



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

Διπλωματική εργασία

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΣΤΗ ΦΘΟΡΑ  
ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ



**Αθηνά Καστριώτη**

Επιβλέπων: Ανδρέας Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2021

## *ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ*

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ανδρέα Λοΐζο, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ για την καθοδήγηση και τη συνολική επίβλεψη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα κυρία Αγγελική Αρμένη για τις πολύτιμες συμβουλές και τη βοήθεια της για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου, για τη στήριξη που μου πρόσφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διερεύνηση της επίδρασης βαρέων αεροσκαφών στη φθορά οδοστρωμάτων αεροδρομίων είναι μια διαδικασία που απαιτείται στο πλαίσιο του σχεδιασμού νέων οδοστρωμάτων αεροδρομίων καθώς και στην περίπτωση αξιολόγησης υφιστάμενων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε η συνεισφορά των αεροσκαφών νέας γενιάς (βαρέα αεροσκάφη) στη συνολική φθορά των οδοστρωμάτων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε διαστασιολόγηση εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, χρησιμοποιώντας την αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού της FAA. Θεωρήθηκε ένα εύρος τιμών των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών που χρησιμοποιούνται στον Ελλαδικό χώρο και μία ενδεικτική σύνθεση κυκλοφορίας που περιλαμβάνει, τόσο αεροσκάφη νέας γενιάς, όσο και αεροσκάφη ήπιας επιβατικής κίνησης. Τα σχετικά αποτελέσματα και συμπεράσματα των αναλύσεων περιλαμβάνονται στο τεύχος της εργασίας.

## **ABSTRACT**

Investigating the impact of heavy aircraft on airport pavement damage is a process required in the context of the design of new airport pavements as well as in the case of evaluating existing airport pavements. In the context of this dissertation, the contribution of new generation aircraft (heavy aircraft) to the total damage of airfield pavements was investigated. For this purpose, flexible airfield pavements were designed using the FAA analytical method, considering a range of material mechanical characteristics used in Greece and aircraft mix that includes both new generation aircraft and mild passenger aircraft. The relevant results and conclusions of the analyses are included in the issue.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	ii
ABSTRACT.....	iii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Διατύπωση προβλήματος.....	1
1.2 Αντικείμενο-Μεθοδολογία.....	2
1.3 Δομή εργασίας.....	3
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ.....	5
2.1 Τύποι οδοστρωμάτων αεροδρομίων .....	5
2.2 Ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων .....	6
2.2.1 Συστήματα επάλληλων στρώσεων – θεωρία Burmister .....	7
2.2.2 Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων .....	8
2.2.3 Τρόπος καταπόνησης οδοστρωμάτων .....	9
2.3 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας.....	10
3. ΦΟΡΤΙΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	13
3.1 Υπολογισμός φόρτισης .....	13
3.2 Εξέλιξη αεροσκαφών .....	14
4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ FAA.....	18
4.1 Εξέλιξη μεθόδου σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων.....	18
4.2 Γενικές αρχές σχεδιασμού.....	19
4.3 Τυπικά υλικά της FAA.....	20
4.4 Δομή οδοστρώματος .....	21
4.5 Τυπικές τιμές πάχους κάθε στρώσης.....	23
4.6 Στοιχεία φόρτισης οδοστρωμάτων.....	24
4.6.1 Χαρακτηριστικά αεροσκαφών.....	24
4.6.2 Καλύψεις αεροσκαφών.....	25
4.7 Φθορά οδοστρώματος .....	27
4.8 Διαστασιολόγηση με το FAARFIELD.....	30
5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΦΘΟΡΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΒΑΡΕΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ.....	33
5.1 Εισαγωγή.....	33
5.2 Ερευνητική διαδικασία.....	35
5.3 Αποτελέσματα.....	39

5.3.1	Διαστασιολόγηση με τη χρήση των τυπικών υλικών της FAA.....	39
5.3.2	Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας ασφαλτικών στρώσεων .....	40
5.3.3	Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας της βάσης από ασύνδετα υλικά.....	42
5.3.4	Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας της υπόβασης από ασύνδετα υλικά.....	45
5.3.5	Μεταβολή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης.....	47
5.4	Συγκριτικά αποτελέσματα παραμορφώσεων .....	53
5.5	Προσέγγιση ισοδύναμου φορτίου μοναδιαίου τροχού.....	58
5.6	Επίδραση αναχωρήσεων στη φθορά .....	62
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	66
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ .....	69

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: (α) Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, (β) Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος.....	6
Εικόνα 2.2: Διατομές: (α) τεσσάρων στρώσεων, (β) τριών στρώσεων.....	8
Εικόνα 2.3: Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων.....	8
Εικόνα 2.4: Μεταβολή τάσεων σε ένα τυχαίο σημείο του οδοστρώματος κατά τη διέλευση φορτίου.....	10
Εικόνα 2.5: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος.....	11
Εικόνα 2.6: Κατανομή τάσεων στο οδόστρωμα.....	11
Εικόνα 3.1: Επιφάνεια επαφής τροχού.....	13
Εικόνα 4.1: Πλάτος κρίσιμης ζώνης $W_{FD}$ .....	20
Εικόνα 4.2: Ενεργά πλάτη δύο τροχών (χωρίς επικάλυψη).....	26
Εικόνα 4.3: Ενεργά πλάτη δύο τροχών (με επικάλυψη).....	26
Εικόνα 4.4: Διάγραμμα φθοράς του οδοστρώματος εγκάρσια του διαδρόμου κίνησης.....	28
Εικόνα 5.1: Κατανομή παραμορφώσεων από άξονες πολλαπλών τροχών.....	34
Εικόνα 5.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος A321-200.....	37
Εικόνα 5.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος A350-900.....	37
Εικόνα 5.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος B737-900.....	37
Εικόνα 5.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος B787-9.....	38
Εικόνα 5.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος A380-800.....	38
Εικόνα 5.7: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος B777-300.....	38
Εικόνα 5.8: Διατομή με τυπικά υλικά της FAA.....	39
Εικόνα 5.9: Διάγραμμα φθοράς οδοστρώματος με τα τυπικά υλικά της FAA.....	40
Εικόνα 5.10: Διατομή οδοστρώματος.....	40
Εικόνα 5.11: Μεταβολή πάχους διατομής οδοστρώματος.....	41
Εικόνα 5.12: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.....	41
Εικόνα 5.13: P/C για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας.....	42
Εικόνα 5.14: Διατομή οδοστρώματος.....	43
Εικόνα 5.15: Μεταβολή πάχους διατομής οδοστρώματος.....	43
Εικόνα 5.16: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.....	44
Εικόνα 5.17: P/C για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας.....	44
Εικόνα 5.18: Διατομή οδοστρώματος.....	45
Εικόνα 5.19: Μεταβολή πάχους διατομής οδοστρώματος.....	46

Εικόνα 5.20: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.....	46
Εικόνα 5.21: P/C για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας.....	47
Εικόνα 5.22: Διατομή οδοστρώματος.....	48
Εικόνα 5.23: Μεταβολή πάχους διατομής οδοστρώματος. ....	48
Εικόνα 5.24: Διατομές οδοστρώματος: (α) για CBR=8%, (β) για CBR=10%, (γ) για CBR=15%.....	49
Εικόνα 5.25: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.....	50
Εικόνα 5.26: P/C για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας.....	50
Εικόνα 5.27: Ενεργό πλάτος ελαστικών για CBR=8% του B777-300.....	51
Εικόνα 5.28: Ενεργό πλάτος ελαστικών για CBR=8% του A350-900.....	51
Εικόνα 5.29: Ενεργό πλάτος ελαστικών για CBR=15% του B777-300.....	52
Εικόνα 5.30: Ενεργό πλάτος ελαστικών για CBR=15% του A350-900.....	52
Εικόνα 5.31: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος A321-200 .....	53
Εικόνα 5.32: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος A350-900 .....	54
Εικόνα 5.33: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος A380.....	54
Εικόνα 5.34: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος A380 Belly.....	55
Εικόνα 5.35: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος B737-900.....	55
Εικόνα 5.36: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος B787-9.....	56
Εικόνα 5.37: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος B777-300.....	56
Εικόνα 5.38: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης για όλα τα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας. ....	57
Εικόνα 5.39: Ισοδύναμο φορτίο μοναδιαίου τροχού. ....	58
Εικόνα 5.40: Μεταβολή ισοδύναμου φορτίου για το αεροσκάφος B777-300 στην εγκάρσια διεύθυνση. ....	60
Εικόνα 5.41: Μεταβολή ισοδύναμου φορτίου για το αεροσκάφος A350-900 στην εγκάρσια διεύθυνση. ....	60
Εικόνα 5.42: Διατομές οδοστρώματος: (α) για CBR=8%, (β) για CBR=10%, (γ) για CBR=15%.....	61
Εικόνα 5.43: Περιοχή κάλυψης φορτίων στη διαμήκη διεύθυνση του B777-300 .....	62
Εικόνα 5.44: Διατομές οδοστρώματος:(α)για CBR=8%, (β)για CBR=10%, (γ) .....	63
Εικόνα 5.45: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.....	64
Εικόνα 5.46: Διατομές οδοστρώματος:(α)για CBR=8%, (β) για CBR=10%, (γ) για CBR=15%.....	64



Εικόνα 5.47: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.....	65
--	----

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Τυπικά υλικά της FAA.....	20
Πίνακας 4.2: Ελάχιστα πάχη στρώσεων οδοστρώματος. ....	23
Πίνακας 5.1: Εύρος μέτρου ελαστικότητας και πάχος στρώσεων.....	36
Πίνακας 5.2: Προβλεπόμενη κυκλοφορία οδοστρώματος. ....	37
Πίνακας 5.3: Φορτία αεροσκαφών. ....	39
Πίνακας 5.4: Ενεργό πλάτος τροχών .....	52
Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικά αεροσκαφών. ....	59
Πίνακας 5.6: Ισοδύναμο φορτίο για A350-900 και B777-300.....	61
Πίνακας 5.7: Σύνθεση κυκλοφορίας για το πρώτο σενάριο. ....	63
Πίνακας 5.8: Σύνθεση κυκλοφορίας για το δεύτερο σενάριο.....	63

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Διατύπωση προβλήματος

Τα αεροδρόμια αποτελούν μία από τις βασικότερες υποδομές μίας χώρας. Για το λόγο αυτό, οι εγκαταστάσεις ενός αεροδρομίου θα πρέπει να διασφαλίζουν την ασφαλή και ορθή πραγματοποίηση των λειτουργιών των αεροσκαφών με στόχο την μετακίνηση επιβατών και αγαθών. Σε παγκόσμιο επίπεδο, σημαντικό μέρος ανθρώπων και αγαθών μετακινούνται καθημερινά μέσω των αεροπορικών υποδομών μίας χώρας. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία της Παγκόσμιας Τράπεζας του 2016, οι αερομεταφορές στην Ελλάδα ισοδυναμούν με το 10,2% του ΑΕΠ, ενώ την περίοδο 2013-2018 οι αεροπορικές συνδέσεις αυξήθηκαν κατά 106%.

Τα οδοστρώματα αεροδρομίων (διάδρομοι προσγείωσης-απογείωσης, τροχόδρομοι, χώροι στάθμευσης) αποτελούν περίπου το 30% της συνολικής επένδυσης και υποδομής και το 40% του ετήσιου κόστους συντήρησης ενός αεροδρομίου. Ταυτόχρονα, είναι μία κατασκευή η οποία θα πρέπει συνεχώς να προσαρμόζεται στις υπάρχουσες συνθήκες προκειμένου να εξυπηρετεί με ασφάλεια την κίνηση αεροσκαφών (Fabre and Vauris, 2019). Επιπλέον, παρουσιάζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τα οδοστρώματα των οδών, όσον αφορά στα υλικά των επιμέρους στρώσεων τους, στη δομή τους, στον τρόπο κατασκευής τους και στην επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών. Ωστόσο, διαφοροποιούνται σε ορισμένες βασικές παραμέτρους σχεδιασμού και λειτουργίας τους. Για το λόγο αυτό συνηθίζεται να εξετάζονται ξεχωριστά από τα οδοστρώματα οδών.

Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ οδοστρωμάτων αεροδρομίων και οδών αφορούν κυρίως σε θέματα φόρτισης και καταπόνησης. Ορισμένες από τις διαφορές μεταξύ των δύο οδοστρωμάτων αναφέρονται στο μέγεθος των φορτίων, στο πλήθος φορτίων, στη συχνότητα φόρτισης, στις ταχύτητες αεροσκαφών, στην πίεση ελαστικών, στη διάταξη τροχών που επηρεάζει την κατανομή του βάρους των αεροσκαφών και στη διακύμανση που παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας στην εγκάρσια διεύθυνση. Η κυκλοφορία στα αεροδρόμια είναι τέτοια, ώστε η κατανομή της να συγκεντρώνεται κυρίως στο κέντρο του οδοστρώματος, ενώ στις οδούς στην άκρη του οδοστρώματος. Ακόμη, τα αεροσκάφη λειτουργούν με διαφορετικά φορτία και διαφορετικές διαμορφώσεις φορτίων. Κατά συνέπεια, οι ποικίλες διαμορφώσεις στα φορτία των αεροσκαφών αναμένεται να έχουν επίδραση στην εντατική καταπόνηση των οδοστρωμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαφοροποιήσεις που εντοπίζονται ανάμεσα στα οδοστρώματα οδών και στα οδοστρώματα αεροδρομίων, αποτελούν παράγοντες που έχουν σημαντικές επιπτώσεις στον σχεδιασμό τους και κατ' επέκταση σε θέματα κατασκευής και συμπεριφοράς τους.

Για την υλοποίηση του σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων έχουν αναπτυχθεί διεθνώς διάφορες μέθοδοι διαστασιολόγησης εύκαμπτων και δύσκαμπτων

οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Μερικές από τις μεθόδους αυτές είναι: η μέθοδος της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας FAA (Federal Aviation Administration) (FAA, 2016), του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (STBA: Service Technique des Bases Aériennes) (STAC, 2013), της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μεγάλης Βρετανίας (Directorate of Civil Engineering Services) (Directorate of civil engineering services, 1989), του Κέντρου Ανάπτυξης και Έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (ERCD: Engineer Research and Development Center) (ERDC, 2001), της Ένωσης Σκυροδέματος (PCA: Portland Center Association) (PCA, 1966) που εφαρμόζεται μόνο σε δύσκαμπτα οδοστρώματα.

Τα τελευταία χρόνια η συνεχής αύξηση της ζήτησης για αεροπορικές μεταφορές και η παρατηρούμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση σε μεγάλα αεροδρόμια, οδήγησαν σταδιακά στην κυκλοφορία αεροσκαφών που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη εμβέλεια και χωρητικότητα θέσεων. Ο συνδυασμός αυτών των δύο χαρακτηριστικών καθιστούν τα αεροσκάφη νέας γενιάς βαρύτερα. Την ίδια στιγμή, τα οδοστρώματα αεροδρομίων γηράσκουν, ενώ η κατασκευή ή η επέκταση αεροδρομίων είναι δύσκολη και σε ορισμένες περιπτώσεις αδύνατη να συμβεί. Συνεπώς, για τη σωστή διαχείριση και συντήρηση των υποδομών, είναι αναγκαίο να κατανοηθεί πως επηρεάζεται η εντατική καταπόνηση των οδοστρωμάτων από την εισαγωγή βαρέων αεροσκαφών στην κυκλοφορία.

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 μίας αξιόπιστης διαδικασίας για την αξιολόγηση της σχετικής επίδρασης των αεροσκαφών στην καταπόνηση των οδοστρωμάτων και τον έλεγχο επάρκειας της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη διαχείριση των μεταφορών. Το ερώτημα όμως που δημιουργείται είναι πώς συμβάλλουν στη φθορά του οδοστρώματος τα αεροσκάφη νέας γενιάς σε συνδυασμό με την υπάρχουσα σύνθεση κυκλοφορίας. Ενδιαφέρον προκαλεί, τόσο η ατομική φθορά που προκαλούν τα συγκεκριμένα αεροσκάφη, όσο και η συμβολή τους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.

## **1.2 Αντικείμενο-Μεθοδολογία**

Συνεκτιμώντας όσα αναφέρθηκαν έως τώρα, αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της εντατικής καταπόνησης και της φθοράς που προκαλείται στα εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων όταν στη σύνθεση κυκλοφορίας περιλαμβάνονται βάρεια αεροσκάφη. Σε ένα τυπικό αεροδρόμιο εύκαμπτα οδοστρώματα συναντιούνται σε διαδρόμους προσγείωσης-απογείωσης, τροχοδρόμους και συνδετήριους διαδρόμους. Για την υλοποίηση του στόχου της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν τα εξής:

- Αρχικά, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με την ένταξη των βαρέων αεροσκαφών στη σύνθεση κυκλοφορίας και τη συνεισφορά τους στην καταπόνηση και στη φθορά των οδοστρωμάτων.
- Έπειτα, διαμορφώθηκαν τυπικές διατομές ανάλυσης. Αρχικά, έγινε διαστασιολόγηση εύκαμπτου οδοστρώματος με τη χρήση των τυπικών υλικών της FAA και τις προτεινόμενες τιμές για τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών και στη συνέχεια προσδιορίστηκε η εντατική καταπόνηση και η φθορά που προκαλείται στο οδόστρωμα από μία τυπική σύνθεση κυκλοφορίας, στην οποία εντάχθηκαν βαρέα αεροσκάφη. Η φθορά αξιολογήθηκε και για κάθε αεροσκάφος και για το σύνολο των αεροσκαφών (αθροιστική φθορά).
- Στη συνέχεια, τροποποιήθηκαν οι παραδοχές για τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών και θεωρήθηκαν ορισμένες τιμές που να ανταποκρίνονται στα υλικά που εντοπίζονται στον Ελλαδικό χώρο. Όμοια με την τυπική διατομή της FAA, εξετάστηκε η μεταβολή της φθοράς του οδοστρώματος για τις νέες διατομές που προέκυψαν. Στο στάδιο αυτό, μεταβλήθηκαν οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας κάθε στρώσης (ασφαλτική στρώση, βάση και υπόβαση) καθώς και του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης. Η σύνθεση της κυκλοφορίας ήταν ίδια σε όλες τις διατομές.

Σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, ακολουθήθηκε η διεθνώς αναγνωρισμένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη αναλυτική μέθοδος της FAA. Προσδιορίστηκαν οι παραμορφώσεις στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός οδοστρώματος, δηλαδή στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης, αλλά ο υπολογισμός της φθοράς έγινε λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη δεύτερη θέση αστοχίας. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται τόσο με σχετικό σχολιασμό, όσο και ως προς τη σημασία που μπορούν να έχουν για τις υπηρεσίες διαχείρισης των υποδομών ενός αεροδρομίου.

### **1.3 Δομή εργασίας**

Η εργασία απαρτίζεται από έξι κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι τύποι των οδοστρωμάτων αεροδρομίων και οι βασικές αρχές ανάλυσης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι θεωρίες ανάλυσης που βασίζονται στην ελαστική θεώρηση για τα υλικά των στρώσεων του οδοστρώματος και αναφέρονται οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στη φόρτιση οδοστρωμάτων αεροδρομίων και στην εξέλιξη των αεροσκαφών που καταπονούν τα οδοστρώματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι γενικές αρχές της αναλυτικής μεθόδου της FAA για τη διαστασιολόγηση εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Γίνεται αναφορά στα προτεινόμενα υλικά της FAA για μία τυπική διατομή, στα χαρακτηριστικά των

αεροσκαφών (διάταξη - πλήθος τροχών, φορτίο, πίεση ελαστικών) και ορίζεται η φθορά ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου καθώς και οι παράμετροι που επηρεάζουν τη φθορά. Τέλος, γίνεται αναφορά και στο λογισμικό FAARFIELD της FAA.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνεται το ερευνητικό σκέλος της διπλωματικής εργασίας που αφορά στη διερεύνηση της επίδρασης βαρέων αεροσκαφών στη φθορά εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Αρχικά, περιγράφονται τα στάδια της ερευνητικής διαδικασίας και στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης.

Στο έκτο κεφάλαιο διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διερεύνηση καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα συναφή με το αντικείμενο της εργασίας.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση των βιβλιογραφικών αναφορών.

## **2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ**

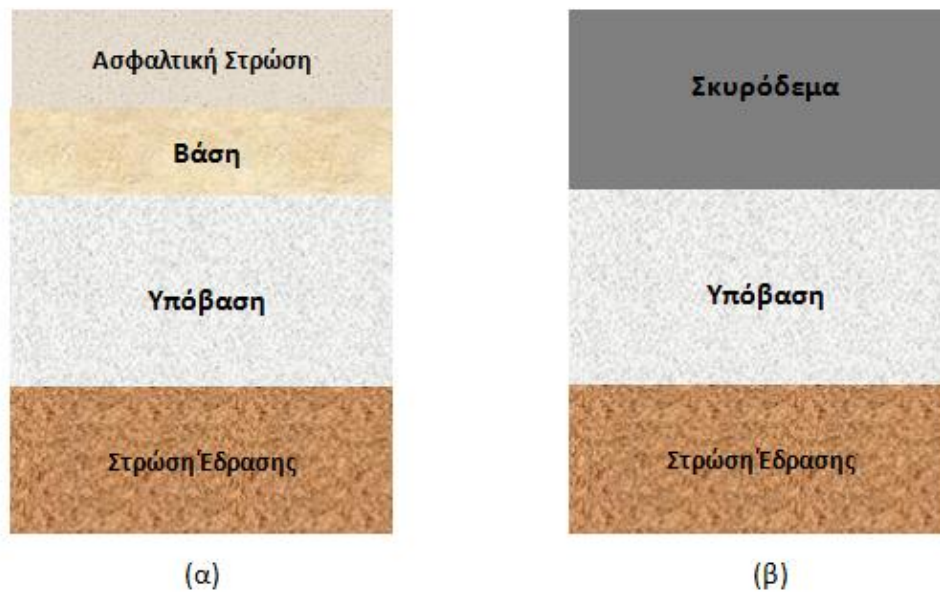
Οι συνθήκες φόρτισης είναι αυτές που καθορίζουν τον τύπο του οδοστρώματος (Wardle and Rodway, 2010). Σε ένα αεροδρόμιο εντοπίζονται διάφορες κατηγορίες καταστρώματων, ανάλογα με τις λειτουργίες που πρέπει να εξυπηρετήσει. Τα καταστρώματα που κυρίως χρησιμοποιούνται σε ένα αεροδρόμιο αφορούν στους διαδρόμους προσγείωσης-απογείωσης, στους τροχοδρόμους, στους συνδετήριους διαδρόμους, στα δάπεδα στάθμευσης, στα δάπεδα αναμονής, στα δάπεδα συντήρησης, στα βοηθητικά δάπεδα και σε ειδικά δάπεδα.

### **2.1 Τύποι οδοστρώματων αεροδρομίων**

Τα οδοστρώματα που χρησιμοποιούνται στα αεροδρόμια παρουσιάζουν την ίδια δομή με εκείνα των οδών και διακρίνονται στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- Εύκαμπτα οδοστρώματα τα οποία αποτελούνται από:
  - Την ασφαλτική επίστρωση, που κατασκευάζεται από ασφαλτικές στρώσεις, οι οποίες εν γένει διακρίνονται στην ανώτερη στρώση που ονομάζεται επιφανειακή στρώση (ορισμένες φορές αναφέρεται και ως αντιολισθηρή), στην ενδιάμεση/συνδετική στρώση και στην υποκείμενη στρώση ασφαλτικής βάσης.
  - Τη στρώση βάσης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο (θραυστό) αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης.
  - Τη στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο (θραυστό ή φυσικό) αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης.
  - Τη στρώση έδρασης.
  
- Δύσκαμπτα οδοστρώματα τα οποία αποτελούνται από:
  - Τη στρώση σκυροδέματος, η οποία παίζει ρόλο επίστρωσης και στρώσης βάσης.
  - Τη στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο ή συνηθέστερα κατεργασμένο με τσιμέντο αμμοχάλικο, με σκοπό κυρίως την ομοιόμορφη έδραση της πλάκας, αλλά και τη μείωση των υποχωρήσεων που αναπτύσσονται σε αυτή.
  - Τη στρώση έδρασης.

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα δεν έχουν ανάγκη από μεγάλο αριθμό στρώσεων, γιατί το σκυροδέμα είναι υλικό με συγκριτικά μεγάλα μέτρα ελαστικότητας και σημαντική αντοχή σε κάμψη. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες διατομές οδοστρώματων αεροδρομίων.



Εικόνα 2.1: (α) Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, (β) διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος.

Αποτέλεσμα των διαφορετικών λειτουργικών απαιτήσεων των καταστρωμάτων αεροδρομίου είναι η χρήση διαφορετικών τύπων οδοστρωμάτων. Στα δάπεδα αναμονής και συντήρησης των αεροσκαφών συνήθως επιλέγεται η κατασκευή δύσκαμπτου οδοστρώματος, το οποίο έχει πολύ καλή συμπεριφορά έναντι των στατικών φορτίων και της χημικής διάβρωσης. Αντίθετα, σε διαδρόμους προσγείωσης-απογείωσης, τροχοδρόμους και συνδετήριους διαδρόμους συνήθως χρησιμοποιούνται ασφαλτικά οδοστρώματα, δεδομένου ότι μπορούν να παρέχουν καλύτερη ποιότητα κύλισης, απόσβεση κραδασμών, ταχύτητα στην κατασκευή και ευελιξία σε θέματα συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών.

Μία από τις πιο σημαντικές εγκαταστάσεις σε ένα αεροδρόμιο είναι ο διάδρομος προσγείωσης και απογείωσης των αεροσκαφών, ο οποίος θα πρέπει να καλύπτει τις διεθνείς προδιαγραφές, τόσο σε θέματα αντοχής του οδοστρώματος, όσο και σε θέματα που αφορούν τις διαστάσεις του (Charles et al. 2016). Ως εκ τούτου, η κατάσταση του διαδρόμου προσγείωσης και απογείωσης πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη, ιδίως στη συντήρηση για την πρόληψη και την επισκευή των φθορών. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και την ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων διαδρόμων προσγείωσης-απογείωσης αεροσκαφών.

## 2.2 Ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Η ανάλυση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων βασίζεται στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων. Μέσω της ελαστικής θεωρίας υπολογίζονται οι παραμορφώσεις και οι τάσεις που αναπτύσσονται από την επιβολή φορτίων στις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος. Ο υπολογισμός τάσεων και παραμορφώσεων βασίζεται στις εξής παραδοχές: τα υλικά των στρώσεων θεωρούνται ομοιογενή, ισότροπα και ελαστικά, όλες οι στρώσεις εκτείνονται πλευρικά στο άπειρο και έχουν



πεπερασμένο πάχος, εκτός από την υποκείμενη στρώση η οποία έχει απεριόριστο βάθος. Σύμφωνα με την ελαστική θεωρία, ισχύει ότι μόλις αφαιρεθεί το φορτίο η επιφάνεια του οδοστρώματος θα επιστρέψει στην αρχική του μορφή (Shafabakhsh and Kashi, 2014a).

### **2.2.1 Συστήματα επάλληλων στρώσεων – θεωρία Burmister**

Για τον υπολογισμό των τάσεων σε ένα οδόστρωμα, γίνεται χρήση διάφορων θεωριών, ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων που συνθέτουν το υπό διερεύνηση οδόστρωμα. Τα μέτρα ελαστικότητας στα εύκαμπτα οδοστρώματα, ελαττώνονται με το βάθος και εξαιτίας αυτής της μείωσης, οι τάσεις και οι υποχωρήσεις στο υπέδαφος είναι μειωμένες σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν στο ιδεατό, ομοιογενές μέσο.

Στο πλαίσιο σχεδιασμού ενός οδοστρώματος βασικό εργαλείο αποτελεί η ανάλυση της συμπεριφοράς του εξαιτίας της φόρτισης (pavement response analysis). Για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα εξαιτίας της φόρτισης είναι απαραίτητη η διαμόρφωση κατάλληλου προσομοιώματος της κατασκευαστικής διατομής του. Ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα μπορεί να προσομοιωθεί από τρεις στρώσεις πεπερασμένου πάχους και απείρων διαστάσεων κατά την οριζόντια έννοια (ασφαλτικές στρώσεις, στρώση βάσης και υπόβασης). Οι στρώσεις αυτές εδράζονται πάνω σε μία στρώση με απεριόριστες οριζόντιες διαστάσεις και απεριόριστο πάχος (στρώση έδρασης) και προκύπτει τελικά ένα σύστημα τεσσάρων στρώσεων. Σε περίπτωση που τα υλικά της βάσης και της υπόβασης δεν διαφέρουν ποιοτικά (όταν χρησιμοποιούνται αμμοχάλικα), οι στρώσεις αυτές μπορούν υπό προϋποθέσεις να θεωρηθούν σαν μία ενιαία στρώση. Στην περίπτωση αυτή το παραπάνω πρότυπο μπορεί να απλοποιηθεί σε σύστημα τριών στρώσεων.

Μία ακόμη μεγαλύτερη απλοποίηση θα μπορούσε να γίνει, αν όλα τα μη κατεργασμένα υλικά της υπόβασης και της βάσης θεωρηθούν ότι αποτελούν μέρος της στρώσης έδρασης, οπότε προκύπτει σύστημα δύο στρώσεων (Burmister). Η ακρίβεια όμως ενός τέτοιου συστήματος είναι σχετικά μικρή. Κατά συνέπεια, η προσομοίωση ενός τυπικού εύκαμπτου οδοστρώματος μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Το σύστημα τριών στρώσεων θεωρείται σήμερα ένας ικανοποιητικός τρόπος για την ανάλυση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Επιπλέον, υπάρχει και η περίπτωση προσομοίωσης με σύστημα τεσσάρων στρώσεων.

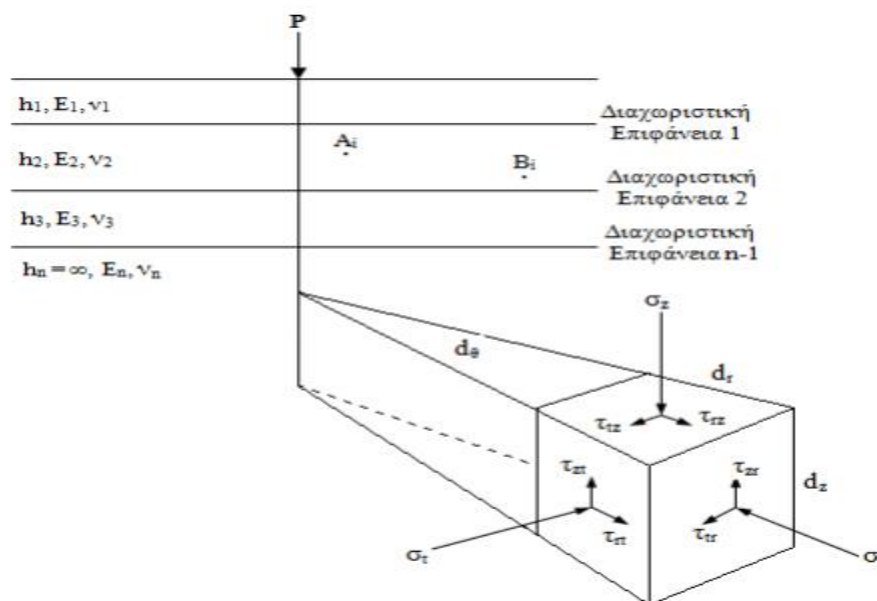


Εικόνα 2.2: Διατομές: (α) τεσσάρων στρώσεων, (β) τριών στρώσεων.

Η επίλυση ενός συστήματος επάλληλων στρώσεων που εδράζονται σε στρώση απεριόριστου πάχους έχει επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια για υλικά ομογενή και ισότροπα αξιοποιώντας τη θεωρία των πολλαπλών στρώσεων (Multi-Layer-Elastic Theory: MLET). Έτσι, το στατικό πρότυπο ορίζεται πλήρως αν εκτός από τα πάχη των στρώσεων, δοθούν και οι σταθερές που χαρακτηρίζουν το υλικό κάθε στρώσης που στην περίπτωση αυτή είναι το μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ) και ο λόγος Poisson ( $\nu$ ).

## 2.2.2 Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων

Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η γενική μορφή ενός ελαστικού συστήματος πολλαπλών στρώσεων.



Εικόνα 2.3: Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων.

Γενικά, η αναλυτική λύση της κατάστασης τάσης ή παραμόρφωσης, στηρίζεται σε διάφορες παραδοχές, οι οποίες είναι:

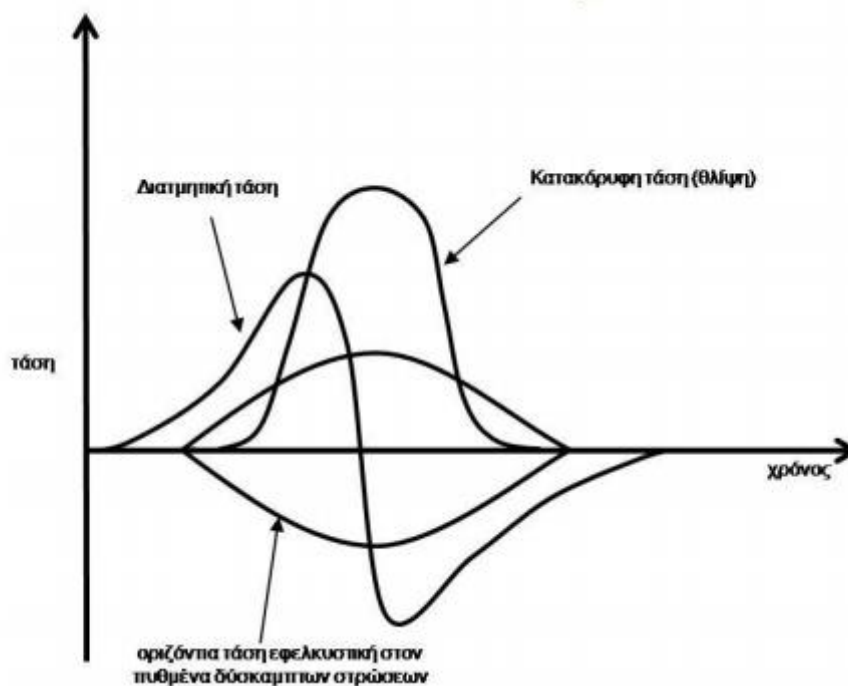
- Οι ιδιότητες του υλικού κάθε στρώσης είναι ομογενείς. Δηλαδή η ιδιότητα στο σημείο A είναι ίδια και στο σημείο B.
- Κάθε στρώση έχει πεπερασμένο πάχος, εκτός από την κατώτερη στρώση και όλες έχουν άπειρη πλευρική διάσταση.
- Κάθε στρώση είναι ισότροπη. Δηλαδή η ιδιότητα σε ένα σημείο A είναι ίδια σε κάθε διεύθυνση ή προσανατολισμό.
- Στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρώσεων, αναπτύσσεται πλήρης τριβή.
- Απουσιάζουν διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια.
- Τα υλικά των στρώσεων χαρακτηρίζονται από δύο ιδιότητες και συγκεκριμένα, το λόγο του Poisson καθώς επίσης και το μέτρο ελαστικότητας E.

Από τη θεωρία προκύπτει ότι σε ένα σημείο μίας οποιαδήποτε στρώσης, αναπτύσσονται εννέα τάσεις. Οι τρεις από αυτές είναι ορθές τάσεις ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ), που ενεργούν κάθετα στις έδρες του στοιχείου και οι υπόλοιπες έξι είναι διατμητικές τάσεις ( $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$ ), που ενεργούν παράλληλα προς τις έδρες. Οι συνθήκες στατικής ισορροπίας του στοιχείου, δείχνουν ότι οι διατμητικές τάσεις είναι ίσες. Δηλαδή,  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$  και  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ . Στις περιπτώσεις που οι διατμητικές τάσεις είναι μηδενικές οι τάσεις χαρακτηρίζονται ως κύριες.

Το σύστημα των επάλληλων ελαστικών στρώσεων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων βασίζεται στην παραδοχή ότι τα υλικά είναι ελαστικά, ομογενή και ισότροπα. Στην πραγματικότητα καμία από τις παραδοχές αυτές δεν είναι αληθινή. Έχει όμως αποδειχθεί πειραματικά ότι υπό τις δυναμικές συνθήκες φόρτισης των οδοστρωμάτων από τα οχήματα στις οδούς και από τα αεροσκάφη στα αεροδρόμια, τα υλικά συμπεριφέρονται με αρκετά καλή προσέγγιση σαν ελαστικές στρώσεις δεδομένου του μικρού χρόνου φόρτισης. Η θεώρηση αυτή αποτελεί μία ικανοποιητική προσέγγιση ενώ παράλληλα σχετική έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη (Λοΐζος και Πλατή, 2018a).

### 2.2.3 Τρόπος καταπόνησης οδοστρωμάτων

Κατά τη διέλευση ενός τροχού από ένα σημείο του οδοστρώματος η επιφάνεια επαφής μεταβάλλεται συνεχώς από μία ελάχιστη τιμή σε μία μέγιστη τιμή, ενώ στη συνέχεια παίρνει πάλι μία ελάχιστη τιμή. Με τον τρόπο που περιγράφεται προηγουμένως πραγματοποιείται και η φόρτιση ενός οδοστρώματος. Συγκεκριμένα η φόρτιση φτάνει σε μία μέγιστη τιμή και ακολουθεί η αποφόρτιση. Σε κάθε διέλευση του τροχού από ένα σημείο της διατομής ενός οδοστρώματος, οι αναπτυσσόμενες τάσεις μεταβάλλονται όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4.

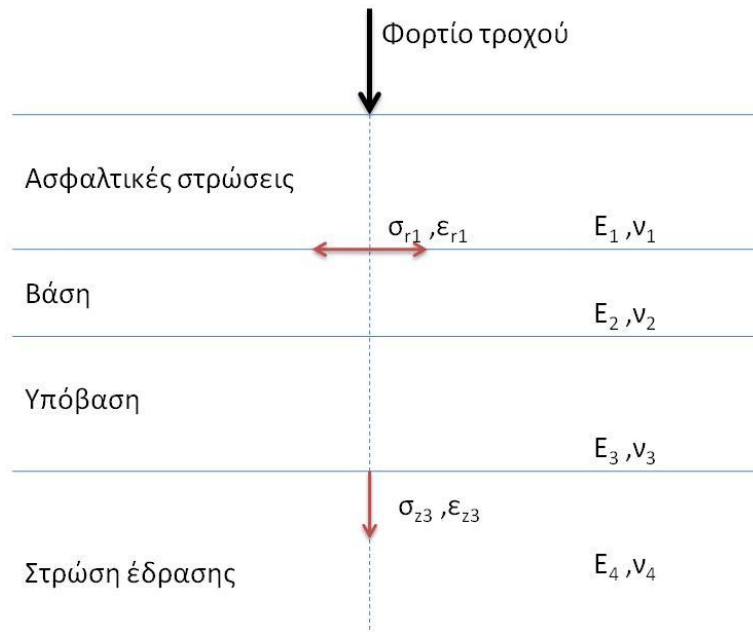


Εικόνα 2.4: Μεταβολή τάσεων σε ένα τυχαίο σημείο του οδοστρώματος κατά τη διέλευση φορτίου.

Στην εικόνα 2.4 παρουσιάζονται ποιοτικά οι τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα σημείο του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια της διέλευσης ενός τροχού. Παρατηρείται ότι γενικά οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες τάσεις μεταβάλλονται κατά παρόμοιο τρόπο, με τη διαφορά ότι το κύμα φόρτισης για τις οριζόντιες τάσεις είναι μεγαλύτερο και με μικρότερη ένταση από το κύμα των κατακόρυφων τάσεων. Επίσης, στο κάτω μέρος των δύσκαμπτων στρώσεων, οι οριζόντιες τάσεις είναι εφελκυστικές, εν αντιθέσει με τις κατακόρυφες που είναι αποκλειστικά θλιπτικές. Όσον αφορά στη διαμητική τάση παρουσιάζει μία αντιστροφή στο πρόσημο.

### 2.3 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας

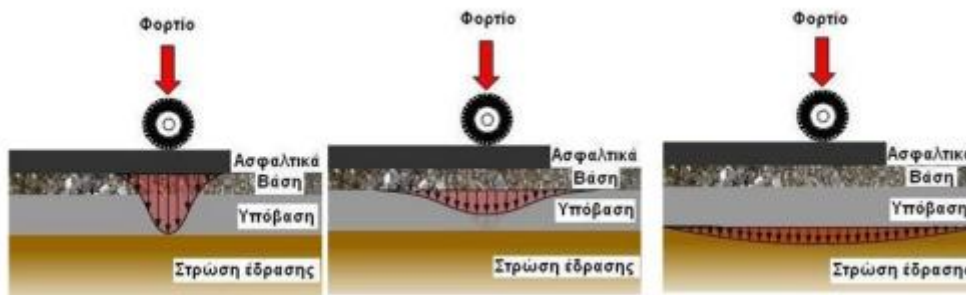
Οι κρίσιμες θέσεις για την εντατική κατάσταση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι ο πυθμένας των ασφαλικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται σε αυτές τις δύο θέσεις είναι οι εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις και οι κατακόρυφες θλιπτικές τάσεις και παραμορφώσεις, αντίστοιχα.



Εικόνα 2.5: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος.

Ο περιορισμός της κατακόρυφης παραμόρφωσης της επιφάνειας της στρώσης έδρασης προφυλάσσει το οδόστρωμα από παραμένουσες παραμορφώσεις. Με τον έλεγχο της εφελκυστικής αντοχής του ασφαλτομίγματος εξετάζεται η κόπωση της ασφαλτικής στρώσης. Για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής λαμβάνεται υπόψη η οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων.

Σημειώνεται ότι για την ανάλυση των οδοστρωμάτων θεωρείται μία πολυστρωματική δομή και λαμβάνεται υπόψη η κατανομή των τάσεων σε κάθε στρώση του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.6: Κατανομή τάσεων στο οδόστρωμα.

Οι ασφαλτικές στρώσεις των οδοστρωμάτων υπό την επίδραση των αξονικών φορτίων υπόκειται σε συνεχή καταπόνηση, άρα και σε εφελκυσμό της κάτω ίνας. Το μέγεθος της εφελκυστικής ανηγμένης παραμόρφωσης που αναπτύσσεται στην πράξη στα οδοστρώματα για συγκεντρωμένο φορτίο εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη δυσκαμψία των στρώσεων. Η εφελκυστική αυτή παραμόρφωση δημιουργεί συνθήκες για να επέλθει η κόπωση του ασφαλτομίγματος η οποία εμφανίζεται ως ρηγμάτωση.

Η ρηγματώση του οδοστρώματος λόγω της κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων είναι από τις κύριες μορφές αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Στην περίπτωση αυτή η ρηγματώση ξεκινάει από τον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, διαπερνάει τις υπερκείμενες στρώσεις και εμφανίζεται τελικά στην επιφάνεια του οδοστρώματος με τη μορφή κατά μήκος ρηγματώσεων.

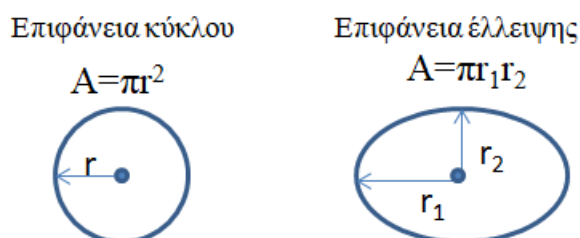
Η παραμένουσα παραμόρφωση, η οποία δημιουργείται κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων των φορτίσεων, θεωρείται στο πλαίσιο του αναλυτικού υπολογισμού των οδοστρωμάτων ότι προέρχεται μόνο από τη γεωτεχνική υποδομή και ειδικότερα από τη στρώση έδρασης. Από πλήθος μελετών έχει προκύψει ότι αν η παραμόρφωση που αναπτύσσεται στο υπέδαφος (στρώση έδρασης) κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, τότε δεν θα παρατηρηθεί μεγάλη παραμένουσα παραμόρφωση στο οδόστρωμα.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας είναι δύο (ο πυθμένας των ασφαλικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης) η επάρκεια και κατ' επέκταση η διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος προκύπτει αξιολογώντας τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται και στις δύο αυτές θέσεις. Κατά συνέπεια, η ευρύτερη έννοια της διάρκειας ζωής ενός εύκαμπτου οδοστρώματος ουσιαστικά μεταφράζεται υπό την έννοια της μηχανικής σε «δύο ζωές» (Λοΐζος και Πλατή, 2018b).

### 3. ΦΟΡΤΙΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

#### 3.1 Υπολογισμός φόρτισης

Όμοια με τις οδούς, η μεταφορά των φορτίων των αεροσκαφών στο οδόστρωμα γίνεται μέσω του συστήματος των τροχών του. Διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά φόρτισης προκύπτουν λόγω του μεγέθους των φορτίων, της μεγάλης ποικιλίας στη διάταξη του συστήματος των τροχών και στη γεωμετρία των τροχών, δηλαδή στην επιφάνεια επαφής. Σύμφωνα με την απλοποιητική παραδοχή που επικρατεί στη φόρτιση των οδών, η επιφάνεια επαφής θεωρείται κυκλική, εμβαδού  $A = \pi r^2$  όπου  $r$  είναι η ακτίνα της επιφάνειας επαφής τροχού και οδοστρώματος. Στην περίπτωση των αεροσκαφών, η επιφάνεια επαφής τροχού και οδοστρώματος θεωρείται συνήθως ελλειπτική, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1. Το εμβαδό της έλλειψης δίνεται από τον τύπο εμβαδού  $A = \pi r_1 r_2$ , όπου  $r_1, r_2$  είναι οι ακτίνες της ελλειπτικής επιφάνειας.



Εικόνα 3.1: Επιφάνεια επαφής τροχού.

Με γνωστή την επιφάνεια επαφής  $A$  (σε  $\text{mm}^2$ ) και το φορτίο που παραλαμβάνει ο κάθε τροχός ( $P$  σε  $\text{N}$ ), η πίεση που μεταβιβάζει ο τροχός στο οδόστρωμα ( $p$  σε  $\text{MPa}$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$p = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

Κάθε αεροσκάφος ανάλογα με το βάρος του και το πλήθος των τροχών του οδηγεί σε διαφορετική φόρτιση και καταπόνηση του οδοστρώματος, η οποία μάλιστα εξαρτάται και από την αλληλεπίδραση των τροχών μεταξύ τους. Σταδιακά, η αύξηση του βάρους των αεροσκαφών αναμένεται να επιβαρύνει περισσότερο το οδόστρωμα, ωστόσο σημαντικό ρόλο παίζει και το σύστημα των τροχών του κάθε αεροσκάφους. Παράδειγμα από δύο συστήματα τροχών φαίνεται στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Παραδείγματα από διαφορετικά συστήματα τροχών.

Η αύξηση της αεροπορικής επιβατικής κίνησης σε συνδυασμό με την κυκλοφοριακή συμφόρηση που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια σε μεγάλα αεροδρόμια παγκοσμίως αποτέλεσε σταδιακά κίνητρο για την κατασκευή βαρύτερων αεροσκαφών που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη εμβέλεια και χωρητικότητα θέσεων. Λόγω των διαφορετικών τύπων αεροσκαφών που έχουν κατασκευαστεί στο πέρασμα των χρόνων, οι πιέσεις επαφής τροχού και οδοστρώματος γενικά διαφοροποιούνται ως αποτέλεσμα και της ποικιλομορφίας στα συστήματα των τροχών (εικόνα 3.2).

Στην συνέχεια παρουσιάζεται μία σύντομη αναφορά στην εξέλιξη των αεροσκαφών.

### 3.2 Εξέλιξη αεροσκαφών

Οι αδερφοί Ράιτ πέτυχαν την πρώτη πειραματική πτήση αεροσκάφους το 1903. Τα οφέλη των αεροσκαφών γρήγορα έγιναν αντιληπτά και έτσι το 1909 κατασκευάστηκε το πρώτο αεροσκάφος. Το 1914 τα αεροσκάφη έπαιξαν σημαντικό ρόλο στον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Εκείνη την εποχή τα οδοστρώματα του αεροδρομίου δεν αντιμετώπιζαν προβλήματα καθώς τα αεροσκάφη είχαν αρκετά μικρό βάρος. Μεταξύ των δύο Παγκόσμιων Πολέμων οι κινητήρες των αεροσκαφών σταδιακά βελτιωνόντουσαν και η εξέλιξη των αεροσκαφών ήταν ταχεία. Επομένως τα αεροσκάφη έπαιξαν σημαντικό ρόλο στις στρατιωτικές επιχειρήσεις κατά την διάρκεια του πολέμου.



Εικόνα 3.3: Typical WWI aircraft.



Η τεχνολογία των στρατιωτικών αεροσκαφών κατά τη διάρκεια του δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου αποτέλεσε επίσης βάση για σημαντικές εξελίξεις στα εμπορικά αεροσκάφη. Χαρακτηριστικά μεταξύ των δεκαετιών του 1940 και του 1950, οι πιέσεις των ελαστικών στα στρατιωτικά αεροσκάφη είχε σχεδόν διπλασιαστεί, συγκεκριμένα η πίεση ελαστικών από 0,6 MPa έγινε 1,2 MPa.

Σημαντικό βήμα στην ανάπτυξη των εμπορικών αεροσκαφών ήταν το DC-8-50, που δόθηκε στην κυκλοφορία πρώτη φορά το 1958 (εικόνα 3.4). Τα αεροσκάφη αυτά είχαν φορτίο δεκαεννέα τόνους και πίεση ελαστικών 1,35 MPa. Η πίεση των ελαστικών και τα φορτία ανά τροχό σταδιακά αυξήθηκαν. Άλλα σημαντικά αεροσκάφη είναι το B737-800 που δόθηκε στην κυκλοφορία το 1997, το οποίο δεν έχει αποσυρθεί από την κυκλοφορία, το B747-100 και το B747-400, που δόθηκαν στην κυκλοφορία το 1966 και 1989, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.4: DC-8-50.

Τα τελευταία χρόνια, οι κύριες εξελίξεις στην τεχνολογία των αεροσκαφών έχουν γίνει στην εμπορική βιομηχανία των αεροσκαφών και όχι στον τομέα της στρατιωτικής αεροπορίας. Είναι πλέον κοινό ότι η τεχνολογία ορισμένων στρατιωτικών αεροσκαφών βασίζεται σε αυτή των εμπορικών αεροσκαφών.

Το 2001 η αεροπορική εταιρία Airbus παρουσίασε το εμπορικό αεροσκάφος A340-600 (εικόνα 3.5). Το συγκεκριμένο αεροσκάφος θεωρείται ένα από τα πιο απαιτητικά αεροσκάφη από άποψη υποδομής οδοστρωμάτων. Έχει πίεση ελαστικών ίση με 1,61 MPa και φορτίο ανά τροχό ίσο με 30,8 τόνους (Airbus, 2021).



Εικόνα 3.5: Airbus A340-600.

Το 2005 εισήχθη στην κυκλοφορία το μεγαλύτερο επιβατικό αεροσκάφος σε όλο τον κόσμο, το A380-800 (εικόνα 3.6). Αν και το βαρύτερο αεροσκάφος, παρουσιάζεται μικρότερη πίεση ελαστικών και φορτίο ανά τροχό, 26,8 τόνους ανά τροχό και πίεση ίση με 1,50 MPa.



Εικόνα 3.6: Airbus A380-800.

Το 2009 τίθεται στην κυκλοφορία το αεροσκάφος B787-8 με πίεση ελαστικών 1,6 MPa και φορτίο ανά τροχό ίσο με 27 τόνους (εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Boeing 787.

Το 2010 εισήχθη στην κυκλοφορία το αεροσκάφος B747-8 (Εικόνα 3.8). Η τεχνολογία του βασίστηκε σε αυτή του αεροσκάφους B747-400, η πίεση ελαστικών είναι 1,55 MPa και το φορτίο ανά τροχό 26,5 τόνους (Boeing, 2021).



Εικόνα 3.8: Boeing 747-8.

Το 2022 αναμένεται να τεθεί σε κυκλοφορία το επιβατικό αεροσκάφος B777-9 (εικόνα 3.9) αναμένεται ότι θα είναι το μεγαλύτερο επιβατικό αεροσκάφος της εταιρίας Boeing.



Εικόνα 3.9: Boeing 777-9.

Όσον αφορά στην αεροπορική εταιρία Airbus, το νεότερο της αεροσκάφος είναι το A350 και η πρώτη του πτήση πραγματοποιήθηκε το 2013. Έγιναν αλλαγές στην τεχνολογία του συγκεκριμένου αεροσκάφους το 2015 και αντικαταστάθηκε με το μοντέλο A350-900 και το 2016 με το αεροσκάφος A350-800. Το A350-900 (εικόνα 3.10) είναι το πιο απαιτητικό εμπορικό αεροσκάφος από άποψη πίεσης ελαστικών και φορτίου ανά τροχό, συγκεκριμένα η πίεση ελαστικών είναι 1,66 Μρα και το φορτίο ανά τροχό 31,8 τόνους (Australian Airports Association, 2017).



Εικόνα 3.10: Airbus A350-900.

Συνοπτικά, τα αεροσκάφη έχουν αλλάξει σημαντικά, ιδιαίτερα μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Οι αεροπορικές εταιρίες έχουν ως κύριο στόχο να επιτύχουν το μικρότερο κόστος ανά επιβάτη ανά χιλιόμετρο. Ενώ ταυτόχρονα, η κατασκευή μεγαλύτερων αεροσκαφών έχει ως αντίκτυπο την αύξηση των απαιτήσεων των οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

## **4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ FAA**

Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Μία μεθοδολογία που χρησιμοποιείται ευρέως είναι εκείνη που έχει αναπτυχθεί από την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας FAA (Federal Aviation Administration). Η FAA έχει δημιουργήσει την εγκατάσταση National Airport Pavement Test Facility (NAPTF), με στόχο την εξέλιξη των μεθοδολογιών σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Πραγματοποιώντας δοκιμές πλήρους κλίμακας στην υπόψη εγκατάσταση γίνεται προσομοίωση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος όταν αυτό υπόκειται σε φόρτιση αεροσκαφών (Garg and Hayhoe, 2008).

### **4.1 Εξέλιξη μεθόδου σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων**

Προκειμένου να επιτευχθεί ο σχεδιασμός οδοστρωμάτων αεροδρομίου, εισήχθησαν διάφορες μεθοδολογίες διαστασιολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, το 1995 δημοσιεύτηκε από την FAA η εμπειρική μέθοδος σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίου, η οποία εξελίχθηκε και συμπληρώθηκε με διορθώσεις με τη πάροδο των χρόνων (FAA, 1995). Η εν λόγω μέθοδος βασίζεται σε συγκεκριμένες παραδοχές που συνδυάζουν το εμπειρικό υπόβαθρο και τις εκτενείς έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί από την FAA. Συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για διαστασιολόγηση νέων, αξιολόγηση αλλά και ενίσχυση υφιστάμενων εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Την εμπειρική μέθοδο διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA, έρχεται να διαδεχθεί το 2009 η αναλυτική μέθοδος σχεδιασμού, οι βασικές αρχές της οποίας αναφέρονται στο εγχειρίδιο Advisory Circular 150/5320-6E (FAA, 2009). Η αναλυτική μέθοδος χρησιμοποιείται τόσο για τη διαστασιολόγηση όσο και για την αξιολόγηση και ενίσχυση υφιστάμενων εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Η FAA προκειμένου να διευκολύνει τη διαδικασία σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων, ανέπτυξε το υπολογιστικό σχεδιαστικό πρόγραμμα FAARFIELD 1.305 (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design).

Στην προσπάθεια εξέλιξης και βελτίωσης της αναλυτικής μεθόδου της FAA, εισήχθη μία νέα έκδοση της μεθόδου η οποία περιγράφεται από το Advisory Circular 150/5320-6F (FAA, 2016). Η εξελιγμένη μορφή της αναλυτικής μεθόδου της FAA εφαρμόζει τις βασικές αρχές της στη διαδικασία σχεδιασμού μέσω της χρήσης του FAARFIELD 1.42, αντικαθιστώντας το FAARFIELD 1.305 που χρησιμοποιούσε η αρχική μορφή της αναλυτικής μεθόδου. Η βασικότερη διαφορά των δύο αυτών μεθόδων είναι οι νόμοι αστοχίας που χρησιμοποιεί η κάθε μία.

Η εισαγωγή νέων αεροσκαφών δημιούργησε την ανάγκη διεξαγωγής περαιτέρω δοκιμών σε πλήρη κλίμακα για τη βελτίωση των μεθοδολογιών σχεδιασμού

οδοστρωμάτων. Η κύρια αλλαγή στην αναλυτική μέθοδο της FAA σχετικά με την εμπειρική μέθοδο είναι η μη χρήση του αεροσκάφους σχεδιασμού. Η μέθοδος δέχεται οποιαδήποτε σύνθεση κυκλοφορίας και λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία και την ακριβή θέση των τροχών του κάθε αεροσκάφους σε σχέση με τον άξονα του διαδρόμου κίνησης. Η αναλυτική μέθοδος είναι σε θέση να εξετάσει τη φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη νέας γενιάς στα οδοστρώματα αεροδρομίων (Vieira, 2015).

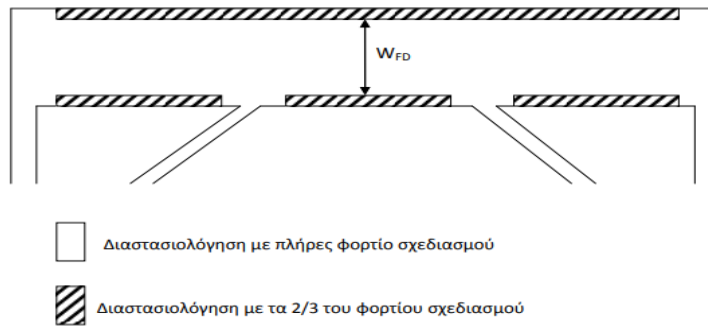
## 4.2 Γενικές αρχές σχεδιασμού

Η ανάλυση και ο σχεδιασμός οδοστρώματος περιλαμβάνουν την αλληλεπίδραση τεσσάρων εξίσου σημαντικών παραγόντων: της στρώσης έδρασης, των υλικών της βάσης και της υπόβασης της δομής του οδοστρώματος, των περιβαλλοντικών συνθηκών και των χαρακτηριστικών των εφαρμοζόμενων φορτίων. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των οδοστρωμάτων αεροδρομίων πρέπει να παρέχουν επαρκή υποστήριξη για τα φορτία που επιβάλλονται από τα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας. Για την κάλυψη αυτών των απαιτήσεων η ποιότητα και το πάχος του οδοστρώματος θα πρέπει να μπορούν να υποστηρίξουν τα επιβαλλόμενα φορτία (FAA, 2016).

Σε μία μηχανιστική - εμπειρική διαδικασία σχεδιασμού οδοστρωμάτων, καθίσταται απαραίτητος ο προσδιορισμός κατάλληλων παχών για καθεμία από τις επιμέρους στρώσεις, ούτως ώστε να περιορίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις σε αποδεκτά επίπεδα, βάσει των προβλεπόμενων συνθηκών φόρτισης (Gopalakrishnan and Thompson, 2006).

Οι σχεδιαστικές απαιτήσεις που δημιουργούνται από τη φόρτιση και την καταπόνηση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων οδηγούν συχνά στην απαίτηση για μεγαλύτερα πάχη των επιμέρους στρώσεων τους και κατά συνέπεια σε υψηλότερο κόστος κατασκευής. Ωστόσο, για λόγους οικονομίας σε πολλές περιπτώσεις επιλέγεται να μην διατηρείται σταθερό το πάχος καθ' όλο το πλάτος του καταστρώματος και επιλέγεται η μείωση του πάχους των οδοστρωμάτων εκτός των κρίσιμων περιοχών. Οι τύποι των αεροσκαφών που πρόκειται να εξυπηρετηθούν από το εκάστοτε αεροδρόμιο, καθορίζουν το πλάτος της κρίσιμης περιοχής, δεδομένου ότι οι κινήσεις τους κατανέμονται σε μία ζώνη γύρω από τον άξονα του διαδρόμου. Το πλάτος της κρίσιμης περιοχής ( $W_{FD}$ ) διαστασιοποιείται με το πλήρες φορτίο σχεδιασμού (Λοΐζος και Πλατή, 2018β).

Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η κάτοψη ενός διαδρόμου προσγείωσης-απογείωσης αεροσκαφών καθώς και το πλάτος της κρίσιμης ζώνης (το σχέδιο δεν είναι υπό κλίμακα).



Εικόνα 4.1: Πλάτος κρίσιμης ζώνης  $W_{FD}$ .

Επιπλέον, σημαντικό ρόλο κατά τον σχεδιασμό ενός οδοστρώματος έχει η επιλεγμένη θερμοκρασία, η οποία αναφέρεται και ως ισοδύναμη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία αυτή ορίζεται ως μία σταθερή θερμοκρασία και είναι ίση με τη μέση μηνιαία θερμοκρασία της κάθε χώρας (Mounier, 2014).

### 4.3 Τυπικά υλικά της FAA

Στον πίνακα 4.1 παρατίθενται τα τυπικά υλικά της FAA τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των στρώσεων ενός εύκαμπτου οδοστρώματος (ασφαλτική στρώση, βάση και υπόβαση οδοστρώματος). Για κάθε ένα υλικό αναφέρεται η κωδικοποίησή του και τα χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 4.1: Τυπικά υλικά της FAA.

Υλικό		Στρώση οδοστρώματος	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Λόγος Poisson
P-401/P-403/P-601 HMA	Θερμό Ασφαλτόμιγμα	Ασφαλτική στρώση	1.380	0,35
P-401/P-403HMA	Ασφαλτική Βάση θερμού ασφαλτομίγματος	Βάση	3.000	0,35
P-306 Lean Concrete	Σταθεροποιημένη βάση από τσιμέντο	Βάση	5.000	0,20
P-304 cement treated base	Σταθεροποιημένη βάση από τσιμέντο	Βάση	3.500	0,20
P-209 crushed aggregate	Βάση από θραυστό αμμοχάλικο	Βάση	Καθορίζεται από το πρόγραμμα	0,35
P-208 aggregate	Βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο	Βάση	Καθορίζεται από το πρόγραμμα	0,35
P-219 Recycled concrete aggregate	Ανακυκλώσιμο σκυρόδεμα με αδρανή	Βάση	Καθορίζεται από το πρόγραμμα	0,35

Υλικό		Στρώση οδοστρώματος	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Λόγος Poisson
P-211 Lime rock	Ασβεστόλιθος	Βάση	Καθορίζεται από το πρόγραμμα	0,35
P-154 uncrushed aggregate	Μη θραυστό αμμοχάλικο	Υπόβαση	Καθορίζεται από το πρόγραμμα	0,35
P-301 soil cement	Εδαφικό υλικό κατεργασμένο με τσιμέντο	Υπόβαση	1.700	0,20

Στον πίνακα 4.1 παρατίθενται για κάθε υλικό ενδεικτική τιμή του μέτρου ελαστικότητας (σε MPa) και του λόγου Poisson, τα οποία περιλαμβάνονται στο λογισμικό FAARFIELD και λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση.

#### 4.4 Δομή οδοστρώματος

Σύμφωνα με την FAA, ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα αποτελείται από μία επιφανειακή ασφαλτική στρώση, η οποία τοποθετείται είτε πάνω από τη βάση είτε πάνω από την υπόβαση (εάν απαιτείται), για την προστασία της στρώσης έδρασης. Κάθε στρώση πρέπει να προστατεύει την υποκείμενη στρώση (τη στρώση στήριξής του).

- **Ασφαλτική Στρώση:** Η επιφανειακή ασφαλτική στρώση περιορίζει την διείσδυση νερού στις υποκείμενες στρώσεις. Παρέχει μία ομαλή αντισθητική επιφάνεια και αντιστέκεται στις διατμητικές τάσεις που προκαλούνται από τα φορτία των τροχών των αεροσκαφών κυκλοφορίας. Για να υπάρχουν αυτά τα χαρακτηριστικά στην επιφάνεια θα πρέπει το μείγμα να αποτελείται από αδρανή και συνδετικό υλικό (άσφαλτος), ώστε να δημιουργείται μία ομοιόμορφη επιφάνεια με μέγιστη σταθερότητα και ανθεκτικότητα.

Σύμφωνα με τον πίνακα 4.1 το υλικό που χρησιμοποιείται στην επιφανειακή στρώση του οδοστρώματος είναι το P-401 και επιλέγεται προκειμένου να εξυπηρετήσει αεροσκάφη με βάρος άνω των 12.500 pounds (5.670 kg). Το υλικό P-403 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην επιφάνεια του οδοστρώματος προκειμένου να εξυπηρετήσει αεροσκάφη βάρους 12.500pounds (5.670 kg) ή λιγότερο. Τα παραπάνω υλικά έχουν μέτρο ελαστικότητας 200.000 psi (1.380 MPa) και λόγο Poisson 0,35. Το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνει συντηρητικά αυτή την τιμή και προκύπτει για θερμοκρασία ασφαλτομίγματος ίση με 32 °C (90 °F).

- **Βάση:** Η βάση μεταφέρει στις υποκείμενες στρώσεις τα φορτία των τροχών που επιβάλουν τα αεροσκάφη της κυκλοφορίας στο οδόστρωμα. Καλύτερα υλικά θεωρούνται αυτά που αποτελούνται από σκληρά και ανθεκτικά αδρανή. Η ποιότητα της στρώσης εξαρτάται από τον τύπο του υλικού, τη διαβάθμιση, τις

φυσικές ιδιότητες και τη συμπύκνωση. Η ποιότητα και το πάχος της στρώσης πρέπει να αποτρέψουν την αστοχία της και να αντέχει τις τάσεις που αναπτύσσονται.

Η στρώση βάσης ταξινομείται σε δύο κατηγορίες, τη σταθεροποιημένη και τη μη σταθεροποιημένη βάση. Εάν τα αεροσκάφη κυκλοφορίας σχεδιασμού έχουν μικτό βάρος 100.000 rounds (45.359 kg) ή περισσότερο, τότε απαιτείται σταθεροποιημένη βάση. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι τα P-401, P-403, P-306 και P-304, όπως αναφέρονται στον πίνακα 4.1. Εάν τα αεροσκάφη κυκλοφορίας σχεδιασμού έχουν μικτό βάρος 60.000 rounds (27.200kg) ή λιγότερο, τότε χρησιμοποιείται μη σταθεροποιημένη βάση. Σε αυτή την περίπτωση τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι τα P-209, P-208, P-219 και P-211 (πίνακας 4.1).

- Σταθεροποιημένη βάση: Για τη σταθεροποιημένη βάση υπάρχει δυνατότητα επιλογής υλικών στα οποία η σταθεροποίηση έχει γίνει, είτε με ασφαλτο (εύκαμπτη), είτε με τσιμέντο (δύσκαμπτη). Για μία τυπική σταθεροποιημένη εύκαμπτη βάση της FAA το υλικό που επιλέγεται είναι το P-401/P-403 (πίνακας 4.1), το οποίο έχει μέτρο ελαστικότητας 400.000 psi (3.000 MPa). Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής υλικών με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας. Τα υλικά της σταθεροποιημένης δύσκαμπτης βάσης αναφέρονται με την κωδικοποίηση P-304 και P-306 (πίνακας 4.1) τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση σε εύκαμπτα οδοστρώματα.
- Μη σταθεροποιημένη βάση: Στα εύκαμπτα οδοστρώματα το τυπικό υλικό για τη στρώση βάσης από αδρανή υλικά αναφέρεται με την ονομασία P-208. Το υλικό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση σε οδοστρώματα όταν τα αεροσκάφη κυκλοφορίας έχουν μικτό βάρος κάτω των 60.000 rounds (27.200 kg). Το μέτρο ελαστικότητας των μη σταθεροποιημένων στρώσεων δεν ορίζεται από τον χρήστη αλλά εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας της υποκείμενης στρώσης. Οι στρώσεις από αδρανή υλικά μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε στη δομή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, εκτός από την επιφανειακή στρώση και τη στρώση έδρασης.
- Υπόβαση: Η υπόβαση απαιτείται σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα όταν η στρώση έδρασης έχει CBR μικρότερο από 20%. Το βασικό υλικό υπόβασης όπως αναφέρεται στον πίνακα 4.1 είναι το P-154, το οποίο παρέχει φέρουσα ικανότητα ίση με αυτή που απαιτείται όταν ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι ίσος με 20%. Η υπόβαση μπορεί να αποτελείται είτε από επεξεργασμένα είτε από μη επεξεργασμένα αδρανή. Οι απαιτήσεις των υλικών της υπόβασης δεν είναι αυστηρές δεδομένου ότι οι εντάσεις στις οποίες υπόκειται είναι μικρές.

Προκειμένου να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας των στρώσεων από αδρανή στην περίπτωση που αυτές έχουν μεγάλο πάχος πραγματοποιείται η διαδικασία



επιμερισμού αυτών των στρώσεων. Το τελικό μέτρο ελαστικότητας επηρεάζεται άμεσα από το μέτρο ελαστικότητας της υποκείμενης στρώσης. Οι ανώτερες στρώσεις που έχουν προκύψει από τον επιμερισμό της στρώσης από αδρανή πρέπει να εμφανίζουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τις κατώτερες. Το τελικό μέτρο ελαστικότητας που ορίζεται για τη συνολική στρώση αδρανών, είναι ο μέσος όρος του μέτρου ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων (FAA, 2016). Η μέθοδος της FAA πραγματοποιεί τη διαδικασία επιμερισμού βάσει μιας εξελιγμένης υπορουτίνας (FAA Modulus Subroutine). Στη αναλυτική μέθοδο όλες οι επιμέρους στρώσεις αδρανών, εκτός από την ανώτερη, έχουν σταθερά πάχος 8 ίντσες, ενώ το πάχος της ανώτερης κυμαίνεται από 4 έως 12 ίντσες. Επομένως, για στρώση από αδρανή με πάχος 18 ιντσών, ο επιμερισμός γίνεται 8 ίντσες και 10 ίντσες η ανώτερη στρώση.

- **Στρώση έδρασης:** Η ικανότητα ενός εδάφους να αντιστέκεται στη διάτμηση και την παραμόρφωση ποικίλει ανάλογα με τις ιδιότητές του, την πυκνότητα και την υγρασία. Η παραμόρφωση της στρώσης έδρασης μειώνεται με το βάθος και για αυτό τον λόγο ο έλεγχος γίνεται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Η σχέση που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας  $E$  της υπόψη στρώσης με το δείκτη CBR είναι:

$$E = 1500CBR \text{ (psi)} \quad (4.1)$$

Στην αναλυτική μέθοδο της FAA το πάχος της στρώσης έδρασης θεωρείται ότι είναι άπειρο και χαρακτηρίζεται, είτε από το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , είτε από το δείκτη CBR.

#### 4.5 Τυπικές τιμές πάχους κάθε στρώσης

Η αναλυτική μέθοδος της FAA κατά τον σχεδιασμό ενός οδοστρώματος ορίζει ορισμένες ελάχιστες τιμές που αφορούν στο πάχος της κάθε στρώσης του οδοστρώματος. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα ελάχιστα πάχη που λαμβάνει υπόψη η αναλυτική μέθοδος της FAA για κάθε στρώση του οδοστρώματος.

Πίνακας 4.2: Ελάχιστα πάχη στρώσεων οδοστρώματος.

Στρώση οδοστρώματος	Τυπικά υλικά της FAA	Μέγιστο μικό βάρος αεροσκάφους		
		<5.670kg	<45.360kg	>45.360kg
Ασφαλτική στρώση	P-401	10cm	10cm	10cm
Σταθεροποιημένη βάση	P-401/ P-403/P-304/ P-306	Δεν απαιτείται	Δεν απαιτείται	12,5cm
Βάση από θραυστό αμμοχάλικο	P-209	7,5cm	15cm	15cm

Στρώση οδοστρώματος	Τυπικά υλικά της FAA	Μέγιστο μικτό βάρος αεροσκάφους		
		<5.670kg	<45.360kg	>45.360kg
Βάση από ασύνδετο υλικό	P-208	7,5cm	Δεν χρησιμοποιείται	Δεν χρησιμοποιείται
Υπόβαση	P-154	10cm	10cm	10cm

Οι ελάχιστες τιμές εξαρτώνται από τη στρώση (ασφαλτική, βάση, υπόβαση) και από το μέγιστο βάρος των αεροσκαφών της σύνθεσης κυκλοφορίας.

## 4.6 Στοιχεία φόρτισης οδοστρωμάτων

### 4.6.1 Χαρακτηριστικά αεροσκαφών

Στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων καθοριστικός παράγοντας είναι τα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας και τα χαρακτηριστικά τους (φορτίο, διάταξη τροχών, πίεση ελαστικών, αναχωρήσεις) (Chai et al. 2016). Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των αεροσκαφών που καθορίζουν τη φόρτιση των οδοστρωμάτων και λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό:

- Φορτίο:** Τα οδοστρώματα σχεδιάζονται για τα μέγιστα αναμενόμενα βάρη των αεροσκαφών. Η κατανομή του φορτίου γίνεται ως εξής: το 95% του συνολικού φορτίου του αεροσκάφους το αναλαμβάνει το κύριο φορείο (πίσω φορείο) και το 5% του φορτίου αναλαμβάνεται από το ρινιαίο φορείο (μπροστινό φορείο). Τα φορτία των αεροσκαφών αποτελούν τον κύριο παράγοντα καταπόνησης για τα οδοστρώματα των αεροδρομίων. Τα αεροσκάφη που δέχεται καθημερινά ένα αεροδρόμιο παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις ως προς το μέγιστο μικτό βάρος τους. Είναι λοιπόν σαφές ότι, το βάρος των αεροσκαφών επηρεάζει και τη φθορά του οδοστρώματος.
- Τύπος φορείων και διάταξη τροχών:** Ο τύπος φορείων και η διάταξη των τροχών καθορίζουν την κατανομή του βάρους του αεροσκάφους στο οδόστρωμα. Οι αποστάσεις των τροχών των φορείων είναι διαφορετικές για κάθε αεροσκάφος. Η διάταξη των τροχών και το μικτό βάρος των αεροσκαφών είναι αναπόσπαστο μέρος του σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων και συχνά αυτά τα χαρακτηριστικά του αεροσκάφους καθορίζουν την αντοχή του οδοστρώματος. Η κατασκευή μεγαλύτερων και βαρύτερων αεροσκαφών οδήγησε στην απαίτηση τα αεροσκάφη να αποτελούνται από περισσότερους τροχούς προκειμένου να αποτραπεί η επιβολή υπερβολικά υψηλών τάσεων από τα μεμονωμένα φορτία των τροχών στη δομή του οδοστρώματος (Shafabakhsh and Kashi, 2014b).

- **Πίεση ελαστικών:** Η πίεση των ελαστικών ποικίλει ανάλογα με τη διάταξη του φορείου, το μικτό βάρος και το μέγεθος του ελαστικού. Στην αναλυτική μέθοδο της FAA η πίεση των ελαστικών συνδέεται με το μικτό βάρος.
- **Προβλεπόμενη κυκλοφορία αεροσκαφών:** Για τον σχεδιασμό ενός οδοστρώματος απαιτείται πρόβλεψη των ετήσιων αναχωρήσεις σε κάθε αεροσκάφος. Σε γενικές γραμμές, τα οδοστρώματα πρέπει να είναι σχεδιασμένα ώστε να εξυπηρετούν τουλάχιστον 250 αναχωρήσεις για τα συνήθη αεροσκάφη (500 πτήσεις). Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις αεροσκάφη μη τακτικής χρήσης μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη δομή του οδοστρώματος. Για την πρόβλεψη της κυκλοφορίας χρησιμοποιούνται δεδομένα που μπορεί να προέρχονται από: τα στοιχεία των ιδίων των αεροδρομίων, την Terminal Area Forecast (TAF) για πρόβλεψη της αεροπορικής δραστηριότητας στα αεροδρόμια της Αμερικής, το Εθνικό Σχέδιο Ολοκληρωμένων Συστημάτων Αεροδρομίων (National Plan of Integrated Airport Systems), τα Στατιστικά Δραστηριοτήτων Αεροδρομίων (Airport Activity Statistics) και τις αναφορές της Εναέριας Κυκλοφορίας της FAA (FAA Traffic Activity Reports) (FAA,2016).

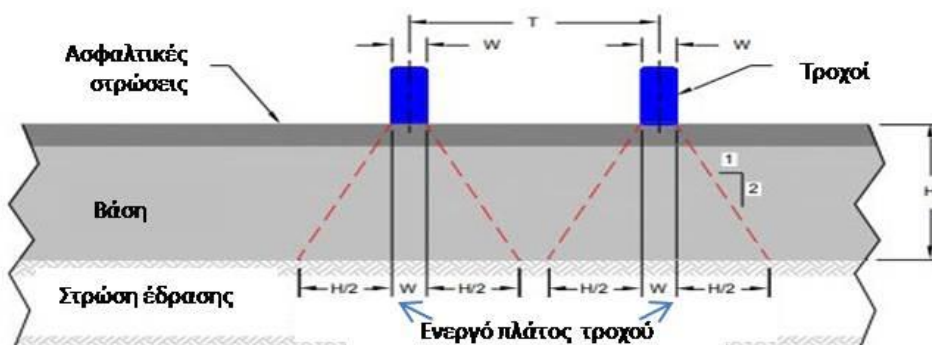
Συνήθως, καθοριστικό ρόλο κατά τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων έχουν τα βαρέα αεροσκάφη. Τα αεροσκάφη με ήπιας κυκλοφορία δεν επηρεάζουν το πάχος του οδοστρώματος, ακόμη και με σχετικά υψηλή συχνότητα διέλευσης. Επιπλέον, στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων λαμβάνονται υπόψη μόνο οι αναχωρήσεις και η κυκλοφορία άφιξης δεν επηρεάζει τη διαδικασία του σχεδιασμού. Αυτό συμβαίνει επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις τα αεροσκάφη όταν φτάνουν σε ένα αεροδρόμιο έχουν σημαντικά μικρότερο βάρος από ό,τι κατά την απογείωσή τους.

#### 4.6.2 Καλύψεις αεροσκαφών

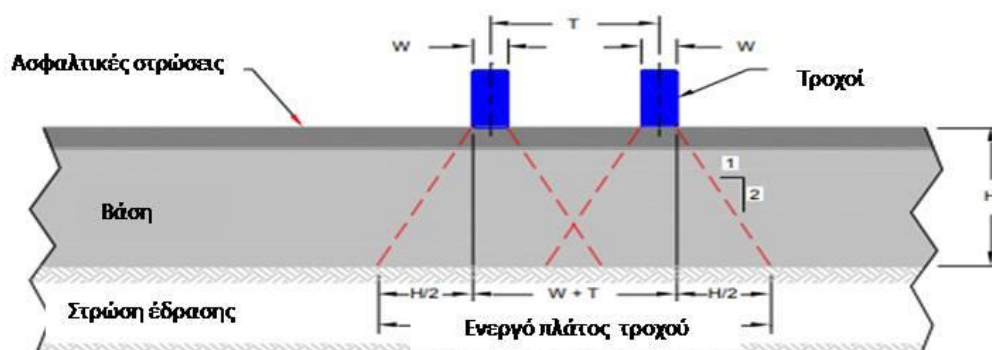
Ένα αεροσκάφος σπάνια διέρχεται κατά μήκος ενός οδοστρώματος σε μία απόλυτη ευθεία διαδρομή ή στο ίδιο ίχνος κάθε φορά. Καθώς ένα αεροσκάφος κινείται κατά μήκος ενός διαδρόμου ή ενός τροχοδρόμου, μπορεί να χρειαστούν πολλά περάσματα ώστε ένα συγκεκριμένο σημείο να λάβει τη μέγιστη καταπόνηση. Η αναλογία του αριθμού των περασμάτων που απαιτούνται για την εφαρμογή πλήρους φορτίου σε ένα συγκεκριμένο σημείο ορίζεται ως ο λόγος P/C (pass-to-coverage).

Εύκολα παρατηρείται ο αριθμός των διελεύσεων ενός αεροσκάφους, αλλά ο αριθμός των καλύψεων προκύπτει μέσω της ανάλυσης του οδοστρώματος. Μία κάλυψη εμφανίζεται όταν μία περιοχή του οδοστρώματος έχει τη μέγιστη τάση. Μέσω του λόγου P/C λαμβάνεται υπόψη η εγκάρσια κατανομή των αεροσκαφών. Ο λόγος P/C προσδιορίζεται μέσω στατιστικής ανάλυσης της κατανομής του φορτίου του τροχού στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Caron et al.2010).

Για τον υπολογισμό του λόγου P/C, η αναλυτική μέθοδος της FAA χρησιμοποιεί την έννοια του ενεργού πλάτους ελαστικού. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα, για τον υπολογισμό της αστοχίας της επιφάνειας της στρώσης έδρασης λόγω διάτμησης, το ενεργό πλάτος του ελαστικού ορίζεται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Οι «γραμμές απόκρισης» (response lines) σχεδιάζονται με κλίση 1:2 από το άκρο του τροχού μέχρι την επιφάνεια της στρώσης έδρασης όπως παρουσιάζονται στις εικόνες 4.2 και 4.3. Τα ελαστικά των αεροσκαφών μπορούν να θεωρηθούν, είτε ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, είτε όχι. Αυτό εξαρτάται με το εάν οι γραμμές απόκρισης επικαλύπτονται ή όχι (FAA, 2012).



Εικόνα 4.2: Ενεργά πλάτη δύο τροχών (χωρίς επικάλυψη).



Εικόνα 4.3: Ενεργά πλάτη δύο τροχών (με επικάλυψη).

Τα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν ένα αεροδρόμιο, δε διατρέχουν το οδόστρωμα στην ίδια εγκάρσια θέση κάθε φορά, αλλά παρατηρείται πλευρική μετατόπιση κατά την κίνηση τους, ο βαθμός της οποίας ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του οδοστρώματος και του καταστρώματος του, τον τύπο του αεροσκάφους και την ταχύτητα με την οποία κινείται το αεροσκάφος. Η εγκάρσια κατανομή των κινήσεων των αεροσκαφών μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή (Gaussian). Ένας συμβατικός τρόπος προσδιορισμού του πλάτους της εγκάρσιας κατανομής είναι να θεωρηθεί ισοδύναμο με δύο φορές την τυπική απόκλιση του κάθε καταστρώματος. Στους διαδρόμους απογείωσης-προσγείωσης η τυπική απόκλιση είναι μεγαλύτερη από αυτή των τροχοδρόμων. Ενώ, στους χώρους στάθμευσης και συντήρησης η τυπική απόκλιση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα (ίση με μηδέν), καθώς σε αυτούς του χώρους η ταχύτητα είναι μηδενική (Fabre and Vaurs, 2019).

## 4.7 Φθορά οδοστρώματος

Για τον σχεδιασμό ενός οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο της FAA λαμβάνεται υπόψη η αθροιστική φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη που δέχεται το οδόστρωμα. Η αθροιστική φθορά προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους φθορών που προκαλεί το κάθε αεροσκάφος ξεχωριστά και εκφράζεται μέσω του δείκτη αθροιστική φθοράς CDF (Cumulative Damage Factor). Οι Shafabakhsh and Kashi (2014a), ανέφεραν ότι ο δείκτης αθροιστικής φθοράς CDF, είναι το ποσοστό της δομικής ζωής ενός οδοστρώματος που έχει εξαντληθεί. Έτσι, η δομική κατάσταση ενός οδοστρώματος καθορίζεται από την εναπομένουσα διάρκεια ζωής του.

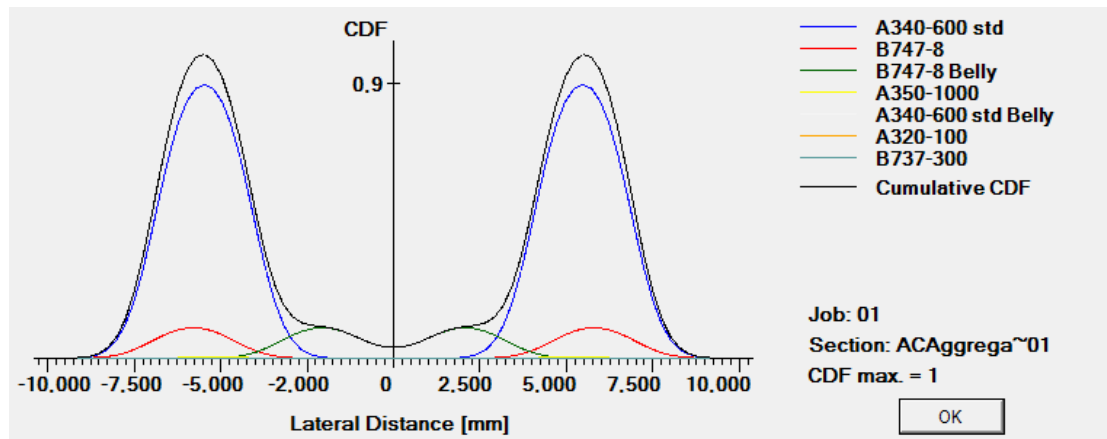
Ο δείκτης CDF κάθε αεροσκάφους ορίζεται ως ο λόγος των εφαρμοσμένων καλύψεων προς τις επιτρεπόμενες διελεύσεις έως την αστοχία (FAA,2016). Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του CDF κάθε αεροσκάφους παρουσιάζεται στην εξίσωση 4.2:

$$CDF = \frac{\text{Απογειώσεις αεροσκάφους για όλη την περίοδο σχεδιασμού}}{\left(\frac{P}{C}\right) \text{ Καλύψεις αεροσκάφους έως την αστοχία}} \quad (4.2)$$

Ο δείκτης αθροιστικής φθοράς CDF στις αναλυτικές μεθόδους είναι ο βασικός παράγοντας για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον κανόνα του Miner. Η επίδραση κάθε αεροσκάφους στη φθορά του οδοστρώματος λαμβάνεται υπόψη σύμφωνα με τον νόμο  $CDF = CDF_1 + \dots + CDF_A$ , όπου A είναι ο συνολικός αριθμός αεροσκαφών της κυκλοφορίας.

Ο σχεδιασμός του οδοστρώματος βασίζεται στην υπόθεση ότι η αστοχία του οδοστρώματος επέρχεται όταν ο δείκτης CDF είναι μεγαλύτερος από την μονάδα, για οποιοδήποτε κριτήριο αστοχίας. Στην περίπτωση που ο δείκτης CDF είναι μικρότερος της μονάδας ( $CDF < 1$ ) η δομική ζωή του οδοστρώματος υπερβαίνει την περίοδο σχεδιασμού. Όταν ο δείκτης CDF είναι μεγαλύτερος από ένα ( $CDF > 1$ ) το οδόστρωμα αναμένεται να αστοχήσει πριν το τέλος της περιόδου σχεδιασμού. Επιπλέον, όταν ο δείκτης CDF λάβει τιμή ίση με τη μονάδα ( $CDF = 1$ ) η δομική ζωή του οδοστρώματος ισούται με την περίοδο σχεδιασμού (Caron et al. 2010).

Στην εικόνα 4.4 φαίνεται η φθορά του οδοστρώματος, κατά πλάτος του διαδρόμου για διάφορους τύπους αεροσκαφών, καθώς και η συνολική φθορά που προκύπτει. Σημειώνεται ότι εξαιτίας της συμμετρίας των τροχών ενός αεροσκάφους, η φθορά του οδοστρώματος εξετάζεται στο μισό πλάτος του διαδρόμου κίνησης.



Εικόνα 4.4: Διάγραμμα φθοράς του οδοστρώματος εγκάρσια του διαδρόμου κίνησης.

Συνέπεια των διαφορετικών αποστάσεων μεταξύ των τροχών των φορείων στα αεροσκάφη και σε συνδυασμό με την εγκάρσια κατανομή της κίνησης, είναι ότι η μέγιστη φόρτιση δεν ασκείται πάντοτε στο ίδιο σημείο ή στην ίδια περιοχή του οδοστρώματος. Επομένως, η φόρτιση και η φθορά κατανέμεται σε μία ευρύτερη περιοχή του οδοστρώματος. Κατά συνέπεια, προκειμένου να εκτιμηθεί το συνολικό αποτέλεσμα της φόρτισης (φθορά) σε ένα οδόστρωμα είναι σκόπιμο να πραγματοποιηθούν κατάλληλες διερευνήσεις για τον υπολογισμό της αθροιστική φθοράς σε κάθε σημείο.

Για τον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, η αναλυτική μέθοδος της FAA χρησιμοποιεί τη μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση της επιφάνειας της στρώσης έδρασης ως τον κύριο παράγοντα αστοχίας του οδοστρώματος. Ως προεπιλεγμένο κριτήριο αστοχίας είναι η αστοχία της επιφάνειας της στρώσης έδρασης. Ωστόσο, η αστοχία λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος μπορεί να υπολογιστεί. Ο υπολογισμός του CDF στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων είναι προαιρετικός, αλλά συνιστάται στον τελικό έλεγχο σχεδιασμού (FAA, 2016).

Για τον υπολογισμό του δείκτη αθροιστικής φθοράς των ασφαλτικών στρώσεων και της στρώσης έδρασης, χρειάζεται εκτίμηση των απαιτούμενων καλύψεων - διελεύσεων έως την αστοχία. Οι απαιτούμενες καλύψεις-διελεύσεις εκτιμώνται μέσω των αντίστοιχων νόμων αστοχίας, για τις δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας του οδοστρώματος.

Όσον αφορά στην αστοχία λόγω κόπωσης των ασφαλτικών στρώσεων οι Shen and Carpenter (2007), ανέπτυξαν τη σχέση 4.3 προκειμένου να υπολογιστούν οι καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία.

$$N_f = 0,4801 PV^{-0,9007} \quad (4.3)$$

$N_f$ : η παράμετρος αυτή εκφράζει τις καλύψεις που απαιτούνται για ένα αεροσκάφος έως ότου επέλθει αστοχία των ασφαλτικών στρώσεων.

Η παράμετρος PV υπολογίζεται από τη σχέση 4.4.

$$PV = 44,422 \varepsilon_h^{5,140} S^{2,993} VP^{1,850} GP^{-0,4063} \quad (4.4)$$

$\varepsilon_h$ : αντιστοιχεί στη μέγιστη οριζόντια παραμόρφωση του πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων.

S: αποτελεί τη δυσκαμψία που υπολογίστηκε μέσω της εργαστηριακής δοκιμής standard four-point bending beam fatigue test η οποία δίνει τη μέγιστη δυσκαμψία για το ασφαλτόμιγμα, υπό διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και συχνοτήτων. Σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο της FAA, για το τυπικό υλικό P-401 η τιμή του S ορίζεται ίση με 4.137 MPa. Η τιμή αυτή προέκυψε για συχνότητα 10 Hz και θερμοκρασία 20°C.

VP: αυτή η μεταβλητή είναι μια ογκομετρική παράμετρος και δίνεται από τη σχέση που περιγράφεται στην εξίσωση 4.5.

$$VP = \frac{Va}{Va+Vb} \quad (4.5)$$

Va: αντιστοιχεί στον όγκο κενών αέρα.

Vb: εκφράζει την περιεκτικότητα σε άσφαλο κατά όγκο.

GP: είναι μία παράμετρος διαβάθμισης και δίνεται από τη σχέση 4.6.

$$GP = \frac{PNMS-PPCS}{P200} \quad (4.6)$$

P<sub>NMS</sub>: το ποσοστό αδρανών που περνά από το ονομαστικό μέγιστο κόσκινο (Normal Maximum Size).

P<sub>PCS</sub>: το ποσοστό αδρανών που περνά από το κύριο κόσκινο (Primary Control Sieve).

Οι προτεινόμενες τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους στην περίπτωση των τυπικών υλικών της FAA είναι οι εξής: S=4137 MPa, V<sub>a</sub>=3,5%, V<sub>b</sub>=12%, P<sub>NMS</sub>=95%, P<sub>PCS</sub>=58% και P<sub>200</sub>=4,5%.

Η εκτίμηση της φθοράς για τη στρώση έδρασης πραγματοποιείται μέσω των σχέσεων 4.7a και 4.7b, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία της στρώσης έδρασης (Shen and Carpenter, 2007).

$$C = \left(\frac{0,04141}{\varepsilon_v}\right)^{8,1}, C \leq 1000 \quad (4.7a)$$

$$\text{Log}_{10}(C) = (1/(-0.1638+185.19\varepsilon_v))^{0,60586}, C > 1000 \quad (4.7b)$$

C: είναι οι επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία της στρώσης έδρασης.

$\varepsilon_v$ : αντιστοιχεί στη μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση της επιφάνειας της στρώσης έδρασης.

## 4.8 Διαστασιολόγηση με το FAARFIELD

Ο αναλυτικός σχεδιασμός των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, όπως και των υπολοίπων κατηγοριών, συνίσταται στην ακόλουθη διαδικασία:

- Καθορισμός της διατομής του οδοστρώματος, στην οποία απεικονίζονται οι επιμέρους στρώσεις.
- Προσδιορισμός των φορτίων κυκλοφορίας. Στην περίπτωση των οδοστρωμάτων αεροδρομίου είναι ο καθορισμός των αεροσκαφών που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα.
- Προσδιορισμός της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών για παράδειγμα θερμοκρασιακές τάσεις, επιρροή της μεταβολής της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης από τις κλιματολογικές και υδρολογικές μεταβολές.
- Υπολογισμός του πάχους των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και ο προσδιορισμός των μηχανικών τους χαρακτηριστικών, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας  $E$  και ο λόγος Poisson  $\nu$ .
- Υπολογισμός των τάσεων, των παραμορφώσεων και των υποχωρήσεων στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας που προκαλούνται στο οδόστρωμα έπειτα από την επιβολή των φορτίων.
- Έλεγχος της επάρκειας του οδοστρώματος, η οποία σχετίζεται με τα επιλεγμένα πάχη και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρώσεων του οδοστρώματος. Ο στόχος είναι να μην παρουσιαστεί αστοχία κατά τη διάρκεια της προβλεπόμενης χρήσης σε καμία στρώση του οδοστρώματος.

Η Federal Aviation Administration (FAA) δημιούργησε το πρόγραμμα FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design (FAARFIELD) με στόχο τον σχεδιασμό εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Το FAARFIELD ενσωματώνει την πλευρική κατανομή της κίνησης ενός αεροσκάφους μέσω του λόγου διελεύσεις προς καλύψεις (P/C). Ο λόγος αυτός υπολογίζεται στην κορυφή της στρώσης έδρασης για τα εύκαμπτα οδοστρώματα και στην επιφάνεια του οδοστρώματος για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα ο υπολογισμός του λόγου αυτού μπορεί να γίνει και σε επιπλέον σημεία της διατομής, μέσω του κριτηρίου της οριζόντιας καταπόνησης του πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων (FAA,2016).

Το λογισμικό FAARFIELD της αναλυτικής μεθόδου FAA θεωρείται ένα από τα πιο αποτελεσματικά προγράμματα σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Λαμβάνει υπόψη τον δείκτη αθροιστικής φθοράς (CDF) της επιφάνειας της στρώσης έδρασης για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων. Το λογισμικό μπορεί να υπολογίσει και τον δείκτη φθοράς του πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων (Attia, 2019).

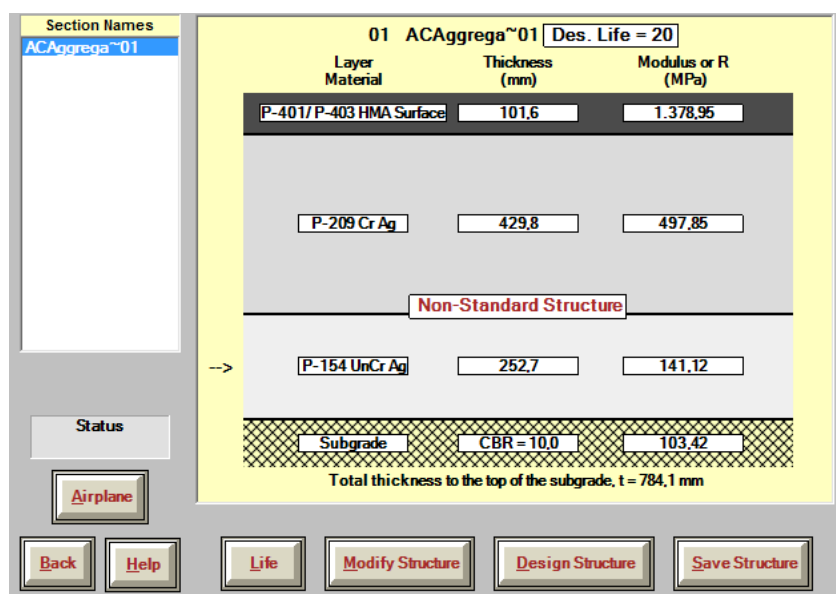
Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων το FAARFIELD εξετάζει δύο θέσεις αστοχίας: την κατακόρυφη καταπόνηση της επιφάνειας της στρώσης έδρασης και την οριζόντια καταπόνηση του πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων. Ο



περιορισμός της κατακόρυφης καταπόνησης έχει ως στόχο να περιορίσει τις παραμένουσες παραμορφώσεις και ο περιορισμός της οριζόντιας καταπόνησης έχει ως στόχο να περιορίσει τη ρηγματώση (κόπωση) του ασφαλτομίγματος. Εξ' ορισμού το FAARFIELD κατά τον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίου υπολογίζει τις κατακόρυφες παραμορφώσεις της επιφάνειας της στρώσης έδρασης. Ωστόσο, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής υπολογισμού των οριζόντιων παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών. Στο Advisory Circular AC 150/5320-6F επισημαίνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ο προσδιορισμός του πάχους ενός οδοστρώματος προκύπτει από το κριτήριο αστοχίας της στρώσης έδρασης, ωστόσο συνίσταται και ο έλεγχος αστοχίας των ασφαλτικών στρώσεων.

Τα βήματα που ακολουθούνται κατά την ανάλυση είναι:

- Αρχικά ορίζεται η διατομή του οδοστρώματος και η περίοδος σχεδιασμού. Συνήθως, η περίοδος σχεδιασμού επιλέγεται ίση με είκοσι (20) χρόνια. Το βέλος δίπλα από τη βασική στρώση υποδηλώνει ότι το πάχος της συγκεκριμένης στρώσης θα αλλάξει κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και οι άλλες στρώσεις θα παραμείνουν έτσι όπως αρχικά είχαν οριστεί. Επιλέγοντας την εντολή 'Design structure' προκύπτει η τελική διατομή του οδοστρώματος. Στην εικόνα 4.5 παρουσιάζεται το περιβάλλον του λογισμικού FAARFIELD.



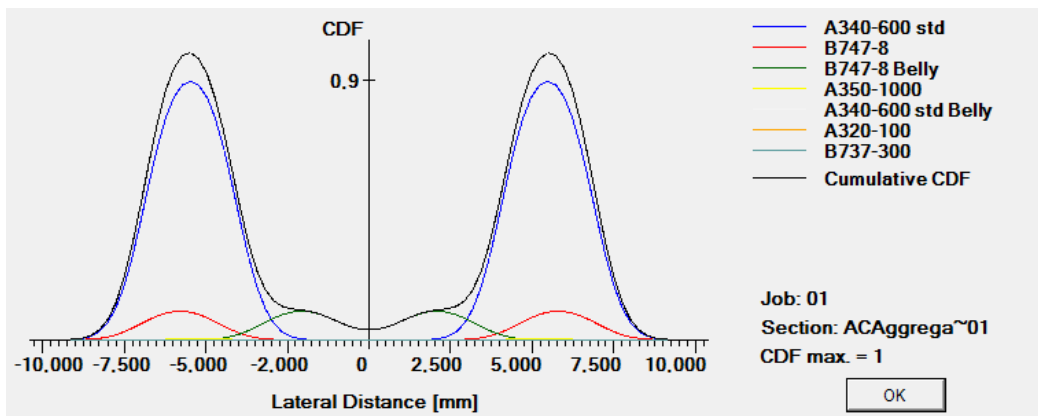
Εικόνα 4.5: Σχεδιασμός διατομής οδοστρώματος.

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενός εύκαμπτου οδοστρώματος υπολογίζεται πρώτα το πάχος της στρώσης βάσης που απαιτείται στην περίπτωση που η υποκείμενη στρώση είχε δείκτη CBR ίσο με 20%. Στη συνέχεια συγκρίνεται η τιμή του πάχους που προέκυψε με την ελάχιστη τιμή που απαιτείται για την εν λόγω στρώση.

- Υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής όλων των αεροσκαφών της σύνθεσης κυκλοφορίας από μία βιβλιοθήκη 400 αεροσκαφών στο υπόψη λογισμικό. Τα

χαρακτηριστικά των αεροσκαφών παρέχονται από τους κατασκευαστές, αποθηκεύονται σε μία εσωτερική βιβλιοθήκη αεροσκαφών και δεν μπορούν να αλλάξουν από τον χρήστη. Επιπλέον, εισάγονται οι ετήσιες αναχωρήσεις του κάθε αεροσκάφους της σύνθεσης κυκλοφορίας από τον χρήστη.

- Η διαδικασία σχεδιασμού ολοκληρώνεται όταν ο δείκτης CDF της στρώσης έδρασης είναι ίσος με την μονάδα. Εάν ο δείκτης CDF των ασφαλτικών στρώσεων (HMA CDF) είναι μικρότερος από τη μονάδα, τότε το οδόστρωμα δεν αστοχεί λόγω κόπωσης. Στην περίπτωση που είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα, σημαίνει ότι η διατομή αστοχεί λόγω των ασφαλτικών στρώσεων.
- Μετά την ολοκλήρωση σχεδιασμού του οδοστρώματος προκύπτει το διάγραμμα αθροιστικής φθοράς (CDF). Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζεται ενδεικτικό διάγραμμα φθοράς όπως προκύπτει μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας σχεδιασμού.



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα CDF.

Μετά το τέλος της ανάλυσης το λογισμικό δημιουργεί φακέλους με τα αποτελέσματα των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων σε μορφή κειμένου. Δεδομένα εξόδου του FAARFIELD είναι ο δείκτης φθοράς για κάθε ένα αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας και ο δείκτης αθροιστικής φθοράς για όλη τη διατομή του οδοστρώματος.

## **5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΦΘΟΡΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΒΑΡΕΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ**

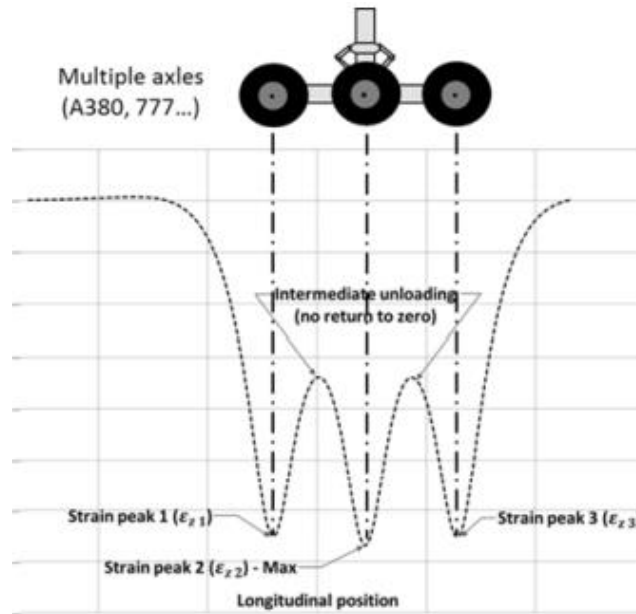
### **5.1 Εισαγωγή**

Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στο ερευνητικό σκέλος της διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα στη διερεύνηση της επίδρασης βαρέων αεροσκαφών στη φθορά εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Προς τούτο, σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά σε προγενέστερες σχετικές διερευνήσεις.

Οι Fabre and Vaurs (2019), επιχείρησαν να καταγράψουν τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, όταν στη σύνθεση κυκλοφορίας εντάσσονται αεροσκάφη νέας γενιάς, όπως το A380-800, το B777-300 και το A350-900, χρησιμοποιώντας την αναλυτική Γαλλική μέθοδο. Προκειμένου να αξιολογήσουν τη συνεισφορά των βαρέων αεροσκαφών στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος εξέτασαν μία τυπική διατομή ενός οδοστρώματος αεροδρομίου και μία σύνθεση κυκλοφορίας που περιείχε, τόσο αεροσκάφη ήπιας επιβατικής κίνησης, όσο και βαρέα αεροσκάφη. Συγκεκριμένα ο στόχος των αναλύσεων ήταν να αξιολογηθεί η συνεισφορά του A380-800 στη συνολική φθορά που προκαλείται στο οδόστρωμα, όταν αυτό εντάσσεται σε υπάρχουσα κυκλοφορία.

Διαπίστωσαν ότι εξαιτίας των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των μεγάλων αεροσκαφών, η φθορά που προκαλείται στο οδόστρωμα από τα αεροσκάφη νέας γενιάς είναι μικρότερη από εκείνη που προκαλούν αεροσκάφη ευρείας ατράκτου. Επιπλέον, προέκυψε ότι η θέση στην οποία το A380-800 εμφανίζει τη μέγιστη καταπόνηση διαφέρει από τη θέση που εμφανίζεται η μέγιστη αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.

Το αεροσκάφος A380-800 έχει μεγαλύτερο μικτό βάρος από τα αεροσκάφη B787-9 και B777-300, αλλά η ατομική φθορά που προκαλεί το A380-800 είναι μικρότερη από αυτή που προκαλούν τα άλλα δύο αεροσκάφη, αυτό οφείλεται στη γεωμετρία των τροχών. Ο τύπος και η διάταξη του τροχού καθορίζουν την κατανομή του βάρους του αεροσκάφους, αλλά και το πως θα ανταποκριθεί το οδόστρωμα σε αυτό. Αεροσκάφη όπως το A380-800 διαθέτουν άξονες πολλαπλών τροχών και εξαιτίας του μεγάλου ανοίγματος η παραμόρφωση του οδοστρώματος δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή, δηλαδή μεταξύ των κορυφών η παραμόρφωση δεν επιστρέφει στο μηδέν, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1: Κατανομή παραμορφώσεων από άξονες πολλαπλών τροχών.

Επιπλέον, οι Fabre and Vaurs (2019) μέσω αναλύσεων ευαισθησίας που πραγματοποίησαν κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για ίδιες ετήσιες αναχωρήσεις η δομική ζωή ενός οδοστρώματος με μικρό συνολικό πάχος επηρεάζεται περισσότερο από τα μεμονωμένα φορτία τροχού των αεροσκαφών της σύνθεσης κυκλοφορίας. Αντίθετα, τα οδοστρώματα με μεγαλύτερο πάχος η δομική ζωή τους επηρεάζεται περισσότερο από τη γεωμετρία των τροχών και την διάταξη τους.

Οι Shafabakhsh and Kashi (2014b), εξέτασαν την επίδραση της διαμόρφωσης των φορείων των αεροσκαφών των εταιριών Airbus και Boeing, σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίου μέσω της αναλυτικής μεθόδου της FAA. Διαπιστώθηκε ότι η διάταξη των τροχών ενός αεροσκάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το ποσοστό φθοράς που προκαλεί στο οδόστρωμα. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αποδεικνύουν ότι, όσο πιο σύνθετη είναι η διάταξη των τροχών ενός φορείου, τόσο μικρότερη είναι η φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη στο οδόστρωμα. Από τα αεροσκάφη της Airbus, το A340-500/600 παρουσιάζει το μεγαλύτερο δείκτη αθροιστικής CDF, καθώς διαθέτει μεγάλο μικτό βάρος και μικρό αριθμό τροχών. Από τα αεροσκάφη της Boeing, το B777-300ER παρουσιάζει το μεγαλύτερο δείκτη φθοράς. Το συμπέρασμα των αναλύσεων ήταν ότι το αεροσκάφος με το μεγαλύτερο μικτό βάρος, το A380-800 παρουσιάζει το μικρότερο δείκτη CDF. Οι είκοσι τροχοί που διαθέτει έχουν ως αποτέλεσμα η κατανομή του φορτίου ανά τροχό να είναι μικρότερη, οπότε παρόλο που έχει το μεγαλύτερο συνολικό βάρος ταυτόχρονα έχει το μικρότερο φορτίο ανά τροχό.

Ο Attia (2019), σε άρθρο του διερευνά την επίδραση των διαφορετικών τύπων αεροσκαφών στο σχεδιασμό ενός οδοστρώματος αεροδρομίου, με διαφορετική στρώση έδρασης κάθε φορά (αλλαγή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης) μέσω της αναλυτικής μεθόδου της FAA. Επιπλέον, στο άρθρο προσδιορίζονται οι διαφορές

που προκύπτουν όταν το κριτήριο σχεδιασμού είναι η φθορά της στρώσης έδρασης και όταν κριτήριο είναι η φθορά στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων. Διαπιστώθηκε ότι, το A350-900 έχει το πιο σοβαρό αντίκτυπο στο CDF των ασφαλτικών στρώσεων και ακολουθούν το B777-300, A380-800, B747-400 και μετά το A350-1000. Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι, για στρώση έδρασης με χαμηλό δείκτη CBR κρίσιμη θεωρείται η αστοχία της επιφάνειας της στρώσης έδρασης και κατά συνέπεια ο σχεδιασμός του οδοστρώματος γίνεται με βάση το κριτήριο αστοχίας της στρώσης έδρασης. Αντίθετα, όταν η ποιότητα του εδάφους είναι υψηλή (μεγάλο CBR) κρίσιμη θεωρείται η αστοχία στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και κατά συνέπεια ο σχεδιασμός του οδοστρώματος γίνεται με βάση το κριτήριο αστοχίας των ασφαλτικών.

Οι Wang et al. (2020), πραγματοποίησαν μία μελέτη ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της διάταξης των φορέων ενός αεροσκάφους στην πιθανή αστοχία εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίου. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πλήρους κλίμακας στο National Airport Pavement Test Facility (NAPTF). Αναπτύχθηκαν τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία με σκοπό να γίνει προσομοίωση της φόρτισης πολλαπλών τροχών. Το μέγεθος του φορτίου θεωρήθηκε ως ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αστοχία των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Εξετάστηκαν διαφορετικοί τύποι αεροσκαφών που διαθέτουν διαφορετικές διατάξεις φορέων (αριθμό τροχών, φορτίο ανά τροχό, απόσταση μεταξύ των τροχών). Από τις αναλύσεις προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η διάταξη των έξι τροχών προκάλεσε τις μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις στο κάτω μέρος των ασφαλτικών στρώσεων.
- Με την αύξηση του πάχους της διατομής του οδοστρώματος οι οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων παρουσιάζουν μία μείωση της τάξης του 60%, ενώ οι κατακόρυφες τάσεις της επιφάνειας της στρώσης έδρασης παρουσιάζουν μείωση κατά 30%. Το πάχος της διατομής μπορεί να μειώσει σημαντικά την αστοχία του οδοστρώματος λόγω κόπωσης (επιφανειακές ρωγμές), αλλά έχει μικρότερη επίδραση στις μόνιμες παραμορφώσεις που οφείλονται στην αστοχία της επιφάνειας της στρώσης έδρασης.
- Η κατακόρυφη τάση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης αυξάνεται ταχύτερα καθώς αυξάνεται το μέγεθος του φορτίου σε σύγκριση με την οριζόντια εφελκυστική τάση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων. Από την άλλη πλευρά, επισημαίνεται ότι το οδόστρωμα παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στο μέγεθος του φορτίου καθώς μειώνεται το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων.

## 5.2 Ερευνητική διαδικασία

Σε συνέχεια των παραπάνω, για τη διερεύνηση της επίδρασης των βαρέων αεροσκαφών στη φθορά των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, έγινε διαστασιολόγηση διατομών εύκαμπτου οδοστρώματος. Αρχικά, η διαστασιολόγηση έγινε με τα τυπικά υλικά της FAA για κάθε στρώση του οδοστρώματος. Δεδομένου ότι η αναλυτική

μέθοδος της FAA λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στη χώρα που έχει αναπτυχθεί, η εφαρμογή της στον ελλαδικό χώρο απαιτεί την προσαρμογή της με βάση τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Ως εκ τούτου στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε διαστασιολόγηση διατομών μεταβάλλοντας τα μέτρα ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων ώστε να ανταποκρίνονται στα υλικά που εντοπίζονται στον Ελλαδικό χώρο.

Όσον αφορά στη διαστασιολόγηση με τα τυπικά υλικά της FAA, χρησιμοποιήθηκαν τα προτεινόμενα από τη μέθοδο υλικά για την περίπτωση αεροσκαφών μεγάλου βάρους (πάνω από 45 τόνους). Πιο συγκεκριμένα για την επιφανειακή ασφαλτική στρώση θεωρήθηκε υλικό P-401/P-403 μέτρου ελαστικότητας 1.380 MPa, για την ασφαλτική βάση θεωρήθηκε υλικό P-401/P-403 μέτρου ελαστικότητας 3.000 MPa, για τη βάση από ασύνδετο υλικό θεωρήθηκε υλικό P-409 μέτρου ελαστικότητας 300 MPa, για την υπόβαση από ασύνδετο υλικό θεωρήθηκε υλικό P-154 μεταβαλλόμενου μέτρου ελαστικότητας με τιμή που να ικανοποιεί την συνθήκη σχεδιασμού (CDF στρώσης έδρασης=1). Επιπλέον για τη στρώση έδρασης θεωρήθηκε υλικό με CBR=8%.

Σχετικά με τη διαστασιολόγηση των υπολοίπων διατομών με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά από αυτά της FAA, θεωρήθηκε μία διατομή με τέσσερις στρώσεις που αποτελείται από ενιαία ασφαλτική στρώση, βάση, υπόβαση και στρώση έδρασης. Οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας που μεταβλήθηκαν ανά υλικό στρώσης καθώς και τα πάχη φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Εύρος μέτρου ελαστικότητας και πάχος στρώσεων.

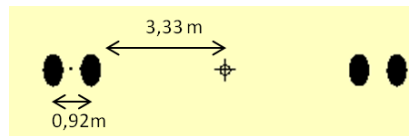
Στρώση	Εύρος Μέτρου Ελαστικότητας/ CBR	Πάχος (cm)
Ενιαία ασφαλτική στρώση	2.000 MPa έως 6.000 MPa	20
Βάση από θραυστό αμμοχάλικο	400 MPa έως 700 MPa	20
Υπόβαση	200 MPa έως 400 MPa	Μεταβλητό Πάχος
Στρώση Έδρασης	CBR από 8% έως 15%	Εκτείνεται στο άπειρο

Το κριτήριο για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού είναι ο δείκτης της αθροιστικής φθοράς στη στρώση έδρασης να είναι ίσος με τη μονάδα. Ως προς τα στοιχεία της φόρτισης, σε όλες τις διατομές (και της τυπικής κατά FAA και των υπολοίπων με τα διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας) θεωρήθηκε η ίδια σύνθεση κυκλοφορίας αεροσκαφών. Στη σύνθεση αυτή περιλαμβάνονται, τόσο αεροσκάφη ήπιας επιβατικής κίνησης, όσο και βαρέα αεροσκάφη νέας γενιάς με τις ετήσιες διελεύσεις του πίνακα 5.2.

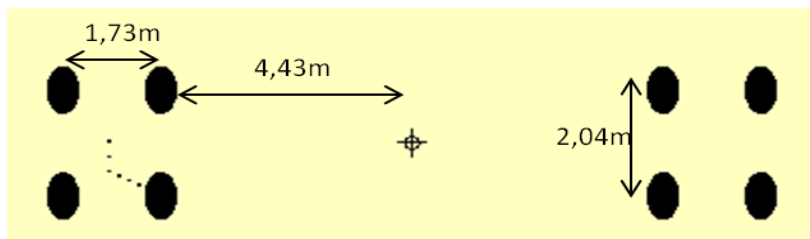
Πίνακας 5.2: Προβλεπόμενη κυκλοφορία οδοστρώματος.

Αεροσκάφη	Ετήσιες Διελεύσεις
A321-200	3.650
A350-900	3.650
A380-800	3.650
B737-900	3.650
B787-9	3.650
B777-300	3.650

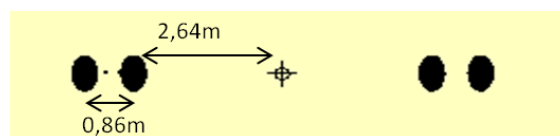
Συνολικά, θεωρήθηκαν 36.500 διελεύσεις για κάθε ένα από τα αεροσκάφη. Από τα αεροσκάφη που επιλέχθηκαν, παρατηρήθηκε διαφορετική διάταξη στο σύστημα των τροχών και στη γεωμετρία τους. Συγκεκριμένα, η διάταξη των A321-200 και B737-900 έχει φορεία διπλών τροχών, τα αεροσκάφη A350-900 και B787-9 έχουν φορεία διπλών τροχών - διπλών αξόνων και στο αεροσκάφος B777-300 τα φορεία είναι διπλών τροχών - τριπλών αξόνων. Τέλος, στο αεροσκάφος με το μέγιστο βάρος, το A380-800 το σύστημα τροχών αποτελείται από μικτή διάταξη τροχών (διπλοί τροχοί - διπλών αξόνων και διπλοί τροχοί - τριπλών αξόνων). Στη συνέχεια στις εικόνες 5.2-5.7 παρουσιάζονται αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των φορείων για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας.



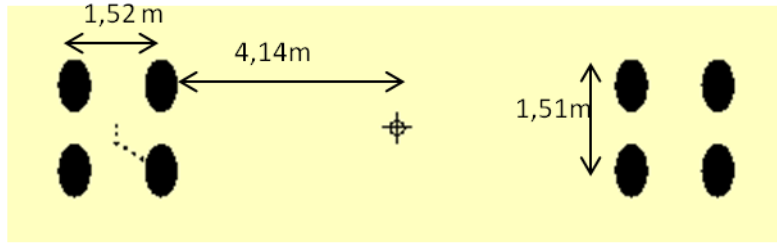
Εικόνα 5.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος A321-200.



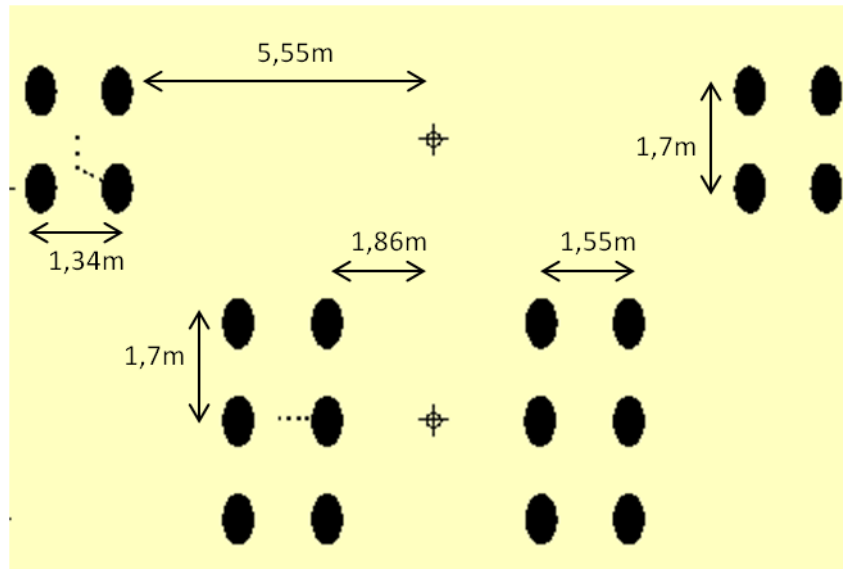
Εικόνα 5.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος A350-900.



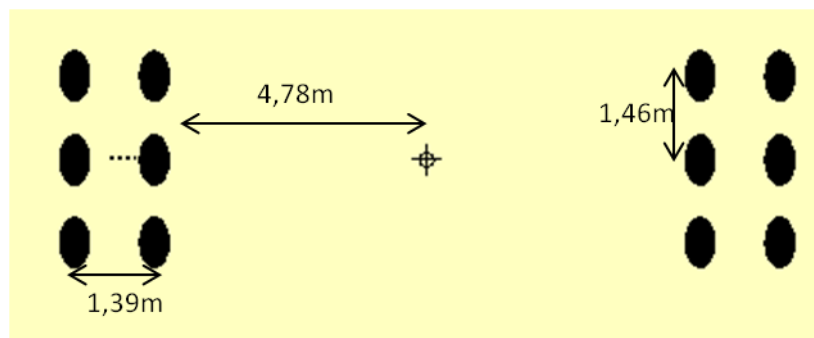
Εικόνα 5.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος B737-900.



Εικόνα 5.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος B787-9.



Εικόνα 5.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος A380-800.



Εικόνα 5.7: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροχών στο αεροσκάφος B777-300.

Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά, αλλά και την κατανομή του φορτίου στα φορεία των αεροσκαφών, το μικό βάρος του κάθε αεροσκάφους κατανέμεται στους τροχούς και υπολογίζεται η πίεση που μεταφέρει ο κάθε τροχός στο οδόστρωμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.3.



Πίνακας 5.3: Φορτία αεροσκαφών.

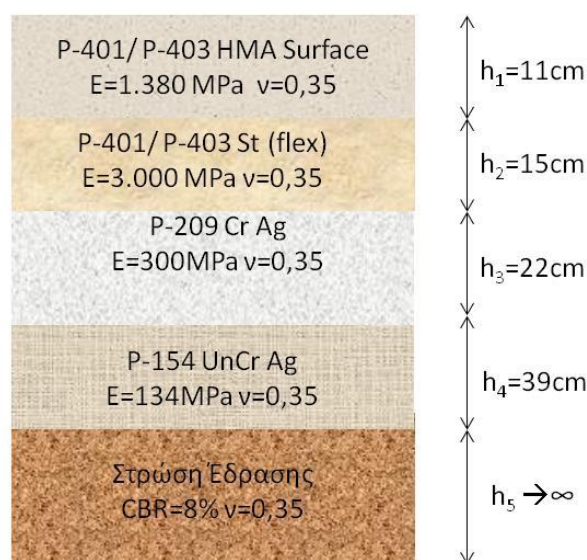
Αεροσκάφος	Μικτό Βάρος (kg)	Πίεση (MPa)
A321-200	93.900	1,50
A350-900	272.904	1,66
A380-800	562.000	1,50
B737-900	85.366	1,51
B787-9	251.744	1,54
B777-300	352.441	1,52

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραμετρικές αναλύσεις και σχολιάζονται τα αποτελέσματα ως προς τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων και τη φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη. Παράλληλα γίνεται και ένας σύντομος ποιοτικός σχολιασμός σε σχέση με τη σημασία των ευρημάτων.

## 5.3 Αποτελέσματα

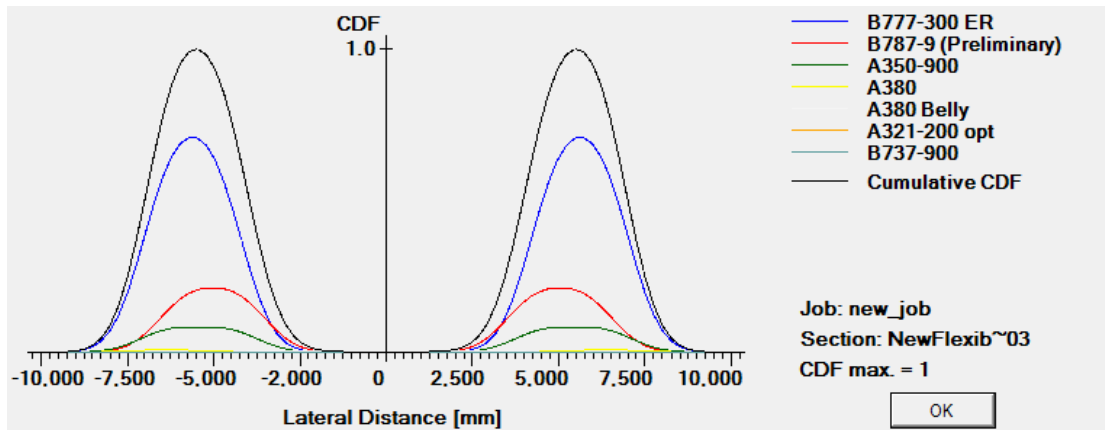
### 5.3.1 Διαστασιολόγηση με τη χρήση των τυπικών υλικών της FAA

Η κυκλοφορία σχεδιασμού περιέχει αεροσκάφη άνω των 100.000 pounds (45.359 kg), οπότε απαιτείται η χρήση επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης και ασφαλτικής βάσης. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα πάχη των επιμέρους στρώσεων που προέκυψαν από την ολοκλήρωση της διαδικασίας σχεδιασμού παρουσιάζονται στην εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8: Διατομή με τυπικά υλικά της FAA.

Το διάγραμμα αθροιστική φθοράς και ατομικής φθοράς του κάθε αεροσκάφους που προέκυψε μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού παρουσιάζεται στην εικόνα 5.9.

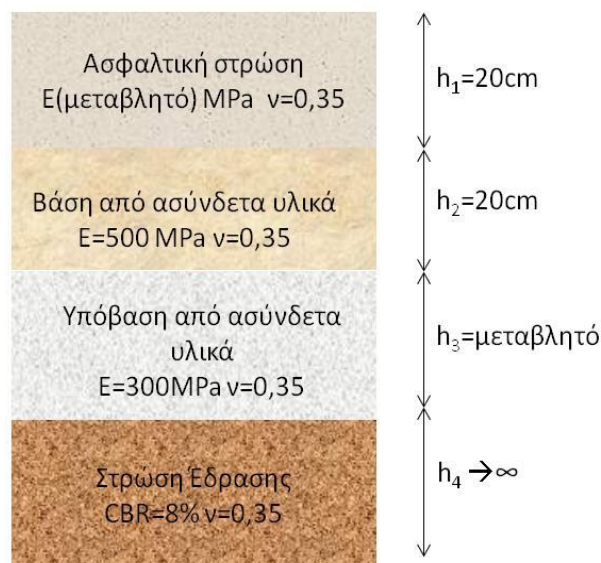


Εικόνα 5.9: Διάγραμμα φθοράς οδοστρώματος με τα τυπικά υλικά της FAA.

Διαπιστώνεται ότι, το αεροσκάφος που προκαλεί τη μεγαλύτερη φθορά είναι το B777-300. Επομένως, χρησιμοποιώντας τα τυπικά υλικά για την διαστασιολόγηση του οδοστρώματος του αεροσκάφος B777-300 θεωρείται κρίσιμο.

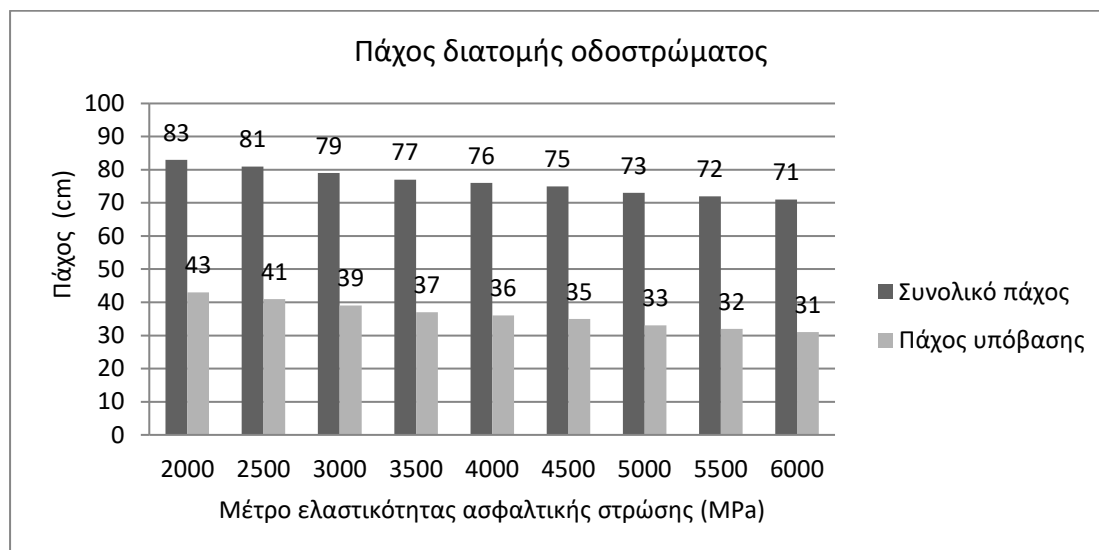
### 5.3.2 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας ασφαλτικών στρώσεων

Αρχικά, θεωρήθηκε μία ενιαία ασφαλτική στρώση και πραγματοποιήθηκε μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας της. Στην εικόνα 5.10 φαίνεται η διατομή που εξετάστηκε. Πραγματοποιήθηκαν εννέα διαφορετικοί συνδυασμοί τιμών, μεταβάλλοντας κάθε φορά το μέτρο ελαστικότητας της πρώτης στρώσης και διατηρώντας την υπόλοιπη διατομή σταθερή. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.



Εικόνα 5.10: Διατομή οδοστρώματος.

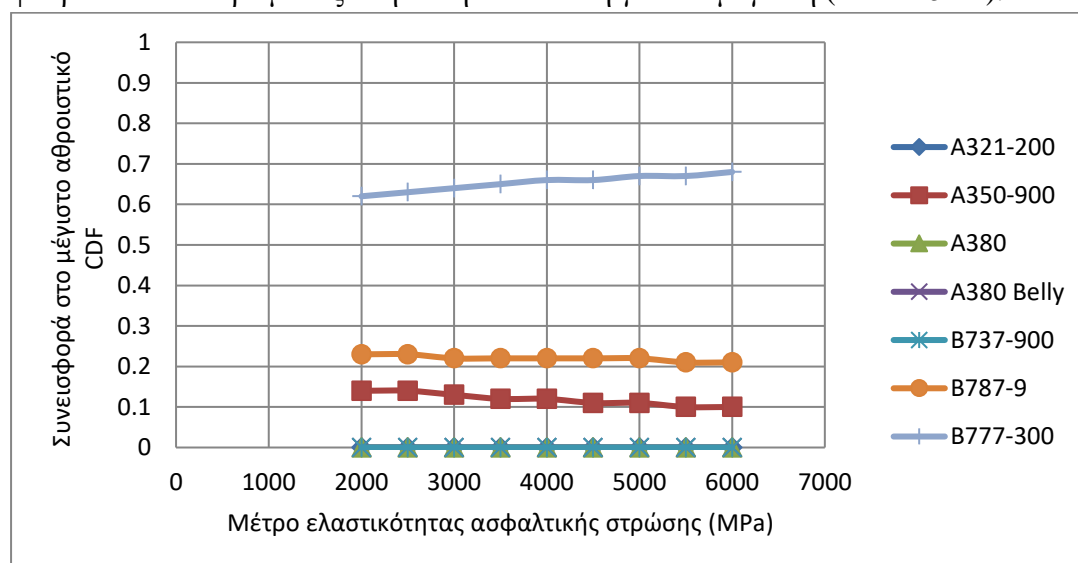
Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού το πάχος της υπόβασης μεταβάλλεται, ενώ το πάχος της βάσης και της ασφαλική στρώσης είναι σταθερό. Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού το πάχος της συνολικής διατομής καθώς και το πάχος της υπόβασης παρουσιάζονται στην εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.11: Μεταβολή πάχους διατομής οδοστρώματος.

Παρατηρείται ότι, καθώς το μέτρο ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης αυξάνεται από 2.000 MPa σε 6.000 MPa το συνολικό πάχος της διατομής του οδοστρώματος παρουσιάζει μικρή μείωση, συγκεκριμένα μειώνεται κατά 15%. Επομένως, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά της ασφαλτικής στρώσης έχουν μικρή συμβολή στο τελικό πάχος της διατομής του οδοστρώματος.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η συνεισφορά του κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος στη θέση όπου αυτή γίνεται μέγιστη (εικόνα 5.12).

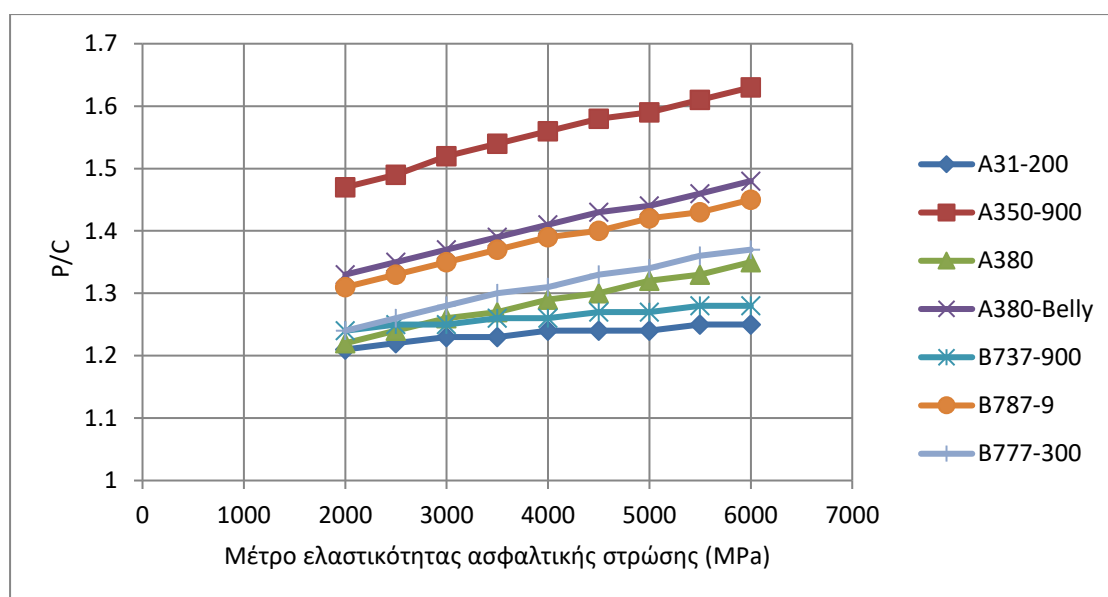


Εικόνα 5.12: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.

Καταγράφεται ότι, η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος δημιουργεί μία μικρή αύξηση της φθοράς που προκαλεί το αεροσκάφος B777-300. Επιπλέον, η φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη A350-900 και B787-9 διατηρείται σταθερή.

Αναφορικά με τον δείκτη φθοράς στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος οδηγεί σε μείωση του δείκτη φθοράς στον πυθμένα της. Στην περίπτωση των δύο ακραίων τιμών του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης (2.000 MPa και 6.000 MPa), ο δείκτης φθοράς στον πυθμένα της είναι 0,72 και 0,18, αντίστοιχα. Η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της ασφαλτικής στρώσης οδηγεί σε μείωση της φθοράς του πυθμένα της.

Ολοκληρώνοντας την διαδικασία σχεδιασμού η αναλυτική μέθοδος της FAA υπολογίζει τον λόγο διελεύσεις προς καλύψεις (P/C) για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας. Στην εικόνα 5.13 φαίνεται η μεταβολή του λόγου αυτού καθώς μεταβάλλεται το μέτρο ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος.



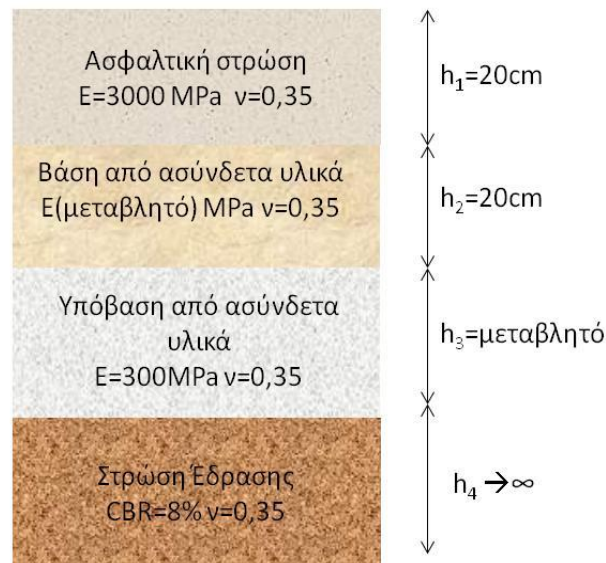
Εικόνα 5.13: P/C για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας.

Αυξάνοντας το μέτρο ελαστικότητας παρατηρείται αύξηση του λόγου P/C. Το αεροσκάφος A350-900 που παρουσιάζει τη μικρότερη φθορά πραγματοποιεί περισσότερες διελεύσεις προκειμένου μία περιοχή του οδοστρώματος να εμφανίσει τη μέγιστη καταπόνηση.

### 5.3.3 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας της βάσης από ασύνδετα υλικά

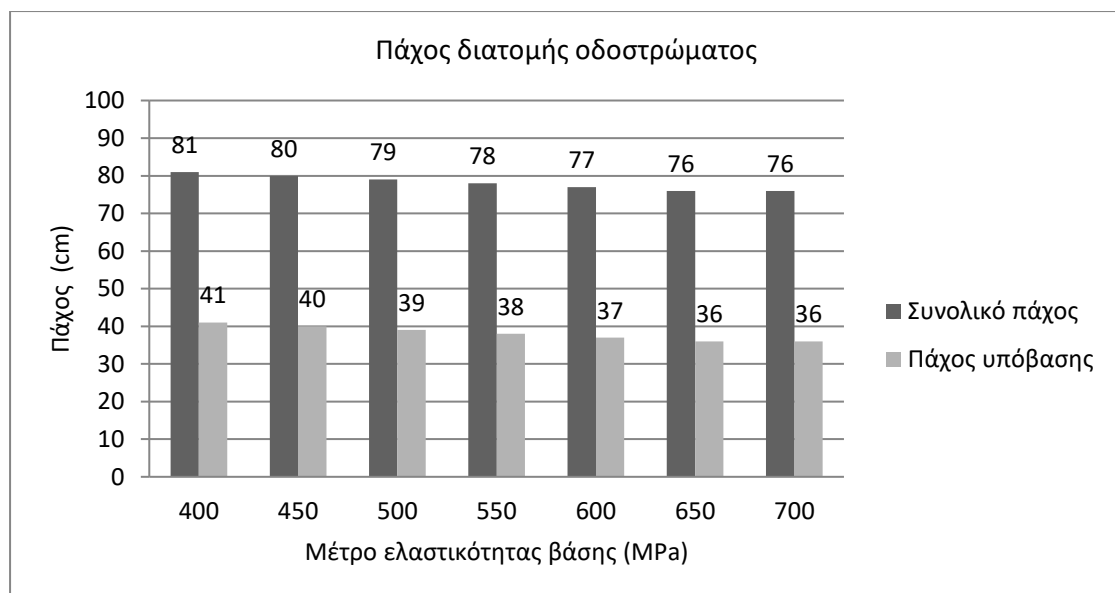
Έπειτα διερευνήθηκε η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας της βάσης στη συνολική φθορά του οδοστρώματος. Στην εικόνα 5.14 φαίνεται η διατομή που εξετάστηκε. Πραγματοποιήθηκαν επτά διαφορετικοί συνδυασμοί τιμών, μεταβάλλοντας κάθε

φορά το μέτρο ελαστικότητας της βάσης (πίνακας 5.1) και διατηρώντας την υπόλοιπη διατομή σταθερή.



Εικόνα 5.14: Διατομή οδοστρώματος.

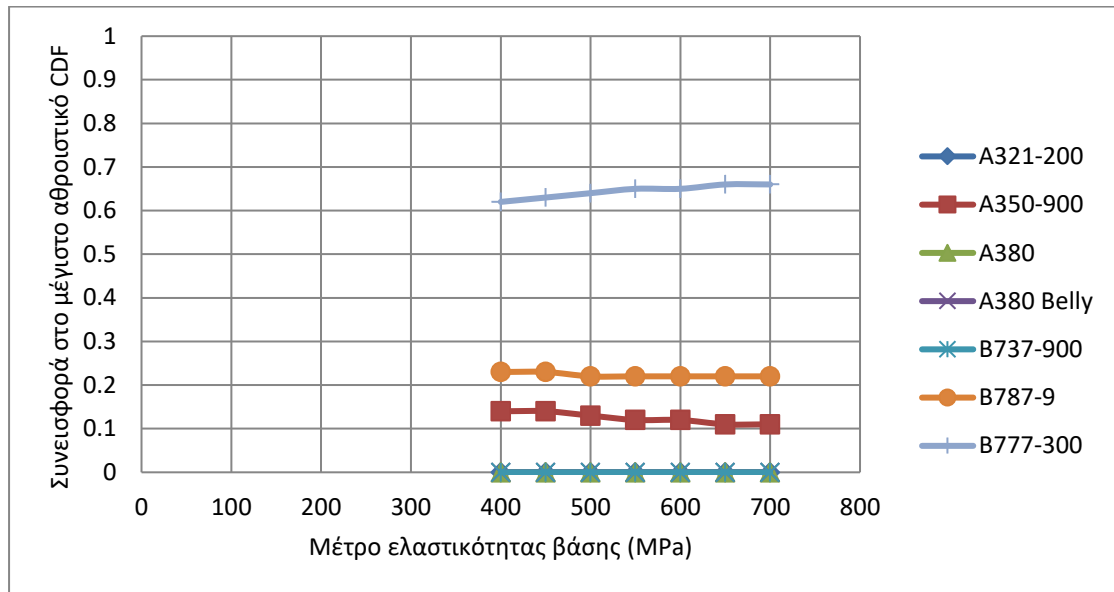
Το συνολικό πάχος της διατομής και το πάχος της υπόβασης μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού φαίνεται στην εικόνα 5.15. Διαπιστώνεται ότι, το μέτρο ελαστικότητας της βάσης δεν επηρεάζει σημαντικά το συνολικό πάχος του οδοστρώματος. Μεταβάλλοντας το μέτρο ελαστικότητας της βάσης κατά 300 MPa, το συνολικό πάχος της διατομής παρουσιάζει μείωση 6%.



Εικόνα 5.15: Μεταβολή πάχους διατομής οδοστρώματος.

Η μεταβολή του δείκτη αθροιστικής φθοράς της επιφάνειας της στρώσης έδρασης για όλα τα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας παρουσιάζεται στην εικόνα 5.16. Με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της βάσης και διατηρώντας την υπόλοιπη διατομή σταθερή παρατηρείται μικρή αύξηση του δείκτη φθοράς στη στρώση

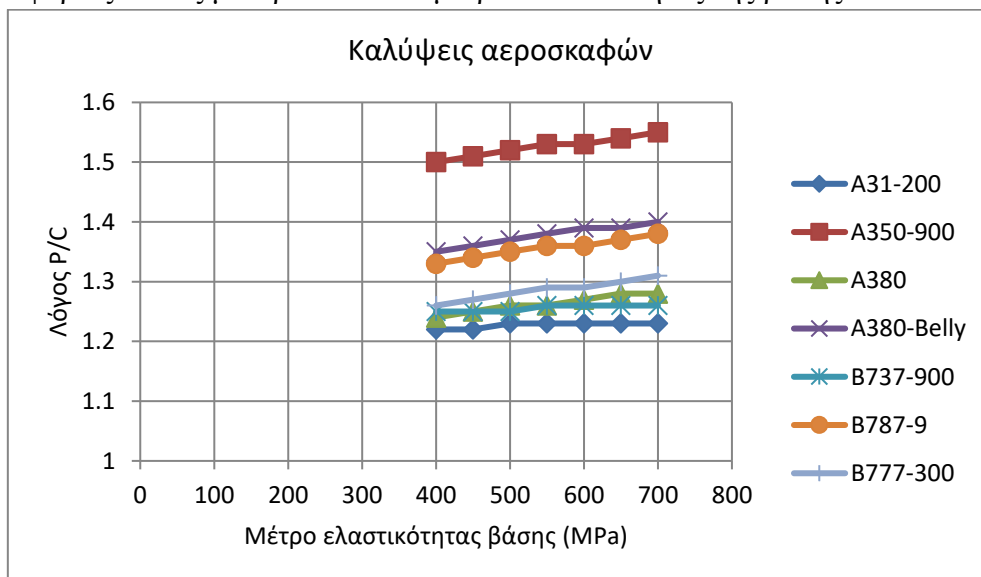
έδρασης στο αεροσκάφος B777-300. Τα αεροσκάφη A350-900 και B787-9 παρουσιάζουν σε όλες τις διατομές που προέκυψαν την ίδια φθορά.



Εικόνα 5.16: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.

Σχετικά με την επίδραση που έχει η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της βάσης στον δείκτη φθοράς του πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, παρατηρείται μείωση στον δείκτη CDF των ασφαλτικών. Ενδεικτικά, στις δύο περιπτώσεις ακραίων τιμών του μέτρου ελαστικότητας της βάσης (400 MPa και 700 MPa), ο δείκτης φθοράς του πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης παίρνει τις τιμές 0,82 και 0,2, αντίστοιχα.

Στην εικόνα 5.17 παρουσιάζεται ο λόγος P/C για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης της κυκλοφορίας καθώς μεταβάλλεται το μέτρο ελαστικότητας της βάσης.

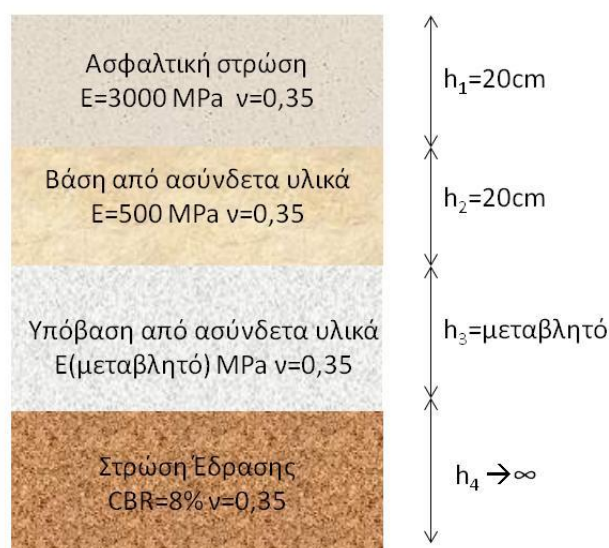


Εικόνα 5.17: P/C για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας.

Διαπιστώνεται ότι τα βαρέα αεροσκάφη έχουν μεγαλύτερο P/C. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτά τα αεροσκάφη η απόσταση μεταξύ των τροχών τους είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επικάλυψη του ενεργού πλάτους των τροχών των φορέων και έτσι να απαιτούνται περισσότερες διελεύσεις προκειμένου το αεροσκάφος να πραγματοποιήσει μία κάλυψη.

### 5.3.4 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας της υπόβασης από ασύνδετα υλικά

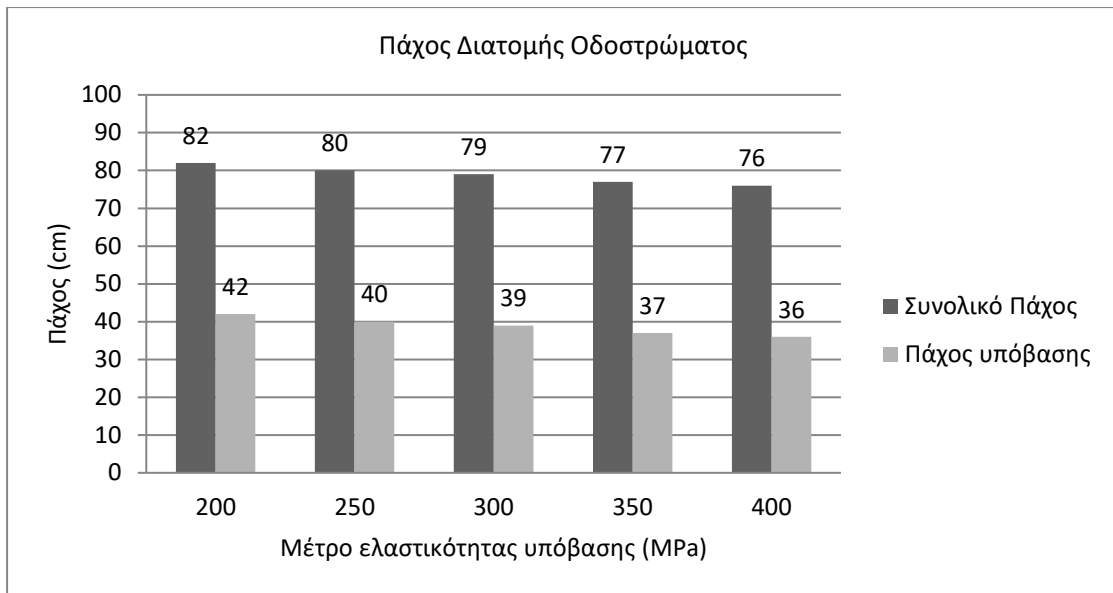
Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας της υπόβασης στη συνολική φθορά του οδοστρώματος. Οι τιμές που έλαβε το μέτρο ελαστικότητας της υπόβασης αναφέρονται στον πίνακα 5.1. Τα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά της διατομής διατηρήθηκαν σταθερά. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν πέντε διαφορετικοί συνδυασμοί τιμών. Η διατομή που εξετάστηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 5.18.



Εικόνα 5.18: Διατομή οδοστρώματος.

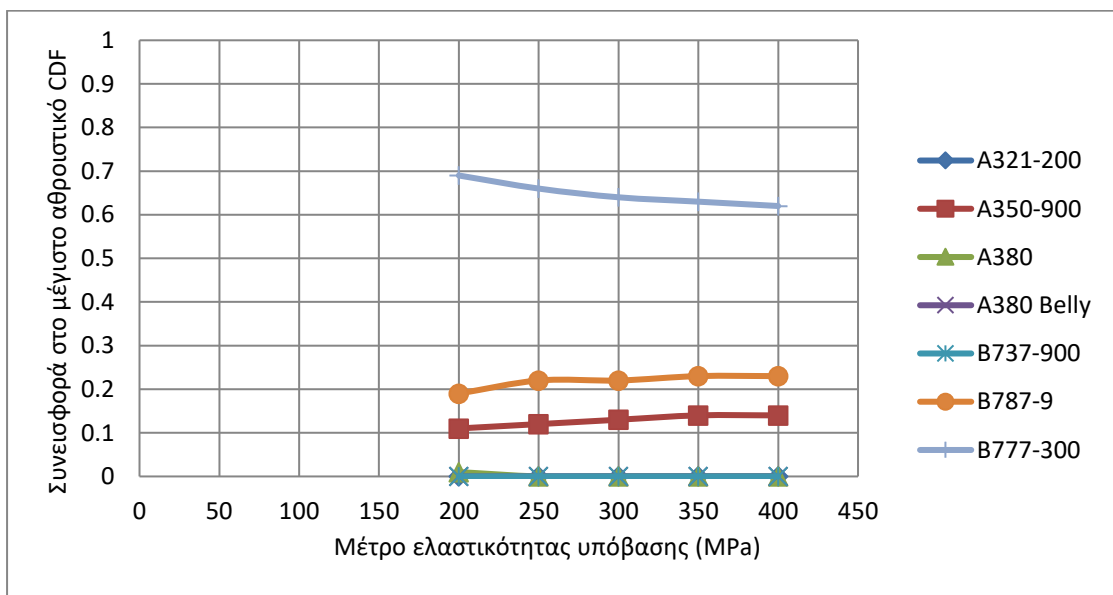
Το πάχος της διατομής που προέκυψε έπειτα από την ολοκλήρωση του σχεδιασμού παρουσιάζεται στην εικόνα 5.19. Από την ολοκλήρωση των αναλύσεων προκύπτει το συμπέρασμα ότι το μέτρο ελαστικότητας της υπόβασης έχει μικρή επιρροή στο συνολικό πάχος της τελικής διατομής, για την ακρίβεια μεταβάλλοντας το μέτρο ελαστικότητας της υπόβασης κατά 200 MPa, το πάχος της διατομής του οδοστρώματος μειώνεται κατά 7%.





Εικόνα 5.19: Μεταβολή πάχους διατομής οδοστρώματος.

Στη συνέχεια ακολουθεί η μεταβολή της συνεισφοράς του κάθε αεροσκάφους στο μέγιστο αθροιστικό CDF της επιφάνειας της στρώσης έδρασης για κάθε τιμή του μέτρου ελαστικότητας της υπόβασης (εικόνα 5.20).



Εικόνα 5.20: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.

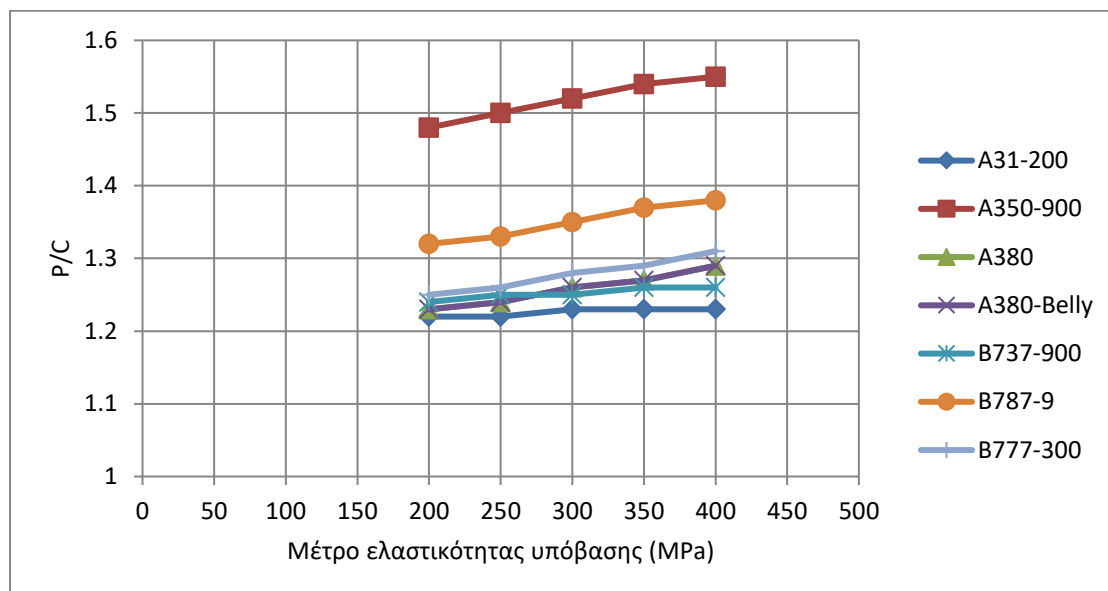
Με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της υπόβασης και διατηρώντας την υπόλοιπη διατομή σταθερή παρατηρείται μείωση 14% του δείκτη φθοράς της επιφάνειας της στρώσης έδρασης του αεροσκάφους B777-300. Ταυτόχρονα παρατηρείται μικρή αύξηση του δείκτη φθοράς της στρώσης έδρασης στο αεροσκάφος A350-900.

Σχετικά με τον δείκτη φθοράς στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της υπόβασης οδηγεί σε μείωση του CDF της



ασφαλτικής στρώσης. Ακριβέστερα, στις δύο ακραίες τιμές του μέτρου ελαστικότητας της υπόβαση (200 MPa και 400 MPa), ο δείκτης CDF των ασφαλτικών λαμβάνει τις τιμές 0,66 και 0,4, αντίστοιχα.

Η μεταβολή του λόγου P/C καθώς βελτιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της υπόβασης παρουσιάζεται στην εικόνα 5.21.

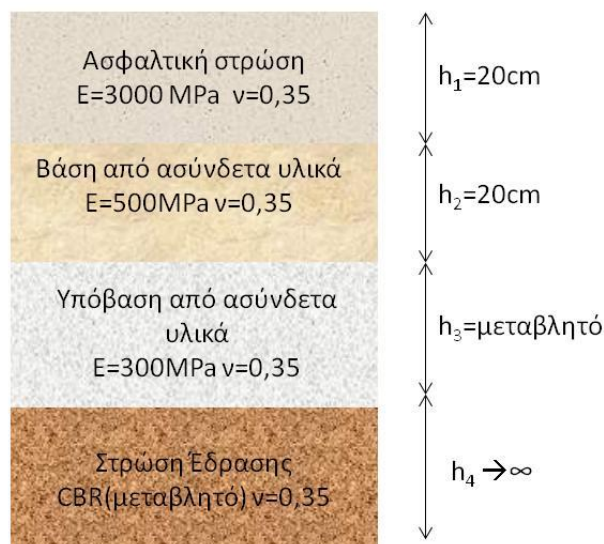


Εικόνα 5.21: P/C για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι με τη βελτίωση των υλικών του οδοστρώματος απαιτούνται περισσότερες διελεύσεις προκειμένου μία περιοχή του οδοστρώματος να εμφανίσει την μέγιστη παραμόρφωση.

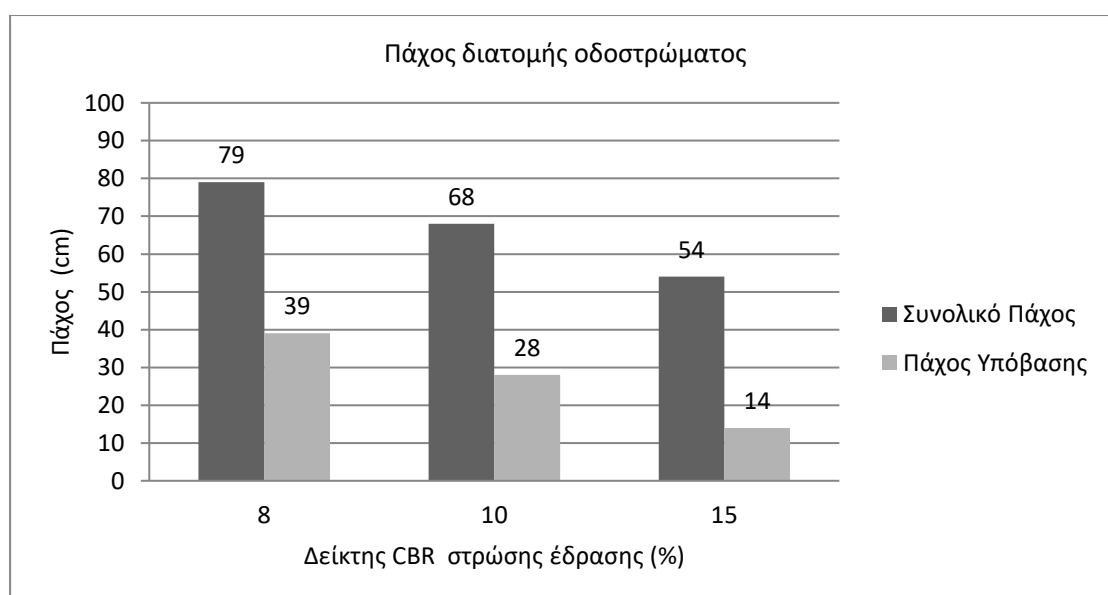
### 5.3.5 Μεταβολή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης

Τέλος εξετάστηκε η επίδραση του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης στη συνολική φθορά του οδοστρώματος. Η τιμή του δείκτη CBR όπως παρουσιάζεται και στον πίνακα 5.1 κυμάνθηκε από 8% έως 15%. Το μέτρο ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης θεωρήθηκε ίσο με 3.000 MPa, της βάσης ίσο με 500 MPa και της υπόβασης ίσο με 300 MPa. Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί συνδυασμοί τιμών, μεταβάλλοντας κάθε φορά το δείκτη CBR της στρώσης έδρασης και διατηρώντας την υπόλοιπη διατομή σταθερή. Η διατομή η οποία εξετάστηκε φαίνεται στην εικόνα 5.22.



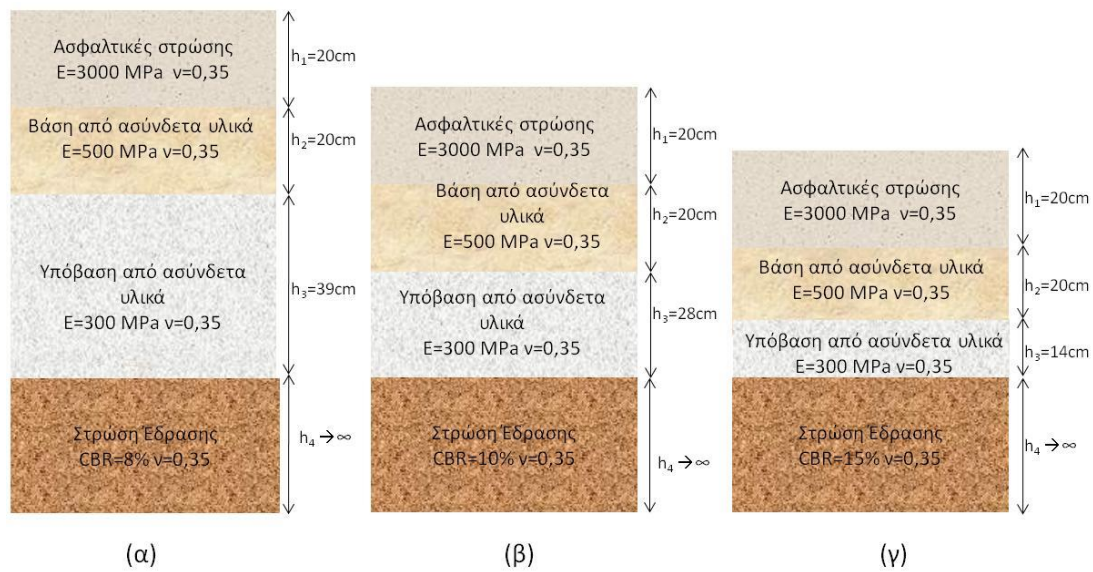
Εικόνα 5.22: Διατομή οδοστρώματος.

Το πάχος της διατομής έπειτα από την ολοκλήρωση του σχεδιασμού παρουσιάζεται στην εικόνα 5.23. Διαπιστώνεται ότι η γεωτεχνική υποδομή ενός οδοστρώματος έχει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του τελικού πάχους της διατομής του οδοστρώματος. Μεταβάλλοντας τον δείκτη CBR από 8% σε 15%, το συνολικό πάχος της διατομής μειώνεται κατά 64%.



Εικόνα 5.23: Μεταβολή πάχους διατομής οδοστρώματος.

Από την διαδικασία σχεδιασμού οι διατομές που προέκυψαν φαίνονται αναλυτικά στην εικόνα 5.24. Στην περίπτωση όπου ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι ίσος με 8% το πάχος της διατομής είναι 79cm, στην περίπτωση CBR=10% το πάχος της διατομής είναι 68cm και όταν ο δείκτης CBR είναι 15% το πάχος της διατομής είναι 54cm.

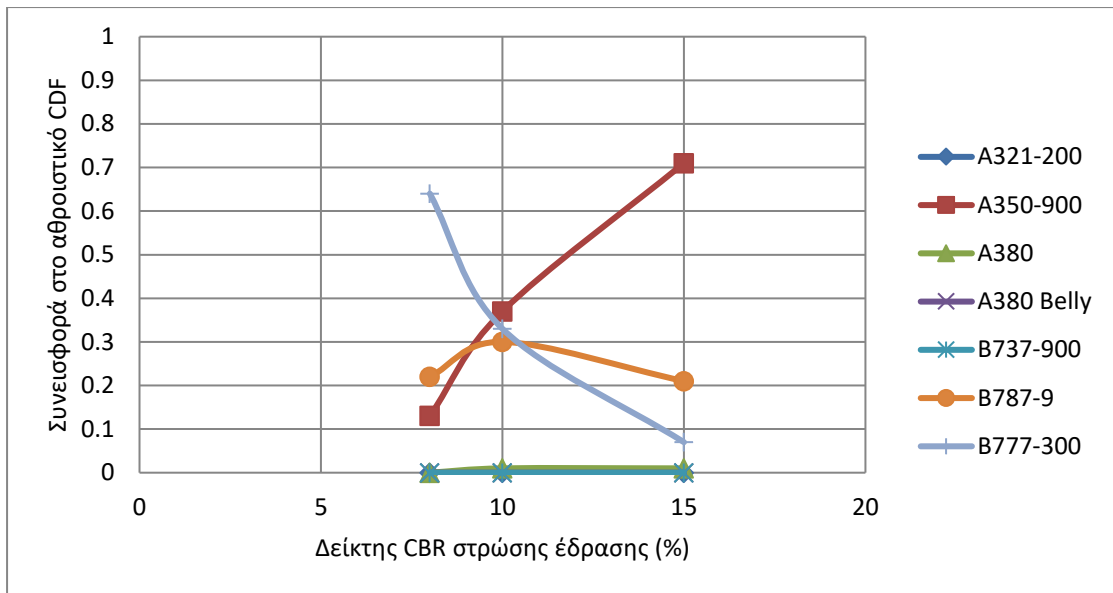


Εικόνα 5.24: Διατομές οδοστρώματος: (α) για CBR=8%, (β) για CBR=10%, (γ) για CBR=15%.

Στην συνέχεια εξετάζεται η μεταβολή της συνεισφοράς του κάθε αεροσκάφους στο μέγιστο αθροιστικό CDF της στρώσης έδρασης μεταβάλλοντας το δείκτη CBR της στρώσης έδρασης.

Αεροσκάφη με ίδιο σύστημα τροχών παρουσιάζουν διαφορετική μεταβολή στον δείκτη φθοράς. Συνεπώς, καθοριστικό ρόλο έχει η διάταξη και η γεωμετρία των τροχών. Το αεροσκάφος A350-900 με πίεση ελαστικού 1,66 MPa, καθώς βελτιώνεται ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης παρατηρείται απότομη αύξηση στο δείκτη φθοράς. Αντίθετα, το αεροσκάφος B787-9 με πίεση ελαστικού 1,54 MPa, παρουσιάζει μικρότερη μεταβολή στον δείκτη φθοράς, η μέγιστη φθορά που προκαλεί το B78-9 είναι όταν το CBR έχει την τιμή 10%. Απότομη αύξηση παρατηρείται στο αεροσκάφος με την μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των τροχών.

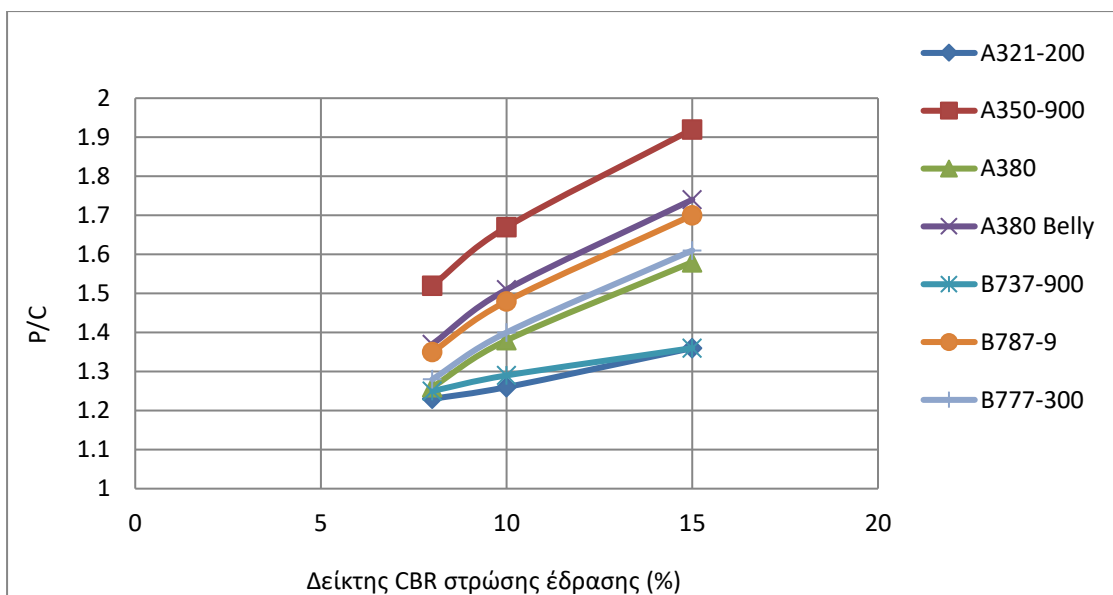
Επιπλέον, καταγράφεται διαφορετική συμπεριφορά των αεροσκαφών A350-900 και B777-300 καθώς μεταβάλλεται ο δείκτης αθροιστικής φθοράς της επιφάνειας της στρώσης έδρασης. Αυξάνοντας τον δείκτη CBR της στρώσης έδρασης η φθορά που προκαλεί το αεροσκάφος A350-900 αυξάνεται. Αντίθετα, η φθορά που προκαλεί το B777-300 μειώνεται. Στην εικόνα 5.25 απεικονίζεται η μεταβολή του δείκτη CDF για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας.



Εικόνα 5.25: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος

Ελέγχοντας το δείκτη CDF του πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, καθώς μεταβάλλεται ο δείκτης CBR παρατηρείται αύξηση του συγκεκριμένου δείκτη φθοράς. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που η στρώση έδρασης έχει CBR 8% ο δείκτης φθοράς της ασφαλτικής στρώσης είναι 0,49. Αντίθετα, στην περίπτωση υψηλού δείκτη CBR (15%) ο δείκτης φθοράς των ασφαλτικών έχει τιμή ίση με 0,56. Επομένως, προκύπτει ότι ο δείκτης CDF της ασφαλτικής στρώσης παρουσιάζει ευαισθησία καθώς βελτιώνεται η ποιότητα της γεωτεχνικής υποδομής.

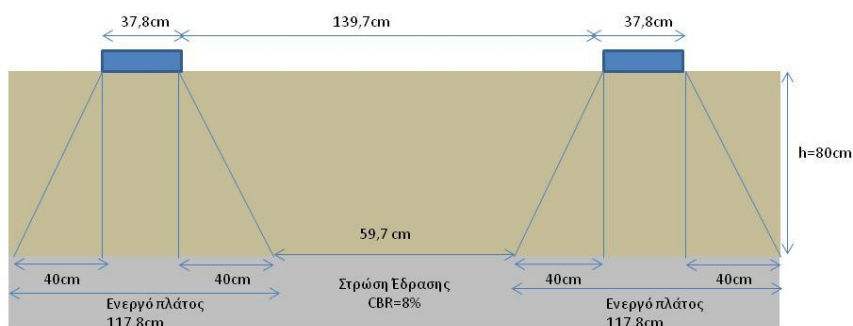
Αναφορικά με τη μεταβολή του λόγου P/C καθώς αυξάνεται ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης, παρατηρείται αύξηση του λόγου αυτού (εικόνα 5.26).



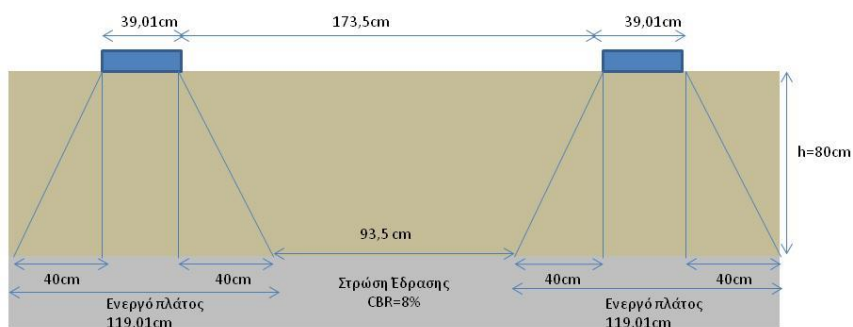
Εικόνα 5.26: P/C για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας.

Ενδιαφέρον προκαλεί η μεταβολή του λόγου P/C των αεροσκαφών A350-900 και B777-300. Με την αύξηση του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης παρατηρείται απότομη αύξηση του λόγου P/C στο αεροσκάφος A350-900. Όταν ο δείκτης CBR είναι 8% ο λόγος P/C είναι ίσος με 1,5, ενώ όταν ο δείκτης CBR παίρνει τη τιμή 15% ο λόγος είναι ίσος με 1,9. Αντίθετα, στο αεροσκάφος B777-300 η αύξηση του λόγου P/C είναι μικρότερη. Στην περίπτωση που ο δείκτης CBR είναι 8% ο λόγος P/C είναι 1,23, ενώ στην περίπτωση που ο δείκτης CBR είναι 15% ο λόγος P/C είναι 1,38.

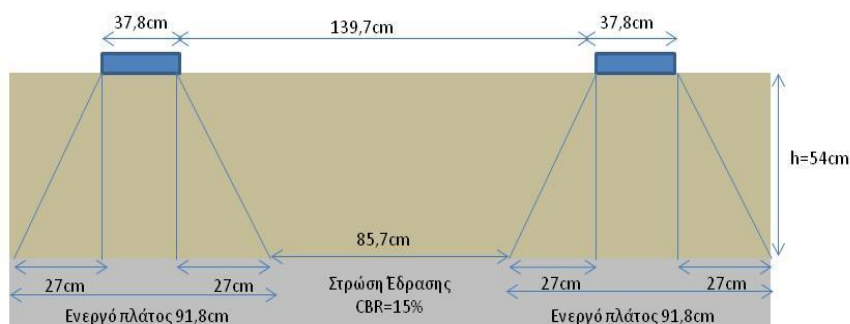
Η διαφορετική μεταβολή του λόγου P/C για τα δύο κρίσιμα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας (A350-900 και B777-300) οδήγησε στον υπολογισμό του ενεργού πλάτους των δύο αεροσκαφών για τις δύο ακραίες τιμές του δείκτη CBR (8% και 15%). Στις εικόνες 5.27-5.30 παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός του ενεργού πλάτους τροχών για τα δύο αεροσκάφη στις περιπτώσεις όπου ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι ίσος με 8% και 15%. Εξετάστηκε η εγκάρσια διεύθυνση των τροχών των φορείων για τα δύο αεροσκάφη (A350-900 και B777-300).



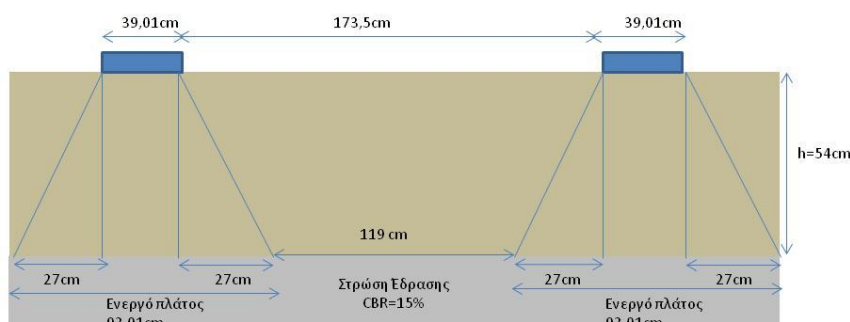
Εικόνα 5.27: Ενεργό πλάτος ελαστικών για CBR=8% του B777-300.



Εικόνα 5.28: Ενεργό πλάτος ελαστικών για CBR=8% του A350-900.



Εικόνα 5.29: Ενεργό πλάτος ελαστικών για CBR=15% του B777-300.



Εικόνα 5.30: Ενεργό πλάτος ελαστικών για CBR=15% του A350-900.

Στον πίνακα 5.4 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά το ενεργό πλάτος τροχών για τα δύο αεροσκάφη. Το αεροσκάφος με το μεγαλύτερο ενεργό πλάτος είναι το A350-900 και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια επαφής του τροχού με το οδόστρωμα και η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι μεγαλύτερες από αυτές του B777-300.

Πίνακας 5.4: Ενεργό πλάτος τροχών

Αεροσκάφος	Ενεργό πλάτος για CBR=8% (cm)	Ενεργό πλάτος για CBR=15%(cm)
B777-300	117	92
A350-900	119	93

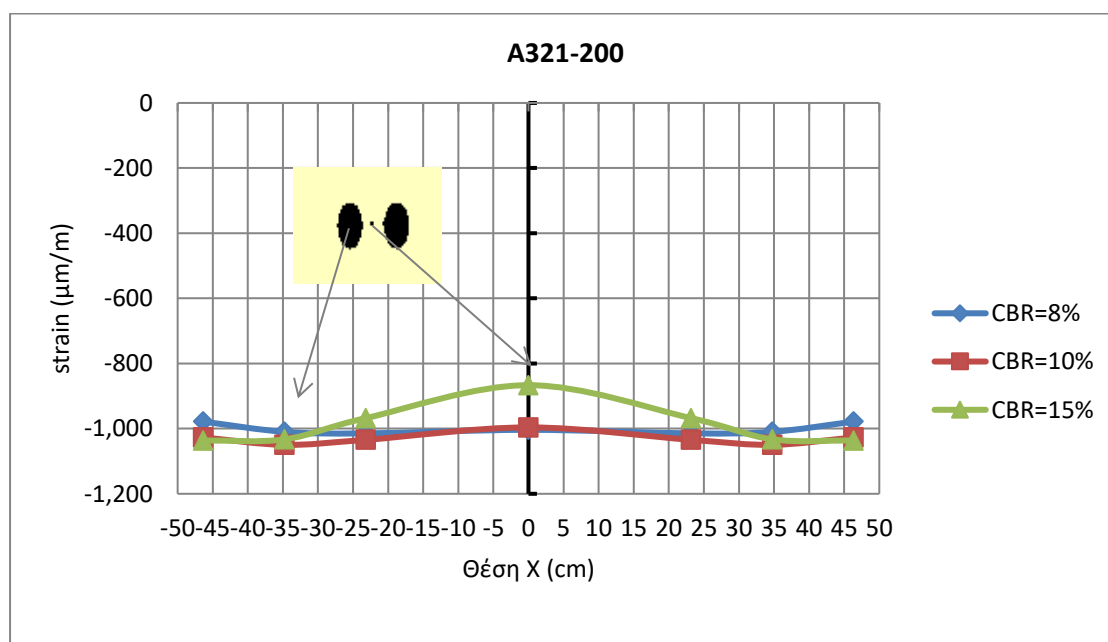
Καθώς αυξάνεται ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης παρατηρείται μείωση του πάχους της διατομής, με αποτέλεσμα να μειώνεται το ενεργό πλάτος των ελαστικών των αεροσκαφών. Η μείωση του ενεργού πλάτους οδηγεί σε αύξηση του λόγου P/C. Το αεροσκάφος A350-900 παρουσιάζει το μεγαλύτερο P/C, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ενεργό πλάτος των τροχών του είναι μεγαλύτερο από τα άλλα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας.

## 5.4 Συγκριτικά αποτελέσματα παραμορφώσεων

Η μεταβολή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης είχε ως αποτέλεσμα την αντίστροφη μεταβολή του δείκτη αθροιστικής φθοράς της επιφάνειας της στρώσης έδρασης στα δύο κρίσιμα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας (A350-900 και B777-300). Προκειμένου να αιτιολογηθούν οι αλλαγές αυτές μελετήθηκε η μεταβολή των κατακόρυφων παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Στις εικόνες 5.31 έως 5.37 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο οδόστρωμα για όλες τις τιμές CBR από το σύστημα τροχών του κάθε αεροσκάφους της σύνθεσης κυκλοφορίας.

Το «FAARFIELD» με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις ακολουθεί σύμβαση πρόσημων σύμφωνα με την οποία οι εφελκυστικές παραμορφώσεις είναι αρνητικές και οι θλιπτικές είναι θετικές. Στην εγκάρσια διεύθυνση εμφανίζονται μόνο εφελκυστικές παραμορφώσεις. Η θέση  $X=0$  θεωρείται ο άξονας του συστήματος τροχών του κάθε αεροσκάφους και οι θέσεις που παρουσιάζονται στον οριζόντιο άξονα των διαγραμμάτων είναι εγκάρσιες στον άξονα του διαδρόμου κίνησης.

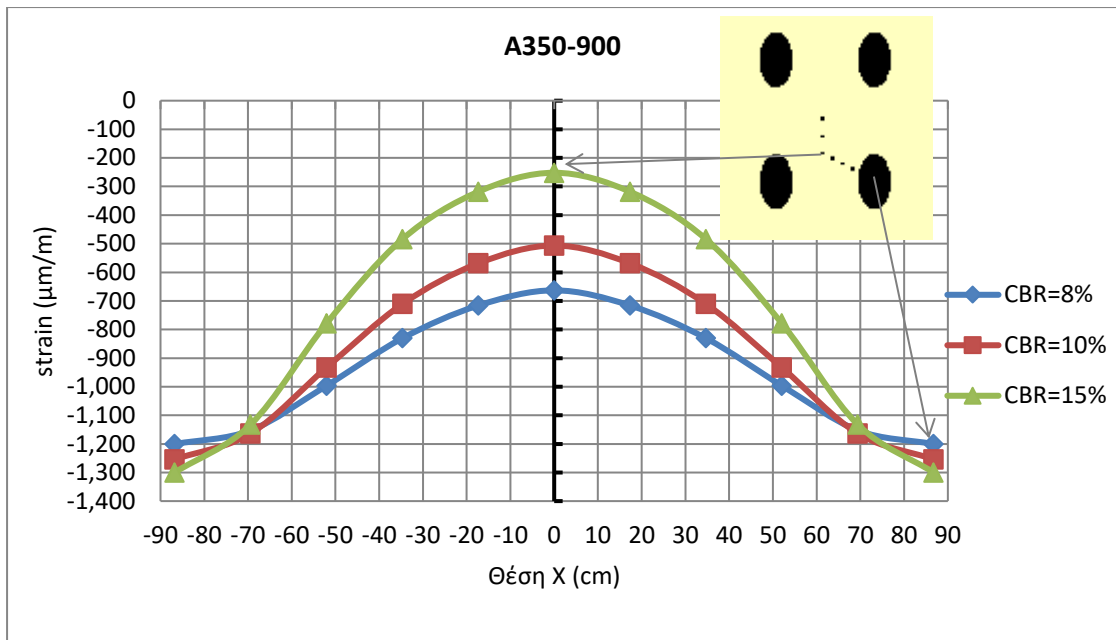
Το φορείο του αεροσκάφους A321-200 αποτελείται από διπλούς τροχούς. Διαπιστώνεται ότι για όλες τις τιμές του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης η μέγιστη παραμόρφωση εντοπίζεται κάτω από τον άξονα του τροχού.



Εικόνα 5.31: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος A321-200

Το σύστημα τροχών του αεροσκάφους A350-900 είναι διπλοί τροχοί - διπλών αξόνων. Παρουσιάζει τη μέγιστη παραμόρφωση στην περίπτωση όπου ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι ίσος με 15%. Η μέγιστη καταπόνηση της επιφάνειας της στρώσης έδρασης εμφανίζεται στον άξονα του τροχού.

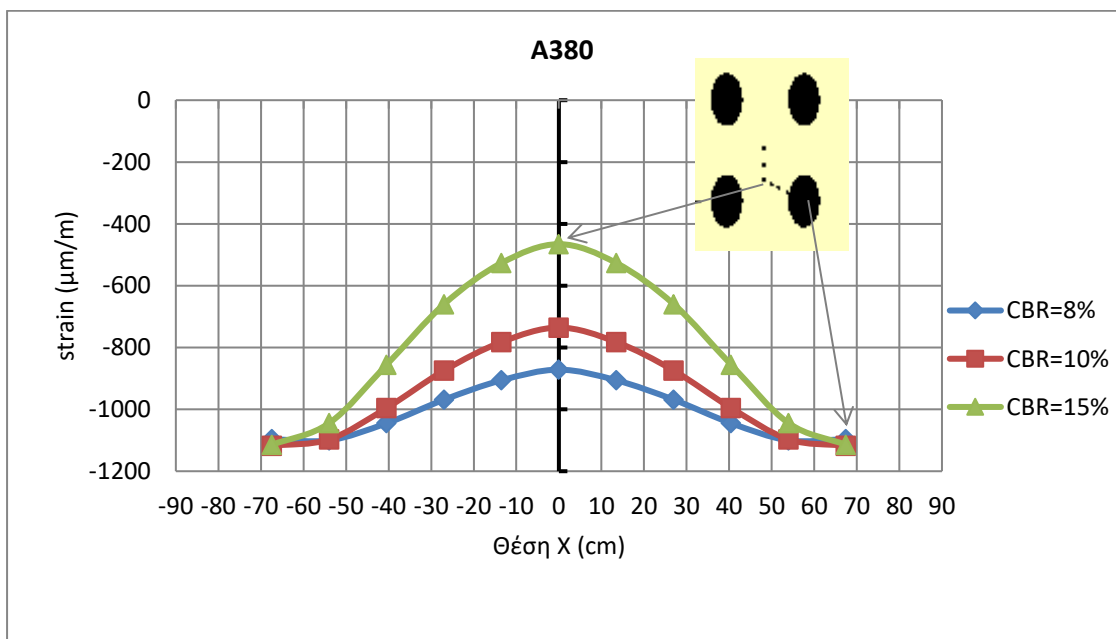




Εικόνα 5.32: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος A350-900

Η αναλυτική μέθοδος της FAA διαχωρίζει το σύστημα τροχών του αεροσκάφους A380-800 σε δύο επιμέρους συστήματα και τα εξετάζει ξεχωριστά. Επομένως τα συστήματα τροχών που εξετάζονται είναι: οι διπλοί τροχοί – διπλοί άξονες (A380) και οι διπλοί τροχοί – τριπλοί άξονες (A380Belly).

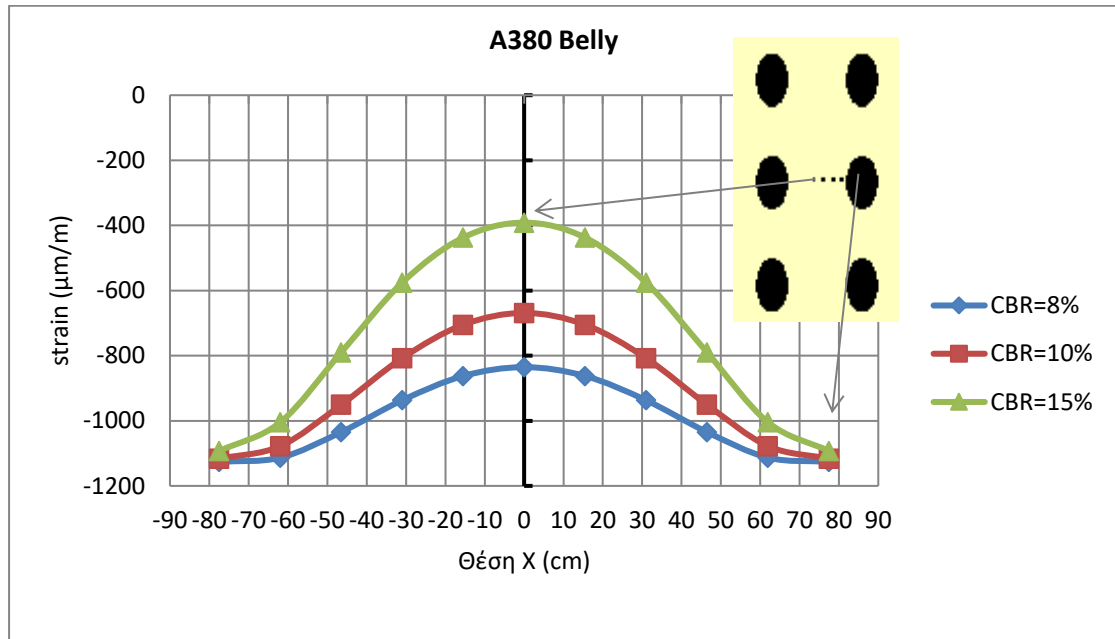
Στην περίπτωση των διπλών τροχών – διπλών αξόνων (A380) η μέγιστη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης παρουσιάζεται στο σημείο κάτω από τον άξονα του τροχού σε όλες τις περιπτώσεις του δείκτη CBR.



Εικόνα 5.33: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος A380.

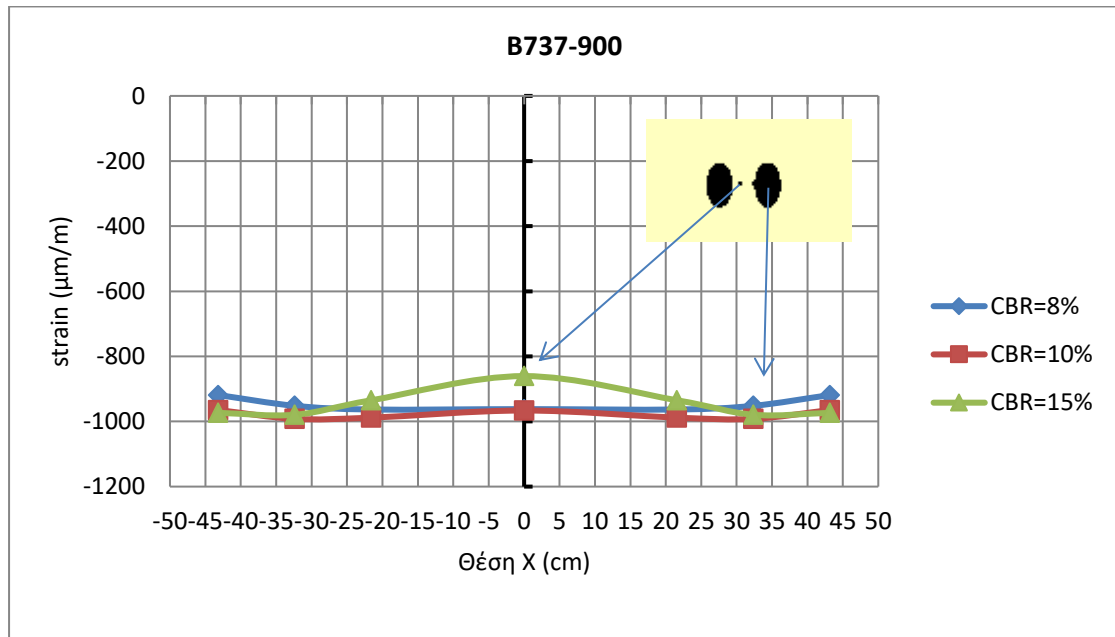


Εξετάζοντας τις παραμορφώσεις που προκαλεί το σύστημα διπλών τροχών – τριπλών αξόνων (A380 Belly) παρατηρείται ότι η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στο ίδιο σημείο με αυτό του συστήματος τροχών A380 (διπλοί τροχοί – διπλοί άξονες).



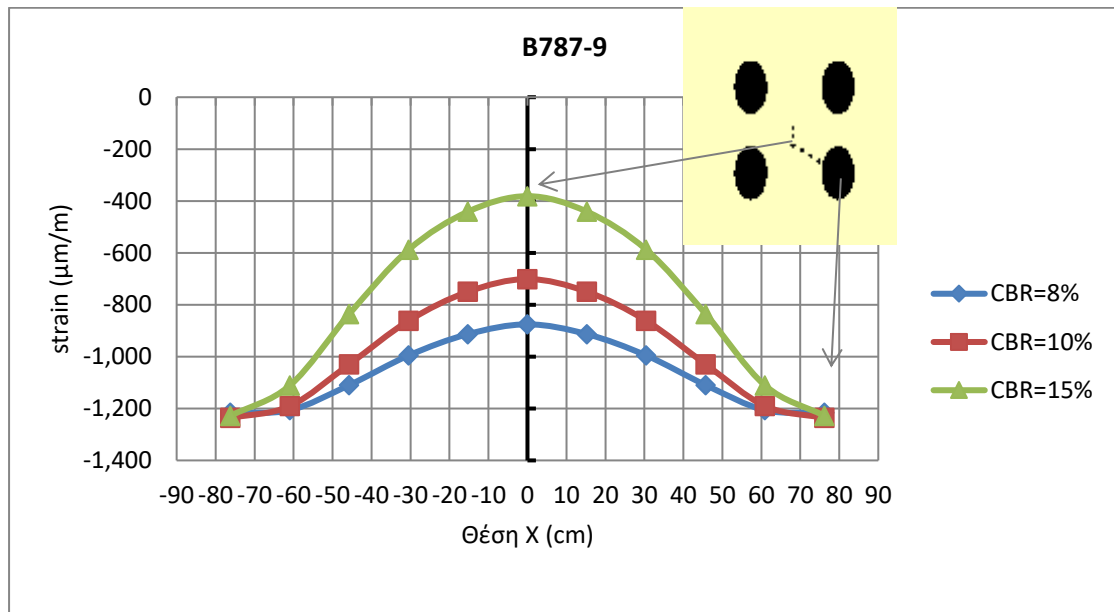
Εικόνα 5.34: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος A380 Belly.

Το φορείο του αεροσκάφους B737-900 αποτελείται από διπλούς τροχούς. Για τις διαφορετικές τιμές του δείκτη CBR η μέγιστη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης εντοπίζεται κάτω από τον άξονα του τροχού.



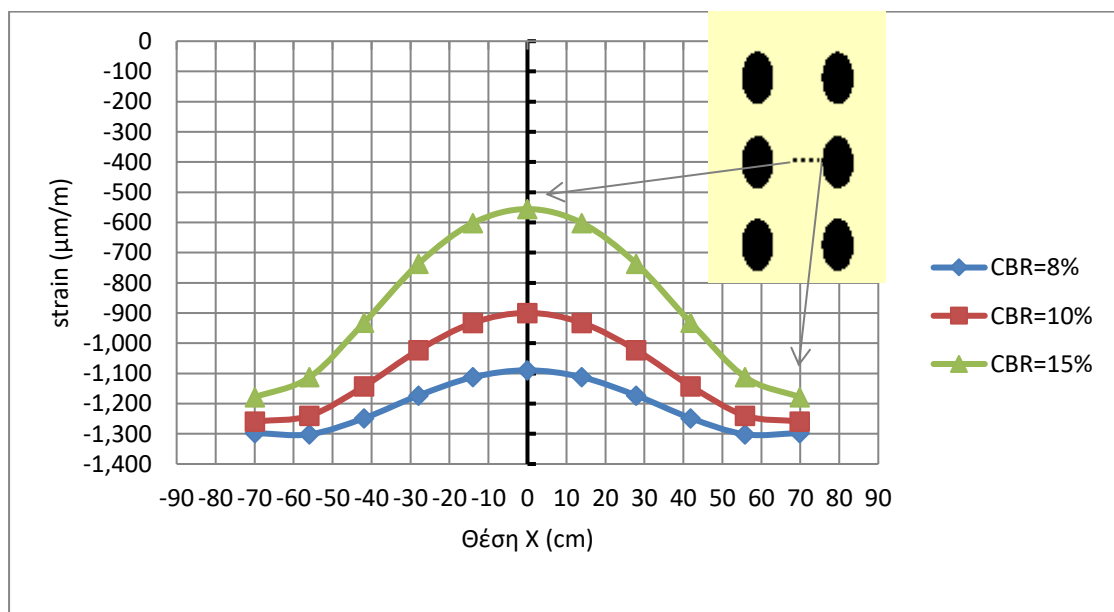
Εικόνα 5.35: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος B737-900.

Το σύστημα τροχών του αεροσκάφους B787-9 είναι διπλοί τροχοί - διπλών αξόνων. Η μέγιστη καταπόνηση της επιφάνειας της στρώσης έδρασης εμφανίζεται κάτω από το σημείο του άξονα του τροχού.



Εικόνα 5.36: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος B787-9.

Το σύστημα τροχών του αεροσκάφους B777-300 είναι διπλοί τροχοί - τριπλοί άξονες. Το αεροσκάφος δημιουργεί τη μέγιστη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης στην περίπτωση όπου ο δείκτης CBR είναι ίσος με 8%. Η μέγιστη καταπόνηση της επιφάνειας της στρώσης έδρασης εμφανίζεται σε απόσταση 18,95 cm από τον άξονα του τροχού ( περιφέρεια τροχού).

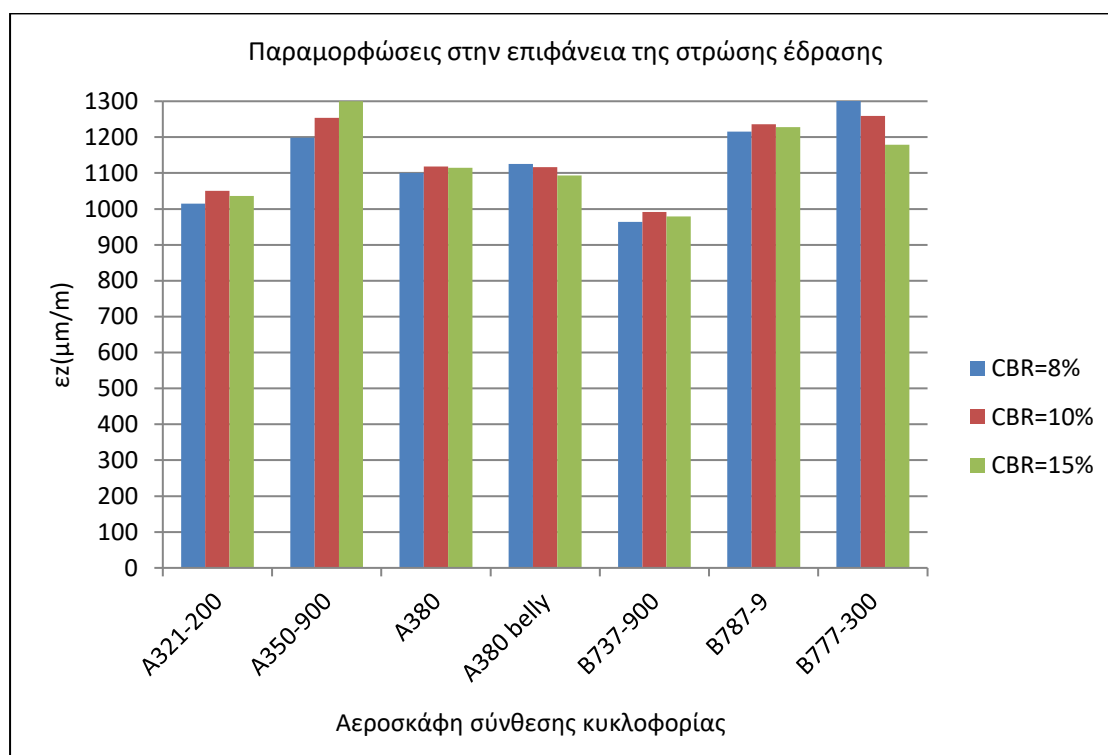


Εικόνα 5.37: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από το αεροσκάφος B777-300.

Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι το αεροσκάφος που έχει τη μέγιστη συνεισφορά στο αθροιστικό CDF του οδοστρώματος δημιουργεί και τη μέγιστη παραμόρφωση στο οδόστρωμα. Αεροσκάφη που δεν προκαλούν φθορά στο οδόστρωμα δεν σημαίνει ότι η παραμόρφωση που δημιουργούν στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης είναι μηδενική.

Στα αεροσκάφη A321-200 και B737-900 η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι μικρή με αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις κατά μήκος του συστήματος τροχών να παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις. Μεγάλες διακυμάνσεις στην κατακόρυφη παραμόρφωση, καθώς αλλάζει ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος, παρουσιάζονται στον άξονα του συστήματος των τροχών για όλα τα βαρέα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας. Ενώ, μικρότερες είναι οι αλλαγές στις παραμορφώσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης στο ίχνος του τροχού.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται σε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα των παραμορφώσεων της επιφάνειας της στρώσης έδρασης για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας. Οι παραμορφώσεις στο διάγραμμα παρουσιάζονται με θετικό πρόσημο.



Εικόνα 5.38: Παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης για όλα τα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας.

Με την ολοκλήρωση των αναλύσεων προκύπτει ότι μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά των υλικών η ανηγμένη παραμόρφωση για κάθε αεροσκάφος παρουσιάζει παραπλήσιες τιμές. Στα αεροσκάφη ήπιας επιβατικής κίνησης (A321-200 και B737-900) η ανηγμένη παραμόρφωση κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα. Επιπλέον, το βαρύτερο αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας (A380-800)

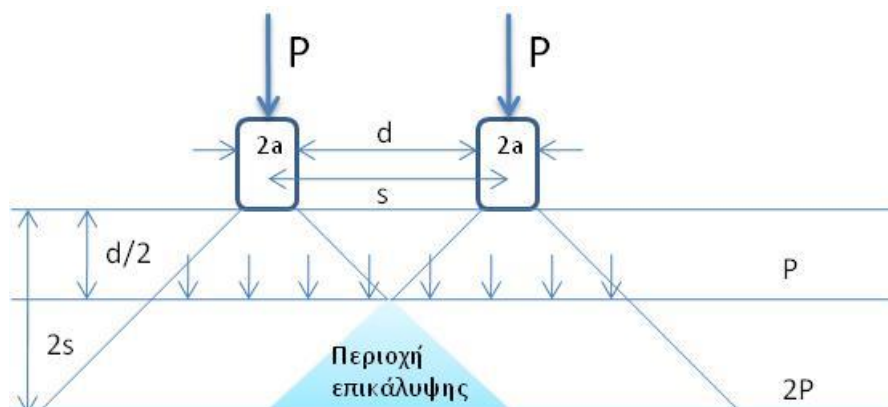
δημιουργεί μικρότερη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης σε σχέση με άλλα αεροσκάφη. Το αεροσκάφος B777-300 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης από όλα τα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας στην περίπτωση όπου ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι 8%. Η μέγιστη παραμόρφωση για το αεροσκάφος A350-900 εμφανίζεται στην περίπτωση που ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι 15%.

## 5.5 Προσέγγιση ισοδύναμου φορτίου μοναδιαίου τροχού

Μεταβάλλοντας τον δείκτη CBR της στρώσης έδρασης παρατηρήθηκε διαφορετική μεταβολή της φθοράς στα αεροσκάφη A350-900 και B777-300. Προκειμένου να εξηγηθεί η αλλαγή στη συμπεριφορά της φθοράς εξετάστηκε η μεταβολή του ισοδύναμου φορτίου μοναδιαίου τροχού για τα δύο κρίσιμα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας.

Το ισοδύναμο φορτίο μοναδιαίου τροχού (ESWL) ορίζεται ως το φορτίο ενός μονού τροχού που δράοντας με την ίδια πίεση, παράγει το ίδιο κρίσιμο αποτέλεσμα σε ένα δεδομένο οδόστρωμα με αυτό που παράγεται από το πραγματικό σύστημα τροχών. Η έννοια του ισοδύναμου φορτίου μοναδιαίου τροχού δίνει τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των φορτίων διαφορετικών φορτίων αεροσκαφών. Το ισοδύναμο φορτίο δεν είναι ένας σταθερός αριθμός αλλά εξαρτάται από το βάθος της διατομής που επιλέγεται να υπολογιστεί κάθε φορά. Με την εισαγωγή της έννοιας του ισοδύναμου φορτίου αντιμετωπίστηκε η αδυναμία άμεσης σύγκρισης των φορτίων διαφορετικών φορτίων αεροσκαφών (Λοΐζος και Πλατή, 2019).

Στην εικόνα 5.39 παρουσιάζεται ποιοτικά η μεταβολή του ισοδύναμου φορτίου δύο τροχών συναρτήσει του βάθους της διατομής του οδοστρώματος. Διαπιστώνεται ότι, σε βάθος ίσο με τη μισή καθαρή απόσταση μεταξύ των τροχών το ισοδύναμο φορτίο ισούται με το φορτίο  $P$  του τροχού. Επιπλέον, σε βάθος ίσο με τη διπλάσια απόσταση μεταξύ των αξόνων των τροχών το ισοδύναμο φορτίο ισούται με το άθροισμα των φορτίων των δύο τροχών, δηλαδή  $2P$ .



Εικόνα 5.39: Ισοδύναμο φορτίο μοναδιαίου τροχού.

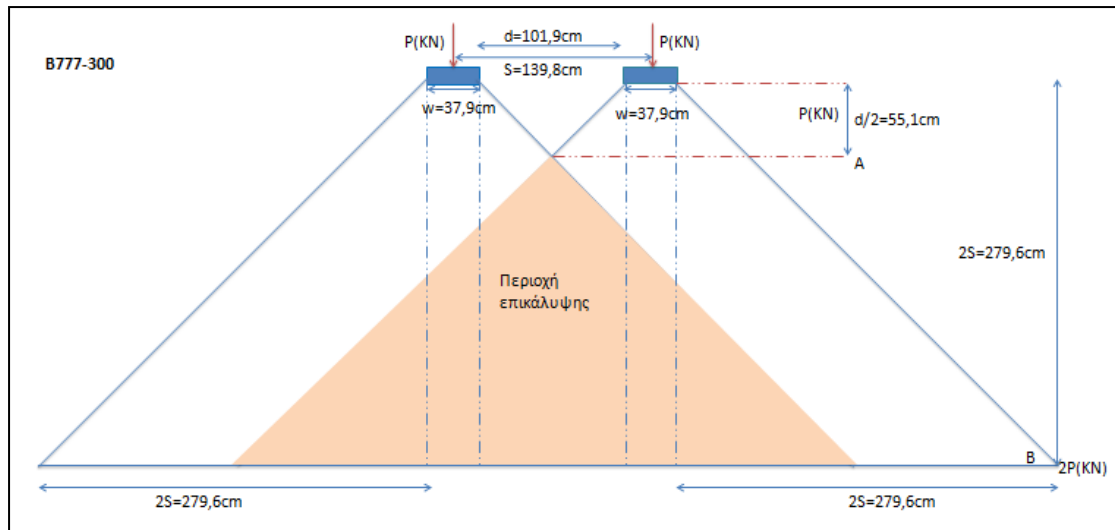
Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των αεροσκαφών A350-900 και B777-300. Συγκεκριμένα, η απόσταση S αντιπροσωπεύει την απόσταση των δύο τροχών από τον άξονα τους, η απόσταση δείναι η καθαρή απόσταση μεταξύ των δύο τροχών, η τέταρτη και η πέμπτη στήλη του πίνακα περιέχουν το πλάτος και το μήκος της επιφάνειας επαφής του τροχού με το οδόστρωμα, αντίστοιχα. Στη συνέχεια ακολουθούν το εμβαδόν της επιφάνειας επαφής του τροχού με το οδόστρωμα, η πίεση και το φορτίο ελαστικού.

Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικά αεροσκαφών.

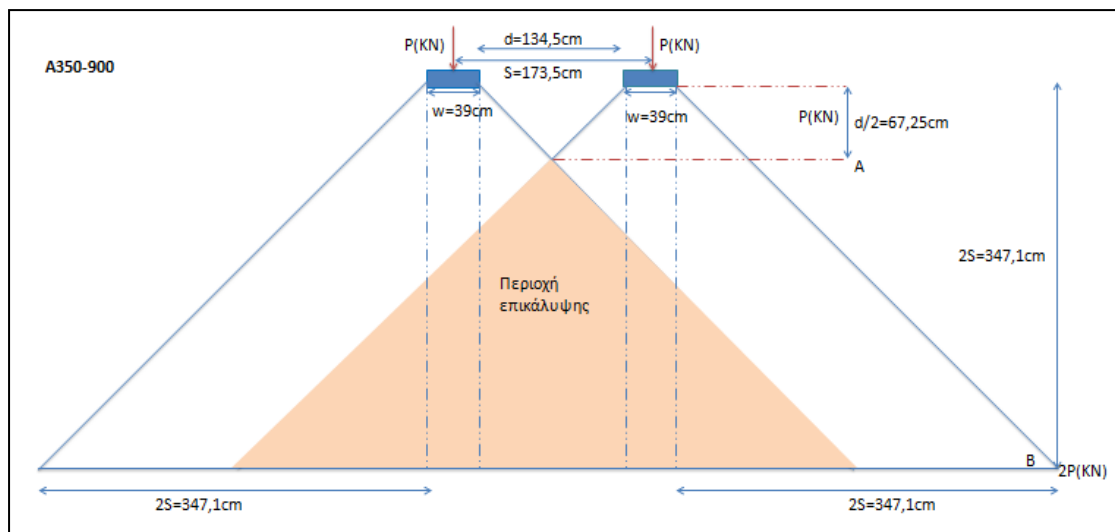
Αεροσκάφος	S (m)	D (m)	Πλάτος επιφάνειας επαφής (m)	Μήκος επιφάνειας επαφής (m)	A (m <sup>2</sup> )	Πίεση Ελαστικού (MPa)	Φορτίο Ελαστικού (KN)
A350-900	1,73	1,345	0,3901	0,6242	0,1912	1,66	8.679
B777-300	1,398	1,019	0,378	0,6048	0,1796	1,52	8.464

Για τα δύο κρίσιμα αεροσκάφη έγινε προσέγγιση του ισοδύναμου φορτίου στη δυσμενέστερη διεύθυνση του φορείου των τροχών. Στην περίπτωση της εγκάρσιας διεύθυνσης, τα αεροσκάφη A350-900 και B777-300 αποτελούνται από διπλούς τροχούς. Στη διαμήκη διεύθυνση το αεροσκάφος A350-900 αποτελείται από δύο τροχούς, ενώ το αεροσκάφος B777-300 αποτελείται από τρεις τροχούς. Η απόσταση μεταξύ των τροχών του A350-900 στη διαμήκη διεύθυνση είναι 2,04m, ενώ στην εγκάρσια διεύθυνση είναι 1,73m. Δυσμενέστερη θεωρείται η περίπτωση στην οποία η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι μικρότερη. Στην περίπτωση του A350-900 δυσμενέστερη είναι η εγκάρσια διεύθυνση, συνεπώς αυτή είναι που εξετάστηκε. Το αεροσκάφος B777-300 στην εγκάρσια διεύθυνση η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι 1,398 m, ενώ στη διαμήκη διεύθυνση η απόσταση είναι 1,49m.

Στις εικόνες 5.40 και 5.41 παρουσιάζεται η μεταβολή του ισοδύναμου φορτίου για τα αεροσκάφη B777-300 και A350-900, στην εγκάρσια διεύθυνση. Διακρίνονται δύο κρίσιμες περιοχές, η περιοχή που δεν υπάρχει επικάλυψη των φορτίων των τροχών και η περιοχή που υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των φορτίων. Για το αεροσκάφος B777-300 σε βάθος μεγαλύτερο ή ίσο με 55,1 εκατοστά και για το αεροσκάφος A350-900 σε βάθος μεγαλύτερο ή ίσο με 67,25 εκατοστά, υπάρχει επικάλυψη των φορτίων των δύο τροχών.

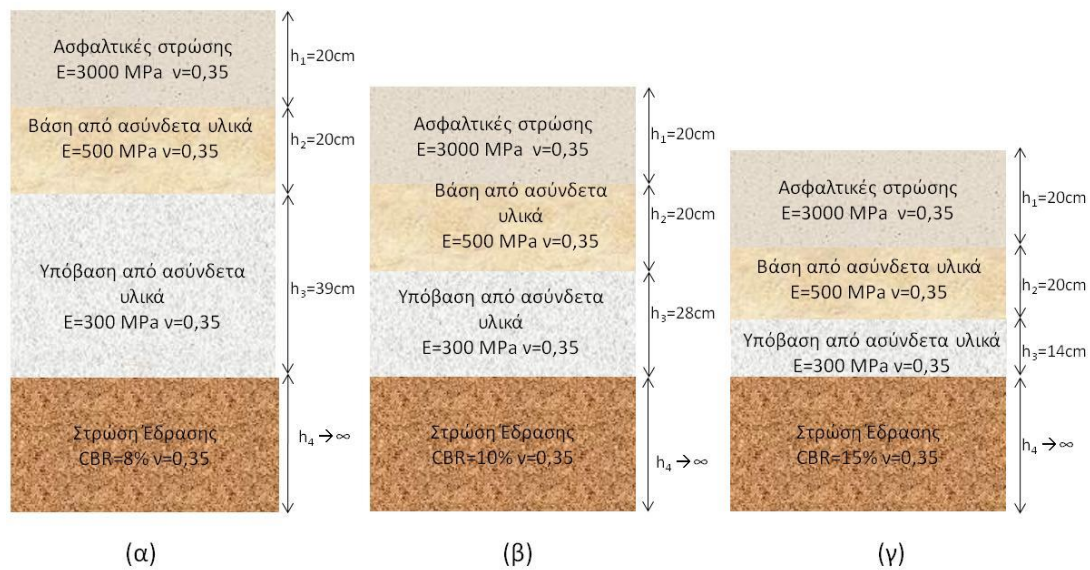


Εικόνα 5.40: Μεταβολή ισοδύναμου φορτίου για το αεροσκάφος B777-300 στην εγκάρσια διεύθυνση.



Εικόνα 5.41: Μεταβολή ισοδύναμου φορτίου για το αεροσκάφος A350-900 στην εγκάρσια διεύθυνση.

Οι διατομές που εξετάστηκαν ήταν αυτές που προέκυψαν για δείκτη CBR ίσο με 8%, 10% και 15%. Στην περίπτωση όπου ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι 15% το συνολικό πάχος της διατομής είναι 54 εκατοστά, όταν ο δείκτης CBR είναι 10% και 8%, το συνολικό πάχος της διατομής του οδοστρώματος είναι 68 και 79 εκατοστά, αντίστοιχα. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των διατομών που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στην εικόνα 5.42.



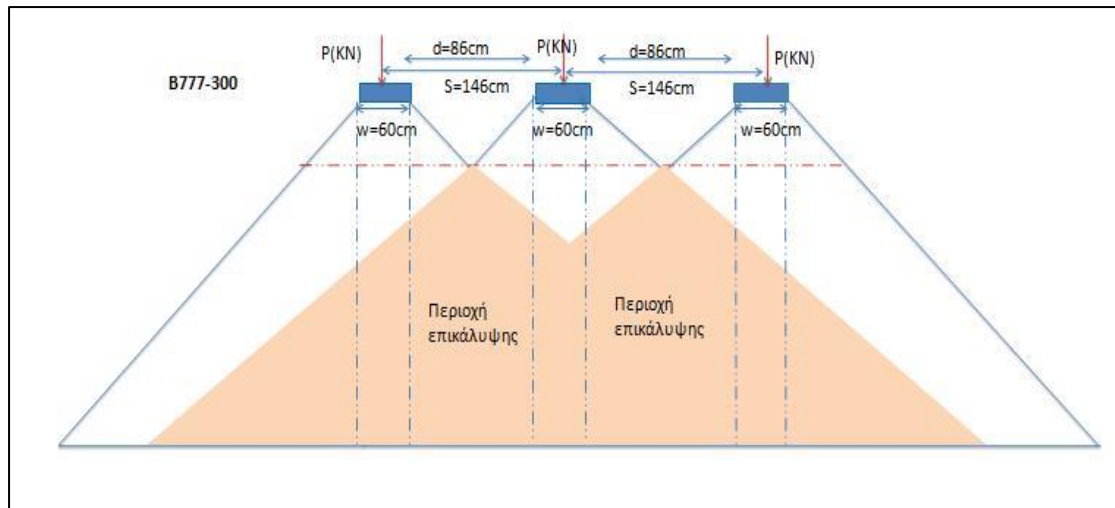
Εικόνα 5.42: Διατομές οδοστρώματος: (α) για CBR=8%, (β) για CBR=10%, (γ) για CBR=15%.

Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζεται το ισοδύναμο φορτίο στην εγκάρσια διεύθυνση των τροχών των αεροσκαφών A350-900 και B777-300 για τις διατομές της εικόνας 5.42.

Πίνακας 5.6: Ισοδύναμο φορτίο για A350-900 και B777-300.

Απόσταση από την επιφάνεια του οδοστρώματος(m)	A350-900 Ισοδύναμο Φορτίο (KN)	B777-300 Ισοδύναμο Φορτίο (KN)
0,79	P = 9.069	P = 9.396
0,68	P = 8.950	P= 8.887
0,54	P=8.679	P=8.464

Στην περίπτωση της διαμήκου διεύθυνσης των τροχών του B777-300 (τρεις τροχοί) δεν μπορεί να γίνει ακριβής υπολογισμός του ισοδύναμου φορτίου, καθώς οι μέχρι τώρα γνώσεις επιτρέπουν τον υπολογισμό του ισοδύναμου φορτίου στην περίπτωση των δύο τροχών. Στην εικόνα 5.43 παρουσιάζεται μία προσέγγιση της περιοχής επικάλυψης των φορτίων κατά τη διαμήκη διεύθυνση.



Εικόνα 5.43: Περιοχή κάλυψης φορτίων στη διαμήκη διεύθυνση του B777-300.

Με την ολοκλήρωση των υπολογισμών του ισοδύναμου φορτίου, προκύπτει ότι η αύξηση του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης έχει ως αποτέλεσμα να διαφοροποιείται το αεροσκάφος με το μεγαλύτερο ισοδύναμο φορτίο. Συγκεκριμένα όταν ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι μεγαλύτερος ή ίσος με 10% παρατηρείται ότι το A350-900 έχει μεγαλύτερο ισοδύναμο φορτίο σε σχέση με το αεροσκάφος B777-300.

Όταν ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι 8% ή 10% το πάχος της διατομής του οδοστρώματος είναι 79 και 68 εκατοστά, αντίστοιχα, με αποτέλεσμα να υπάρχει επικάλυψη των περιοχών επιρροής των δύο τροχών για τα δύο αεροσκάφη. Κατά συνέπεια το δυσμενέστερο σημείο είναι στην περιοχή ανάμεσα στους τροχούς των αεροσκαφών. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι 15%, το πάχος της διατομής είναι 54 εκατοστά και το δυσμενέστερο σημείο βρίσκεται στην περιοχή επαφής του τροχού με το οδόστρωμα.

## 5.6 Επίδραση αναχωρήσεων στη φθορά

Σε συνέχεια των παραπάνω πραγματοποιήθηκε σχετική ανάλυση μεταβάλλοντας τον αριθμό των αναχωρήσεων για τα δύο κρίσιμα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας (A350-900 και B777-300), παράμετρος που επηρεάζει τον δείκτη φθοράς. Υπενθυμίζεται ότι ο δείκτης αθροιστικής φθοράς ορίζεται ως ο λόγος των προβλεπόμενων καλύψεων ενός αεροσκάφους για την περίοδο σχεδιασμού προς τις καλύψεις του αεροσκάφους έως την αστοχία.

Πραγματοποιήθηκαν δύο σενάρια κυκλοφορίας, στα οποία μεταβλήθηκαν οι ετήσιες αναχωρήσεις στα αεροσκάφη A350-900 και B777-300. Η σύνθεση κυκλοφορίας για τα δύο αυτά σενάρια παρουσιάζεται στους πίνακες 5.7 και 5.8.



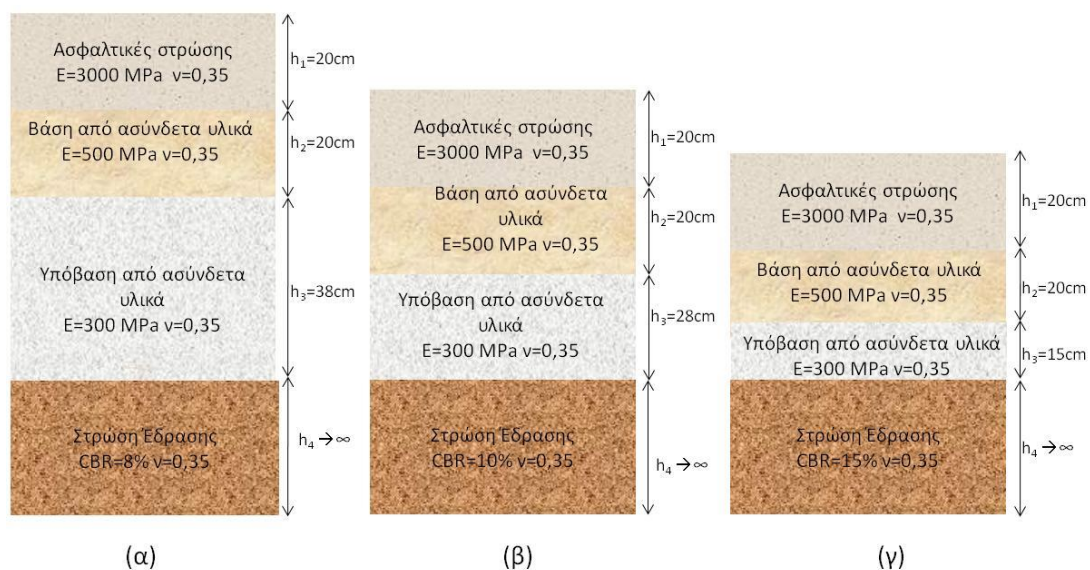
Πίνακας 5.7: Σύνθεση κυκλοφορίας για το πρώτο σενάριο.

Αεροσκάφη	Ετήσιες Διελεύσεις
A321-200	3650
A350-900	<b>2650</b>
A380-800	3650
B737-900	3650
B787-9	3650
B777-300	<b>1000</b>

Πίνακας 5.8: Σύνθεση κυκλοφορίας για το δεύτερο σενάριο.

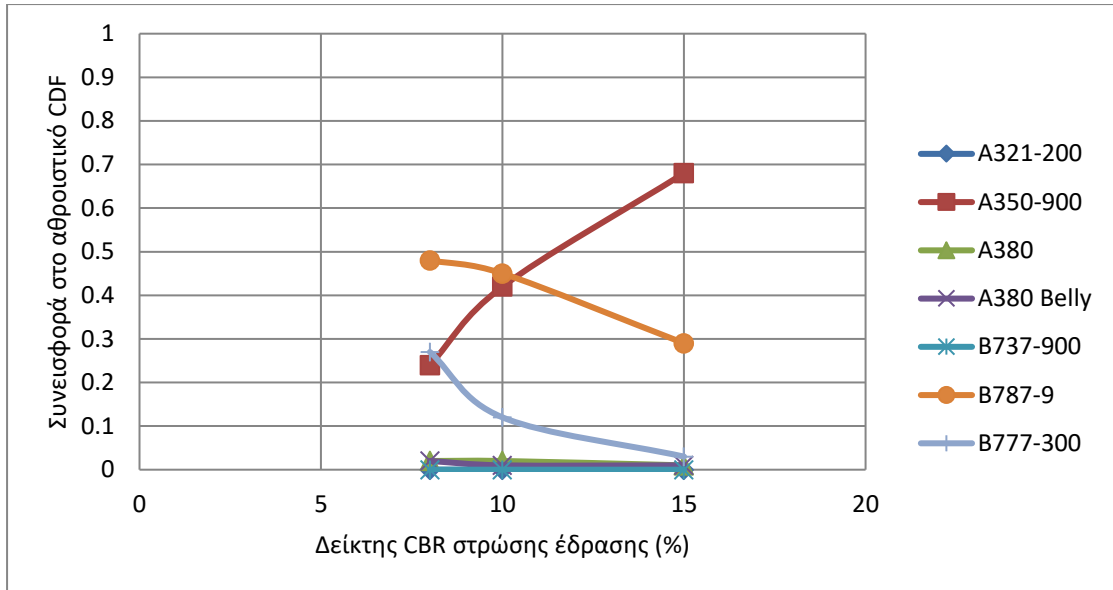
Αεροσκάφη	Ετήσιες Διελεύσεις
A321-200	3650
A350-900	<b>1000</b>
A380-800	3650
B737-900	3650
B787-9	3650
B777-300	<b>2650</b>

Σχετικά με το πρώτο σενάριο σύνθεσης κυκλοφορίας, οι διατομές που εξετάστηκαν φαίνονται στην εικόνα 5.44. Το μέτρο ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης είναι ίσο με 3.000 MPa, της βάσης είναι ίσο με 500 MPa και της υπόβασης είναι ίσο με 300 MPa. Ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης έλαβε τις τιμές 8%, 10% και 15%.



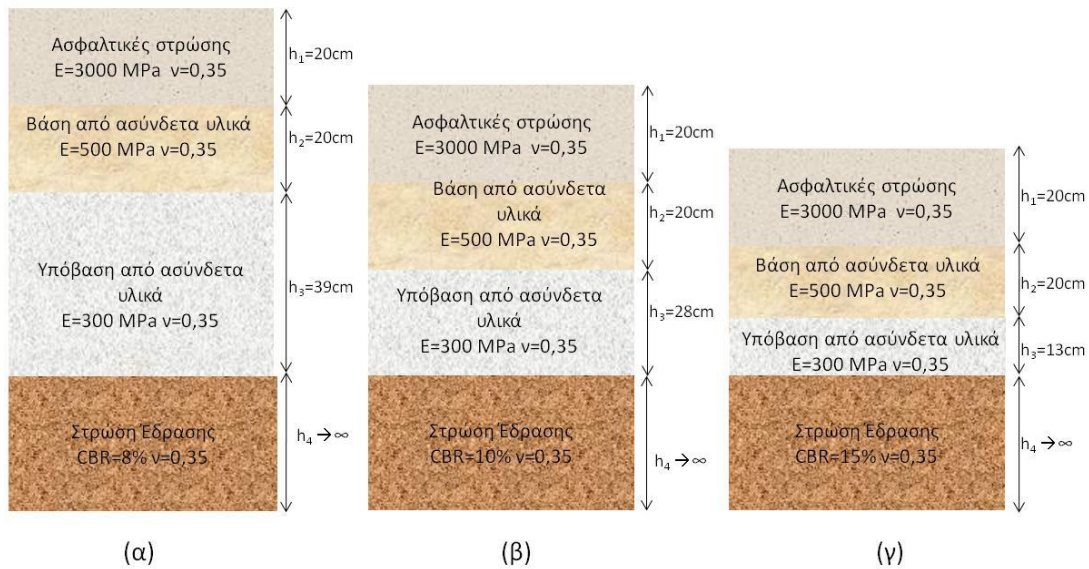
Εικόνα 5.44: Διατομές οδοστρώματος:(α)για CBR=8%, (β)για CBR=10%, (γ) για CBR=15%.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η μεταβολή της συνεισφοράς κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος (εικόνα 5.45). Από την ανάλυση προέκυψε ότι τα αεροσκάφη που συμβάλουν στη φθορά του οδοστρώματος είναι τα A350-900, B777-300 και B787-9.



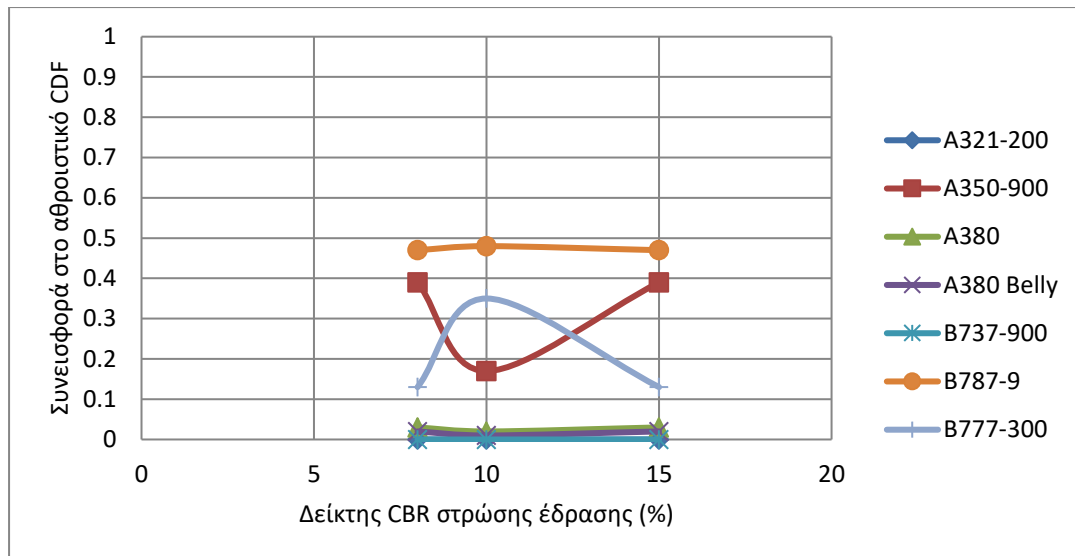
Εικόνα 5.45: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.

Αναφορικά με το δεύτερο σενάριο σύνθεσης κυκλοφορίας, οι διατομές που προέκυψαν έπειτα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας σχεδιασμού του οδοστρώματος παρουσιάζονται στην εικόνα 5.46.



Εικόνα 5.46: Διατομές οδοστρώματος: (α) για CBR=8%, (β) για CBR=10%, (γ) για CBR=15%.

Τέλος, εξετάστηκε η μεταβολή του δείκτη CDF για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας (εικόνα 5.47).



Εικόνα 5.47: Συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στην αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ότι παρόλο που παρατηρείται μεταβολή στις επιμέρους φθορές των αεροσκαφών, εντούτοις τα ίδια αεροσκάφη εξακολουθούν να είναι κρίσιμα για τον σχεδιασμό. Πιο συγκεκριμένα, μεταβάλλοντας τις αναχωρήσεις των αεροσκαφών A350-900 και B777-300 παρατηρείται ότι τα αεροσκάφη που εξακολουθούν να προκαλούν φθορά είναι τα A350-900, B777-300 και B787-9. Επομένως, στην περίπτωση που οι αναχωρήσεις μειωθούν για τα δύο αεροσκάφη (A350-900 και B777-300) δεν θα υπάρξει μεταβολή των αεροσκαφών που συμβάλουν στη φθορά του οδοστρώματος.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η φθορά εύκαμπτων οδοστρωμάτων ως αποτέλεσμα της εισαγωγής βαρέων αεροσκαφών στη σύνθεση κυκλοφορίας οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Πραγματοποιήθηκε διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων με τα τυπικά υλικά της FAA καθώς και με υλικά που έχουν διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Στις διατομές που προέκυψαν εξετάστηκε η συνεισφορά έξι αεροσκαφών (A321-200, B787-900, A350-900, B737-900, A380-800, B777-300) στη φθορά των οδοστρωμάτων που προκαλείται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

### **Σχετικά με τις διατομές που προέκυψαν από την ανάλυση:**

- Με τη μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων του οδοστρώματος (ασφαλτικές στρώσεις, βάση και υπόβαση) προέκυψε ότι μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό πάχος της διατομής του οδοστρώματος είχε το μέτρο ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος. Συγκεκριμένα, η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας μεταξύ των δύο ακραίων τιμών που θεωρήθηκαν για την ασφαλτική στρώση (2.000 MPa και 6.000 MPa) οδήγησε σε μείωση 15% του συνολικού πάχους της διατομής. Τα αντίστοιχα ποσοστά μείωσης για τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας της βάσης και της υπόβασης ήταν 6% και 7%, αντίστοιχα.
- Σχετικά με τη στρώση έδρασης, η επιλογή του δείκτη CBR αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα στη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος. Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι η αύξηση του δείκτη CBR από 8% σε 15% είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού πάχους της διατομής κατά 64%. Αυτό σημαίνει ότι η βελτίωση των χαρακτηριστικών του εδάφους όπου εδράζεται ένα οδόστρωμα μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη εξοικονόμηση πάχους της κατασκευής.

### **Αναφορικά με τη φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης:**

- Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ότι αεροσκάφη με μεγάλο φορτίο δεν προκαλούν τη μεγαλύτερη φθορά στο οδόστρωμα. Το αεροσκάφος A380-800, που είναι το βαρύτερο αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας, εμφανίζει τη μικρότερη παραμόρφωση και φθορά στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Η γεωμετρία και η διάταξη των τροχών καθορίζουν την κατανομή του βάρους του αεροσκάφους, αλλά και το πως θα αποκριθεί το οδόστρωμα σε αυτό. Το συγκεκριμένο αεροσκάφος αποτελείται συνολικά από είκοσι τροχούς. Συνεπώς, σημαντικό ρόλο στη φθορά του οδοστρώματος έχουν το πλήθος, η διάταξη των τροχών και οι αποστάσεις μεταξύ των τροχών.
- Στην περίπτωση στην οποία η διαστασιολόγηση έγινε με τα τυπικά υλικά της FAA αλλά και μεταβάλλοντας τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασφαλτικών στρώσεων, της βάσης και της υπόβασης, το αεροσκάφος που προκαλεί τη μεγαλύτερη φθορά

στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης είναι το B777-300 και ακολουθούν τα αεροσκάφη B787-9 και A350-900.

- Μεταβάλλοντας τον δείκτη CBR της στρώσης έδρασης παρατηρείται αντιστροφή του δυσμενέστερου αεροσκάφους της σύνθεσης κυκλοφορίας. Στην περίπτωση όπου ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι 8%, το αεροσκάφος που προκαλεί τη μεγαλύτερη φθορά στο οδόστρωμα είναι το B777-300, στο οποίο ο κάθε τροχός έχει τη μικρότερη πίεση, αλλά οι αποστάσεις των τροχών είναι μικρές. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι 15% μεγαλύτερη φθορά προκαλεί το αεροσκάφος A350-900, στο οποίο παρά το γεγονός ότι οι αποστάσεις μεταξύ των τροχών είναι μεγάλες, παρατηρήθηκε ότι ο κάθε τροχός μεταφέρει μεγαλύτερη πίεση συγκριτικά με το B777-300. Επομένως, φαίνεται ότι για μία διατομή με μεγάλο πάχος οδοστρώματος (που θα αντιστοιχούσε με μικρό δείκτη CBR) η φθορά καθορίζεται περισσότερο από τη διάταξη και τη γεωμετρία των τροχών (δηλαδή στις αποστάσεις μεταξύ των τροχών), παρά από την πίεση που μεταβιβάζει ο κάθε τροχός. Το αντίθετο παρατηρήθηκε στην περίπτωση διατομής με μικρό πάχος (που αντιστοιχεί σε μεγάλο δείκτη CBR). Αυτό επαληθεύει υπάρχουσες αναφορές από τη βιβλιογραφία (Fabre and Vaurs, 2019).
- Διατηρώντας τον δείκτη CBR της στρώσης έδρασης σταθερό και ίσο με 8% και μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά των υπόλοιπων στρώσεων (ασφαλτικές στρώσεις, βάση, υπόβαση) τα βαρέα αεροσκάφη A350-900 και B787-9 με φορείο διπλών τροχών - διπλών αξόνων, παρουσιάζουν την ίδια ανηγμένη παραμόρφωση, αλλά η φθορά που προκαλούν στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης είναι διαφορετική. Στα δύο αυτά αεροσκάφη η γεωμετρία των τροχών των φορείων είναι διαφορετική. Συνεπώς, διαπιστώνεται ότι μέσω της διάταξης και της γεωμετρίας των τροχών προσδιορίζεται η κατανομή του φορτίου σε ένα οδόστρωμα και η αλληλεπίδραση των φορτίων οδηγεί σε διαφορετική φθορά.
- Τέλος, στα αεροσκάφη ήπιας επιβατικής κίνησης, A321-200 και B737-900, που έχουν ίδιο σύστημα τροχών (διπλοί άξονες), αλλά η διαμόρφωση των τροχών είναι διαφορετική η ανηγμένη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης παρουσιάζει μικρές διαφοροποιήσεις. Αυτό ισχύει για όλες τις περιπτώσεις όπου μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων της διατομής του οδοστρώματος. Παράλληλα, η φθορά και των δύο αεροσκαφών είναι μηδενική.

#### **Σχετικά με τις καλύψεις των αεροσκαφών:**

- Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι η βελτίωση της ποιότητας των υλικών του οδοστρώματος οδήγησε σε αύξηση του λόγου pass-to-coverage. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η βελτίωση της ποιότητας των υλικών του οδοστρώματος οδηγεί σε μείωση του ενεργού πλάτους των τροχών των αεροσκαφών. Η αύξηση του λόγου pass-to-coverage έχει ως αποτέλεσμα τα αεροσκάφη της σύνθεσης κυκλοφορίας να πραγματοποιούν περισσότερες διελεύσεις προκειμένου μία περιοχή του οδοστρώματος να παρουσιάσει τη μέγιστη καταπόνηση και κατ' επέκταση η εντατική καταπόνηση ανά διεύση είναι μικρότερη.

**Αναφορικά με τη σημασία και τη χρηστικότητα των ευρημάτων επισημαίνονται τα εξής:**

- Η γνώση της επίδρασης των αεροσκαφών στη φθορά των οδοστρωμάτων αποτελεί βασικό εργαλείο για τους διαχειριστές αεροδρομίων, ώστε να έχουν επίγνωση της υφιστάμενης κατάστασης του οδοστρώματος και να προγραμματίζουν εγκαίρως την συντήρησή τους. Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ότι η φθορά ενός οδοστρώματος δεν είναι συνάρτηση του βάρους των αεροσκαφών, καθώς αποδείχθηκε ότι αεροσκάφη με μεγάλο μικτό φορτίο δεν προκαλούν απαραίτητα τη μέγιστη φθορά στο οδόστρωμα. Επομένως, οι υπηρεσίες του αεροδρομίου θα μπορούσαν ενδεχομένως να προσδιορίζουν τα τέλη προσγείωσης και στάθμευσης των αεροσκαφών βάσει της φθοράς που προκαλούν στο οδόστρωμα και όχι με κριτήριο το μέγιστο βάρος τους. Επιπλέον, η γνώση για τη φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη στα οδοστρώματα βοηθάει στον καλύτερο προγραμματισμό και διαχείριση της συντήρησης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

**Τέλος, διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:**

- Η συγκεκριμένη διερεύνηση θα μπορούσε να επεκταθεί λαμβάνοντας υπόψη το δείκτη CDF στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων για να διερευνηθεί η επίδραση των βαρέων αεροσκαφών στη φθορά του οδοστρώματος.
- Επίσης, θα μπορούσαν να εμπλουτιστούν οι παραμετρικές αναλύσεις ώστε να προκύψει μία μεγάλη συλλογή στοιχείων σχετικά με την επίδραση των αεροσκαφών στη φθορά των οδοστρωμάτων. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να οδηγήσει στη δημιουργία μοντέλων ή συναρτήσεων πρόβλεψης με εξαρτημένη μεταβλητή τον δείκτη CDF και ανεξάρτητες τις υπόλοιπες μεταβλητές (πχ πάχη, μέτρο ελαστικότητας, CBR, αναχωρήσεις).
- Λόγω της πρόσφατης εισαγωγής βαρέων αεροσκαφών στην κυκλοφορία, τα ήδη υπάρχοντα αεροδρόμια έχουν σχεδιαστεί θεωρώντας μία κυκλοφορία σχεδιασμού η οποία δεν περιέχει αεροσκάφη νέας γενιάς. Επομένως, βάσει των εξελίξεων στη κατασκευή αεροσκαφών, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μελέτη της συμπεριφοράς των ήδη διαστασιοποιημένων εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίου όταν αυτά χρησιμοποιούνται από βαρέα αεροσκάφη.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ

- Airbus (2021): <https://www.airbus.com>
- Attia M. (2019): “Evaluation of Airport Flexible Pavement HMA Fatigue Using FAARFIELD”, International Journal of Scientific and Engineering Research, Volume 10, pages 782-789.
- Australian Airports Association (2017): Airfield Pavement Essentials, Author: G. White, pages 1-96.
- Boeing (2021): <https://www.boeing.com>
- Caron C., Theillout J. and Brill D. (2010): “Comparison of US and French Rational Procedures for the Design of Flexible Airfield Pavements”, Presented for FAA worldwide airport technology transfer conference, USA, pages 1-22.
- Chai G., Wardle L. and Haydon M. (2016): “Airfield Pavement Design for a Major Airport Using FAARFIELD and APSDS”, 8<sup>th</sup> International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements, Singapore, pages 181-191.
- Charles B., Djuniati S. and Sandhyavitri A. (2016): “Analisis Perencanaan Struktur Perkerasan Runway, Taxiway, Dan Apron Bandara Sultan Syarif Kasim Ii Menggunakan Metode FAA”. Online Student Journal of Engineering Faculty the University of Riau, Indonesia.
- Directorate of civil engineering services (1989): “A guide to airfield pavement design and evaluation”. United Kingdom: Property services agency, Department of environment.
- Engineer Research and Development Center, ERDC (2001): “Pavement design for airfields”, U.S.A.
- Fabre C. and Vours G. (2019): “Paradox: Why the Heaviest Commercial Airplane Remains the Most Pavement Friendly Aircraft at Large Hub Airports”, ASCE Airfield and Highway Pavements Conference 2019, U.S.A., pages 333-342.
- Federal Aviation Administration, FAA (1995): “Advisory Circular No: 150.5320-6D, subject: Airport Pavement Design and Evaluation”, U.S.A., Department of Transportation Federal Aviation Administration.

- Federal Aviation Administration, FAA (2009): “Advisory Circular No: 150-5320-6E, subject: Airport Pavement Design and Evaluation”, U.S.A., Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- Federal Aviation Administration, FAA (2012): “Pass-to-Coverage computation for arbitrary gear configurations in the FAARFIELD Program”.
- Federal Aviation Administration, FAA (2016): “Advisory Circular No: 150-5320-6F, subject: Airport Pavement Design and Evaluation”, U.S.A., Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- Garg N. and Hayhoe G. (2008): “Permanent Deformation Behavior of the Granular Layers Tested at the FAA’s National Airport Pavement Test Facility”. 3<sup>rd</sup> International Conference on Accelerated Pavement Testing (APT), Spain, pages 1-22.
- Gopalakrishnan K. and Thompson M. (2006): “Severity Effects of Dual-Tandem and Dual-Tridem Repeated Heavier Aircraft Gear Loading on Pavement Rutting Performance”, International Journal of Pavement Engineering, Volume 7, pages 179-190.
- Huang Y. (1993): “Pavement Analysis and Design”, U.S.A.
- International Air Transport Association (IATA, 2016): “Δείκτες Ανταγωνιστικότητας Ρυθμιστικού Πλαισίου Αερομεταφορών”.
- Mounier D. (2014): “A New Mechanistic Design Procedure for Flexible Airfield Pavements”, French Civil Aviation Technical Center (STAC).
- Portland Cement Association, PCA (1966): “Thickness design for concrete pavements”.
- Shafabakhsh G. and Kashi E. (2014a): “Evaluation of Aircraft Wheel Load on Pavement Damages by Layered Elastic Method”, International Journal of Damage Mechanics, Volume 3, pages 782-789.
- Shafabakhsh G. and Kashi E. (2014b): “Effect of Aircraft Wheel Load and Configuration on Runway Damage”, Periodica Polytechnica Civil Engineering, pages 85-94.
- Shen S. and Carpenter S. (2007): “Development of an Asphalt Fatigue Model Based on Energy Principles”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 76, pages 525-573.



- STAC (2013): Rational Design Method of Flexible Airfield Pavements-Technical Manual, France.
- Vieira R. (2015): “Airport Pavement Designs, Consideration of New Guidelines”. Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources, Instituto Superior Técnico, Lisbon University.
- Wang H., Li M., Garg N. and Zhao J. (2020): “Multi-Wheel Gear Loading Effect on Load-Induced Failure Potential of Airfield Flexible Pavement”, International Journal of Pavement Engineering, volume 21, pages 805-816.
- Wardle L. and Rodway B. (2010): “Advanced Design of Flexible Aircraft Pavements”, 24<sup>th</sup> ARRB Conference, Australia.
- Λοΐζος Α. και Πλατή Χ. (2018α): “Κατασκευή Οδών”, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Λοΐζος Α. και Πλατή Χ. (2018β): “Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων”, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Λοΐζος Α. και Πλατή Χ. (2019): “Αξιολόγηση και Συντήρηση Οδοστρωμάτων”, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.