DT2 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός με διπλό άξονα a (mm): 1473 b (mm): 1118 c (mm): - ακτίνα τροχού (mm): 233 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.30
Τύπος α/φους: NAPTF TR2 Τύπος φορείου: Διπλός τροχός με τριπλό άξονα a (mm): 1370 b (mm): 1450 c (mm): 1450 ακτίνα τροχού (mm): 233 Πίεση Ελαστικών (MPa): 1.30	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3

Πίνακας Π2.1α: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφαλικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο (κρίσιμη οριζόντια τάση στον πυθμένα (κάτω ίνα) των ασφαλικών στρώσεων)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
FA	5000/120	500/500	150	2.18	2.21	-0.03	2.13	2.13	0.00	2.41	2.41	0.00	2.59	2.67	-0.08	2.46	2.43	0.03
FA	4000/150	400/500	100	2.08	2.1	-0.02	2.02	2.03	-0.01	2.28	2.3	-0.02	2.5	2.55	-0.05	2.32	2.32	0.00
FA	7000/150	400/500	100	3.12	3.11	0.01	3.01	3	0.01	3.4	3.39	0.01	3.76	3.76	0.00	3.42	3.42	0.00
FA	7000/150	300/500	60	3.78	3.72	0.06	3.64	3.59	0.05	4.13	4.06	0.07	4.58	4.5	0.08	4.1	4.09	0.01
FA	5000/150	350/500	80	2.74	2.74	0.00	2.64	2.64	0.00	2.99	2.99	0.00	3.3	3.31	-0.01	3.02	3.01	0.01
FA	3000/150	500/400	100	1.36	1.39	-0.03	1.33	1.34	-0.01	1.52	1.51	0.01	1.63	1.68	-0.05	1.53	1.53	0.00
FA	10000/120	400/500	120	4.37	4.36	0.01	4.22	4.21	0.01	4.74	4.76	-0.02	5.23	5.28	-0.05	4.83	4.8	0.03
FA	8000/150	250/500	50	4.51	4.39	0.12	4.34	4.24	0.10	4.94	4.79	0.15	5.49	5.31	0.18	4.85	4.83	0.02
FA	4500/120	400/400	80	2.56	2.58	-0.02	2.5	2.5	0.00	2.83	2.82	0.01	3.06	3.13	-0.07	2.87	2.84	0.03
FA	4500/150	300/500	60	2.85	2.84	0.01	2.75	2.75	0.00	3.12	3.11	0.01	3.44	3.44	0.00	3.14	3.13	0.01
FA	7500/150	350/400	90	3.68	3.64	0.04	3.55	3.51	0.04	4.04	3.97	0.07	4.48	4.4	0.08	4	4	0.00
FA	6000/170	400/500	120	2.59	2.58	0.01	2.5	2.5	0.00	2.83	2.82	0.01	3.14	3.12	0.02	2.84	2.84	0.00
FA	9500/120	350/500	80	4.67	4.64	0.03	4.51	4.49	0.02	5.08	5.07	0.01	5.61	5.62	-0.01	5.14	5.11	0.03
FA	8000/100	400/500	150	3.99	4.01	-0.02	3.89	3.87	0.02	4.35	4.38	-0.03	4.73	4.85	-0.12	4.48	4.41	0.07
FA	6500/120	400/400	180	3.3	3.31	-0.01	3.21	3.2	0.01	3.59	3.61	-0.02	3.92	4	-0.08	3.69	3.64	0.05
FA	5000/150	500/400	200	2.12	2.13	-0.01	2.05	2.06	-0.01	2.32	2.33	-0.01	2.53	2.58	-0.05	2.36	2.34	0.02
FA	3500/170	600/300	150	1.4	1.41	-0.01	1.36	1.36	0.00	1.56	1.54	0.02	1.7	1.71	-0.01	1.56	1.56	0.00
FA	6000/140	350/500	100	3.17	3.17	0.00	3.07	3.06	0.01	3.45	3.46	-0.01	3.81	3.84	-0.03	3.5	3.49	0.01
FA	5500/130	250/400	70	4.04	4.02	0.02	3.9	3.88	0.02	4.41	4.39	0.02	4.87	4.86	0.01	4.43	4.42	0.01
FB	5000/200	400/400	100	2.19	2.18	0.01	2.1	2.26	-0.16	2.42	2.42	0.00	2.69	2.69	0.00	2.36	2.36	0.00
FB	6500/250	300/500	60	2.47	2.35	0.12	2.26	2.43	-0.17	2.68	2.6	0.08	3.02	2.9	0.12	2.55	2.54	0.01
FB	8000/200	500/500	120	2.44	2.43	0.01	2.34	2.52	-0.18	2.69	2.69	0.00	3	3	0.00	2.63	2.63	0.00
FB	6500/250	400/500	160	1.92	1.93	-0.01	1.86	2	-0.14	2.14	2.14	0.00	2.4	2.39	0.01	2.04	2.09	-0.05
FB	3000/250	300/500	80	1.52	1.53	-0.01	1.47	1.58	-0.11	1.68	1.7	-0.02	1.88	1.89	-0.01	1.64	1.65	-0.01
FB	10000/180	300/500	90	3.81	3.78	0.03	3.64	3.91	-0.27	4.22	4.18	0.04	4.7	4.66	0.04	4.04	4.08	-0.04
FB	3000/300	250/300	60	1.63	1.58	0.05	1.52	1.64	-0.12	1.81	1.75	0.06	2.04	1.95	0.09	1.69	1.71	-0.02
FB	3500/230	300/500	70	1.82	1.82	0.00	1.75	1.88	-0.13	2.01	2.01	0.00	2.24	2.24	0.00	1.96	1.96	0.00
FB	4000/200	300/400	90	2.23	2.23	0.00	2.15	2.31	-0.16	2.47	2.47	0.00	2.74	2.76	-0.02	2.41	2.41	0.00

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
FB	4000/200	600/300	180	1.45	1.45	0.00	1.4	1.5	-0.10	1.61	1.61	0.00	1.78	1.79	-0.01	1.59	1.57	0.02
FB	7500/180	700/400	120	2.19	2.16	0.03	2.08	2.24	-0.16	2.41	2.4	0.01	2.67	2.67	0.00	2.38	2.34	0.04
FB	6000/270	350/500	120	1.87	1.86	0.01	1.79	1.92	-0.13	2.08	2.06	0.02	2.34	2.29	0.05	1.96	2.01	-0.05
FB	5000/200	400/600	100	2.03	2.03	0.00	1.96	2.1	-0.14	2.23	2.25	-0.02	2.47	2.51	-0.04	2.21	2.2	0.01
FB	5500/250	400/500	150	1.78	1.79	-0.01	1.72	1.85	-0.13	1.97	1.98	-0.01	2.21	2.21	0.00	1.89	1.93	-0.04
FB	8500/200	350/500	80	3.08	3.03	0.05	2.92	3.14	-0.22	3.4	3.36	0.04	3.8	3.74	0.06	3.27	3.28	-0.01
FB	8500/200	250/500	50	3.73	3.57	0.16	3.44	3.7	-0.26	4.08	3.96	0.12	4.56	4.41	0.15	3.88	3.86	0.02
FB	7000/280	700/300	200	1.51	1.5	0.01	1.45	1.56	-0.11	1.69	1.67	0.02	1.89	1.86	0.03	1.58	1.62	-0.04
FB	4000/220	500/500	120	1.45	1.45	0.00	1.4	1.5	-0.10	1.6	1.61	0.01	1.77	1.79	-0.02	1.58	1.57	0.01
FB	3000/250	300/500	90	1.51	1.52	-0.01	1.46	1.57	-0.11	1.67	1.68	-0.01	1.86	1.87	-0.01	1.62	1.64	-0.02
FA	3000/150	250/500	50	2.42	2.43	-0.01	2.34	2.35	-0.01	2.65	2.66	-0.01	2.92	2.95	-0.03	2.68	2.68	0.00
FA	4000/150	200/500	40	3.44	3.4	0.04	3.32	3.29	0.03	3.76	3.72	0.04	4.16	4.12	0.04	3.75	3.75	0.00
FA	6500/150	250/500	60	3.96	3.9	0.06	3.82	3.77	0.05	4.33	4.26	0.07	4.81	4.72	0.09	4.29	4.29	0.00
FA	5000/160	350/500	100	2.61	2.61	0.00	2.52	2.52	0.00	2.85	2.85	0.00	3.15	3.16	-0.01	2.88	2.88	0.00
FB	2500/200	250/400	60	1.9	1.89	0.01	1.83	1.82	0.01	2.1	2.1	0.00	2.32	2.33	-0.01	2.06	2.04	0.02
FB	5000/300	200/300	40	2.46	2.2	0.26	2.38	2.13	0.25	2.64	2.44	0.20	2.99	2.72	0.27	2.5	2.38	0.12
FB	10000/200	250/300	70	4.1	4	0.10	3.94	3.85	0.09	4.61	4.43	0.18	5.16	4.93	0.23	4.27	4.32	-0.05
FB	5000/200	400/400	80	2.25	2.23	0.02	2.16	2.15	0.01	2.48	2.47	0.01	2.76	2.75	0.01	2.42	2.41	0.01
FB	8000/180	500/300	170	2.78	2.79	-0.01	2.68	2.69	-0.01	3.08	3.09	-0.01	3.42	3.44	-0.02	3	3.01	-0.01
FB	7000/250	400/300	120	2.25	2.22	0.03	2.15	2.14	0.01	2.52	2.46	0.06	2.83	2.74	0.09	2.35	2.4	-0.05

Επεξηγήσεις στηλών:

- 1: Κατηγορία Οδοστρώματος
- 2: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)/Πάχος Ασφαλτικών Στρώσεων (mm)
- 3: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)/Πάχος Βάσης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο (mm)
- 4: Μέτρο Ελαστικότητας Στρώσης Έδρασης (MPa)
- 5: Τάση (MPa) από A300-C4 (πραγματικό φορείο)
- 6: Τάση (MPa) από A300-C4 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 7: Διαφορά στηλών 5 - 6
- 8: Τάση (MPa) από A300-600 (πραγματικό φορείο)
- 9: Τάση (MPa) από A300-600 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 10: Διαφορά στηλών 8 - 9
- 11: Τάση (MPa) από MD-83 (πραγματικό φορείο)
- 12: Τάση (MPa) από MD-83 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 13: Διαφορά στηλών 11 - 12
- 14: Τάση (MPa) από B737-800 (πραγματικό φορείο)
- 15: Τάση (MPa) από B737-800 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 16: Διαφορά στηλών 14 - 15
- 17: Τάση (MPa) από B747-400 (πραγματικό φορείο)
- 18: Τάση (MPa) από B747-400 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 19: Διαφορά στηλών 17 - 18

Πίνακας Π2.1β: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφαλικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο (κρίσιμη οριζόντια τάση στον πυθμένα (κάτω ίνα) των ασφαλικών στρώσεων)

1	2	3	20	21	22	23	24	25	26	27	28
FA	5000/120	500/500	2.69	2.82	-0.13	2.7	2.93	-0.23	2.71	2.64	0.07
FA	4000/150	400/500	2.65	2.69	-0.04	2.71	2.79	-0.08	2.54	2.51	0.03
FA	7000/150	400/500	4.02	3.97	0.05	4.18	4.12	0.06	3.7	3.71	-0.01
FA	7000/150	300/500	4.9	4.75	0.15	5.12	4.94	0.18	4.39	4.44	-0.05
FA	5000/150	350/500	3.51	3.5	0.01	3.63	3.64	-0.01	3.27	3.27	0.00
FA	3000/150	500/400	1.69	1.77	-0.08	1.7	1.84	-0.14	1.69	1.65	0.04
FA	10000/120	400/500	5.62	5.57	0.05	5.81	5.79	0.02	5.23	5.2	0.03
FA	8000/150	250/500	5.86	5.6	0.26	6.15	5.82	0.33	5.15	5.24	-0.09
FA	4500/120	400/400	3.2	3.3	-0.10	3.24	3.43	-0.19	3.14	3.08	0.06
FA	4500/150	300/500	3.66	3.63	0.03	3.79	3.78	0.01	3.39	3.39	0.00
FA	7500/150	350/400	4.76	4.64	0.12	4.98	4.83	0.15	4.29	4.34	-0.05
FA	6000/170	400/500	3.35	3.3	0.05	3.49	3.43	0.06	3.06	3.08	-0.02
FA	9500/120	350/500	6.02	5.93	0.09	6.23	6.16	0.07	5.55	5.54	0.01
FA	8000/100	400/500	5	5.12	-0.12	5.06	5.32	-0.26	4.9	4.78	0.12
FA	6500/120	400/400	4.2	4.22	-0.02	4.27	4.39	-0.12	4.02	3.94	0.08
FA	5000/150	500/400	2.7	2.72	-0.02	2.75	2.83	-0.08	2.58	2.54	0.04
FA	3500/170	600/300	1.77	1.8	-0.03	1.8	1.88	-0.08	1.7	1.68	0.02
FA	6000/140	350/500	4.08	4.05	0.03	4.21	4.21	0.00	3.8	3.78	0.02
FA	5500/130	250/400	5.2	5.13	0.07	5.4	5.34	0.06	4.79	4.8	-0.01
FB	5000/200	400/400	2.84	2.83	0.01	2.98	2.99	-0.01	2.53	2.5	0.03
FB	6500/250	300/500	3.27	3.04	0.23	3.38	3.21	0.17	2.63	2.68	-0.05
FB	8000/200	500/500	3.18	3.15	0.03	3.34	3.33	0.01	2.8	2.78	0.02
FB	6500/250	400/500	2.51	2.51	0.00	2.65	2.65	0.00	2.16	2.21	-0.05
FB	3000/250	300/500	1.99	1.98	0.01	2.09	2.09	0.00	1.74	1.75	-0.01
FB	10000/180	300/500	4.94	4.9	0.04	5.23	5.17	0.06	4.28	4.32	-0.04
FB	3000/300	250/300	2.16	2.05	0.11	2.25	2.16	0.09	1.72	1.81	-0.09
FB	3500/230	300/500	2.37	2.36	0.01	2.49	2.49	0.00	2.08	2.08	0.00
FB	4000/200	300/400	2.9	2.9	0.00	3.04	3.06	-0.02	2.58	2.55	0.03
FB	4000/200	600/300	1.87	1.88	-0.01	1.92	1.98	-0.06	1.73	1.66	0.07
FB	7500/180	700/400	2.82	2.81	0.01	2.94	2.96	-0.02	2.56	2.48	0.08
FB	6000/270	350/500	2.44	2.41	0.03	2.58	2.54	0.04	2.05	2.12	-0.07
FB	5000/200	400/600	2.64	2.64	0.00	2.75	2.78	-0.03	2.38	2.32	0.06

1	2	3	20	21	22	23	24	25	26	27	28
FB	5500/250	400/500	2.32	2.32	0.00	2.45	2.45	0.00	2.01	2.04	-0.03
FB	8500/200	350/500	4.02	3.93	0.09	4.23	4.15	0.08	3.44	3.47	-0.03
FB	8500/200	250/500	4.9	4.63	0.27	5.1	4.89	0.21	4.02	4.08	-0.06
FB	7000/280	700/300	1.96	1.95	0.01	2.08	2.06	0.02	1.65	1.72	-0.07
FB	4000/220	500/500	1.88	1.88	0.00	1.96	1.99	-0.03	1.71	1.66	0.05
FB	3000/250	300/500	1.97	1.97	0.00	2.07	2.08	-0.01	1.73	1.74	-0.01
FA	3000/150	250/500	3.09	3.11	-0.02	3.18	3.23	-0.05	2.92	2.9	0.02
FA	4000/150	200/500	4.45	4.35	0.10	4.64	4.52	0.12	4.04	4.06	-0.02
FA	6500/150	250/500	5.14	4.98	0.16	5.38	5.18	0.20	4.6	4.65	-0.05
FA	5000/160	350/500	3.37	3.34	0.03	3.49	3.47	0.02	3.11	3.12	-0.01
FB	2500/200	250/400	2.45	2.59	-0.14	2.56	2.59	-0.03	2.21	2.16	0.05
FB	5000/300	200/300	3.41	3.06	0.35	3.42	3.02	0.40	2.55	2.52	0.03
FB	10000/200	250/300	5.36	5.18	0.18	5.63	5.47	0.16	4.38	4.57	-0.19
FB	5000/200	400/400	2.91	2.89	0.02	3.06	3.05	0.01	2.57	2.55	0.02
FB	8000/180	500/300	3.61	3.62	-0.01	3.79	3.82	-0.03	3.23	3.19	0.04
FB	7000/250	400/300	2.92	2.88	0.04	3.09	3.04	0.05	2.44	2.54	-0.10

1: Κατηγορία Οδοστρώματος

2: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)/Πάχος Ασφαλτικών Στρώσεων (mm)

3: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)/Πάχος Βάσης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο (mm)

4: Μέτρο Ελαστικότητας Στρώσης Έδρασης (MPa)

20: Τάση (MPa) από B777-300 (πραγματικό φορείο)

21: Τάση (MPa) από B777-300 (εκτίμηση δείκτη ALI)

22: Διαφορά σηλών 20 - 21

23: Τάση (MPa) από B787-8 (πραγματικό φορείο)

24: Τάση (MPa) από B787-8 (εκτίμηση δείκτη ALI)

25: Διαφορά σηλών 23 - 24

26: Τάση (MPa) από A380 (πραγματικό φορείο)

27: Τάση (MPa) από A380 (εκτίμηση δείκτη ALI)

28: Διαφορά σηλών 17 - 18

Πίνακας Π2.2α: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφαλικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο (κρίσιμη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα (κάτω ίνα) των ασφαλτικών στρώσεων)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
FA	5000/120	500/500	150	530	505	0.05	506	488	0.04	594	552	0.07	644	611	0.05
FA	4000/150	400/500	100	326	309	0.05	298	320	-0.07	370	342	0.08	404	381	0.06
FA	7000/150	400/500	100	264	245	0.07	236	254	-0.08	306	272	0.11	340	303	0.11
FA	7000/150	300/500	60	224	212	0.05	204	219	-0.07	254	235	0.07	278	261	0.06
FA	5000/150	350/500	80	216	206	0.05	199	214	-0.08	250	229	0.08	275	255	0.07
FA	3000/150	500/400	100	386	367	0.05	354	380	-0.07	438	407	0.07	482	453	0.06
FA	10000/120	400/500	120	269	254	0.06	245	264	-0.08	311	282	0.09	340	314	0.08
FA	8000/150	250/500	50	388	364	0.06	350	377	-0.08	454	403	0.11	508	449	0.12
FA	4500/120	400/400	80	389	369	0.05	355	382	-0.08	441	408	0.07	485	455	0.06
FA	4500/150	300/500	60	414	393	0.05	379	408	-0.08	470	436	0.07	514	486	0.05
FA	7500/150	350/400	90	289	275	0.05	265	285	-0.08	326	305	0.06	355	340	0.04
FA	6000/170	400/500	120	219	208	0.05	200	215	-0.08	248	230	0.07	270	256	0.05
FA	9500/120	350/500	80	224	213	0.05	206	221	-0.07	262	236	0.10	289	263	0.09
FA	8000/100	400/500	150	304	291	0.04	280	301	-0.08	343	322	0.06	374	359	0.04
FA	6500/120	400/400	180	239	228	0.05	220	236	-0.07	274	253	0.08	302	282	0.07
FA	5000/150	500/400	200	257	243	0.05	234	251	-0.07	297	269	0.09	326	299	0.08
FA	3500/170	600/300	150	303	282	0.07	272	292	-0.07	351	312	0.11	389	348	0.11
FA	6000/140	350/500	100	158	151	0.04	146	157	-0.08	185	168	0.09	205	187	0.09
FA	5500/130	250/400	70	284	271	0.05	261	281	-0.08	319	300	0.06	349	335	0.04
FB	5000/200	400/400	100	382	364	0.05	351	378	-0.08	434	404	0.07	477	450	0.06
FB	6500/250	300/500	60	611	589	0.04	585	569	0.03	683	643	0.06	737	712	0.03
FB	8000/200	500/500	120	623	590	0.05	594	570	0.04	701	644	0.08	762	714	0.06
FB	6500/250	400/500	160	436	410	0.06	415	396	0.05	493	448	0.09	537	496	0.08
FB	3000/250	300/500	80	389	371	0.05	371	359	0.03	435	406	0.07	472	450	0.05
FB	10000/180	300/500	90	574	547	0.05	546	527	0.03	651	606	0.07	710	675	0.05
FB	3000/300	250/300	60	333	294	0.12	320	284	0.11	383	326	0.15	435	363	0.17
FB	3500/230	300/500	70	282	266	0.06	268	256	0.04	336	295	0.12	374	328	0.12
FB	4000/200	300/400	90	333	314	0.06	315	303	0.04	378	348	0.08	414	388	0.06
FB	4000/200	600/300	180	254	242	0.05	241	233	0.03	290	268	0.08	316	299	0.05
FB	7500/180	700/400	120	228	216	0.05	216	209	0.03	268	240	0.10	298	267	0.10
FB	6000/270	350/500	120	530	505	0.05	506	488	0.04	594	552	0.07	644	611	0.05

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
FB	5000/200	400/600	100	326	309	0.05	298	320	-0.07	370	342	0.08	404	381	0.06
FB	5500/250	400/500	150	264	245	0.07	236	254	-0.08	306	272	0.11	340	303	0.11
FB	8500/200	350/500	80	224	212	0.05	204	219	-0.07	254	235	0.07	278	261	0.06
FB	8500/200	250/500	50	216	206	0.05	199	214	-0.08	250	229	0.08	275	255	0.07
FB	7000/280	700/300	200	386	367	0.05	354	380	-0.07	438	407	0.07	482	453	0.06
FB	4000/220	500/500	120	269	254	0.06	245	264	-0.08	311	282	0.09	340	314	0.08
FB	3000/250	300/500	90	388	364	0.06	350	377	-0.08	454	403	0.11	508	449	0.12
FA	3000/150	250/500	50	389	369	0.05	355	382	-0.08	441	408	0.07	485	455	0.06
FA	4000/150	200/500	40	414	393	0.05	379	408	-0.08	470	436	0.07	514	486	0.05
FA	6500/150	250/500	60	289	275	0.05	265	285	-0.08	326	305	0.06	355	340	0.04
FA	5000/160	350/500	100	219	208	0.05	200	215	-0.08	248	230	0.07	270	256	0.05
FB	2500/200	250/400	60	224	213	0.05	206	221	-0.07	262	236	0.10	289	263	0.09
FB	5000/300	200/300	40	304	291	0.04	280	301	-0.08	343	322	0.06	374	359	0.04
FB	10000/200	250/300	70	239	228	0.05	220	236	-0.07	274	253	0.08	302	282	0.07
FB	5000/200	400/400	80	257	243	0.05	234	251	-0.07	297	269	0.09	326	299	0.08
FB	8000/180	500/300	170	303	282	0.07	272	292	-0.07	351	312	0.11	389	348	0.11
FB	7000/250	400/300	120	158	151	0.04	146	157	-0.08	185	168	0.09	205	187	0.09

1

: Κατηγορία Οδοστρώματος

2: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) /Πάχος Ασφ. Στρώσεων (mm)

3: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)/Πάχος Βάσης από Ασύνδετο Αμμοχ.

(mm)

4: Μέτρο Ελαστικότητας Στρώσης Έδρασης (MPa)

5: Αν. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) από A300-C4 (πραγμ. φορείο)6: Αν. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) από A300-C4 (εκτίμ. δείκτη ALI)

7: Σχετική διαφορά στηλών 5 και 6 ((5-6)/5).

8: Αν. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) από A300-600 (πραγμ. φορείο)9: Αν. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) από A300-600 (εκτίμ. δείκτη ALI)

10: Σχετική διαφορά στηλών 8 και 9 ((8-9)/8).

11: Αν. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) από MD-83 (πραγμ. φορείο)12: Αν. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) από MD-83 (εκτίμ. δείκτη ALI)

13: Σχετική διαφορά στηλών 11 και 12 ((11-12)/11).

14: Αν. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) από B737-800 (πραγμ. φορείο)15: Αν. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) από B737-800 (εκτίμ. δείκτη ALI)

16: Σχετική διαφορά στηλών 14 και 15 ((14-15)/14).

Πίνακας Π2.2β: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφαλικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο (κρίσιμη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα (κάτω ίνα) των ασφαλτικών στρώσεων)

1	2	3	4	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
FA	5000/120	500/500	150	567	556	0.02	662	645	0.03	687	671	0.02	603	603	0.00
FA	4000/150	400/500	100	341	334	0.02	414	400	0.03	427	423	0.01	358	353	0.01
FA	7000/150	400/500	100	272	265	0.03	361	318	0.12	357	336	0.06	284	280	0.01
FA	7000/150	300/500	60	234	229	0.02	286	275	0.04	294	290	0.01	244	242	0.01
FA	5000/150	350/500	80	223	223	0.00	280	268	0.04	288	283	0.02	231	236	-0.02
FA	3000/150	500/400	100	401	397	0.01	496	476	0.04	510	502	0.02	419	420	0.00
FA	10000/120	400/500	120	278	275	0.01	348	330	0.05	356	349	0.02	289	291	-0.01
FA	8000/150	250/500	50	396	393	0.01	531	472	0.11	525	498	0.05	413	416	-0.01
FA	4500/120	400/400	80	405	398	0.02	499	478	0.04	513	505	0.02	423	422	0.00
FA	4500/150	300/500	60	434	425	0.02	525	510	0.03	543	539	0.01	456	450	0.01
FA	7500/150	350/400	90	309	298	0.04	362	357	0.01	375	377	-0.01	328	315	0.04
FA	6000/170	400/500	120	232	224	0.03	277	269	0.03	285	284	0.00	245	238	0.03
FA	9500/120	350/500	80	231	230	0.00	297	276	0.07	301	292	0.03	239	244	-0.02
FA	8000/100	400/500	150	322	314	0.02	384	377	0.02	399	398	0.00	341	332	0.03
FA	6500/120	400/400	180	247	246	0.00	308	296	0.04	317	312	0.02	257	261	-0.02
FA	5000/150	500/400	200	267	262	0.02	337	315	0.07	342	332	0.03	278	278	0.00
FA	3500/170	600/300	150	312	305	0.02	407	366	0.10	406	386	0.05	326	322	0.01
FA	6000/140	350/500	100	163	164	-0.01	210	196	0.07	212	207	0.02	169	173	-0.02
FA	5500/130	250/400	70	301	293	0.03	358	352	0.02	371	371	0.00	319	310	0.03
FB	5000/200	400/400	100	398	394	0.01	490	473	0.03	505	499	0.01	416	417	0.00
FB	6500/250	300/500	60	659	648	0.02	758	752	0.01	783	782	0.00	706	702	0.01
FB	8000/200	500/500	120	662	649	0.02	786	753	0.04	813	783	0.04	700	704	-0.01
FB	6500/250	400/500	160	460	451	0.02	553	524	0.05	572	544	0.05	484	489	-0.01
FB	3000/250	300/500	80	416	409	0.02	485	474	0.02	504	493	0.02	443	443	0.00
FB	10000/180	300/500	90	608	591	0.03	728	749	-0.03	752	749	0.00	641	626	0.02
FB	3000/300	250/300	60	337	318	0.06	488	382	0.22	461	403	0.13	360	337	0.06
FB	3500/230	300/500	70	289	287	0.01	380	345	0.09	379	364	0.04	300	304	-0.01
FB	4000/200	300/400	90	348	340	0.02	426	408	0.04	436	430	0.01	364	360	0.01
FB	4000/200	600/300	180	266	262	0.02	321	314	0.02	333	332	0.00	280	277	0.01
FB	7500/180	700/400	120	234	234	0.00	303	281	0.07	305	296	0.03	242	248	-0.02
FB	6000/270	350/500	120	567	556	0.02	662	645	0.03	687	671	0.02	603	603	0.00
FB	5000/200	400/600	100	341	334	0.02	414	400	0.03	427	423	0.01	358	353	0.01

1	2	3	4	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
FB	5500/250	400/500	150	272	265	0.03	361	318	0.12	357	336	0.06	284	280	0.01
FB	8500/200	350/500	80	234	229	0.02	286	275	0.04	294	290	0.01	244	242	0.01
FB	8500/200	250/500	50	223	223	0.00	280	268	0.04	288	283	0.02	231	236	-0.02
FB	7000/280	700/300	200	401	397	0.01	496	476	0.04	510	502	0.02	419	420	0.00
FB	4000/220	500/500	120	278	275	0.01	348	330	0.05	356	349	0.02	289	291	-0.01
FB	3000/250	300/500	90	396	393	0.01	531	472	0.11	525	498	0.05	413	416	-0.01
FA	3000/150	250/500	50	405	398	0.02	499	478	0.04	513	505	0.02	423	422	0.00
FA	4000/150	200/500	40	434	425	0.02	525	510	0.03	543	539	0.01	456	450	0.01
FA	6500/150	250/500	60	309	298	0.04	362	357	0.01	375	377	-0.01	328	315	0.04
FA	5000/160	350/500	100	232	224	0.03	277	269	0.03	285	284	0.00	245	238	0.03
FB	2500/200	250/400	60	231	230	0.00	297	276	0.07	301	292	0.03	239	244	-0.02
FB	5000/300	200/300	40	322	314	0.02	384	377	0.02	399	398	0.00	341	332	0.03
FB	10000/200	250/300	70	247	246	0.00	308	296	0.04	317	312	0.02	257	261	-0.02
FB	5000/200	400/400	80	267	262	0.02	337	315	0.07	342	332	0.03	278	278	0.00
FB	8000/180	500/300	170	312	305	0.02	407	366	0.10	406	386	0.05	326	322	0.01
FB	7000/250	400/300	120	163	164	-0.01	210	196	0.07	212	207	0.02	169	173	-0.02

Επεξηγήσεις στηλών:

1: Κατηγορία Οδοστρώματος

2: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) /Πάχος Ασφ. Στρώσεων (mm)

3: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)/Πάχος Βάσης από Ασύνδετο Άμμοχ.
(mm)

4: Μέτρο Ελαστικότητας Στρώσης Έδρασης (MPa)

17: Αν. Παραμ. (mm/mm, ε*10-6) από B747-400 (πραγμ. φορείο)

18: Αν. Παραμ. (mm/mm, ε*10-6) από B747-400 (εκτίμ. δείκτη ALI)

19: Σχετική διαφορά στηλών 17 και 18 ((17-18)/17).

20: Αν. Παραμ. (mm/mm, ε* 10-6) από B777-300 (πραγμ. φορείο)

21: Αν. Παραμ. (mm/mm, ε*10-6) από B777-300 (εκτίμ. δείκτη ALI)

22: Σχετική διαφορά στηλών 20 και 21 ((20-21)/20).

23: Αν. Παραμ. (mm/mm, ε* 10-6) από B787-8 (πραγμ. φορείο)

24: Αν. Παραμ. (mm/mm, ε* 10-6) από B787-8 (εκτίμ. δείκτη ALI)

25: Σχετική διαφορά στηλών 23 και 24 ((23-24)/23).

26: Αν. Παραμ. (mm/mm, ε* 10-6) από A380 (πραγμ. φορείο)

27: Αν. Παραμ. (mm/mm, ε* 10-6) από A380 (εκτίμηση δείκτη ALI)

28: Σχετική διαφορά στηλών 26 και 27 ((26-27)/26).

Πίνακας Π2.3: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφαλικά οδοστρώματα με βάση αμμοχάλικο κατεργασμένο με τοιμάντο (κρίσιμη οριζόντια τάση στον πυθμένα (κάτω ίνα) της κατεργασμένης στρώσης)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SRA	150/250/200	6500	20000	60	2.42	2.75	-0.14	2.75	2.79	-0.01	2.99	2.39	0.20	2.72	2.79	-0.03	3.01	2.79	0.07
SRA	200/250/200	6500	20000	60	2.06	2.43	-0.18	2.35	2.45	-0.04	2.67	2.05	0.23	2.33	2.39	-0.03	2.58	2.39	0.07
SRA	250/300/200	5000	15000	60	1.42	1.73	-0.22	1.62	1.74	-0.07	1.93	1.43	0.26	1.63	1.67	-0.02	1.8	1.67	0.07
SRB	150/200/200	4000	12000	80	2.46	2.49	-0.01	2.81	2.48	0.12	2.6	2.45	0.06	2.78	2.54	0.09	2.69	2.54	0.06
SRA	200/250/200	7000	18000	80	1.83	2.08	-0.14	2.08	2.1	-0.01	2.26	1.82	0.19	2.08	2.13	-0.02	2.3	2.13	0.07
SRA	200/250/200	8000	20000	80	1.86	2.14	-0.15	2.12	2.16	-0.02	2.34	1.85	0.21	2.11	2.16	-0.02	2.34	2.16	0.08
SRA	200/300/200	5500	10000	80	1.27	1.42	-0.12	1.45	1.44	0.01	1.54	1.28	0.17	1.45	1.49	-0.03	1.61	1.49	0.07
SRA	150/300/200	7000	18000	90	1.73	1.96	-0.13	1.98	1.98	0.00	2.12	1.73	0.18	1.97	2.02	-0.03	2.18	2.02	0.07
SRB	150/200/200	6500	20000	100	2.65	2.74	-0.03	3.04	2.73	0.10	2.89	2.63	0.09	2.98	2.72	0.09	2.88	2.72	0.06
SRA	150/300/200	6500	15000	100	1.6	1.75	-0.09	1.82	1.78	0.02	1.87	1.59	0.15	1.82	1.86	0.99	2.01	1.86	0.07
SRB	200/200/200	5000	17000	100	2.19	2.29	-0.05	2.51	2.29	0.09	2.42	2.19	0.10	2.49	2.27	0.09	2.4	2.27	0.05
SRA	200/250/200	5000	10000	100	1.44	1.52	-0.06	1.65	1.52	0.08	1.61	1.45	0.10	1.65	1.69	-0.02	1.83	1.69	0.08
SRA	250/300/200	8000	15000	100	1.16	1.37	-0.18	1.33	1.38	-0.04	1.5	1.17	0.22	1.33	1.37	-0.03	1.48	1.37	0.07
SRA	250/300/200	6500	20000	100	1.37	1.61	-0.18	1.56	1.63	-0.04	1.78	1.38	0.22	1.57	1.61	-0.03	1.74	1.61	0.07
SRB	150/250/200	4500	15000	120	1.95	1.98	-0.02	2.23	1.99	0.11	2.08	1.95	0.06	2.21	2.02	0.09	2.14	2.02	0.06
SRB	200/200/200	7000	14000	120	1.8	1.87	-0.04	2.06	1.86	0.10	1.97	1.8	0.09	2.04	1.86	0.09	1.97	1.86	0.06
SRB	200/300/200	7000	15000	120	1.31	1.45	-0.11	1.5	1.47	0.02	1.56	1.3	0.17	1.47	1.34	0.09	1.42	1.34	0.06
SRB	150/200/200	6500	10000	150	1.75	1.75	0.00	2.01	1.73	0.14	1.8	1.76	0.02	2	1.83	0.09	1.93	1.83	0.05
SRB	150/300/200	5000	12000	150	1.37	1.4	-0.02	1.57	1.4	0.11	1.47	1.38	0.06	1.56	1.43	0.08	1.51	1.43	0.05
SRB	250/300/200	4500	12000	150	1.08	1.14	-0.06	1.23	1.15	0.07	1.22	1.08	0.11	1.22	1.08	0.11	1.18	1.12	0.05
SRA	280/300/200	6500	14000	150	1	1.11	-0.11	1.14	1.12	0.02	1.12	0.99	0.18	1.22	1.03	0.16	1.09	1.03	0.06
SRB	150/200/200	8000	10000	200	1.56	1.55	0.01	1.78	1.52	0.15	1.59	1.57	0.01	1.78	1.63	0.08	1.72	1.63	0.05
SRB	150/200/200	6500	15000	200	1.94	1.93	0.01	2.22	1.9	0.14	1.98	1.95	0.02	2.21	2.02	0.09	2.14	2.02	0.06
SRB	150/200/200	5000	20000	200	2.31	2.3	0.00	2.65	2.27	0.14	2.36	2.34	0.01	2.65	2.42	0.09	2.56	2.42	0.05
SRB	150/250/200	8000	12000	200	1.4	1.4	0.00	1.6	1.4	0.13	1.45	1.41	0.03	1.6	1.46	0.09	1.55	1.46	0.06
SRB	150/300/200	8000	15000	200	1.3	1.33	-0.02	1.48	1.33	0.10	1.4	1.3	0.07	1.48	1.35	0.09	1.43	1.35	0.06
SRB	200/200/200	8000	15000	200	1.58	1.6	-0.01	1.81	1.59	0.12	1.67	1.6	0.04	1.81	1.66	0.08	1.75	1.66	0.05
SRB	200/250/200	6500	12000	200	1.24	1.25	-0.01	1.42	1.26	0.11	1.31	1.26	0.04	1.43	1.31	0.08	1.38	1.31	0.05
SRB	200/250/200	4000	15000	200	1.5	1.5	0.00	1.72	1.5	0.13	1.56	1.53	0.02	1.73	1.58	0.09	1.68	1.58	0.06
SRB	200/300/200	4000	20000	200	1.44	1.48	-0.03	1.65	1.49	0.10	1.56	1.45	0.07	1.64	1.5	0.09	1.59	1.5	0.06
SRB	250/300/200	6500	15000	200	1.03	1.09	-0.06	1.18	1.1	0.07	1.17	1.03	0.12	1.17	1.07	0.09	1.13	1.07	0.05

SRB	270/300/200	8000	12000	200	0.85	0.91	-0.07	0.98	0.92	0.06	0.98	0.85	0.13	97	0.88	0.99	0.94	0.88	0.06
-----	-------------	------	-------	-----	------	------	-------	------	------	------	------	------	------	----	------	------	------	------	------

1: Κατηγορία Διατομής

9: Τάση (MPa) από MD-83 (πραγματικό φορείο)

2: Πάχη Στρώσεων (mm): Ασφαλτικές / Βάση από Κατεργασμένο Αμμο-

10: Τάση (MPa) από A300-C4 (πραγματικό φορείο)

χάλικο / Υπόβαση από Ασύνδετο Αμμοχάλικο

3: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) Ασφαλτικών Στρώσεων

12: Τάση (MPa) από A380 (πραγματικό φορείο)

4: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) Βάσης από Αμμοχάλικο Κατεργασμένο

13: Τάση (MPa) από B737-400 (εκτίμηση δείκτη ALI)

με Τσιμέντο

5: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) στην Επιφάνεια της Υπόβασης από

15: Τάση (MPa) από MD-83 (εκτίμηση δείκτη ALI)

Ασύνδετο Αμμοχάλικο

16: Τάση (MPa) από A300-C4 (εκτίμηση δείκτη ALI)

6 Τάση (MPa) από B737-400 (πραγματικό φορείο)

7: Τάση (MPa) από B747-400 (πραγματικό φορείο)

18: Τάση (MPa) από A380 (εκτίμηση δείκτη ALI)

8: Σχετική διαφορά στηλών 6 και 7 ((6-7)/6).

19: Τάση (MPa) από B747-400 (εκτίμηση δείκτη ALI)

Πίνακας Π2.4: Στοιχεία διατομών και αποτελέσματα υπολογισμών για ασφαλτικά οδοστρώματα με βάση από αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο (κρίσιμη οριζόντια αν. παραμόρφωση στον πυθμένα (κάτω ίνα) της κατεργασμένης στρώσης)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SRA	150/250/200	6500	20000	60	118	118	107	121	129	102	101	99	111	108
SRA	200/250/200	6500	20000	60	104	104	91	103	116	101	100	86	99	109
SRA	250/300/200	5000	15000	60	100	99	84	96	113	94	93	80	92	102
SRB	150/200/200	4000	12000	80	179	174	184	207	187	179	177	172	194	189
SRA	200/250/200	7000	18000	80	99	99	90	102	109	100	99	86	98	108
SRA	200/250/200	8000	20000	80	92	92	82	93	102	92	90	78	89	99
SRA	200/300/200	5500	10000	80	122	122	112	128	134	126	125	108	123	136
SRA	150/300/200	7000	18000	90	93	93	85	97	102	95	94	81	92	103
SRB	150/200/200	6500	20000	100	118	114	119	134	125	115	114	111	124	122
SRA	200/200/200	5000	17000	100	116	113	115	130	123	113	111	109	122	119
SRB	200/250/200	5000	10000	100	130	129	129	146	140	144	142	123	140	156
SRA	150/300/200	6500	15000	100	100	100	94	107	108	105	104	90	102	114
SRA	250/300/200	8000	15000	100	79	79	69	78	88	77	76	66	75	83

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SRA	250/300/200	6500	20000	100	70	69	61	69	78	68	67	58	66	73
SRB	200/200/200	7000	14000	120	115	112	115	130	122	112	111	108	122	119
SRB	150/250/200	4500	15000	120	114	111	116	131	120	113	112	109	123	120
SRB	200/300/200	7000	15000	120	83	83	77	88	91	75	74	72	81	79
SRB	150/200/200	6500	10000	150	151	147	159	179	156	155	153	150	168	164
SRB	150/300/200	5000	12000	150	100	98	102	116	106	100	99	96	108	106
SRB	250/300/200	4500	12000	150	82	81	80	91	89	78	77	75	84	83
SRB	280/300/200	6500	14000	150	68	68	63	73	75	61	61	59	66	65
SRB	150/200/200	6500	15000	200	111	108	117	132	114	115	113	111	124	121
SRB	150/200/200	5000	20000	200	99	97	105	118	102	103	101	99	111	109
SRB	150/200/200	8000	10000	200	134	131	142	159	137	139	137	134	150	147
SRB	200/200/200	8000	15000	200	92	90	95	107	96	93	92	90	101	99
SRB	150/250/200	8000	12000	200	101	99	105	119	105	103	102	100	112	109
SRB	200/250/200	6500	12000	200	91	89	93	105	95	92	91	89	99	97
SRB	200/250/200	4000	15000	200	86	85	90	102	90	89	88	86	96	94
SRB	150/300/200	8000	15000	200	76	75	77	88	81	76	75	73	82	80
SRB	200/300/200	4000	20000	200	63	63	64	73	68	63	62	61	68	67
SRB	250/300/200	6500	15000	200	63	62	61	70	68	60	59	58	65	63
SRB	270/300/200	8000	12000	200	66	66	64	73	72	62	61	60	67	66

Επεξηγήσεις στηλών:

- 1: Κατηγορία Διατομής
- 2: Πάχη Στρώσεων (mm): Ασφαλτικές / Βάση από Κατεργασμένο Αμμο-χάλικο / Υπόβαση από Ασύνδετο Αμμοχάλικο
- 3: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) Ασφαλτικών Στρώσεων
- 4: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) Βάσης από Αμμοχάλικο Κατεργασμένο με Τσιμέντο
- 5: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) στην Επιφάνεια της Υπόβασης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο
- 6 Av. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) από B747-400 (πραγματικό φορείο)

- 7: Av. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) από A300-C4 (πραγματικό φορείο)
- 8: Av. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) από B737-400 (πραγματικό φορείο)
- 9: Av. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) από MD-83 (πραγματικό φορείο)
- 10: Av. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) από A380 (πραγματικό φορείο)
- 11: Av. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) από B747-400 (εκτίμηση δέκτη ALI)
- 12: Av. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) από A300-C4 (εκτίμηση δέκτη ALI)
- 13: Av. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) από B737-400 (εκτίμηση δέκτη ALI)
- 14: Av. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) από MD-83 (εκτίμηση δέκτη ALI)
- 15: Av. Παραμ. (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) από A380 (εκτίμηση δέκτη ALI)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4.

Πίνακας Π3.1: Χαρακτηριστικές τιμές μέτρων ελαστικότητας από ανάστροφο υπολογισμό μετρήσεων FWD στα οδοστρώματα των περαιωμάτων που εξετάστηκαν

α/α	Μήνας	Ασφαλτικές Στρώσεις (MPa)			Στρώση Έδρασης (MPa)			Ασφαλτικές Στρώσεις (MPa)			Στρώση Έδρασης (MPa)		
		LFC	LFS	LFS	LFC	LFS	LFS	MFC	MFS	MFS	MFC	MFS	MFS
1	02/00	18590		19486	56	69	69	15825	20175		93		93
2	02/00	19250		19638	57	64	64	16306	19525		95		92
3	02/00	15309		21829	56	70	70	15198	22895		95		86
4	02/00	16914		20686	59	72	72	16110	18255		94		91
5	02/00	17961		22943	56	72	72	16992	18816		94		91
6	03/00	15954		18551	56	65	65	14447	15220		90		93
7	03/00	17934		19941	58	73	73	13163	13114		90		90
8	03/00	14437		20781	57	71	71	14358	17552		94		96
9	03/00	17554		18895	58	68	68	14280	15131		92		94
10	03/00	16805		19506	57	73	73	11713	17953		94		87
11	04/00	12554		13675	54	68	68	12087	13313		87		90
12	04/00	13270		12425	53	66	66	13642	12739		87		87
13	04/00	10001		13166	53	72	72	12942	11066		87		82
14	04/00	11856		13122	54	67	67	10891	13826		88		90
15	04/00	13240		13568	52	64	64	12670	13208		89		86
16	05/00	7899		6372	55	59	59	6596	5206		88		89
17	05/00	7098		6186	55	60	60	6948	5434		88		92
18	05/00	8741		6469	55	59	59	6749	5316		86		92
19	05/00	8851		6963	54	62	62	6313	7178		92		90
20	05/00	6833		7091	51	62	62	6527	6422		91		90
21	06/00	4646		3948	48	62	62	4329	3568		87		90
22	06/00	4857		4151	48	62	62	4340	4029		84		91
23	06/00	5243		4268	47	60	60	4448	4140		88		89
24	06/00	4807		4029	53	60	60	4483	3224		87		92
25	06/00	5445		4090	48	59	59	4227	3389		84		94
Μέση Τιμή	-	11842		12871	54	66	66	10623	11645		90		90

Πίνακας Π3.2 Μέτρα Ελαστικότητας στρώσεων για τις διατομές που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις των κεφαλαίων 5 και 6 (προέκυψαν από ανάστροφο υπολογισμό με το λογισμικό BACKFAA)

Διατομή	Περίοδος	P401 (MPa)	P209 (MPa)	P154 (MPa)	Σ. Έδρασης (MPa)	RMS
LFC	02/00	17961	273	163	56	0.1443
LFC	03/00	15954	217	192	56	0.0729
LFC	04/00	12554	186	129	54	0.1834
LFC	05/00	7899	224	199	55	0.0227
LFC	06/00	5243	166	116	47	0.285
MFC	02/00	16110	384	250	94	0.1136
MFC	03/00	14358	384	236	94	0.2578
MFC	04/00	12942	312	132	87	0.3232
MFC	05/00	6596	270	215	88	0.0817
MFC	06/00	4483	215	200	87	0.219
Διατομή	Περίοδος	P401 (MPa)	P209 (MPa)		Σ. Έδρασης (MPa)	RMS
LFS	02/00	21829	299	-	70	0.0358
LFS	03/00	18895	341	-	68	0.0372
LFS	04/00	13568	234	-	64	0.0613
LFS	05/00	6963	263	-	62	0.0254
LFS	06/00	4029	199	-	60	0.0472
MFS	02/00	19952	784	-	92	0.1764
MFS	03/00	17552	454	-	96	0.1479
MFS	04/00	13826	418	-	90	0.1532
MFS	05/00	5434	588	-	92	0.1724
MFS	06/00	3568	601	-	90	0.0523
HFC	02/00	20317	689		140	0.1637
HFC	03/00	12380	363		135	0.1310
HFC	04/00	14477	480		136	0.2374

Κωδικοί Υλικών Πίνακα Π3.2

P401: Ασφαλτόμιγμα

P209: Ασύνδετο Θραυστό Αμμοχάλικο

P154: Ασύνδετο Συλλεκτικό Αμμοχάλικο

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ 5 ΚΑΙ 6.**Πίνακας Π4.1: Αναλυτικοί υπολογισμοί και αποτελέσματα για τα κρίσιμα μεγέθη των ασφαλικών στρώσεων στις διατομές που εξετάστηκαν**

1	2	3	4	5	6	7
HFC_DT1_02/00	5.89	6.07	0.03	198	200	0.01
HFC_DT1_03/00	5.65	5.81	0.03	312	314	0.01
HFC_DT1_04/00	5.6	5.78	0.03	265	277	0.05
HFC_DT2_04/00	5.96	5.99	0.01	282	276	-0.02
HFC_TR1_02/00	5.78	6.03	0.04	197	198	0.01
HFC_TR1_03/00	5.57	5.77	0.04	309	312	0.01
HFC_TR1_04/00	5.52	5.73	0.04	263	265	0.01
LFC_DT1_02/00	7.14	7.42	0.04	269	270	0.00
LFC_DT1_03/00	6.92	7.04	0.02	294	293	0.00
LFC_DT1_04/00	6.96	7.18	0.03	376	378	0.01
LFC_DT1_05/00	5.10	5.08	0.00	445	461	0.04
LFC_DT1_06/00	5.04	5.04	0.00	664	650	-0.02
LFC_DT2_02/00	7.63	7.75	0.02	288	286	-0.01
LFC_DT2_03/00	7.38	7.47	0.01	314	311	-0.01
LFC_DT2_04/00	7.44	7.61	0.02	402	400	0.00
LFC_DT2_05/00	5.37	5.39	0.00	470	461	-0.02
LFC_DT2_06/00	5.31	5.34	0.01	702	689	-0.02
LFC_TR1_02/00	7.06	7.24	0.03	268	268	0.00
LFC_TR1_03/00	6.86	6.98	0.02	292	291	0.00
LFC_TR1_04/00	6.88	7.06	0.03	374	374	0.00
LFC_TR1_05/00	5.09	5.00	-0.02	443	430	-0.03
LFC_TR1_06/00	5.03	4.95	-0.02	660	642	-0.03
LFS_DT1_02/00	3.42	3.45	0.01	104	104	0.00
LFS_DT1_03/00	3.16	3.19	0.01	112	112	0.00
LFS_DT1_04/00	3.12	3.20	0.03	155	156	0.01
LFS_DT1_05/00	2.40	2.50	0.04	238	242	0.02
LFS_DT1_06/00	2.08	2.18	0.05	364	370	0.02
LFS_DT2_02/00	3.74	3.66	-0.02	114	110	-0.04
LFS_DT2_03/00	3.14	3.38	0.08	111	118	0.06
LFS_DT2_04/00	3.41	3.39	-0.01	169	165	-0.02
LFS_DT2_05/00	2.60	2.65	0.02	258	257	0.00
LFS_DT2_06/00	2.26	2.31	0.02	396	393	-0.01
LFS_TR1_02/00	3.46	3.39	-0.02	112	102	-0.09
LFS_TR1_03/00	3.19	3.16	-0.01	119	111	-0.07
LFS_TR1_04/00	3.14	3.16	0.01	163	154	-0.06
LFS_TR1_05/00	2.40	2.47	0.03	244	240	-0.02
LFS_TR1_06/00	2.08	2.15	0.03	369	367	-0.01
MFC_DT1_02/00	6.15	6.28	0.02	261	261	0.00
MFC_DT1_03/00	5.88	6.00	0.02	278	280	0.01
MFC_DT1_04/00	6.37	6.55	0.03	335	338	0.01
MFC_DT1_05/00	4.49	4.53	0.01	474	471	-0.01
MFC_DT1_06/00	3.97	3.99	0.01	624	619	-0.01
MFC_DT2_02/00	6.54	6.52	0.00	277	269	-0.03
MFC_DT2_03/00	6.24	6.18	-0.01	297	289	-0.03
MFC_DT2_04/00	6.79	6.80	0.00	358	348	-0.03
MFC_DT2_05/00	4.70	4.71	0.00	498	486	-0.02

1	2	3	4	5	6	7
MFC_DT2_06/00	4.13	4.14	0.00	653	638	-0.02
MFC_TR1_03/00	5.82	5.94	0.02	279	278	0.00
MFC_TR1-02/00	6.17	6.27	0.02	256	259	0.01
MFC_TR1-04/00	6.35	6.50	0.02	337	335	-0.01
MFC_TR1-05/00	4.48	4.53	0.01	473	468	-0.01
MFC_TR1-06/00	3.97	3.99	0.01	624	614	-0.02
MFS_DT1_02/00	3.27	3.26	0.00	109	108	-0.01
MFS_DT1_03/00	3.20	3.19	0.00	125	124	-0.01
MFS_DT1_04/00	3.16	3.25	0.03	153	155	0.01
MFS_DT1_05/00	1.90	1.98	0.04	248	251	0.01
MFS_DT1_06/00	1.44	1.50	0.04	300	302	0.01
MFS_DT2_02/00	3.58	3.46	-0.03	120	115	-0.04
MFS_DT2_03/00	3.19	3.38	0.06	125	131	0.05
MFS_DT2_04/00	3.46	3.40	-0.02	168	162	-0.04
MFS_DT2_05/00	2.06	2.12	0.03	269	269	0.00
MFS_DT2_06/00	1.56	1.59	0.02	323	320	-0.01
MFS_TR1_02/00	3.31	3.18	-0.04	118	106	-0.10
MFS_TR1_03/00	3.23	3.17	-0.02	134	123	-0.08
MFS_TR1_04/00	3.18	3.16	-0.01	163	151	-0.07
MFS_TR1_05/00	1.89	1.95	0.03	255	248	-0.03
MFS_TR1_06/00	1.44	1.48	0.03	306	299	-0.02

Επεξηγήσεις στηλών:

1. Στοιχεία Πειράματος: Κωδ. Διατομής / Φορτίου / Χρονική Περίοδος
2. Υπολογισμένη κρίσιμη οριζόντια τάση (MPa) στον πυθμένα (κάτω ίνα) ασφαλικών στρώσεων (πραγματικό φορείο)
3. Υπολογισμένη κρίσιμη οριζόντια τάση (MPa) στον πυθμένα (κάτω ίνα) ασφαλικών στρώσεων (εκτίμηση από ALI)
4. Διαφορά μεταξύ στηλών 2 και 3 ((2-3)/2)
5. Υπολογισμένη κρίσιμη οριζόντια αν. παραμόρφωση (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) στον πυθμένα (κάτω ίνα) ασφαλικών στρώσεων (πραγματικό φορείο)
6. Υπολογισμένη κρίσιμη οριζόντια αν. παραμόρφωση (mm/mm, $\epsilon * 10^{-6}$) στον πυθμένα (κάτω ίνα) ασφαλικών στρώσεων (εκτίμηση από ALI)
7. Διαφορά μεταξύ στηλών 5 και 6 ((5-6)/6)

Πίνακας Π4.2: Αναλυτικοί υπολογισμοί και αποτελέσματα για τα κρίσιμα μεγέθη της στρώσης έδρασης στις διατομές που εξετάστηκαν.

1	2	3	4	5	6	7	8
HFC_DT1_02/00	0.15	0.16	0.06		924	1143	-0.24
HFC_DT1_03/00	0.18	0.20	0.09		1179	1446	-0.23
HFC_DT1_04/00	0.17	0.19	0.08		1092	1343	-0.23
HFC_DT2_02/00	0.17	0.17	-0.01		1032	1171	-0.13
HFC_DT2_04/00	0.19	0.20	0.01		1217	1377	-0.13
HFC_TR1_02/00	0.15	0.16	0.09		873	1136	-0.30
HFC_TR1_03/00	0.18	0.20	0.13		1123	1437	-0.28
HFC_TR1_04/00	0.17	0.18	0.12		1033	1334	-0.29
LFC_DT1_02/00	0.06	0.06	0.09	0.07	736	1045	-0.42
LFC_DT1_03/00	0.06	0.06	0.11	0.08	710	1047	-0.47
LFC_DT1_04/00	0.07	0.07	-0.06	0.07	964	1183	-0.23
LFC_DT1_05/00	0.07	0.07	0.02	0.08	828	1132	-0.37
LFC_DT1_06/00	0.07	0.07	-0.03	0.08	1131	1365	-0.21
LFC_DT2_02/00	0.07	0.06	-0.03		836	1070	-0.28
LFC_DT2_03/00	0.07	0.07	0.05		806	1160	-0.44
LFC_DT2_04/00	0.07	0.07	-0.06		964	1183	-0.23
LFC_DT2_05/00	0.07	0.07	0.02		828	1132	-0.37
LFC_DT2_06/00	0.07	0.07	-0.03		1131	1365	-0.21
LFC_TR1_02/00	0.07	0.06	-0.05	0.07	690	1041	-0.51
LFC_TR1_03/00	0.06	0.06	-0.03	0.08	664	1044	-0.57
LFC_TR1_04/00	0.07	0.07	-0.04	0.08	780	1149	-0.47
LFC_TR1_05/00	0.06	0.06	0.00	0.07	679	1104	-0.63
LFC_TR1_06/00	0.07	0.07	-0.01	0.07	908	1387	-0.53
LFS_DT1_02/00	0.05	0.06	0.12	0.07	472	744	-0.58
LFS_DT1_03/00	0.05	0.06	0.12	0.07	479	771	-0.61
LFS_DT1_04/00	0.06	0.06	0.07	0.08	590	873	-0.48
LFS_DT1_05/00	0.07	0.07	-0.01	0.08	758	1005	-0.33
LFS_DT1_06/00	0.07	0.07	0.06	0.07	790	1117	-0.41
LFS_DT2_02/00	0.06	0.06	-0.02		536	757	-0.41
LFS_DT2_03/00	0.06	0.06	0.02		544	787	-0.45
LFS_DT2_04/00	0.06	0.06	-0.03		670	889	-0.33
LFS_DT2_05/00	0.07	0.07	-0.01		758	1005	-0.33
LFS_DT2_06/00	0.08	0.07	-0.03		897	1149	-0.28
LFS_TR1_02/00	0.06	0.06	-0.05	0.07	470	742	-0.58
LFS_TR1_03/00	0.06	0.06	-0.03	0.07	477	769	-0.61
LFS_TR1_04/00	0.06	0.06	-0.06	0.07	575	870	-0.51
LFS_TR1_05/00	0.07	0.07	-0.06	0.08	643	981	-0.52
LFS_TR1_06/00	0.07	0.07	-0.01	0.08	733	1120	-0.53
MFC_DT1_02/00	0.10	0.11	0.08	0.12	905	1135	-0.25
MFC_DT1_03/00	0.10	0.11	0.08	0.16	928	1164	-0.25
MFC_DT1_04/00	0.11	0.11	0.07	0.19	1038	1296	-0.25
MFC_DT1_05/00	0.12	0.13	0.10	0.18	1038	1455	-0.40
MFC_DT1_06/00	0.12	0.14	0.12	0.17	1206	1646	-0.37
MFC_DT2_02/00	0.11	0.11	-0.03		1023	1159	-0.13
MFC_DT2_03/00	0.12	0.11	-0.03		1049	1190	-0.13
MFC_DT2_04/00	0.12	0.12	-0.03		1173	1324	-0.13
MFC_DT2_05/00	0.13	0.13	0.00		1301	1489	-0.14
MFC_DT2_06/00	0.15	0.14	-0.02		1438	1646	-0.14

MFC_TR1_03/00	0.11	0.11	0.03	0.10	892	1158	-0.30
MFC_TR1_02/00	0.10	0.11	0.04	0.14	866	1129	-0.30
MFC_TR1_04/00	0.11	0.11	0.06	0.17	977	1289	-0.32
MFC_TR1_05/00	0.12	0.13	0.07	0.14	1113	1447	-0.30
MFC_TR1_06/00	0.13	0.14	0.09	0.14	1234	1598	-0.30
MFS_DT1_02/00	0.08	0.08	0.05	0.07	491	761	-0.55
MFS_DT1_03/00	0.08	0.09	0.05	0.12	523	790	-0.51
MFS_DT1_04/00	0.09	0.09	0.05	0.12	600	897	-0.49
MFS_DT1_05/00	0.11	0.12	0.14	0.14	827	1223	-0.48
MFS_DT1_06/00	0.12	0.14	0.15	0.17	958	1387	-0.45
MFS_DT2_02/00	0.09	0.08	-0.04		555	793	-0.43
MFS_DT2_03/00	0.09	0.09	-0.02		528	815	-0.54
MFS_DT2_04/00	0.09	0.09	0.00		597	918	-0.54
MFS_DT2_05/00	0.12	0.12	0.01		927	1223	-0.32
MFS_DT2_06/00	0.13	0.14	0.02		1072	1387	-0.29
MFS_TR1_02/00	0.08	0.08	-0.05	0.07	490	769	-0.57
MFS_TR1_03/00	0.09	0.09	-0.03	0.11	517	786	-0.52
MFS_TR1_04/00	0.09	0.09	-0.02	0.12	584	883	-0.51
MFS_TR1_05/00	0.11	0.12	0.04	0.18	785	1157	-0.47
MFS_TR1_06/00	0.12	0.13	0.07	0.21	910	1322	-0.45

Επεξηγήσεις στηλών:

1. Στοιχεία Πειράματος: Κωδ. Διατομής / Φορτίου / Χρονική Περίοδος
2. Υπολογισμένη κρίσιμη κατακόρυφη τάση (MPa) στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (πραγματικό φορείο)
3. Υπολογισμένη κρίσιμη κατακόρυφη τάση (MPa) στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (εκτίμηση από ALI)
4. Διαφορά μεταξύ στηλών 2 και 3 ((2-3)/2)
5. Μετρημένη κρίσιμη κατακόρυφη τάση (MPa) στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης
6. Υπολογισμένη κρίσιμη κατακόρυφη αν. παραμόρφωση (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (πραγματικό φορείο)
7. Υπολογισμένη κρίσιμη κατακόρυφη αν. παραμόρφωση (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (εκτίμηση από ALI)
8. Διαφορά μεταξύ στηλών 5 και 6 ((5-6)/6)

Πίνακας Π4.3: Σύγκριση υπολογισμένων και μετρημένων κρίσιμων αν. παραμορφώσεων των ασφαλτικών στρώσεων

1	2	3	4	5	6
LFC_DT1_02/00	199	212	268	14/2/2000	
LFC_DT1_03/00	218	231	568	3/4/2000	
LFC_DT1_04/00	279	314	594	21/4/2000	
LFC_DT1_05/00	370	361	677	23/5/2000	
LFC_TR1_02/00	199	210	339	14/2/2000	
LFC_TR1_03/00	217	229	786	3/4/2000	
LFC_TR1_04/00	278	294	857	21/4/2000	
LFC_TR1_05/00	328	338	1267	23/5/2000	
LFS_DT1_02/00	95	91	223	14/2/2000	
LFS_DT1_03/00	102	98	452	3/4/2000	
LFS_DT1_04/00	140	145	729	21/4/2000	
LFS_DT1_05/00	215	225	1261	23/5/2000	
LFS_DT1_06/00	329	344	1776	22/6/2000	
LFS_TR1_02/00	102	90	215	14/2/2000	
LFS_TR1_03/00	108	97	437	3/4/2000	
LFS_TR1_04/00	148	135	482	21/4/2000	
LFS_TR1_05/00	220	210	672	29/5/2000	
LFS_TR1_06/00	333	322	835	22/6/2000	
MFC_DT1_02/00	192	193	316	14/2/2000	
MFC_DT1_03/00	207	207	574	30/3/2000	
MFC_DT1_04/00	248	250	732	21/4/2000	
MFC_DT1_05/00	350	348			Δεν διατίθενται στοιχεία
MFC_DT1_06/00	462	458	1440	22/6/2000	
MFC_TR1_02/00	189		307	14/2/2000	Δεν διατίθενται στοιχεία
MFC_TR1_03/00	207	218	600	30/3/2000	
MFC_TR1_04/00	248	248	718	21/4/2000	
MFS_DT1_02/00	99	99	261	14/2/2000	
MFS_DT1_03/00	114	109	415	30/3/2000	
MFS_DT1_04/00	139	142	450	21/4/2000	
MFS_DT1_05/00	225	233	795	23/5/2000	
MFS_TR1_02/00	107	93	280	14/2/2000	
MFS_TR1_03/00	122	108	434	30/3/2000	
MFS_TR1_04/00	148	133	650	21/4/2000	
MFS_TR1_05/00	231	218	1435	23/5/2000	

1. Στοιχεία Πειράματος: Κωδ. Διατομής / Φορτίου / Χρονική Περίοδος
2. Υπολογισμένη κρίσιμη οριζόντια αν. παραμόρφωση (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) στο σημείο μέτρησης των ασφαλτικών στρώσεων (πραγματικό φορείο)
3. Υπολογισμένη κρίσιμη οριζόντια αν. παραμόρφωση (mm/mm, $\epsilon \cdot 10^{-6}$) στο σημείο μέτρησης των ασφαλτικών στρώσεων (εκτίμηση από ALI)
4. Διαφορά μεταξύ στηλών 2 και 3 (%)
5. Ημερομηνία δοκιμής / μετρήσεως σε πραγματικό χρόνο.
6. Παρατηρήσεις

Πίνακας Π4.4: Λόγοι τιμών υπολογισμένων κρίσιμων μεγεθών για σύγκριση με λόγους ALI (βλ. επεξηγήσεις στηλών)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
FA	5000/120	500/500	150	0.10	0.10	1.03	0.11	0.12	0.90	0.11	0.13	0.86	578	526	1.10	610	634	0.96
FA	4000/150	400/500	100	0.08	0.08	1.04	0.09	0.10	0.90	0.09	0.10	0.86	657	597	1.10	693	720	0.96
FA	7000/150	400/500	100	0.07	0.07	1.04	0.08	0.09	0.90	0.08	0.09	0.87	584	531	1.10	616	640	0.96
FA	7000/150	300/500	60	0.06	0.06	1.04	0.06	0.07	0.90	0.06	0.08	0.85	769	670	1.15	812	844	0.96
FA	5000/150	350/500	80	0.07	0.07	1.03	0.08	0.09	0.91	0.08	0.09	0.86	715	651	1.10	755	785	0.96
FA	3000/150	500/400	100	0.10	0.10	1.04	0.11	0.12	0.91	0.11	0.13	0.87	778	707	1.10	821	853	0.96
FA	10000/120	400/500	120	0.09	0.08	1.04	0.09	0.10	0.90	0.10	0.11	0.86	613	558	1.10	647	673	0.96
FA	8000/150	250/500	50	0.05	0.05	1.04	0.06	0.07	0.89	0.06	0.07	0.87	846	770	1.10	893	928	0.96
FA	4500/120	400/400	80	0.10	0.10	1.03	0.11	0.12	0.90	0.11	0.13	0.86	1012	921	1.10	1068	1110	0.96
FA	4500/150	300/500	60	0.06	0.06	1.03	0.07	0.08	0.90	0.07	0.08	0.87	855	778	1.10	903	938	0.96
FA	7500/150	350/400	90	0.09	0.08	1.04	0.09	0.10	0.90	0.09	0.11	0.86	767	698	1.10	809	841	0.96
FA	6000/170	400/500	120	0.07	0.07	1.04	0.08	0.08	0.98	0.08	0.09	0.86	518	471	1.10	546	568	0.96
FA	9500/120	350/500	80	0.07	0.07	1.04	0.08	0.09	0.91	0.08	0.09	0.86	741	674	1.10	782	813	0.96
FA	8000/100	400/500	150	0.11	0.11	1.04	0.12	0.14	0.90	0.12	0.14	0.86	681	619	1.10	719	747	0.96
FA	6500/120	400/400	180	0.15	0.14	1.04	0.16	0.18	0.90	0.16	0.19	0.86	750	682	1.10	791	822	0.96
FA	5000/150	500/400	200	0.13	0.12	1.03	0.14	0.16	0.90	0.14	0.16	0.86	578	526	1.10	610	634	0.96
FA	3500/170	600/300	150	0.13	0.13	1.03	0.15	0.16	0.90	0.15	0.17	0.87	722	656	1.10	762	792	0.96
FA	6000/140	350/500	100	0.08	0.08	1.04	0.09	0.10	0.90	0.09	0.10	0.86	683	622	1.10	721	750	0.96
FA	5500/130	250/400	70	0.10	0.10	1.04	0.11	0.12	0.90	0.11	0.13	0.86	1192	1084	1.10	1258	1308	0.96
FB	5000/200	400/400	100	0.08	0.08	1.04	0.09	0.10	0.90	0.09	0.10	0.84	660	578	1.14	694	732	0.95
FB	6500/250	300/500	60	0.04	0.04	1.03	0.04	0.05	0.90	0.04	0.05	0.82	513	449	1.14	539	569	0.95
FB	8000/200	500/500	120	0.06	0.06	1.03	0.07	0.07	0.91	0.07	0.08	0.83	414	362	1.14	435	459	0.95
FB	6500/250	400/500	160	0.06	0.06	1.03	0.07	0.08	0.90	0.07	0.08	0.84	354	310	1.14	373	393	0.95
FB	3000/250	300/500	80	0.06	0.06	1.04	0.07	0.07	0.90	0.06	0.08	0.83	617	540	1.14	648	684	0.95
FB	10000/180	300/500	90	0.06	0.06	1.03	0.07	0.08	0.89	0.07	0.08	0.83	575	503	1.14	604	638	0.95
FB	3000/300	250/300	60	0.06	0.06	1.03	0.07	0.07	0.91	0.07	0.08	0.83	801	702	1.14	842	889	0.95
FB	3500/230	300/500	70	0.06	0.05	1.04	0.06	0.07	0.89	0.06	0.07	0.84	664	582	1.14	698	737	0.95
FB	4000/200	300/400	90	0.09	0.08	1.04	0.10	0.11	0.90	0.09	0.11	0.84	820	718	1.14	862	910	0.95
FB	4000/200	600/300	180	0.13	0.13	1.03	0.15	0.16	0.90	0.14	0.17	0.83	624	547	1.14	656	692	0.95
FB	7500/180	700/400	120	0.08	0.07	1.04	0.08	0.09	0.90	0.08	0.10	0.84	484	424	1.14	508	537	0.95
FB	6000/270	350/500	120	0.05	0.05	1.04	0.06	0.06	0.91	0.06	0.07	0.82	380	333	1.14	399	421	0.95

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
FB	5000/200	400/600	100	0.05	0.05	1.04	0.06	0.07	0.90	0.06	0.07	0.84	460	403	1.14	483	510	0.95
FB	5500/250	400/500	150	0.06	0.06	1.05	0.07	0.08	0.90	0.07	0.08	0.84	382	334	1.14	401	423	0.95
FB	8500/200	350/500	80	0.05	0.05	1.04	0.06	0.06	0.91	0.06	0.07	0.82	526	461	1.14	553	584	0.95
FB	8500/200	250/500	50	0.04	0.04	1.05	0.05	0.05	0.89	0.05	0.06	0.82	678	594	1.14	712	752	0.95
FB	7000/280	700/300	200	0.08	0.08	1.04	0.09	0.10	0.90	0.08	0.10	0.83	324	284	1.14	340	359	0.95
FB	4000/220	500/500	120	0.07	0.06	1.05	0.07	0.08	0.90	0.07	0.09	0.84	456	400	1.14	480	506	0.95
FB	3000/250	300/500	90	0.06	0.06	1.03	0.07	0.08	0.90	0.07	0.08	0.83	598	523	1.14	628	663	0.95
FA	3000/150	250/500	50	0.10	0.10	1.03	0.11	0.12	0.90	0.11	0.13	0.86	578	526	1.10	610	634	0.96
FA	4000/150	200/500	40	0.08	0.08	1.04	0.09	0.10	0.90	0.09	0.10	0.86	657	597	1.10	693	720	0.96
FA	6500/150	250/500	60	0.07	0.07	1.04	0.08	0.09	0.90	0.08	0.09	0.87	584	531	1.10	616	640	0.96
FA	5000/160	350/500	100	0.06	0.06	1.04	0.06	0.07	0.90	0.06	0.08	0.85	769	670	1.15	812	844	0.96
FB	2500/200	250/400	60	0.07	0.07	1.03	0.08	0.09	0.91	0.08	0.09	0.86	715	651	1.10	755	785	0.96
FB	5000/300	200/300	40	0.10	0.10	1.04	0.11	0.12	0.91	0.11	0.13	0.87	778	707	1.10	821	853	0.96
FB	10000/200	250/300	70	0.09	0.08	1.04	0.09	0.10	0.90	0.10	0.11	0.86	613	558	1.10	647	673	0.96
FB	5000/200	400/400	80	0.05	0.05	1.04	0.06	0.07	0.89	0.06	0.07	0.87	846	770	1.10	893	928	0.96
FB	8000/180	500/300	170	0.10	0.10	1.03	0.11	0.12	0.90	0.11	0.13	0.86	1012	921	1.10	1068	1110	0.96
FB	7000/250	400/300	120	0.06	0.06	1.03	0.07	0.08	0.90	0.07	0.08	0.87	855	778	1.10	903	938	0.96

Επεξηγήσεις σπηλών:

- 1: Κατηγορία Οδοστρώματος
- 2: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)/Πάχος Ασφαλτικών Στρώσεων (mm)
- 3: Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)/Πάχος Βάσης από Ασύνδετο Αιμο-χάλικο (mm)
- 4: Μέτρο Ελαστικότητας Στρώσης Έδρασης (MPa)
- 5: Κατ. Τάση (MPa) από A300-C4 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 6: Κατ. Τάση (MPa) από A300-600 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 7: Λόγος σπηλών 5 – 6 (Λόγος ALI: FA=1.03, FB=1.04)
- 8: Κατ. Τάση (MPa) από MD-83 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 9: Κατ. Τάση (MPa) από B737-800 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 10: Λόγος σπηλών 8 – 9 (Λόγος ALI: FA=0.90, FB=0.90)
- 11: Κατ. Τάση (MPa) από B747-400 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 12: Κατ. Τάση (MPa) από B777-300 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 13: Λόγος σπηλών 11 – 12 (Λόγος ALI: FA=0.86, FB=0.83)
- 14: Κατ. αν. παράμ. ($\epsilon_z \cdot 10^{-6}$) από B737-800 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 15: Κατ. αν. παράμ. ($\epsilon_z \cdot 10^{-6}$) από B747-400 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 16: Λόγος σπηλών 14 – 15 (Λόγος ALI: FA=1.10, FB=1.14)
- 17: Κατ. αν. παράμ. ($\epsilon_z \cdot 10^{-6}$) από B777-300 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 18: Κατ. αν. παράμ. ($\epsilon_z \cdot 10^{-6}$) από B787-8 (εκτίμηση δείκτη ALI)
- 19: Λόγος σπηλών 17 – 18 (Λόγος ALI: FA=0.96, FB=0.95)