



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

## **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ**



Επιβλέπων: Ανδρέας Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Έχοντας ολοκληρώσει τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου κ. Λοΐζο για τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε, καθώς και για την εμπιστοσύνη του προς το πρόσωπό μου, τα οποία συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την επιστημονική συνεργάτιδα του εργαστηρίου Οδοποιίας, κα. Αρμένη για την υπομονή της αλλά ιδιαίτερα για τις χρήσιμες οδηγίες που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση της εργασίας. Χωρίς την συνεισφορά και την καθοδήγησή της θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στα αδέρφια μου, Σωτήριο και Αναστασία, στην ξαδέρφη μου Αικατερίνη καθώς και στους φίλους και στις φίλες μου για την ψυχολογική υποστήριξη και την υπομονή τους. Αλλά κυρίως στους γονείς μου, Ιωάννη και Ξανθίππη, που βρίσκονταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου και με στήριζαν με κάθε δυνατό τρόπο.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT .....	6
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	7
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
2. ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA.....	13
2.1 Εισαγωγή .....	13
2.2 Βασικές αρχές μεθόδου .....	13
2.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο μεθόδου .....	13
2.2.2 Υλικά μεθόδου FAA.....	18
2.2.3 Κυκλοφορία.....	21
2.3 Διαδικασία διαστασιολόγησης .....	25
3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA .....	27
3.1 Εισαγωγή .....	27
3.2 Βασικές αρχές μεθόδου .....	27
3.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	27
3.2.2 Υλικά μεθόδου FAA.....	33
3.3 Διαδικασία σχεδιασμού-Το σύστημα FAARFIELD .....	36
4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ FAA.....	44
4.1 Εισαγωγή .....	44
4.2 Σύγκριση βασικών αρχών.....	44
4.3 Παράδειγμα διαστασιολόγησης εύκαμπτου οδοστρώματος.....	45
4.3.1 Δεδομένα .....	45
4.3.2 Διαδικασία διαστασιολόγησης οδοστρώματος με την εμπειρική μέθοδο .....	46

4.3.3	Διαδικασία διαστασιολόγησης οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο.....	49
4.4	Σύγκριση διατομών-Σχόλια .....	52
5.	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΩΡΗΣΕΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ FAA.....	53
5.1	Εισαγωγή .....	53
5.2	Αξιολόγηση διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος .....	53
5.3	Διερεύνηση νόμου κόπωσης ασφαλτικής στρώσης .....	54
5.3.1	Επιρροή μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος .....	54
5.3.2	Επιρροή μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασύνδετου αμμοχάλικου.....	61
6.	ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	64
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	66
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	67
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....	78

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA. Για τον σκοπό αυτό, καταγράφηκαν και διερευνήθηκαν οι βασικές αρχές της μέσω της σύγκρισής της με την προϋπάρχουσα εμπειρική μέθοδο. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε παράδειγμα διαστασιολόγησης εύκαμπτου οδοστρώματος και με τις δύο μεθόδους με στόχο να σχολιαστούν τα αποτελέσματά τους. Στο πλαίσιο της διερεύνησης, ακολούθησε εμβάθυνση στο βασικό κριτήριο σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της αναλυτικής μεθόδου, το οποίο είναι ο δείκτης αθροιστικής φθοράς. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας μιας διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος. Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζονται τα ευρήματα-συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία.

**Λέξεις κλειδιά: Εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων, σχεδιασμός εύκαμπτων οδοστρωμάτων, αξιολόγηση οδοστρώματος, δείκτης αθροιστικής φθοράς, FAARFIELD**

# ABSTRACT

---

In the present diploma thesis a research is conducted about the FAA's analytical method for design and evaluation of airfield pavements. For this purpose, the basic principles have been recorded and analyzed by comparing the analytical method with the existing empirical method. In the next stage, a flexible pavement design has been conducted using both methods, in order to comment the results. In the framework of this investigation, the basic criterion for the design and the evaluation of airfield pavement of the analytical method was investigated, which is the cumulative damage factor. Therefore, an evaluation of a flexible pavement cross-section was conducted. The findings-conclusions drawn from the above procedure are represented in this thesis.

**Key words: flexible airfield pavements, flexible pavement design, pavement evaluation, cumulative damage factor, FAARFIELD**

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 2.1: Υλικά εμπειρικής μεθόδου FAA.....	19
Πίνακας 2.2: Προτεινόμενο εύρος συντελεστών ισοδυναμίας για στρώση υπόβασης με ασύνδετα υλικά υψηλής ποιότητας-σταθεροποιημένα υλικά .....	20
Πίνακας 2.3: Προτεινόμενο εύρος συντελεστών ισοδυναμίας για στρώση βάσης με ασύνδετα υλικά υψηλής ποιότητας-σταθεροποιημένα υλικά .....	21
Πίνακας 2.4: Συντελεστές ισοδυναμίας συστημάτων τροχών .....	22
Πίνακας 2.5: Τιμές λόγων διελεύσεων προς καλύψεις-διελεύσεις C.....	24
Πίνακας 2.6: Προσαύξηση του συνολικού πάχους του οδοστρώματος για μεγάλο αριθμό διελεύσεων .....	25
Πίνακας 2.7: Ελάχιστο πάχος βάσης .....	26
Πίνακας 3.1: Τιμές του δείκτη φθοράς.....	32
Πίνακας 3.2: Υλικά αναλυτικής μεθόδου FAA.....	34
Πίνακας 3.3: Τυπικά συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών .....	38
Πίνακας 3.4: Τυπικά συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών (συνέχεια) .....	39
Πίνακας 3.5: Τύποι στρώσεων βάσης με σταθεροποιημένα υλικά .....	41
Πίνακας 3.6: Προτεινόμενες τιμές για ελάχιστο πάχος στρώσης βάσης ασύνδετου υλικού.....	42
Πίνακας 4.1: Προβλεπόμενη κυκλοφορία οδοστρώματος .....	46
Πίνακας 4.2: Υλικά των στρώσεων του οδοστρώματος .....	46
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα υπολογισμών .....	47
Πίνακας 4.4: Ισοδύναμες διελεύσεις αεροσκαφών .....	47
Πίνακας 4.5: Υπολογισμός δείκτη φθοράς στρώσης έδρασης.....	50

## Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος.....	14
Σχήμα 2.2: Νομογράφημα μεθόδου CBR.....	14
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα υπολογισμού για τυπικό φορείο μονού τροχού .....	15
Σχήμα 2.4: Διάγραμμα υπολογισμού για τυπικό φορείο διπλού τροχού .....	16
Σχήμα 2.5: Διάγραμμα υπολογισμού για τυπικό φορείο διπλού δίδυμου τροχού ...	17
Σχήμα 2.6: Κατανομή βάρους αεροσκάφους μεταξύ ρινιαίου και κυρίων φορείων .	23
Σχήμα 3.1: Αρχή δείκτη φθοράς CDF .....	28
Σχήμα 3.2: Ενεργά πλάτη δύο τροχών-χωρίς επικάλυψη.....	30
Σχήμα 3.3: Ενεργό πλάτος ενός τροχού-με επικάλυψη.....	30
Σχήμα 3.4: Στατικό πρότυπο εύκαμπτου οδοστρώματος.....	31
Σχήμα 3.5: Υπολογισμός δείκτη φθοράς στις κρίσιμες θέσεις .....	31
Σχήμα 3.6: Υπολογισμός αθροιστικής φθοράς στρώσης έδρασης οδοστρώματος ...	33
Σχήμα 3.7: Ενδεικτικό σύστημα τροχών αεροσκάφους στο αναλυτικό σύστημα.....	33
Σχήμα 3.8: Βάση δεδομένων αεροσκαφών του FAARFIELD .....	36
Σχήμα 4.1: Σύγκριση Θεωρίας Ελαστικών στρώσεων-Μέθοδος CBR.....	44
Σχήμα 4.2: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος (εμπειρική μέθοδος) .....	48
Σχήμα 4.3: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος με σταθεροποιημένα υλικά (εμπειρική μέθοδος) .....	48
Σχήμα 4.4: Κυκλοφορία οδοστρώματος .....	49
Σχήμα 4.5: Υλικά στρώσεων οδοστρώματος.....	50
Σχήμα 4.6: Υπολογισμός δείκτη φθοράς στρώσης έδρασης .....	51
Σχήμα 4.7: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος με σταθεροποιημένα υλικά (αναλυτική μέθοδος).....	51
Σχήμα 4.8: Συγκριτικά αποτελέσματα.....	52
Σχήμα 5.1: Διατομή αξιολόγησης.....	54
Σχήμα 5.2: Διατομή με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας ασφαλτομίγματος .....	55
Σχήμα 5.3: Επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος στον δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης.....	55
Σχήμα 5.4: Επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος στις επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις.....	56
Σχήμα 5.5: Επίδραση της μεταβολής των παραμορφώσεων στις επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις.....	57



Σχήμα 5.6: Επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος στον δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης, συγκριτικά με άλλους νόμους .....	59
Σχήμα 5.7: Επίδραση της μεταβολής των παραμορφώσεων στις επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις, συγκριτικά με άλλους νόμους .....	60
Σχήμα 5.8: Διατομή με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας ασύνδετου αμμοχάλικου .	61
Σχήμα 5.9: Επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασύνδετου αμμοχάλικου στον δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης, συγκριτικά με άλλους νόμους .....	62
Σχήμα 5.10: Επίδραση της μεταβολής των παραμορφώσεων στον δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης, συγκριτικά με άλλους νόμους.....	63

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Στις μέρες μας ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας διακίνησης εμπορευμάτων και επιβατών πραγματοποιείται μέσω των αερομεταφορών. Τα αεροδρόμια αποτελούν τις βασικές υποδομές που σχετίζονται με τις αερομεταφορές και ως εκ τούτου είναι αναγκαία η διασφάλιση της ορθής λειτουργίας τους. Για το λόγο αυτό ο κατάλληλος σχεδιασμός των επιμέρους εγκαταστάσεων που διαθέτει ένα αεροδρόμιο, και οι οποίες εξυπηρετούν τόσο την κίνηση των επιβατών όσο και την κίνηση των αεροσκαφών, είναι ιδιαίτερα σημαντικός.

Όσον αφορά στην κίνηση των αεροσκαφών, αυτή πραγματοποιείται μέσω των δαπέδων του αεροδρομίου. Τα υπόψη δάπεδα κατασκευάζονται από διάφορους τύπους οδοστρωμάτων ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν στις διαφορετικές συνθήκες φόρτισης που αναπτύσσονται κατά την χρήση τους από τα αεροσκάφη (προσγείωση-απογείωση, τροχοδρόμηση, στάθμευση, συντήρηση, αναμονή, κ.α.). Σε κάθε περίπτωση για την ορθή λειτουργία του αεροδρομίου είναι απαραίτητος ο κατάλληλος σχεδιασμός των οδοστρωμάτων έτσι ώστε τα δάπεδα να μπορούν να φέρουν την προβλεπόμενη φόρτιση.

Ο σχεδιασμός ενός οδοστρώματος αεροδρομίου περιλαμβάνει τον καθορισμό του πάχους των επιμέρους στρώσεων (διαστασιολόγηση οδοστρώματος) καθώς και την επιλογή των κατάλληλων υλικών, έτσι ώστε το οδόστρωμα που θα κατασκευασθεί να μπορεί να φέρει τα φορτία των αεροσκαφών που πρόκειται να δεχθεί.

Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται διάφορες μεθοδολογίες διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, όπως για παράδειγμα η μέθοδος της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας FAA (Federal Aviation Administration) [1,2] του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (STBA: Service Technique des Bases Aériennes) [3], της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μεγάλης Βρετανίας (Directorate of Civil Engineering Services) [4], του Κέντρου Ανάπτυξης και Έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (ERCD: Engineer Research and Development Center) [5], της Ένωσης Σκυροδέματος (PCA: Portland Cement Association) που εφαρμόζεται μόνο σε δύσκαμπτα οδοστρώματα [6], του Ινστιτούτου Ασφάλτου (Asphalt Institute) που εφαρμόζεται μόνο σε

ασφαλικά οδοστρώματα και άλλες. Από αυτές, η πλέον διαδεδομένη μέθοδος, τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο όσο και στην χώρα μας, είναι εκείνη της FAA, στην οποία βασίζεται και η παρούσα διερεύνηση [7].

Η αρχική μορφή της μεθόδου διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA δημοσιεύτηκε το 1958, οπότε η FAA υιοθέτησε ως πολιτική το σχεδιασμό των αεροδρομίων με αεροσκάφος σχεδιασμού μέγιστου βάρους 350.000 lbs (159.000 Kg) και με τυπικό σύστημα τροχών αυτό του DC-S-50. Προσπάθησε επίσης, να διασφαλίσει ότι τα μελλοντικά αεροσκάφη δε θα καταπονούν τα οδοστρώματα περισσότερο από το αεροσκάφος αναφοράς των 350.000 lbs (159.000 Kg). Ως ένα βαθμό, οι κατασκευαστές αεροσκαφών ακολούθησαν και εφάρμοσαν αυτή την οδηγία, για τη μη κατασκευή δηλαδή αεροσκαφών τα οποία προκαλούν ένταση μεγαλύτερη από αυτή του αεροσκάφους σχεδιασμού. Και αυτό το πέτυχαν με την αύξηση του αριθμού και της απόστασης των τροχών, παρόλο που τα φόρτια των αεροσκαφών σχετικά σύντομα υπερέβησαν κατά πολύ το όριο των 159.000 Kg.

Οι βελτιώσεις-τροποποιήσεις της μεθόδου που ακολούθησαν τα επόμενα χρόνια, οδήγησαν στη διαμόρφωση του εγχειριδίου της εμπειρικής μεθόδου της FAA που εκδόθηκε το 1995. Η υπόψη μέθοδος, η οποία χρησιμοποιήθηκε εκτενώς μέχρι και τις μέρες μας, παρέχει οδηγίες για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Ακολουθώντας τις γενικότερες εξελίξεις στον τομέα τόσο της ανάλυσης και του σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων όσο και της κατασκευής νέων τύπων αεροσκαφών, η FAA ανέπτυξε μία νέα αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η υπόψη μέθοδος εισήχθη το 2009 και σήμερα βρίσκεται σε εξέλιξη. Η εφαρμογή της μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του λογισμικού FAARFIELD (Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design).

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η καταγραφή και η διερεύνηση των βασικών αρχών της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA, η οποία θα πραγματοποιηθεί μέσω της σύγκρισής της με την προϋπάρχουσα εμπειρική μέθοδο. Στο πλαίσιο αυτό θα ακολουθήσει εμβάθυνση σε στοιχεία/παραμέτρους της αναλυτικής μεθόδου που κρίνονται καθοριστικά για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Σημειώνεται ότι, η υπόψη μέθοδος περιλαμβάνει το σχεδιασμό και την

αξιολόγηση τόσο εύκαμπτων όσο και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, η παρούσα όμως διερεύνηση επικεντρώνεται στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Τα κεφάλαια που ακολουθούν περιλαμβάνουν τα εξής:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρονται οι βασικές αρχές της εμπειρικής μεθόδου της FAA που αφορούν στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων και περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού τους με την χρήση της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές της αναλυτικής μεθόδου της FAA που αφορούν στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων και περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού τους με την χρήση της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι βασικές διαφορές της αναλυτικής μεθόδου της FAA με την εμπειρική. Επιπλέον, πραγματοποιείται διαστασιολόγηση εύκαμπτου οδοστρώματος με τις δύο μεθόδους και ακολουθεί σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει εμβάθυνση στο βασικό κριτήριο σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων της αναλυτικής μεθόδου της FAA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: Στο τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα-σχόλια που προέκυψαν από την παρούσα διερεύνηση και παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

## 2. ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA

---

### 2.1 Εισαγωγή

Η εμπειρική μέθοδος της FAA εκδόθηκε το 1995 και συμπληρώθηκε με διορθώσεις στα επόμενα χρόνια. Δημιουργήθηκε μέσα από θεωρητικές αναλύσεις της μετάδοσης των φορτίων, από πειραματικά δεδομένα και από εκτενέστερες μελέτες της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων σε συνθήκες πραγματικής φόρτισής τους. Η μέθοδος αυτή, περιλαμβάνει πληροφορίες:

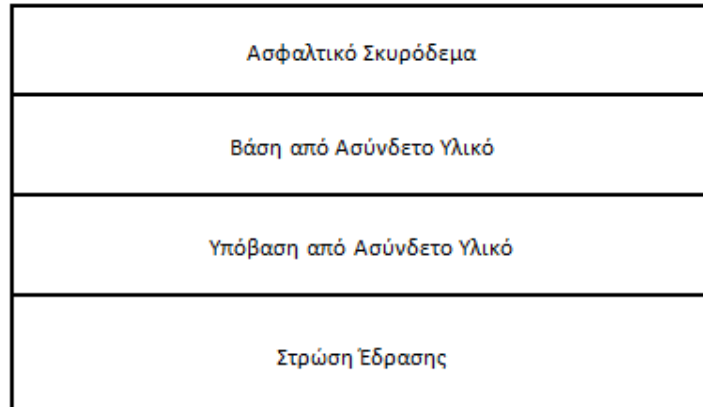
- για το σχεδιασμό εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων
- την αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων αεροδρομίων
- την ενίσχυση υφιστάμενων οδοστρωμάτων με ασφαλική επίστρωση.

Στην συνέχεια, παρατίθενται οι βασικές αρχές σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων με την υπόψη μέθοδο.

### 2.2 Βασικές αρχές μεθόδου

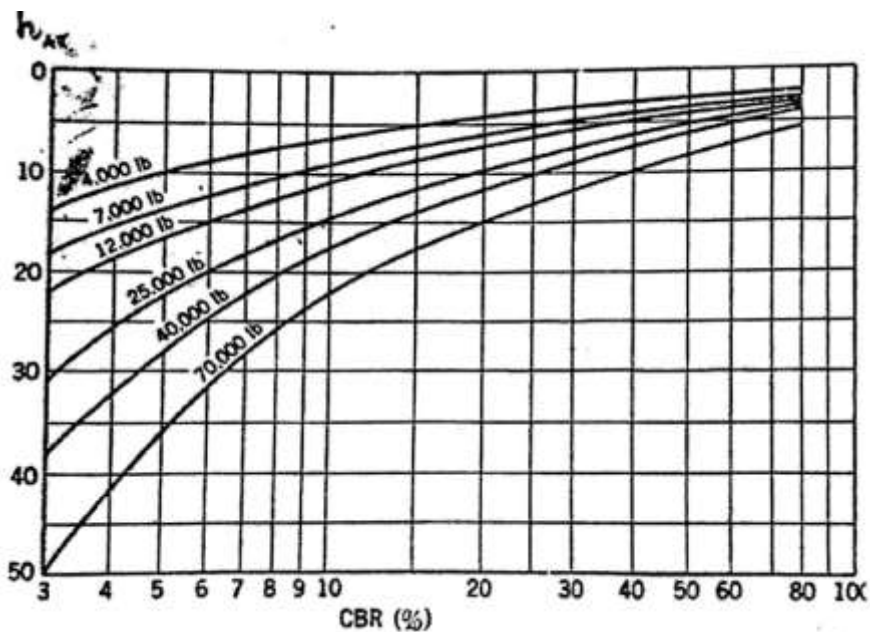
#### 2.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο μεθόδου

Ο σχεδιασμός εύκαμπτων οδοστρωμάτων με την εμπειρική μέθοδο γίνεται με τη χρήση διαγραμμάτων σχεδιασμού. Τα διαγράμματα βασίζονται στο στατικό προσομοίωμα του σχήματος 2.1 και έχουν αναπτυχθεί με βάση τη μέθοδο CBR (California Bearing Ratio) του Σώματος Μηχανικών των ΗΠΑ, συνδυάζοντας το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου με τα αποτελέσματα εκτεταμένων ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί από την FAA έτσι ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία της διαδικασίας σχεδιασμού.



**Σχήμα 2.1: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος**

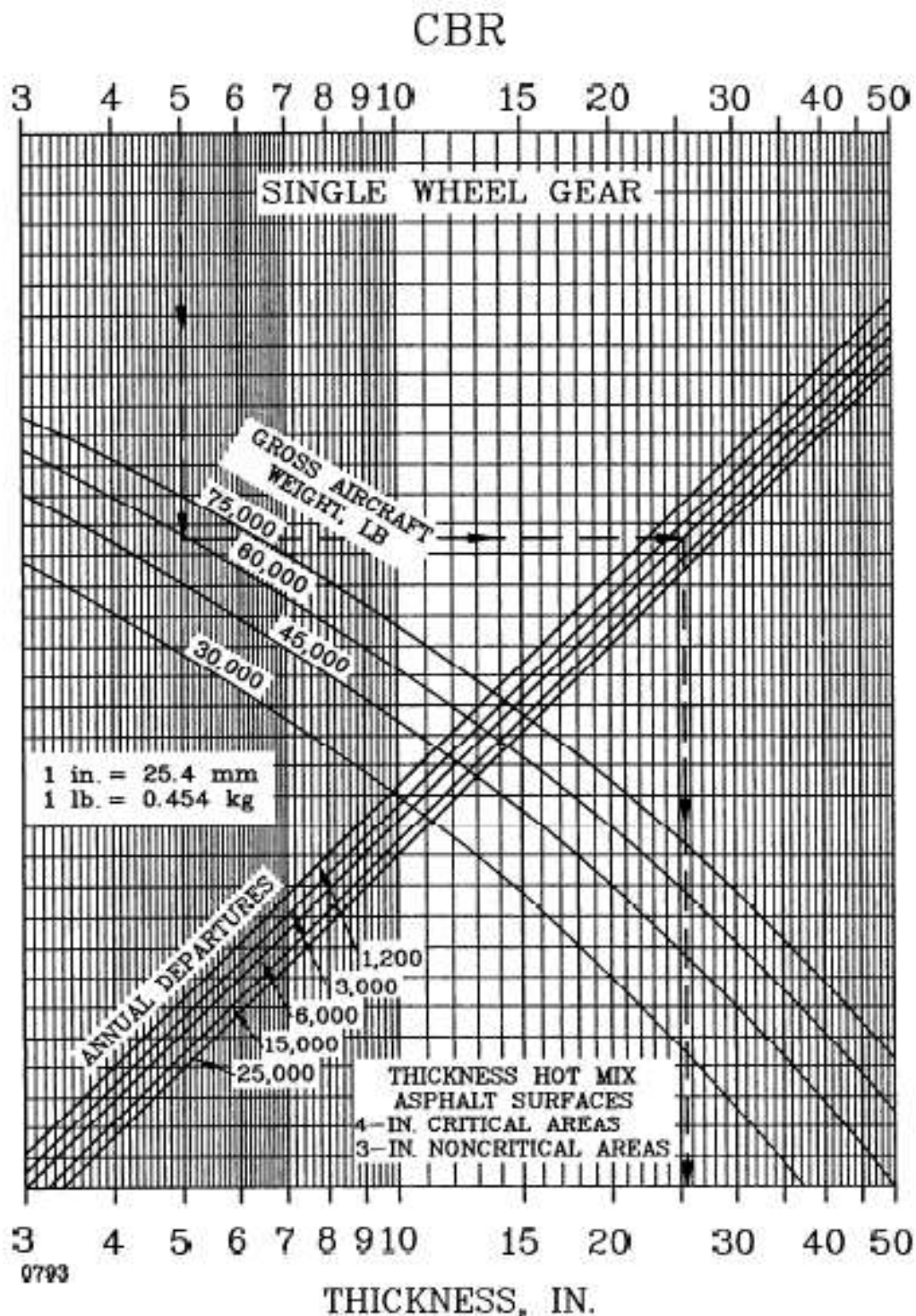
Στο σχήμα 2.2 φαίνεται το γενικό νομογράφημα της μεθόδου CBR με βάση το οποίο υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος στρώσης οδοστρώματος σε συσχέτιση με τη φέρουσα ικανότητα του υλικού της υποκείμενης στρώσης και με το μέγεθος της φόρτισης του οδοστρώματος.



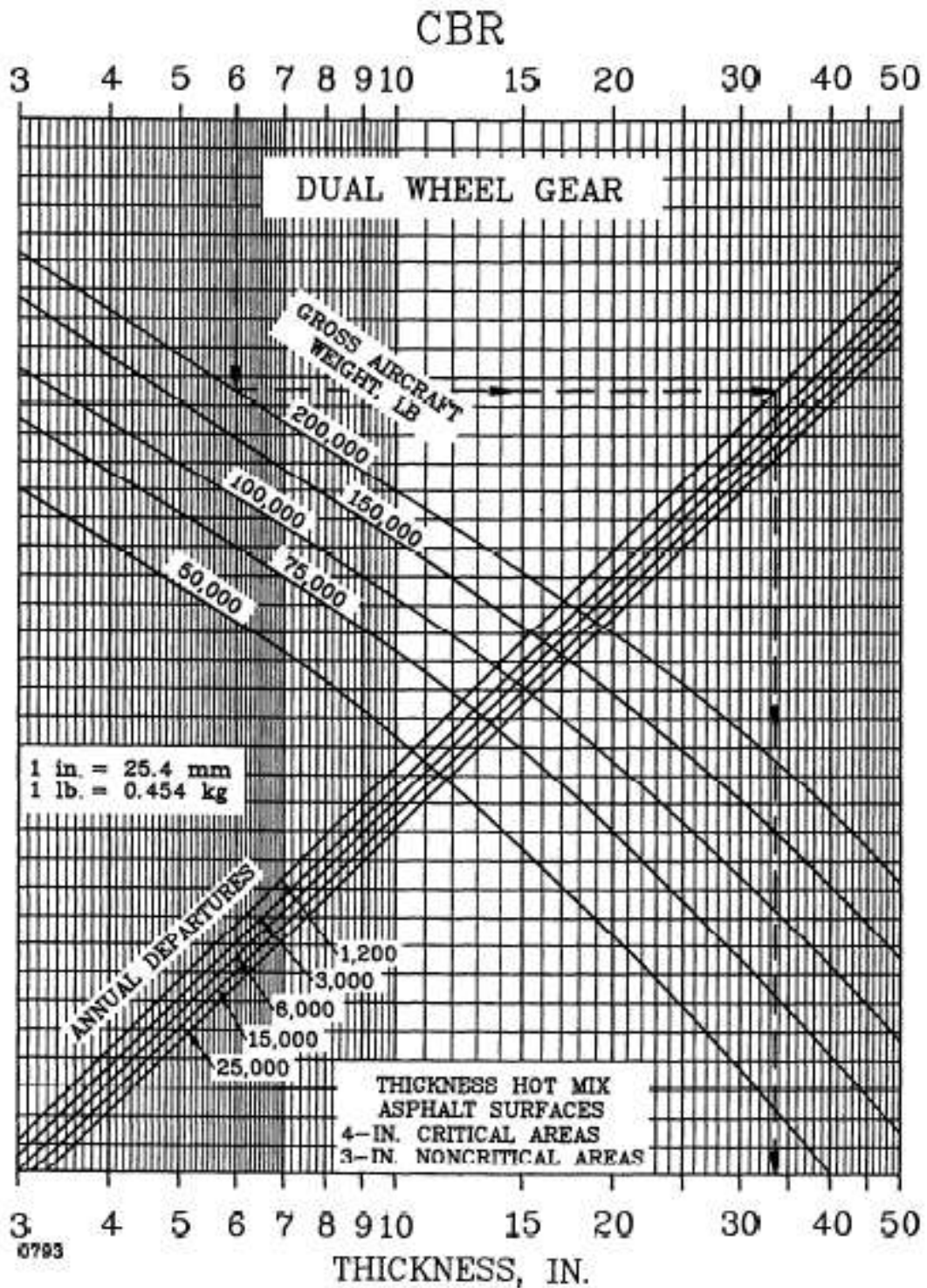
**Σχήμα 2.2: Νομογράφημα μεθόδου CBR**

Διαφορετικά διαγράμματα διαστασιολόγησης έχουν αναπτυχθεί ανάλογα με το σύστημα τροχών, για τα τυπικά φορεία αεροσκαφών (μονού τροχού, διπλού τροχού και διπλού δίδυμου τροχού) τα οποία φαίνονται στα σχήματα 2.3, 2.4, 2.5. Επιπλέον διαγράμματα έχουν αναπτυχθεί για τα αεροσκάφη ευρείας ατράκτου καθώς και για συγκεκριμένους τύπους αεροσκαφών τα οποία παρατίθενται στο παράρτημα Α. Με βάση τα υπόψη διαγράμματα υπολογίζεται το συνολικό πάχος οδοστρώματος που

απαιτείται για να φέρει την προβλεπόμενη φόρτιση για συγκεκριμένα στοιχεία της στρώσης έδρασης. Στα ίδια διαγράμματα φαίνεται και το ελάχιστο πάχος των ασφαλτικών στρώσεων του οδοστρώματος.

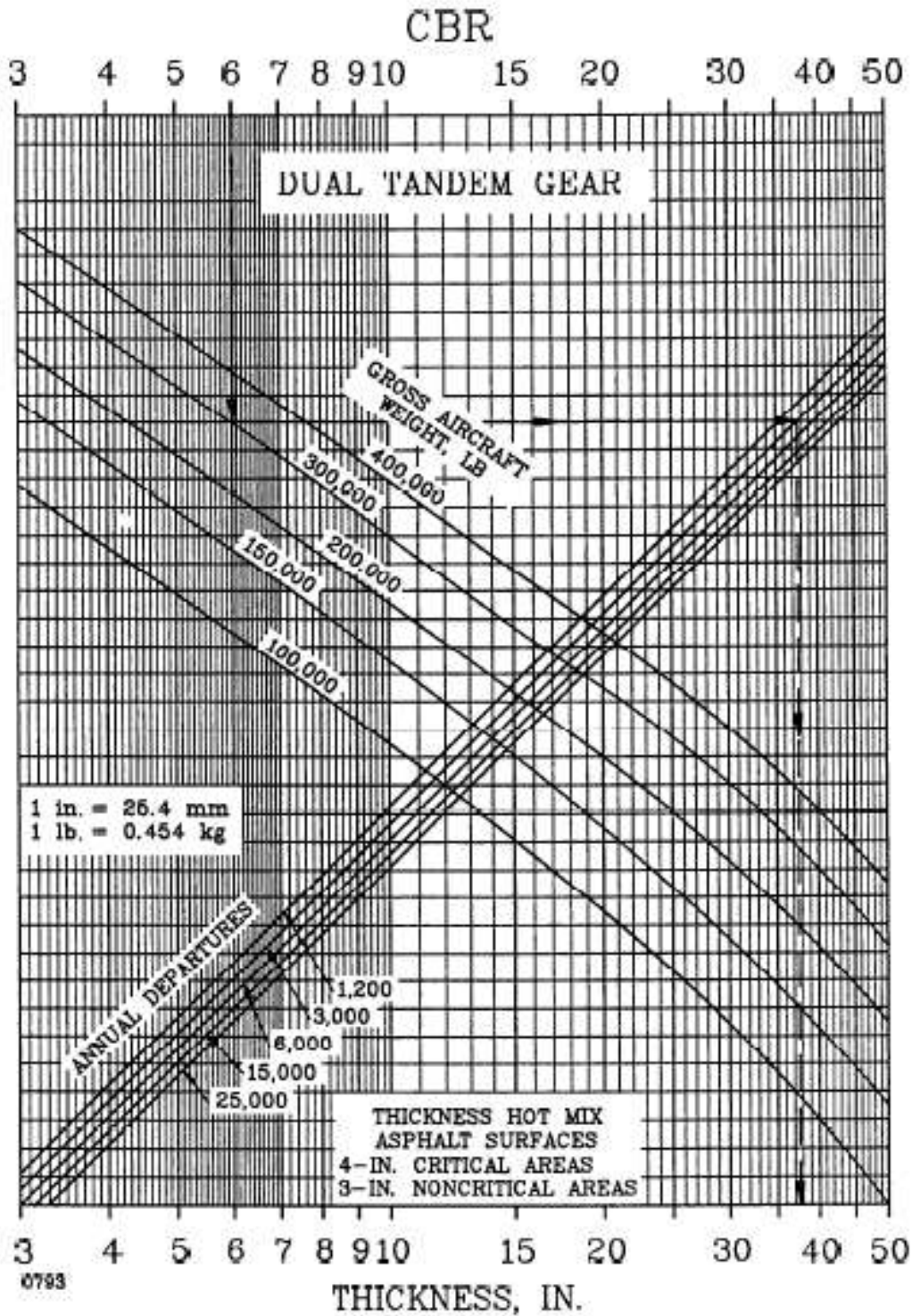


Σχήμα 2.3: Διάγραμμα υπολογισμού για τυπικό φορείο μονού τροχού



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα υπολογισμού για τυπικό φορείο διπλού τροχού





Σχήμα 2.5: Διάγραμμα υπολογισμού για τυπικό φορείο διπλού δίδυμου τροχού

Για την ανάπτυξη των παραπάνω διαγραμμάτων πραγματοποιήθηκε μία ομαδοποίηση των αεροσκαφών με βάση τις τυπικές διατάξεις τροχών, δεδομένου ότι η κατανομή του φορτίου ενός αεροσκάφους στο οδόστρωμα καθορίζεται από τον τύπο και τη διάταξη των τροχών του. Ως εκ τούτου, η διαδικασία σχεδιασμού θα έπρεπε να διαφέρει για τους διάφορους τύπους αεροσκαφών, κάτι το οποίο δεν θα ήταν πρακτικό. Γι'αυτό το λόγο έγιναν κάποιες θεωρήσεις ώστε να μειωθεί ο αριθμός των μεταβλητών και να ομαδοποιηθούν οι τύποι των αεροσκαφών. Μέσω σχετικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε και αφορούσε στις διατάξεις των τροχών, στην επιφάνεια επαφής των τροχών με το οδόστρωμα και στην πίεση του ελαστικού του αεροσκάφους, προέκυψε μια κατηγοριοποίηση των αεροσκαφών. Τα αποτελέσματα της έρευνας οδήγησαν στις εξής κατηγορίες:

- 1) Αεροσκάφος μονού τροχού (S).
- 2) Αεροσκάφος διπλού τροχού (D): Η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι 20 inches (51 cm) για ελαφρά αεροσκάφη και 34 inches (86 cm) για βαριά αεροσκάφη.
- 3) Αεροσκάφος διπλού δίδυμου τροχού (2D): Η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι 20 inches (51 cm) και μεταξύ των αξόνων των τροχών είναι 45 inches (114 cm) για ελαφρά αεροσκάφη. Για βαριά αεροσκάφη, οι αποστάσεις αυτές είναι 30 inches (76 cm) και 55 inches (140 cm) αντίστοιχα.
- 4) Αεροσκάφη ευρείας ατράκτου: Παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις από την διάταξη του διπλού τροχού, όπως είναι το B-747 και το DC-10.

Σε κάθε περίπτωση τα φόρτια των αεροσκαφών θεωρούνται στατικά και ότι κατά την προσγείωση είναι μικρότερα από ότι κατά την απογείωση.

### *2.2.2 Υλικά μεθόδου FAA*

Ο σχεδιασμός ενός οδοστρώματος με την υπόψη μέθοδο πραγματοποιείται με βάση τα τυπικά υλικά της FAA. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων με τη μέθοδο παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.

**Πίνακας 2.1: Υλικά εμπειρικής μεθόδου FAA**

Υλικό			Στρώση οδοστρώματος
P-401	Plant mix bituminous pavements	Θερμό ασφαλτόμιγμα	Ασφαλτική στρώση
P-208	Aggregate Base Course	Στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο	Στρώση βάσης
P-209	Crushed Aggregate Base Course	Στρώση βάσης από θραυστό αμμοχάλικο	Στρώση βάσης
P-211	Lime Rock Base Course	Στρώση βάσης από ασβεστόλιθο	Στρώση βάσης
P-304	Cement Treated Base Course	Βάση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό	Στρώση βάσης
P-306	Econocrete subbase course	Βάση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό	Στρώση βάσης
P-401	Plant mix bituminous pavements	Θερμό ασφαλτόμιγμα	Στρώση βάσης
P-154	Subbase course	Στρώση υπόβασης	Στρώση υπόβασης
P-210	Caliche Base Course	Αμμοχάλικο	Στρώση υπόβασης
P-212	Shell Base Course	Μίγμα αδρανών και οστράκων	Στρώση υπόβασης
P-213	Sand Clay Base Course	Στρώση βάσης από αργιλικά υλικά	Στρώση υπόβασης
P-301	Soil Cement Base Course	Εδαφικό υλικό κατεργασμένο με τσιμέντο	Στρώση υπόβασης

Τα διαγράμματα διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων αφορούν οδοστρώματα που οι στρώσεις βάσης και υπόβασης αποτελούνται από ασύνδετο αμμοχάλικο και δεν περιλαμβάνουν τις περιπτώσεις των σταθεροποιημένων υλικών. Στην περίπτωση όπου η κυκλοφορία του αεροδρομίου αποτελείται από αεροσκάφη με φορτίο από 100.000 lbs (45.350 Kg) και άνω, τότε απαιτείται η χρήση σταθεροποιημένων υλικών στις στρώσεις βάσης και υπόβασης.

Τα τυπικά υλικά σύμφωνα με την μέθοδο είναι το P-209 για τη στρώση βάσης και το P-154 για τη στρώση υπόβασης. Ο σχεδιασμός γίνεται με τα τυπικά υλικά της FAA για στρώσεις από ασύνδετα υλικά και στη συνέχεια τα πάχη των στρώσεων που υπολογίζονται μετατρέπονται σε πάχη στρώσεων από σταθεροποιημένα υλικά με τη χρήση των κατάλληλων συντελεστών ισοδυναμίας. Οι συντελεστές αυτοί, βασίζονται σε διερευνήσεις που έχουν γίνει στα οδοστρώματα και είναι ευαίσθητοι σε παραμέτρους όπως η θέση της στρώσης με σταθεροποιημένο υλικό. Η χρήση συντελεστών δεν περιορίζεται μόνο στην αντικατάσταση των στρώσεων με ασύνδετα υλικά από στρώσεις με σταθεροποιημένα, αλλά και στην αντικατάστασή τους με ασύνδετα υλικά υψηλότερης ποιότητας που προσφέρουν μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα. Πιο συγκεκριμένα:

- Για τη μετατροπή στρώσης υπόβασης από ασύνδετα υλικά σε στρώση υπόβασης από ασύνδετα υλικά υψηλότερης ποιότητας ή από σταθεροποιημένα υλικά χρησιμοποιούνται οι συντελεστές του πίνακα 2.2. Σημειώνεται ότι το υλικό της στρώσης υπόβασης το οποίο αντικαθίσταται είναι το P-154.

**Πίνακας 2.2: Προτεινόμενο εύρος συντελεστών ισοδυναμίας για στρώση υπόβασης με ασύνδετα υλικά υψηλής ποιότητας-σταθεροποιημένα υλικά**

<b>Ασύνδετα υλικά υψηλής ποιότητας</b>	<b>Εύρος συντελεστή ισοδυναμίας</b>
P-208	1,0-1,5
P-209	1,2-1,8
P-211	1,0-1,5
<b>Σταθεροποιημένα υλικά</b>	<b>Εύρος συντελεστή ισοδυναμίας</b>
P-301	1,0-1,5
P-304	1,6-2,3
P-306	1,6-2,3
P-401	1,7-2,3

- Για τη μετατροπή στρώσης βάσης από ασύνδετα υλικά σε στρώση βάσης από ασύνδετα υλικά υψηλότερης ποιότητας ή από σταθεροποιημένα υλικά χρησιμοποιούνται οι συντελεστές του πίνακα 2.3. Σημειώνεται ότι το υλικό της στρώσης βάσης το οποίο αντικαθίσταται είναι το P-209.

**Πίνακας 2.3: Προτεινόμενο εύρος συντελεστών ισοδυναμίας για στρώση βάσης με ασύνδετα υλικά υψηλής ποιότητας-σταθεροποιημένα υλικά**

<b>Ασύνδετα υλικά υψηλής ποιότητας</b>	<b>Συντελεστής ισοδυναμίας</b>
P-208	1,0
P-211	1,0
<b>Σταθεροποιημένα υλικά</b>	<b>Εύρος συντελεστή ισοδυναμίας</b>
P-304	1,2-1,6
P-306	1,2-1,6
P-401	1,2-1,6

### 2.2.3 Κυκλοφορία

Δεδομένου ότι η κυκλοφορία που πρόκειται να δεχθεί ένα οδόστρωμα αποτελείται από πολλούς διαφορετικούς τύπους αεροσκαφών, όλοι οι υπολογισμοί γίνονται με βάση το αεροσκάφος σχεδιασμού. Για κάθε αεροσκάφος εκτιμάται το πάχος που απαιτεί από το κατάλληλο διάγραμμα χρησιμοποιώντας τα στοιχεία της στρώσης έδρασης και τις ετήσιες διελεύσεις του αεροσκάφους. Ως αεροσκάφος σχεδιασμού επιλέγεται αυτό που απαιτεί μέγιστο πάχος οδοστρώματος (εύκαμπτο οδόστρωμα) ή πλάκας σκυροδέματος (δύσκαμπτο οδόστρωμα). Γι'αυτό το λόγο έχουν καθιερωθεί συντελεστές αναγωγής της μεικτής κυκλοφορίας σε διελεύσεις ενός μόνο αεροσκάφους σχεδιασμού οι οποίοι φαίνονται στον πίνακα 2.4.

**Πίνακας 2.4: Συντελεστές ισοδυναμίας συστημάτων τροχών**

Για μετατροπή από	Σε	Συντελεστής Ισοδυναμίας
Μονού τροχού	Διπλού τροχού	0,8
Μονού τροχού	Διπλού δίδυμου τροχού	0,5
Διπλού τροχού	Διπλού δίδυμου τροχού	0,6
Τετραπλού δίδυμου τροχού	Διπλού δίδυμου τροχού	1,0
Διπλού δίδυμου τροχού	Μονού τροχού	2,0
Διπλού δίδυμου τροχού	Διπλού τροχού	1,7
Διπλού τροχού	Μονού τροχού	1,3
Τετραπλού δίδυμου τροχού	Διπλού τροχού	1,7

Με τους συντελεστές αυτούς πολλαπλασιάζονται οι ετήσιες διελεύσεις των υπολοίπων αεροσκαφών έτσι ώστε να μετατραπούν σε διελεύσεις του ίδιου τύπου συστήματος τροχών με το αεροσκάφος σχεδιασμού. Για τη μετατροπή τους σε διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού προσδιορίζεται το φορτίο του τροχού κάθε αεροσκάφους πολλαπλασιάζοντας το συνολικό βάρος του αεροσκάφους με 0.95 και διαιρώντας το με τον αριθμό των τροχών του κυρίου συστήματος. Το φορτίο ενός αεροσκάφους κατανέμεται με αναλογία 95%-5%, σύμφωνα με την παραδοχή της FAA. Το 95% μεταφέρεται στα πίσω φορεία ενώ το 5% αναλαμβάνεται από το ρηνιαίο φορείο τροχών. Για αεροσκάφη ευρείας ατράκτου, θεωρείται ότι έχουν συνολικό φορτίο ίσο με 300.000 lbs (136.100 Kg) και γίνεται η ίδια κατανομή φορτίου στους τροχούς.



**Σχήμα 2.6: Κατανομή βάρους αεροσκάφους μεταξύ ρινιαίου και κυρίων φορειών**

Αφού έχουν καθοριστεί τα φορτία των τροχών, στη συνέχεια μετατρέπονται οι διελεύσεις του κάθε τύπου αεροσκάφους ( $R2$ ) σε διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού ( $R1$ ) μέσω της σχέσης (1). Αθροίζοντας τις διελεύσεις που υπολογίζονται από την προηγούμενη διαδικασία, προκύπτει ο συνολικός αριθμός ισοδύναμων διελεύσεων του αεροσκάφους σχεδιασμού, ο οποίος χρησιμοποιείται στα διαγράμματα σχεδιασμού.

$$\log R1 = \log R2 * \left(\frac{W2}{W1}\right)^{1/2} \quad (1)$$

Όπου:

- $W1$  : φορτίο τροχού του αεροσκάφους σχεδιασμού
- $W2$  : φορτίο τροχού του αεροσκάφους του οποίου μετατρέπουμε τις διελεύσεις
- $R1$  : ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις αεροσκάφους σχεδιασμού
- $R2$  : διελεύσεις του αεροσκάφους μετά τη μετατροπή τους σε ισοδύναμες του ίδιου συστήματος τροχών με το αεροσκάφος σχεδιασμού

Μια ακόμη θεώρηση της μεθόδου είναι ότι στην εγκάρσια διεύθυνση μίας διατομής ενός οδοστρώματος οι διελεύσεις των αεροσκαφών ακολουθούν κανονική κατανομή. Οι διελεύσεις αυτές, λαμβάνονται υπόψη στα διαγράμματα με τον αριθμό των καλύψεων-διελεύσεων  $C$  (coverages). Οι καλύψεις-διελεύσεις έχουν την έννοια των «διελεύσεων μέγιστης επιπόνησης». Αυτό συμβαίνει διότι το φορείο ενός αεροσκάφους συνήθως δεν κινείται κατά μήκος του ίδιου ίχνους, άρα απαιτούνται

παραπάνω από ένα πέρασμα του φορείου ώστε ένα συγκεκριμένο σημείο του οδοστρώματος να δεχτεί τη μέγιστη επιβαλλόμενη φόρτιση. Μια κάλυψη-διέλευση προκύπτει από έναν ορισμένο αριθμό διελεύσεων αεροσκαφών (passes) και αντιστοιχεί στην μέγιστη φόρτιση του οδοστρώματος.

Για τον προσδιορισμό του αριθμού των διελεύσεων που απαιτούνται για μία κάλυψη-διέλευση, εισάγεται η έννοια του λόγου των διελεύσεων αεροσκαφών προς τις καλύψεις-διελεύσεις αεροσκαφών (pass-to-coverage ratio). Ο λόγος αυτός, έχει προσδιοριστεί μαθηματικά για κάθε αεροσκάφος ξεχωριστά και εξαρτάται από το φορείο του καθενός, την κατανομή του βάρους του, τον τύπο του φορείου του αλλά και τις αποστάσεις μεταξύ των φορείων. Ο προσδιορισμός του έγινε με την θεώρηση κανονικής κατανομής και την εφαρμογή γνωστών στατιστικών μεθόδων.

Η χρήση του λόγου P/C είναι απαραίτητη για την μετατροπή των διελεύσεων ενός αεροσκάφους σε καλύψεις-διελεύσεις. Στα διαγράμματα σχεδιασμού έχει συμπεριληφθεί ο αριθμός των καλύψεων-διελεύσεων για 20ετή διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Ο πίνακας 2.5 παρουσιάζει τις τιμές του λόγου P/C. Οι τιμές του λόγου διαφέρουν για τα εύκαμπτα και τα δύσκαμπτα οδοστρώματα.

**Πίνακας 2.5: Τιμές λόγων διελεύσεων προς καλύψεις-διελεύσεις C**

Διάγραμμα σχεδιασμού	Λόγος διελεύσεων προς καλύψεις-διελεύσεις C (pass-to-coverage ratio)	
	Εύκαμπτα οδοστρώματα	Δύσκαμπτα οδοστρώματα
Μονού τροχού	5,18	5,18
Διπλού τροχού	3,48	3,48
Διπλού τροχού-διπλού άξονα	1,84	3,68
A-300 model B2	1,76	3,50
A-300 model B4	1,73	3,45
B-747	1,85	3,70
B-757	1,94	3,88
B-767	1,95	3,90
C-130	2,07	4,15
DC10-10	1,82	3,64
DC10-30	1,69	3,38
L-1011	1,81	3,62



## 2.3 Διαδικασία διαστασιολόγησης

Για το σχεδιασμό λαμβάνονται υπόψιν οι ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού και επιλέγεται το κατάλληλο διάγραμμα για το αεροσκάφος σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός απαιτεί την φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης που εκφράζεται μέσω του δείκτη CBR, τη φέρουσα ικανότητα της υπόβασης, το μεικτό βάρος και τον αριθμό των ετήσιων διελεύσεων του αεροσκάφους σχεδιασμού. Με δεδομένο το δείκτη CBR της στρώσης έδρασης και με την χρήση του κατάλληλου διαγράμματος, ανάλογα με τον τύπο του αεροσκάφους σχεδιασμού, υπολογίζεται το συνολικό πάχος του οδοστρώματος. Στην περίπτωση που ο αριθμός των ετήσιων διελεύσεων υπερβαίνει τις 25.000, χρησιμοποιείται η ευθεία των 25.000 και το εξαγόμενο τελικό αποτέλεσμα διορθώνεται σύμφωνα με τον πίνακα 2.6.

**Πίνακας 2.6: Προσαύξηση του συνολικού πάχους του οδοστρώματος για μεγάλο αριθμό διελεύσεων**

Ετήσιες απογειώσεις	Αναλογία % με το πάχος που απαιτείται για 25.000 ετήσιες διελεύσεις
50.000	104
100.000	108
150.000	110
200.000	112

Για την προσαύξηση που προκύπτει από τον πίνακα 2.6 προστίθεται 1 inch (2,5 cm) στην ασφαλτική στρώση και το υπόλοιπο πάχος κατανέμεται αναλογικά με τα πάχη στην στρώση της βάσης και της υπόβασης.

Για τον υπολογισμό του πάχους των υπόλοιπων στρώσεων ακολουθείται παρόμοια διαδικασία. Με βάση το δείκτη CBR της υπόβασης υπολογίζεται το συνολικό πάχος της ασφαλτικής στρώσης και της στρώσης βάσης. Από το συνολικό πάχος του οδοστρώματος αφαιρείται το προαναφερθέν πάχος και προκύπτει το απαιτούμενο πάχος της υπόβασης. Για τη κατανομή του πάχους στην ασφαλτική στρώση και στη βάση, χρησιμοποιείται ο πίνακας 2.7 ή οι ελάχιστες τιμές που δίνει η μέθοδος στα διαγράμματα.

**Πίνακας 2.7: Ελάχιστο πάχος βάσης**

α/φ ή τυπικό φορείο σχεδιασμού	Φορτίο α/φ σχεδιασμού		Ελάχιστο πάχος βάσης	
	Lbs	Kgr	inch	mm
Μονός τροχός	30.000-50.000	13.600-22.700	4	100
	50.000-75.000	22.700-34.000	6	150
Διπλός τροχός	50.000-100.000	22.700-45.000	6	150
	100.000-200.000	45.000-90.700	8	200
Διπλός δίδυμος	100.000-250.000	45.000-113.400	6	150
	250.000-400.000	113.400-181.000	8	200
757 767	200.000-400.000	90.700-181.000	6	150
DC-10 L1011	400.000-600.000	181.000-272.000	8	200
B-747	400.000-600.000	181.000-272.000	6	150
	600.000-850.000	272.000-385.700	8	200
C130	75.000-125.000	34.000-56.700	4	100
	125.000-175.000	56.700-79.400	6	150

Οι τιμές που δίνονται στον πίνακα 2.7 βασίζονται σε ερευνητικά δεδομένα και παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε οδοστρώματα, υπό συνθήκες πραγματικής φόρτισής τους.

# 3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA

---

## 3.1 Εισαγωγή

Καθώς υπήρξαν διαρκείς εξελίξεις στον τομέα τόσο της ανάλυσης και του σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων όσο και της κατασκευής νέων τύπων αεροσκαφών, αναπτύχθηκε μία νέα αναλυτική μέθοδος σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η υπόψη μέθοδος εισήχθη το 2009 και σήμερα βρίσκεται σε εξέλιξη.

Σκοπός της αναλυτικής μεθόδου ήταν να αντικαταστήσει την εμπειρική μέθοδο καθώς τα διαγράμματα είναι επαρκή για κυκλοφορίες που περιλαμβάνουν μέχρι το αεροσκάφος διπλού τροχού και συγκεκριμένους τύπους αεροσκαφών ευρείας ατράκτου, ενώ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αεροσκάφη νέας γενιάς με πολύπλοκα συστήματα προσγείωσης.

## 3.2 Βασικές αρχές μεθόδου

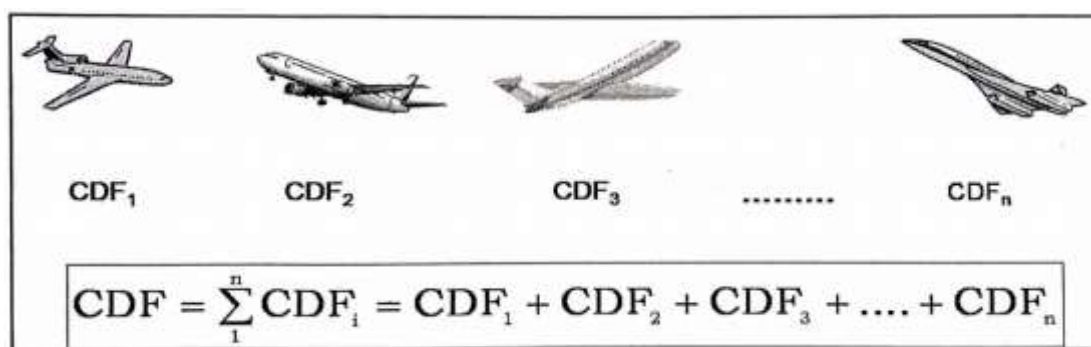
### 3.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η μέθοδος βασίζεται στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων για τον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων και στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τον σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Η θεωρία των ελαστικών στρώσεων μπορεί να αντιμετωπίσει πολύπλοκα μελλοντικά συστήματα προσγείωσης. Να σημειωθεί ότι, παρόλο που είναι πιο μηχανιστική και ορθολογική διαδικασία, σε σχέση με τις προηγούμενες, ακόμα απαιτεί την κρίση του μηχανικού [8]. Μέσω της θεωρίας αυτής, υπολογίζονται οι παραμορφώσεις και οι τάσεις που αναπτύσσονται από την επιβολή φορτίων στις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος και βασίζεται στις εξής παραδοχές [9]:

- Τα υλικά των στρώσεων θεωρούνται ομοιογενή, ισότροπα και ελαστικά.
- Η επιφανειακή στρώση θεωρείται ότι εκτείνεται πλευρικά μέχρι το άπειρο ενώ το βάθος είναι πεπερασμένο.
- Η υποκείμενη στρώση εκτείνεται μέχρι το άπειρο.

Οι οριακές συνθήκες καθώς και οι συνθήκες συνέχειας επιβάλλουν οι στρώσεις να είναι σε συνεχή επαφή και η επιφανειακή στρώση να μην υπόκειται σε διατμητικές και ορθές τάσεις εκτός της φόρτισης.

Για το σχεδιασμό ενός οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο λαμβάνεται υπόψιν 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 αθροιστικής φθοράς CDF (Cumulative Damage Factor), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.



**Σχήμα 3.1: Αρχή δείκτη φθοράς CDF**

Ο δείκτης CDF κάθε αεροσκάφους ορίζεται ως ο λόγος των προβλεπόμενων διελεύσεων προς τις επιτρεπόμενες διελεύσεις έως την αστοχία. Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των CDF<sub>i</sub> για κάθε αεροσκάφος είναι η σχέση (2):

$$CDF = \frac{\text{προβλεπόμενες διελεύσεις}}{\text{επιτρεπόμενες διελεύσεις}} \Rightarrow$$

$$CDF = \frac{(\text{ετήσιες απογειώσεις } \alpha/\varphi) * (\text{περίοδος σχεδιασμού σε έτη})}{\text{λόγος } \left(\frac{P}{C}\right) * (\text{καλύψεις} - \text{διελεύσεις έως την αστοχία})} \quad (2)$$

Όπου:

- **ετήσιες απογειώσεις  $\alpha/\varphi$**  : οι προβλεπόμενες διελεύσεις κάθε αεροσκάφους ανά έτος
- **περίοδος σχεδιασμού σε έτη** : η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος (συνήθως 20 έτη)

- **καλύψεις – διελεύσεις έως την αστοχία:** Είναι οι επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία. Οι καλύψεις-διελεύσεις έχουν την έννοια των «διελεύσεων μέγιστης επιπόνησης». Υπολογίζονται μέσω ενός νόμου κόπωσης της ασφαλικής στρώσης ή νόμου αστοχίας της στρώσης έδρασης. Συγκεκριμένα, στον υπολογισμό του δείκτη φθοράς της στρώσης έδρασης, η αναλυτική μέθοδος, χρησιμοποιεί το νόμο αστοχίας με την ακόλουθη έκφραση:

$$C = \left(\frac{0,004}{\varepsilon\nu}\right)^{8,1} \quad C \leq 12.100 \quad (3)$$

$$C = \left(\frac{0,002428}{\varepsilon\nu}\right)^{14,21} \quad C > 12.100 \quad (4)$$

Όπου:

**C** = οι επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία

**$\varepsilon\nu$**  = κατακόρυφη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης

Στον υπολογισμό του δείκτη φθοράς της ασφαλικής στρώσης, η αναλυτική μέθοδος, χρησιμοποιεί το νόμο κόπωσης (Νόμος κόπωσης Heukelom και Klopp) [10] με την ακόλουθη έκφραση:

$$\log_{10}(C) = 2,68 - 5 * \log_{10}(\varepsilon h) - 2,665 * \log_{10}(E\alpha) \quad (5)$$

Όπου:

**C** = οι επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία

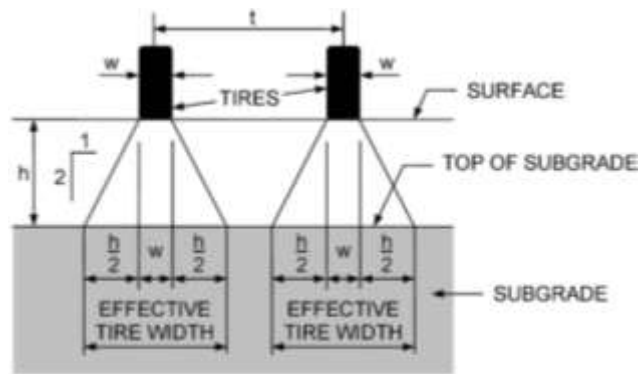
**$\varepsilon h$**  = οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης

**$E\alpha$**  = μέτρο ελαστικότητας ασφαλτομίγματος

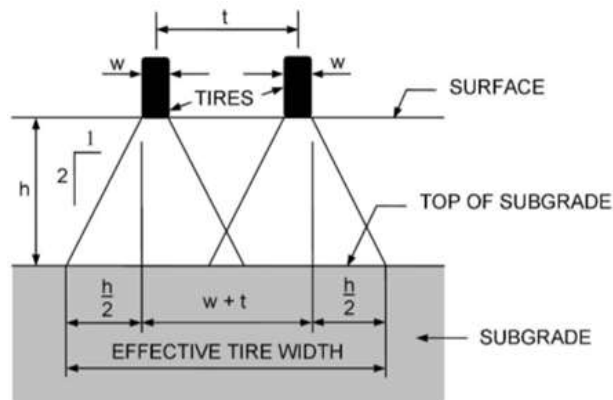
- **λόγος  $\left(\frac{P}{C}\right)$ :** Είναι ο λόγος των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις C.

Παρόλο που είναι εύκολο να μετρηθεί ο αριθμός των διελεύσεων ενός αεροσκάφους, ο αριθμός των καλύψεων-διελεύσεων βασίζεται στο καθορισμένο λόγο P/C για κάθε αεροσκάφος. Για τον υπολογισμό του λόγου P/C, η αναλυτική μέθοδος χρησιμοποιεί την έννοια του ενεργού πλάτους του ελαστικού (effective tire width). Στα εύκαμπτα οδοστρώματα, για τον υπολογισμό της αστοχίας 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 τα άκρα των επαφών μέχρι την επιφάνεια της στρώσης έδρασης όπως απεικονίζονται στα σχήματα 3.2, 3.3. Τα ελαστικά θεωρούνται είτε ξεχωριστά είτε σε συνδυασμό, ανάλογα με το αν οι γραμμές απόκρισης επικαλύπτονται ή όχι. Όλα τα ενεργά πλάτη των ελαστικών και οι υπολογισμοί για το λόγο P/C πραγματοποιούνται μέσα στο λογισμικό που διαθέτει η FAA (FAARFIELD).



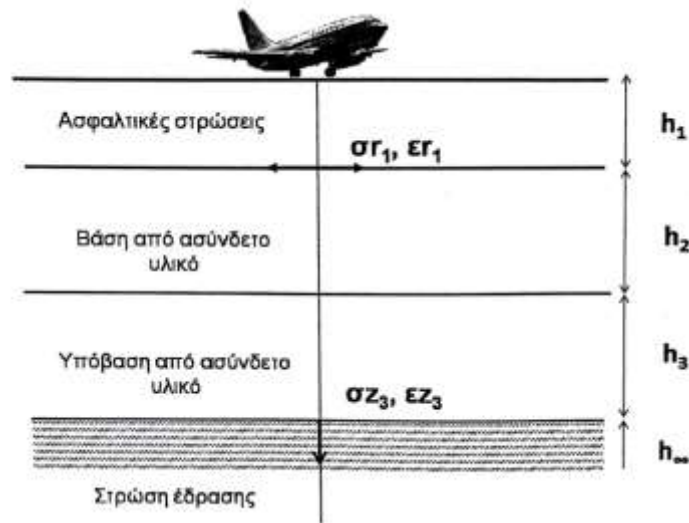
**Σχήμα 3.2: Ενεργά πλάτη δύο τροχών-χωρίς επικάλυψη**



**Σχήμα 3.3: Ενεργό πλάτος ενός τροχού-με επικάλυψη**

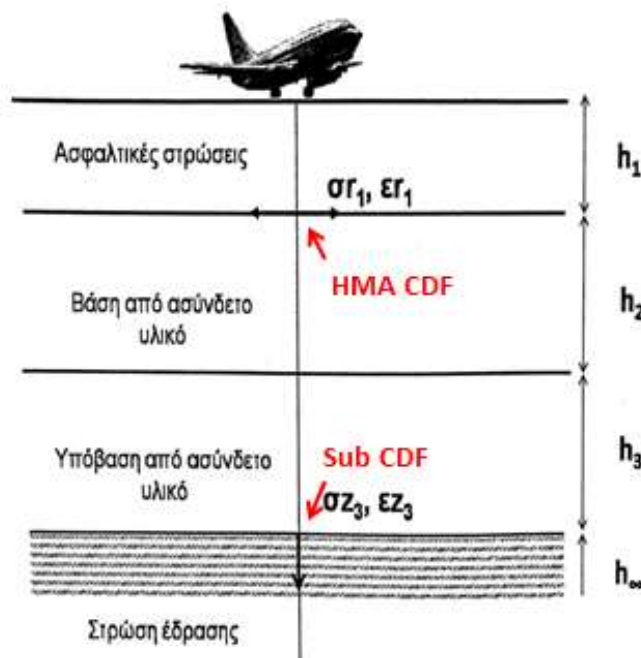
Ο δείκτης αθροιστικής φθοράς υπολογίζεται στις κρίσιμες θέσεις του εύκαμπτου οδοστρώματος χρησιμοποιώντας τις μέγιστες παραμορφώσεις. Οι κρίσιμες θέσεις του εύκαμπτου οδοστρώματος είναι ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης (σχήμα 3.4). Τα αντίστοιχα κρίσιμα εντατικά μεγέθη είναι η οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση για αστοχία λόγω

κόπωσης του ασφαλτομίγματος και η κατακόρυφη παραμόρφωση για αστοχία λόγω παραμενουσών παραμορφώσεων.



**Σχήμα 3.4: Στατικό πρότυπο εύκαμπτου οδοστρώματος**

Επομένως, υπολογίζεται ο δείκτης αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης (Sub CDF) στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης και ο δείκτης αθροιστικής φθοράς της ασφαλτικής στρώσης (HMA CDF) στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης (σχήμα 3.5).



**Σχήμα 3.5: Υπολογισμός δείκτη φθοράς στις κρίσιμες θέσεις**

Ο δείκτης αυτός έχει αναπτυχθεί σε αντιστοιχία με την αρχή Miner που ισχύει για τα οδοστρώματα των οδών. Για να μην αστοχήσει κάποια από τις κρίσιμες θέσεις

του οδοστρώματος θα πρέπει η αθροιστική φθορά της υπόψη θέσης να είναι μικρότερη από τη μονάδα ( $CDF < 1$ ). Αντιθέτως, στην περίπτωση που η αθροιστική φθορά είναι μεγαλύτερη ή ίση της μονάδας ( $CDF \geq 1$ ) το οδόστρωμα που έχει προκύψει από τον σχεδιασμό δεν επαρκεί να φέρει την προβλεπόμενη φόρτιση. Για τον βέλτιστο σχεδιασμό, ο δείκτης φθοράς της στρώσης έδρασης (Sub CDF) πρέπει να είναι ίσος με τη μονάδα. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να ελέγχεται και ο δείκτης αθροιστικής φθοράς της ασφαλτικής στρώσης να είναι μικρότερος ή ίσος της μονάδας.

Επιπλέον, για την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο, υπολογίζεται ο δείκτης φθοράς και στις δύο κρίσιμες θέσεις. Στον πίνακα 3.1 φαίνονται οι διάφορες τιμές του δείκτη CDF:

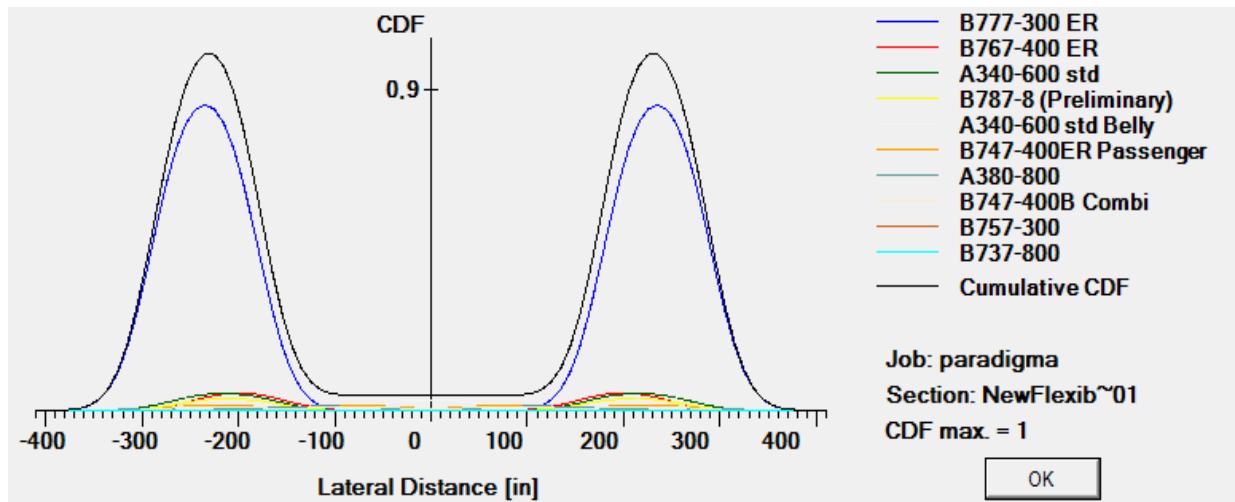
**Πίνακας 3.1: Τιμές του δείκτη φθοράς**

<b>CDF</b>	<b>Εναπομένουσα διάρκεια ζωής του οδοστρώματος</b>
1	Το οδόστρωμα έχει ολοκληρώσει την διάρκεια ζωής του.
<1	Το οδόστρωμα έχει εναπομένουσα διάρκεια ζωής.
>1	Το οδόστρωμα έχει υπερβεί την διάρκεια ζωής του.

Ο δείκτης CDF υπολογίζεται κατά μήκος του οδοστρώματος σε λωρίδες πλάτους 10 inches (254 mm) σε συνολικό πλάτος οδοστρώματος 820 inches (20828 mm). Ο δείκτης που καθορίζει τελικά το σχεδιασμό είναι ο μέγιστος εκείνων που έχουν υπολογιστεί και για τις 82 λωρίδες του οδοστρώματος. Ακόμα και με ίδια γεωμετρία τροχών, αεροσκάφη που έχουν διαφορετικά ίχνη τροχών θα έχουν διαφορετικούς δείκτες P/C και συνεπώς διαφορετική συνεισφορά στον τελικό δείκτη CDF. Ο λόγος P/C υπολογίζεται για κάθε λωρίδα με βάση την θεώρηση ότι οι διελεύσεις του αεροσκάφους ακολουθούν κανονική κατανομή.

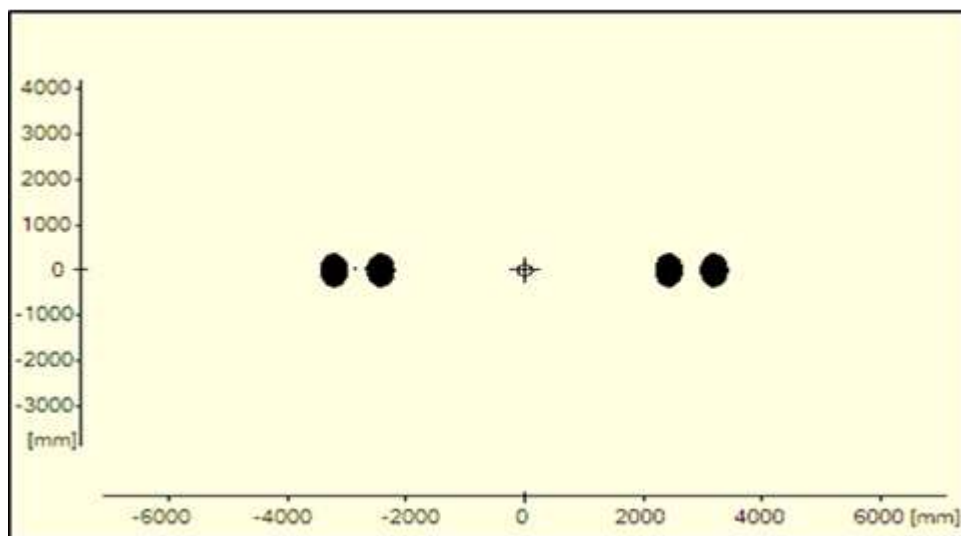
Μέσω του δείκτη αναλύεται η φθορά του οδοστρώματος από κάθε αεροσκάφος λαμβάνοντας υπόψιν την θέση των τροχών σε σχέση με τον κεντρικό άξονα του διαδρόμου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.





**Σχήμα 3.6: Υπολογισμός αθροιστικής φθοράς στρώσης έδρασης οδοστρώματος**

Άλλη μια βασική αρχή της αναλυτικής μεθόδου είναι, η δυνατότητα ανάλυσης του οδοστρώματος σύμφωνα με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους. Καταργείται πλέον η έννοια του αεροσκάφους σχεδιασμού, όπως προϋπήρχε στην εμπειρική μέθοδο, και λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση κάθε αεροσκάφους της κυκλοφορίας μέσω της φθοράς που προκαλεί στο οδόστρωμα.



**Σχήμα 3.7: Ενδεικτικό σύστημα τροχών αεροσκάφους στο αναλυτικό σύστημα**

### 3.2.2 Υλικά μεθόδου FAA

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων με τη μέθοδο παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2. Η αναλυτική μέθοδος περιλαμβάνει μεγαλύτερο εύρος υλικών σε σχέση με την εμπειρική μέθοδο.

**Πίνακας 3.2: Υλικά αναλυτικής μεθόδου FAA**

Υλικό			Στρώση οδοστρώματος	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
P-401	Plant mix bituminous pavements	Θερμό ασφαλτόμιγμα	Ασφαλτική στρώση	1.380
P-208	Aggregate Base Course	Στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο	Στρώση βάσης	518
P-209	Crushed Aggregate Base Course	Στρώση βάσης από θραυστό αμμοχάλικο	Στρώση βάσης	518
P-211	Lime Rock Base Course	Στρώση βάσης από ασβεστόλιθο	Στρώση βάσης	-
P-219	Recycled Concrete Aggregate Base Course	Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα με αδρανή για την στρώση βάσης	Στρώση βάσης	-
P-304	Cement Treated Base Course	Βάση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό	Στρώση βάσης	3.450
P-306	Econocrete subbase course	Βάση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό	Στρώση βάσης	4.830
P-401	Plant mix bituminous pavements	Θερμό ασφαλτόμιγμα	Στρώση βάσης	2.760
P-403	HMA Base Course	Ασφαλτική βάσης θερμού αφατομίγματος	Στρώση βάσης	2.760

Υλικό			Στρώση οδοστρώματος	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
P-154	Subbase course	Στρώση υπόβασης	Στρώση υπόβασης	276
P-210	Caliche Base Course	Αμμοχάλικο	Στρώση υπόβασης	-
P-212	Shell Base Course	Μίγμα αδρανών και οστράκων	Στρώση υπόβασης	-
P-213	Sand Clay Base Course	Στρώση βάσης από αργιλικά υλικά	Στρώση υπόβασης	-
P-301	Soil Cement Base Course	Εδαφικό υλικό κατεργασμένο με τσιμέντο	Στρώση υπόβασης	1.730

### 3.3 Διαδικασία σχεδιασμού-Το σύστημα FAARFIELD

Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων είναι ένα πολύπλοκο μηχανικό πρόβλημα που περιλαμβάνει πολλές παραμέτρους, όπως είναι η κυκλοφορία, η συγκέντρωση κυκλοφορίας σε συγκεκριμένες περιοχές, η αντοχή της στρώσης έδρασης και η ποιότητα των υλικών. Οι παράμετροι αυτές, είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν και εξαρτώνται από το είδος των φορτίων που επιβάλλονται στα οδοστρώματα. Για την αντιμετώπιση των δυσκολιών αυτών, η FAA ανέπτυξε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα, το FAARFIELD. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί νόμους κόπωσης, που βασίζονται σε δοκιμές πλήρους κλίμακας οι οποίες διεξάγονται από το 1949 μέχρι σήμερα. Οι νόμοι αυτοί παρουσιάζουν την σχέση μεταξύ των αναπτυσσόμενων τάσεων-παραμορφώσεων του οδοστρώματος και των επιτρεπόμενων διελεύσεων έως την αστοχία.

Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων συνήθως γίνεται για την τυπική διάρκεια ζωής της FAA που είναι 20 έτη. Μέσω του προγράμματος, δίνεται η δυνατότητα σχεδιασμού για διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 20 έτη. Ο σχεδιασμός βασίζεται σε τρεις μεταβλητές: α) τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης (CBR), β) τον τύπο του αεροσκάφους (φορείο τροχών και φορτίο αεροσκαφών) και γ) την κυκλοφορία του αεροδρομίου (ετήσιες διελεύσεις). Όσον αφορά στην κυκλοφορία του αεροδρομίου, το πρόγραμμα περιέχει βάση δεδομένων με μεγάλη ποικιλία αεροσκαφών, τα οποία χωρίζονται σε έξι κατηγορίες: Generic, Airbus, Boeing, άλλα Εμπορικά, Γενική Αεροπορία, και Στρατιωτικά (σχήμα 3.8).



The screenshot shows the FAARFIELD software interface. On the left, there is a tree view under 'Airplane Group' with categories like 'Airbus', 'Boeing', 'Other Commercial', 'General Aviation', 'Military', and 'External Library'. Below this is a list of 'Library Airplanes' including various models like 'Sngl Whi-3', 'Dual Whi-10', etc. The main area is a table with the following data:

Airplane Name (IT)	Gross Taxi Weight (lbs)	Annual Departures	% Annual Growth
A320-100	150,796	600	0.00
A340-600 std	805,128	1,000	0.00
A340-600 std Belly	805,128	1,000	0.00
A380-800	1,239,000	300	0.00
B737-800	174,700	2,000	0.00
B747-400B Combs	877,000	400	0.00
B747-400ER Passenger	913,000	300	0.00

Below the table are several control buttons: 'Add', 'Remove', 'Save List', 'Clear List', 'Save to Float', 'Add Float', 'Back', 'Help', 'CDF Graph', and 'View Goal'. There is also a 'Float Airplanes' section on the right.

Σχήμα 3.8: Βάση δεδομένων αεροσκαφών του FAARFIELD






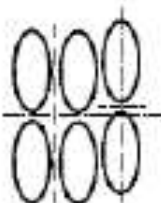
Για κάθε αεροσκάφος, μέσω της βάσης δεδομένων δίνονται τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το Φορτίο. Η μέθοδος σχεδιασμού του οδοστρώματος βασίζεται στο μεικτό βάρος του αεροσκάφους. Το οδόστρωμα θα πρέπει να σχεδιαστεί για το μέγιστο αναμενόμενο βάρος απογείωσης του αεροπλάνου στην προβλεπόμενη εγκατάσταση. Η διαδικασία σχεδιασμού θεωρεί ότι το 95% του μεικτού βάρους μεταφέρεται από τα πίσω φορεία ενώ το 5% παραλαμβάνεται από το ριναίο φορείο τροχών του αεροσκάφους, σύμφωνα με την παραδοχή της FAA. Παρέχει προτεινόμενα κατασκευαστικά-λειτουργικά μεικτά βάρη για διάφορα πολιτικά και στρατιωτικά αεροσκάφη. Η FAA συνιστά τη χρήση του μέγιστου αναμενόμενου βάρους απογείωσης, το οποίο οδηγεί σε συντηρητικό σχεδιασμό του οδοστρώματος. Η συντηρητική αυτή θεώρηση αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι η αναλυτική μέθοδος λαμβάνει υπόψιν μόνο τις αναχωρήσεις και αγνοεί τις αφίξεις των αεροσκαφών στον καθορισμό του αριθμού των διελεύσεων. Αυτό συμβαίνει διότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι αφίξεις έχουν πολύ μικρότερο βάρος σε σχέση με τις αναχωρήσεις λόγω της κατανάλωσης του καυσίμου.

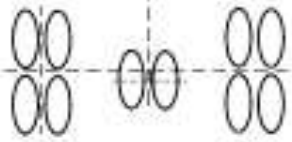

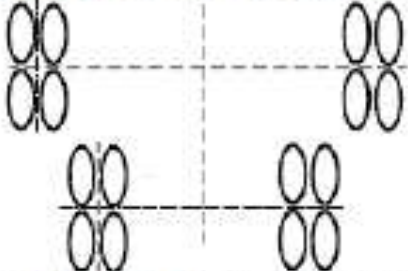
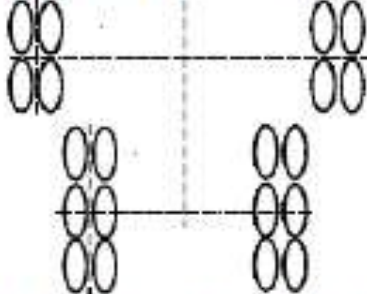
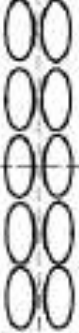
Σημειώνεται ότι η FAA έχει ορίσει έναν κύκλο κίνησης του αεροσκάφους (TC) που αποτελείται από μία απογείωση και μία προσγείωση του ίδιου αεροσκάφους. Ένας κύκλος κίνησης, που αποτελείται από μία διέλευση του αεροσκάφους, ισοδυναμεί με λόγο pass-to-traffic cycle ίσο με τη μονάδα ( $P/TC=1$ ). Για τον προσδιορισμό των ετήσιων διελεύσεων για τον σχεδιασμό του οδοστρώματος, πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των αναχωρούντων αεροσκαφών με το λόγο  $P/TC$ . Για τα περισσότερα οδοστρώματα χρησιμοποιείται η παραδοχή  $P/TC=1$ . Σε περιπτώσεις βέβαια όπου, οι αφίξεις δεν είναι αμελητέες ή όταν το αεροσκάφος πρέπει να κινηθεί στο οδόστρωμα πάνω από μία φορές, τότε θα ήταν φρόνιμο να υπολογιστούν οι ετήσιες διελεύσεις που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό του πάχους του οδοστρώματος λαμβάνοντας υπόψιν τον λόγο  $P/TC$ .

- Τύπος και Γεωμετρία του συστήματος προσγείωσης. Ο τύπος και η διάταξη του τροχού καθορίζουν την κατανομή του βάρους του αεροσκάφους αλλά και το πώς θα ανταποκριθεί το οδόστρωμα σε αυτό. Οι πίνακες 3.3 και 3.4 παρουσιάζουν τυπικές διατάξεις τροχών και τους συμβολισμούς τους σύμφωνα με το πρότυπο της FAA .

Πίνακας 3.3: Τυπικά συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών

Gear Designation	Gear Designation	Airplane Example
S	 Single	Snagl Whl-45
D	 Dual	B737-100
2S	 2 Singles in Tandem	C-130
2D	 2 Duals in Tandem	B767-200
3D	 3 Duals in Tandem	B777-200
2T	 Two Triple Wheels in Tandem	C-17A

Πίνακας 3.4: Τυπικά συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών (συνέχεια)

Gear Designation	Gear Designation	Airplane Example
2D/D1	 <p data-bbox="448 483 959 544">Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Dual Wheel Body Gear</p>	DC10-30/40
2D/2D1	 <p data-bbox="448 714 959 775">2D/2D1 Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Two Dual Wheels in Tandem Body Gear</p>	A340-600 std
2D/2D2	 <p data-bbox="448 1072 959 1128">Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Two Dual Wheels in Tandem Body Gear</p>	B747-400
2D/3D2	 <p data-bbox="448 1449 959 1505">Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Three Dual Wheels in Tandem Body Gear</p>	A380-800
5D	 <p data-bbox="480 1865 927 1886">Five Dual Wheels in Tandem Main Gear</p>	An-124

- Η Πίεση των Ελαστικών. Η πίεση των ελαστικών ποικίλλει ανάλογα με τη διάταξη των τροχών, το μεικτό βάρος και το μέγεθος των ελαστικών. Έχει σημαντικά μεγαλύτερη επιρροή στις παραμορφώσεις της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης από ότι στην στρώση έδρασης.
- Η Κυκλοφορία. Είναι οι προβλεπόμενες διελεύσεις από το συγκεκριμένο τύπο αεροσκάφους που απαιτούνται για τον σχεδιασμό του οδοστρώματος. Πληροφορίες σχετικά με τις ενέργειες των αεροσκαφών, ώστε να καθοριστούν οι προβλεπόμενες διελεύσεις, είναι διαθέσιμες από τα Master plans των αεροδρομίων, την Terminal Area Forecast (TAF) που είναι η επίσημη πρόβλεψη της αεροπορικής δραστηριότητας της FAA για τα αεροδρόμια των ΗΠΑ, το Εθνικό Σχέδιο Ολοκληρωμένων Συστημάτων Αεροδρομίων (National Plan of Integrated Airport Systems), τα Στατιστικά της Δραστηριότητας των αεροδρομίων (Airport Activity Statistics) και τις αναφορές της δραστηριότητας της Εναέριας Κυκλοφορίας της FAA (FAA Air Traffic Activity Reports).

Όσον αφορά στα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος, η αναλυτική μέθοδος υπολογίζει την ελάχιστη τιμή τους ώστε ο δείκτης φθοράς της στρώσης έδρασης να ισούται με τη μονάδα (Sub CDF=1). Για την επιφανειακή ασφαλτική στρώση του οδοστρώματος έχει οριστεί το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος να είναι ίσο με 4 inches (102 mm) και το μέτρο ελαστικότητας της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης ίσο με 200.000 psi (1.380 MPa). Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι συντηρητικά επιλεγμένα και αντιστοιχεί σε θερμοκρασία ασφαλτομίγματος περίπου 90°F (32°C).

Το πάχος της στρώσης βάσης υπολογίζεται αυτόματα από το υπόψη λογισμικό. Δεδομένου ότι η στρώση υπόβασης παρέχει ισοδύναμη φέρουσα ικανότητα μίας στρώσης έδρασης με φέρουσα ικανότητα CBR=20%, το πάχος της στρώσης βάσης υπολογίζεται ώστε να εξασφαλίζει αυτή την φέρουσα ικανότητα. Ανάλογα τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στην στρώση βάσης, έχουν χωριστεί σε δύο κύριες κατηγορίες: α) τα σταθεροποιημένα (P-211, P-304, P306, P-401 και P-403) και β) τα ασύνδετα υλικά (P-208, P-209, P-219). Σε περιπτώσεις αεροσκαφών που υπερβαίνουν τα 100.000 rounds (45.359 Kg), απαιτείται η χρήση σταθεροποιημένων υλικών για την στρώση βάσης και το πάχος της στρώσης να είναι κατ'ελάχιστο ίσο με 5 inches (12,7 cm).



Αναλυτικότερα, για τις στρώσεις με σταθεροποιημένα υλικά, η αναλυτική μέθοδος τις χωρίζει σε στρώσεις με σταθεροποιημένα υλικά που έχουν δείκτη Poisson 0,20 και σε στρώσεις με σταθεροποιημένα υλικά που έχουν δείκτη Poisson 0,35. Ο διαχωρισμός γίνεται γιατί οι δεύτερες έχουν υψηλότερο δείκτη Poisson από τις πρώτες και είναι λιγότερο πιθανό να ρηγματωθούν. Τα πρότυπα υλικά της FAA, για την πρώτη περίπτωση, είναι τα υλικά P-401 ή P-403, τα οποία έχουν σταθερό μέτρο ελαστικότητας ίσο με 400.000 psi (2.760 MPa). Αντίστοιχα, για την δεύτερη είναι τα υλικά P-304 και P-306. Και στις δυο περιπτώσεις, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης υλικού με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας.

Οι ιδιότητες των διαφόρων τύπων στρώσεων της βάσης με σταθεροποιημένα υλικά της αναλυτικής μεθόδου συνοψίζονται στον πίνακα 3.5.

**Πίνακας 3.5: Τύποι στρώσεων βάσης με σταθεροποιημένα υλικά**

Στρώση βάσης	Μέτρο ελαστικότητας, psi (MPa)	Λόγος Poisson
<b>Στρώση με σταθεροποιημένα υλικά</b>		0,35
Στρώση με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας	150.000 (1.035)-400.000 (2.760)	
P-401/403	400.000 (2.760)	
<b>Στρώση με σταθεροποιημένα υλικά</b>		0,20
Στρώση με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας	250.000 (1.720)-700.000 (4.830)	
P-304	500.000 (3.450)	
P-306	700.000 (4.830)	

Αντίστοιχα, για τις στρώσεις βάσης από ασύνδετα υλικά, το πρότυπο υλικό εύκαμπτου οδοστρώματος είναι το P-209. Η χρήση του υλικού P-208 στην στρώση βάσης είναι αποκλειστικά για οδοστρώματα σχεδιασμένα για φορτίο μέχρι 60.000 lbs (27.216 Kg). Όταν το υλικό P-208 χρησιμοποιείται στην στρώση βάσης το ελάχιστο πάχος της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης είναι 5 inches (127 mm). Η χρήση του υλικού P-209 είναι αποκλειστικά για οδοστρώματα που εξυπηρετούν αεροσκάφη που έχουν φορτίο μέχρι 100.000 lbs (45.359 Kg).

Για κάθε στρώση από ασύνδετο υλικό υπολογίζεται αυτόματα από το FAARFIELD και το πάχος της. Η διαδικασία υπολογισμού του πάχους αποτελείται από δύο βήματα:

- 1) Υπολογισμός του πάχους της στρώσης βάσης από ασύνδετο υλικό που απαιτείται για την προστασία μίας θεωρητικής στρώσης έδρασης με CBR=20%.
- 2) Σύγκριση του πάχους που υπολογίστηκε με τις ελάχιστες απαιτήσεις πάχους της βάσης από τον πίνακα 3.6. Επιλέγεται το μεγαλύτερο από τις δύο τιμές ως πάχος σχεδιασμού της βάσης.

**Πίνακας 3.6: Προτεινόμενες τιμές για ελάχιστο πάχος στρώσης βάσης ασύνδετου υλικού**

Σύστημα προσγείωσης α/φ	Μέγεθος φορτίου		Ελάχιστο πάχος βάσης (P-209)	
	lbs	Kg	in.	mm
S	30.000-50.000	13.600-22.700	4	100
	50.000-75.000	22.700-34.000	6	150
D	50.000-100.000	22.7000-45.400	6	150
	100.000-200.000	45.400-90.700	8	200
2D	100.000-250.000	45.400-113.400	6	150
	250.000-400.000	113.400-181.000	8	200
2D (B757, B767)	200.000-400.000	90.700-181.000	6	150
2D ή 2D/D1 (DC10, L1011)	400.000-600.000	181.000-272.000	8	150
2D/2D2 (B747)	400.000-600.000	181.000-272.000	6	150
	600.000-850.000	272.000-385.600	8	200
2D/D1 ή 2D/2D1 (A340)	568.000-840.400	257.640-381.200	10	250
2S (C130)	75.000-125.000	34.000-56.700	4	100
	125.000-175.000	56.700-79.400	6	150
3D (B777)	537.000-777.000	243.500-352.440	10	250
3D (A380)	1.239.000-1.305.125	562.000-592.000	9	230

Η στρώση υπόβασης μπορεί να αποτελείται είτε από ασύνδετα υλικά είτε από σταθεροποιημένα υλικά. Ελάχιστο πάχος της στρώσης υπόβασης έχει οριστεί να είναι ίσο με 4 inches (10,2 cm), για κατασκευαστικούς λόγους. Για πρακτικούς κατασκευαστικούς περιορισμούς μπορεί να απαιτηθεί επιπλέον πάχος. Όταν απαιτείται στρώση βάσης με σταθεροποιημένα υλικά για αεροσκάφη που υπερβαίνουν τα 100.000 rounds (45.359 Kg), προτείνεται η χρήση υλικών υψηλής ποιότητας όπως το P-208 και το P-209. Επίσης, οποιοδήποτε υλικό κατάλληλο για την στρώση βάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως υπόβαση, αν ενδείκνυται από οικονομικούς και πρακτικούς λόγους.

Η στρώση έδρασης θεωρητικά έχει άπειρο βάθος και χαρακτηρίζεται είτε από το μέτρο ελαστικότητας, είτε από το δείκτη CBR. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας μπορεί να καθοριστεί με διάφορους τρόπους. Η διαδικασία που εφαρμόζεται τις περισσότερες φορές είναι η χρήση-αντικατάσταση του διαθέσιμου CBR στην παρακάτω σχέση:

$$E = 1500 * CBR \quad (6)$$

**E**= το μέτρο ελαστικότητας του υλικού (psi)

**CBR**= η φέρουσα ικανότητα του υλικού

Τέλος, το πρόγραμμα FAARFIELD δίνει την δυνατότητα χρήσης στρώσης μεταβλητού μέτρου ελαστικότητας. Η ελάχιστη τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι 6,89 MPa και η μέγιστη τιμή είναι 27.579,03 MPa. Όταν μία στρώση με υλικά μεταβλητού μέτρου ελαστικότητας δημιουργείται για πρώτη φορά, η τιμή του ρυθμίζεται αυτόματα στην ελάχιστη. Η επιλογή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στο συνολικό πάχος του εύκαμπτου οδοστρώματος.

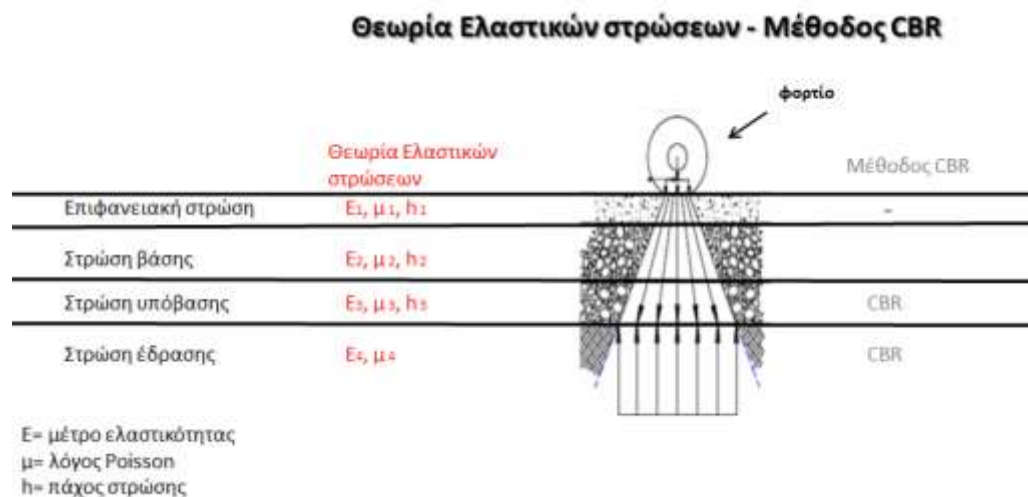
# 4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ FAA

## 4.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει μία σύγκριση της εμπειρικής μεθόδου με την αναλυτική. Στο πλαίσιο της σύγκρισης, πραγματοποιήθηκε διαστασιολόγηση εύκαμπτου οδοστρώματος με τις δύο μεθόδους για συγκεκριμένα στοιχεία κυκλοφορίας και υλικά στις στρώσεις του. Ο σχεδιασμός έγινε για διάρκεια ζωής του οδοστρώματος ίση με 20 έτη.

## 4.2 Σύγκριση βασικών αρχών

Η αναλυτική μέθοδος της FAA είναι βασισμένη στη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων. Αντίθετα, η εμπειρική μέθοδος βασίζεται στη μέθοδο CBR για τον σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων (Σχήμα 4.1).



**Σχήμα 4.1: Σύγκριση Θεωρίας Ελαστικών στρώσεων-Μέθοδος CBR**

Όσον αφορά στις διαδικασίες σχεδιασμού, η αναλυτική μέθοδος παρουσιάζει σημαντική απόκλιση από τις προηγούμενες μεθόδους της FAA. Η κύρια διαφορά στο σχεδιασμό του οδοστρώματος είναι η κατάργηση της έννοιας του αεροσκάφους σχεδιασμού. Σε αντίθεση με την εμπειρική μέθοδο, σύμφωνα με την οποία η επίδραση της κυκλοφορίας λαμβάνεται υπόψιν μέσω της μετατροπής των

διελεύσεων όλων των αεροσκαφών σε ισοδύναμες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού, η νέα τάση λαμβάνει υπόψιν το πραγματικό σύστημα τροχών όλων των αεροσκαφών και περιλαμβάνει τον υπολογισμό της επίδρασης που προκαλεί κάθε αεροσκάφος χωριστά.

Στην αναλυτική μέθοδο, η κύρια ιδιότητα των υλικών των στρώσεων ενός οδοστρώματος εκφράζεται μέσω του μέτρου ελαστικότητας. Αντίθετα, στην εμπειρική χαρακτηρίζεται από το δείκτη CBR. Πλέον παρέχεται τύπος μετατροπής του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης σε μέτρο ελαστικότητας, καθώς το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης δεν είχε μετρηθεί σε δόκιμες πλήρους κλίμακας έως το 1974. Ως εκ τούτου, οι μετατροπές είναι απαραίτητες και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας σχεδιασμού. Στον σχεδιασμό με την εμπειρική μέθοδο γίνεται υπολογισμός του συνολικού πάχους του οδοστρώματος με βάση το CBR της στρώσης έδρασης ενώ στην αναλυτική λαμβάνονται υπόψιν τα χαρακτηριστικά των υλικών των επιμέρους στρώσεων όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson.

Η αναλυτική μορφή της μεθόδου της FAA ως εξέλιξη της εμπειρικής καλύπτει απαιτήσεις οι οποίες δεν καλύπτονταν από προηγούμενες διαδικασίες σχεδιασμού της FAA. Μια τέτοια απαίτηση είναι ο σχεδιασμός οδοστρωμάτων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο από αεροσκάφη τύπου S, D, 2D/2D2, αλλά και από αεροσκάφη νέας γενιάς με πολύπλοκα συστήματα προσγείωσης. Η εμπειρική μέθοδος δεν παρέχει συντελεστές μετατροπής για τέτοια συστήματα.

Ο σχεδιασμός, πλέον, γίνεται με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος FAARFIELD αντί για τα διαγράμματα σχεδιασμού (νομογραφήματα). Τα αποτελέσματα επομένως της αναλυτικής μεθόδου ενδεχομένως να είναι πιο ακριβή. Επίσης, στον σχεδιασμό με την εμπειρική μέθοδο παρέχονται διαγράμματα για συγκεκριμένους τύπους αεροσκαφών και για ετήσιες διελεύσεις μέχρι 25.000. Για διελεύσεις άνω των 25.000 ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία σχεδιασμού.

### **4.3 Παράδειγμα διαστασιολόγησης εύκαμπτου οδοστρώματος**

#### **4.3.1 Δεδομένα**

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε διαστασιολόγηση εύκαμπτου οδοστρώματος με την εμπειρική και την αναλυτική μέθοδο της FAA. Ο σχεδιασμός έγινε για ενδεικτική κυκλοφορία (πίνακας 4.1) και για τα τυπικά υλικά της

FAA. Η περίοδος σχεδιασμού ορίστηκε ίση με 20 έτη. Επιπλέον, η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης θεωρήθηκε ίση με CBR=10% και της στρώσης υπόβασης ίση με CBR=20%.

**Πίνακας 4.1: Προβλεπόμενη κυκλοφορία οδοστρώματος**

<b>Αεροσκάφη</b>	<b>Μεικτό βάρος α/φ</b>	<b>Ετήσιες διελεύσεις</b>
A-320-200	78.400 Kg	3.000
B-767-300	163.747 Kg	1.200
B-737-400	68.266 Kg	3.000

#### 4.3.2 Διαδικασία διαστασιολόγησης οδοστρώματος με την εμπειρική μέθοδο

Η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος με την εμπειρική μέθοδο έγινε με βάση τη διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2. Επομένως η διατομή διαστασιολογήθηκε με τα υλικά που φαίνονται στον πίνακα 4.2.

**Πίνακας 4.2: Υλικά των στρώσεων του οδοστρώματος**

<b>Στρώσεις</b>	<b>Υλικά</b>
Επιφανειακή ασφαλτική στρώση	P-401
Στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο	P-209
Στρώση υπόβασης από ασύνδετο αμμοχάλικο	P-154

Για τον σχεδιασμό του οδοστρώματος αρχικά προσδιορίστηκε το αεροσκάφος σχεδιασμού από την προβλεπόμενη κυκλοφορία του οδοστρώματος. Από τα κατάλληλα διαγράμματα, με δεδομένα το βάρος του αεροσκάφους, τις ετήσιες διελεύσεις του και τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης (CBR=10%), υπολογίστηκε για κάθε τύπο αεροσκάφους το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος. Από τα αποτελέσματα (πίνακες 4.3) προκύπτει ότι το αεροσκάφος σχεδιασμού είναι το B-737-400.

**Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα υπολογισμών**

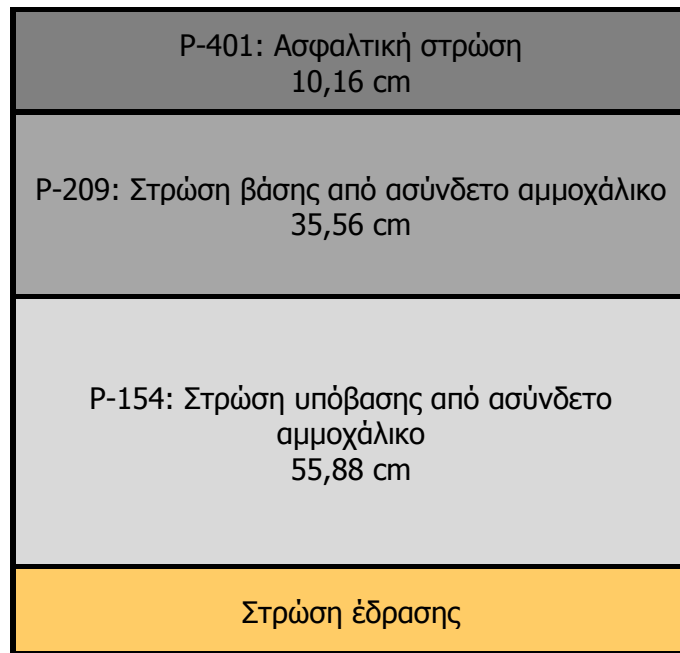
<b>Αεροσκάφος</b>	<b>Απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος</b>
A-320-200	24 inches (60,96 cm)
B-767-300	13 inches (33,02 cm)
B-737-400	29 inches (73,66 cm)

Στη συνέχεια, οι ετήσιες διελεύσεις των αεροσκαφών μετατράπηκαν σε ετήσιες διελεύσεις του ίδιου τύπου με το αεροσκάφος σχεδιασμού (R2). Από τον πίνακα 2.4 επιλέχθηκαν οι κατάλληλοι συντελεστές για τη μετατροπή των διελεύσεων. Έπειτα, υπολογίστηκαν τα φόρτια των τροχών για κάθε αεροσκάφος και εφαρμόζοντας τη σχέση (1) υπολογίστηκαν οι ισοδύναμες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού (R1) για κάθε αεροσκάφος της κυκλοφορίας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4.4.

**Πίνακας 4.4: Ισοδύναμες διελεύσεις αεροσκαφών**

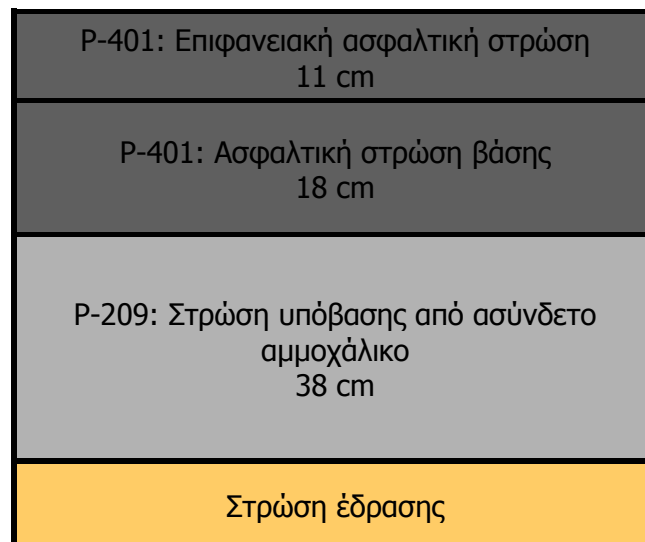
<b>Αεροσκάφος</b>	<b>Φορτία τροχών</b>	<b>Ετήσιες διελεύσεις (R2)</b>	<b>Ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις (R1)</b>
A-320-200	18.620 Kg	1.800	1.549
B-767-300	32.320 Kg	720	4.786
B-737-400	19.445 Kg	3.000	3.000
ΣΥΝΟΛΟ			9.335

Ακολουθώντας τη διαδικασία που αναφέρεται στο κεφάλαιο 2 προέκυψε η διατομή του σχήματος 4.2.



**Σχήμα 4.2: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος (εμπειρική μέθοδος)**

Επειδή η κυκλοφορία του οδοστρώματος περιέχει αεροσκάφη με φορτίο άνω των 100.000 lbs (45.350 Kg), απαιτήθηκε η χρήση σταθεροποιημένων υλικών. Η μετατροπή έγινε μέσω των συντελεστών ισοδυναμίας από τους πίνακες 2.2 και 2.3 και προέκυψε η διατομή του σχήματος 4.3.



**Σχήμα 4.3: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος με σταθεροποιημένα υλικά (εμπειρική μέθοδος)**

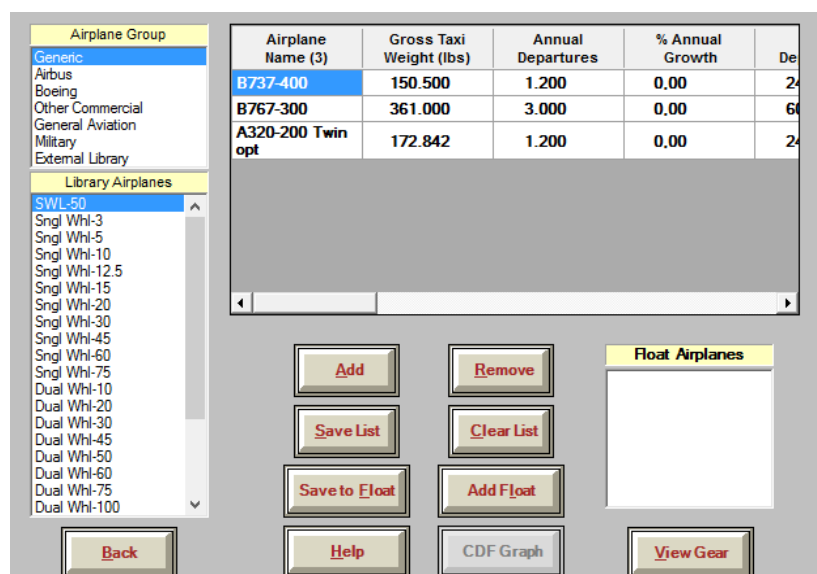
Καταλήγοντας, η διατομή αποτελείται από 29 cm ασφαλτομίγματος, 38 cm ασύνδετου αμμοχάλικου και τη στρώση έδρασης.



### 4.3.3 Διαδικασία διαστασιολόγησης οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο

Η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος έγινε μέσω του λογισμικού που διαθέτει η FAA (FAARFIELD). Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης με αυτά της εμπειρικής μεθόδου, χρησιμοποιήθηκαν τα τυπικά υλικά της FAA, όπως και στην εμπειρική.

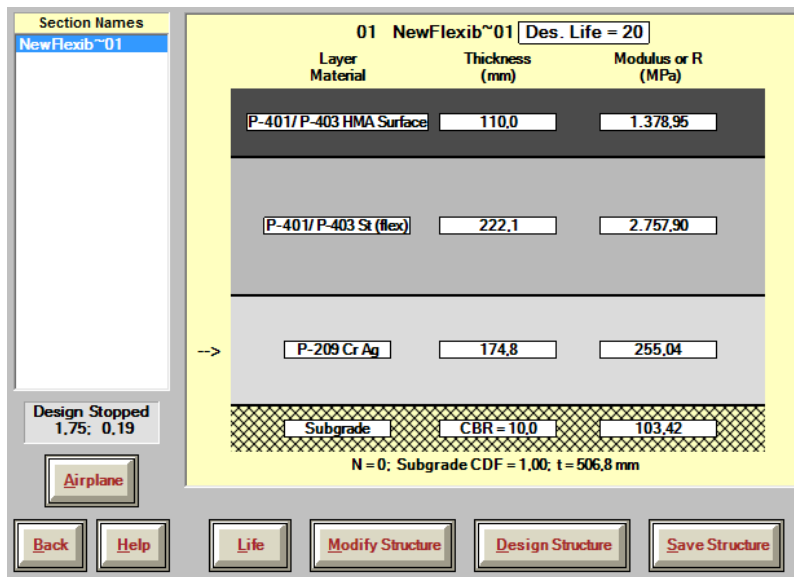
Αρχικά εισήχθη η κυκλοφορία που πρόκειται να δεχθεί το οδόστρωμα (σχήμα 4.4), τα υλικά της διατομής (σχήμα 4.5), η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης (CBR=10%) και η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος (Design Life) ίση με 20 έτη.



Airplane Name (3)	Gross Taxi Weight (lbs)	Annual Departures	% Annual Growth	De
B737-400	150.500	1.200	0.00	24
B767-300	361.000	3.000	0.00	60
A320-200 Twin opt	172.842	1.200	0.00	24

Σχήμα 4.4: Κυκλοφορία οδοστρώματος

Ο σχεδιασμός του οδοστρώματος ολοκληρώθηκε όταν ο δείκτης αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης ήταν ίσος με την μονάδα (Sub CDF=1). Επίσης ελέγχθηκε και η τιμή του δείκτη αθροιστικής φθοράς του ασφαλτομίγματος (HMA CDF), ο οποίος προέκυψε ίσος με 0,13.

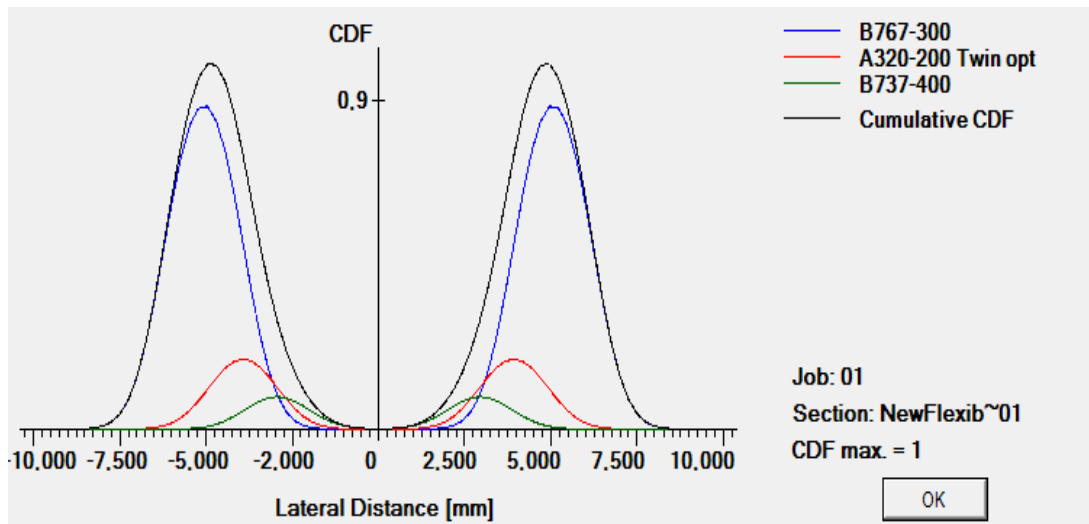


**Σχήμα 4.5: Υλικά στρώσεων οδοστρώματος**

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού, η αναλυτική μέθοδος μέσω του FAARFIELD, παρέχει πληροφορίες οι οποίες αφορούν στη φθορά του οδοστρώματος από κάθε αεροσκάφος ξεχωριστά. Για το δοσμένο παράδειγμα, οι πληροφορίες αυτές παρατίθενται στον πίνακα 4.5. Η στήλη “CDF Contribution” δείχνει τη συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στο συνολικό δείκτη CDF της κρίσιμης θέσης της στρώσης έδρασης (Sub CDF). Ο υπολογισμός του δείκτη Sub CDF παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6.

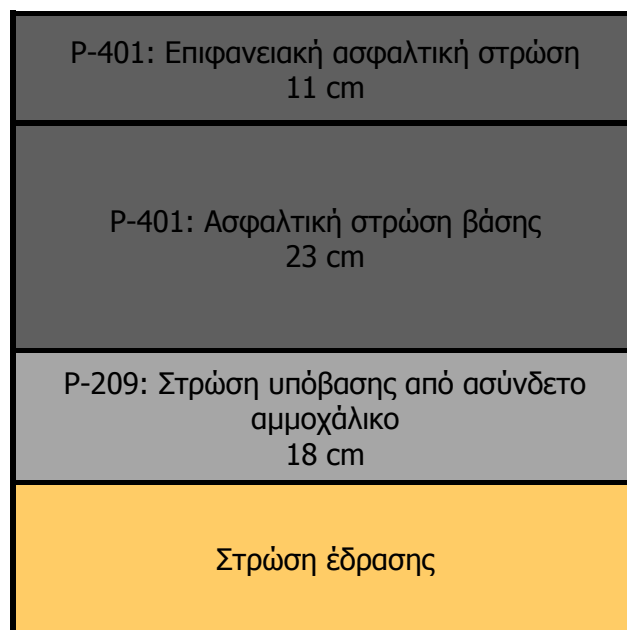
**Πίνακας 4.5: Υπολογισμός δείκτη φθοράς στρώσης έδρασης (Subgrade CDF)**

Τύπος α/φ	Συνεισφορά CDF	Μέγιστος δείκτης CDF	Λόγος P/C
A-320-200	0,11	0,19	1,45
B-767-300	0,88	0,88	0,77
B-737-400	0,01	0,09	1,43



**Σχήμα 4.6: Υπολογισμός δείκτη φθοράς στρώσης έδρασης**

Από τον σχεδιασμό με την αναλυτική μέθοδο της FAA προέκυψε η διατομή του σχήματος 4.7.

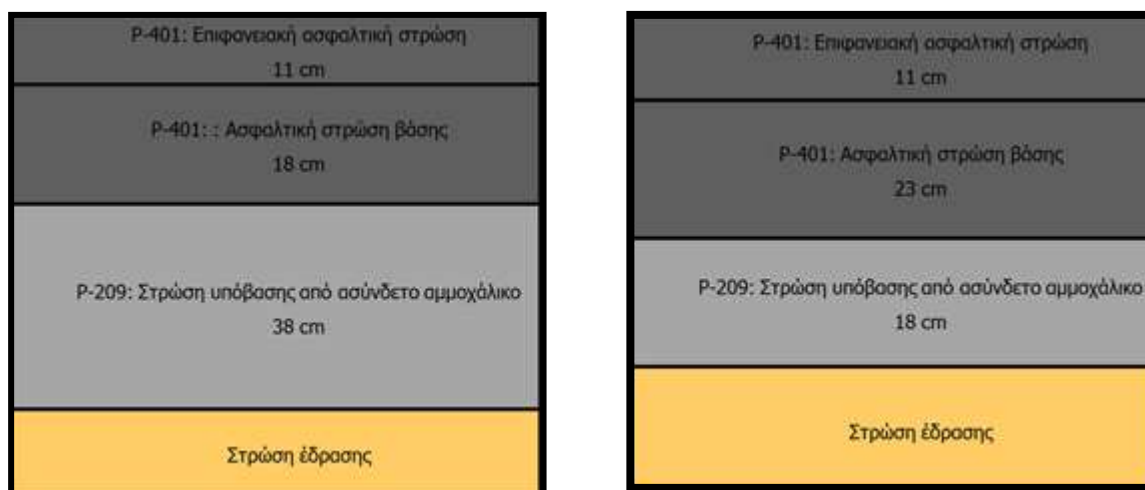


**Σχήμα 4.7: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος με σταθεροποιημένα υλικά (αναλυτική μέθοδος)**

Καταλήγοντας, η διατομή που προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία αποτελείται από 34 cm ασφαλτομίγματος, 18 cm ασύνδετου αμμοχάλικου και τη στρώση έδρασης.

## 4.4 Σύγκριση διατομών-Σχόλια

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων διαπιστώνεται ότι, παρόλο που οι δύο διατομές σχεδιάστηκαν με την ίδια κυκλοφορία και κάνοντας χρήση των ίδιων υλικών, τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν διαφορετικά. Επομένως, οι διαφορές στη διαδικασία σχεδιασμού των δύο μεθόδων, έχουν επίδραση και στα αποτελέσματα, τα οποία φαίνονται συγκριτικά στο σχήμα 4.8.



**Σχήμα 4.8: Συγκριτικά αποτελέσματα**

Μια ακόμα παρατήρηση που αφορά τα υπολογιζόμενα πάχη με την εμπειρική και την αναλυτική μέθοδο, είναι ότι τα πάχη της πρώτης είναι μεγαλύτερα. Αυτό, ενδεχομένως, να οφείλεται στο γεγονός ότι η εμπειρική μέθοδος βασίζεται σε θεωρητικές αναλύσεις της μετάδοσης των φορτίων στο έδαφος και σε πειραματικά δεδομένα.

# 5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΩΡΗΣΕΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ FAA

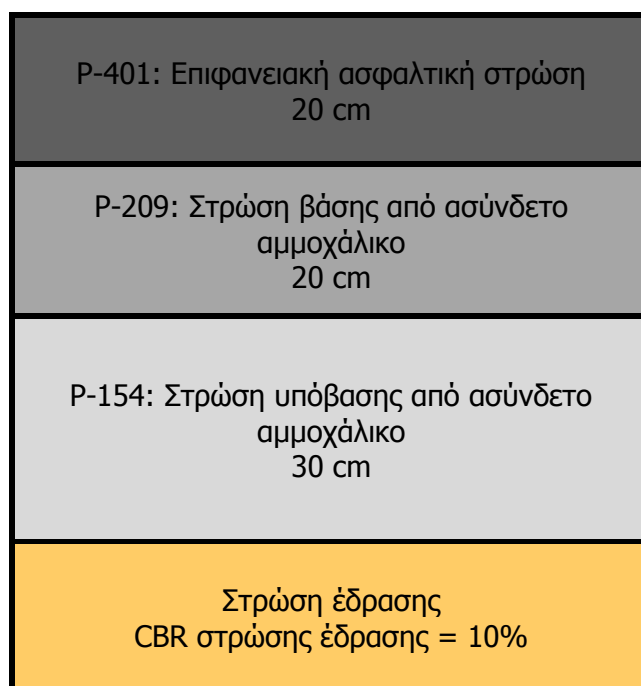
---

## 5.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε εμβάθυνση σε στοιχεία/παραμέτρους της αναλυτικής μεθόδου που κρίνονται καθοριστικά για το σχεδιασμό. Προς τούτο έγινε έλεγχος επάρκειας μίας ενδεικτικής διατομής με την χρήση του υπόψη λογισμικού.

## 5.2 Αξιολόγηση διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος

Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας αξιολογήθηκε ενδεικτική διατομή που έχει σχεδιαστεί με τα τυπικά υλικά της FAA και συγκεκριμένα πάχη στρώσεων. Η διατομή φαίνεται στο σχήμα 5.1. Η κυκλοφορία, που πρόκειται να δεχθεί το οδόστρωμα επιλέχθηκε να αποτελείται από ένα αεροσκάφος μονού τροχού, για πρακτικούς λόγους, με μεικτό βάρος 22.680 Kg και 17.000 ετήσιες διελεύσεις για 20ετή διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Για τον έλεγχο επάρκειας της διατομής του εύκαμπτου οδοστρώματος υπολογίστηκε ο δείκτης αθροιστικής φθοράς της ασφαλικής στρώσης (HMA CDF) και ο δείκτης αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης (Sub CDF).



**Σχήμα 5.1: Διατομή αξιολόγησης**

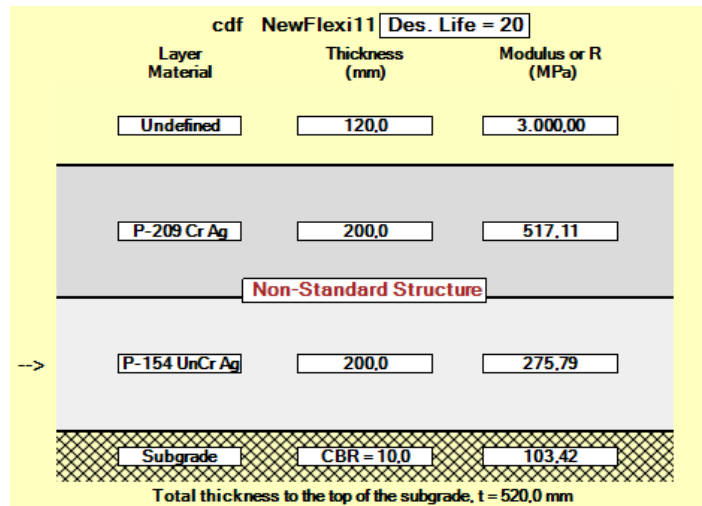
Ο δείκτης φθοράς της στρώσης έδρασης προέκυψε ότι είναι ίσος με 0,88 (Sub CDF=0,88) και ο δείκτης φθοράς της ασφαλτικής στρώσης ίσος με 1,11 (HMA CDF=1,11).

Μέσω της αξιολόγησης της διατομής προέκυψε ότι η ασφαλτική στρώση δεν επαρκεί να φέρει την προβλεπόμενη κυκλοφορία εφόσον ο δείκτης φθοράς είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Στην περίπτωση αυτή, αναμένεται να παρατηρηθεί αστοχία των ασφαλτικών στρώσεων. Αντίθετα, ο δείκτης φθοράς της στρώσης έδρασης είναι μικρότερος της μονάδας άρα επαρκεί για την κυκλοφορία. Για το λόγο αυτό διερευνήθηκε η δυνατότητα βελτίωσης της διατομής μέσω αύξησης του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης.

### 5.3 Διερεύνηση νόμου κόπωσης ασφαλτικής στρώσης

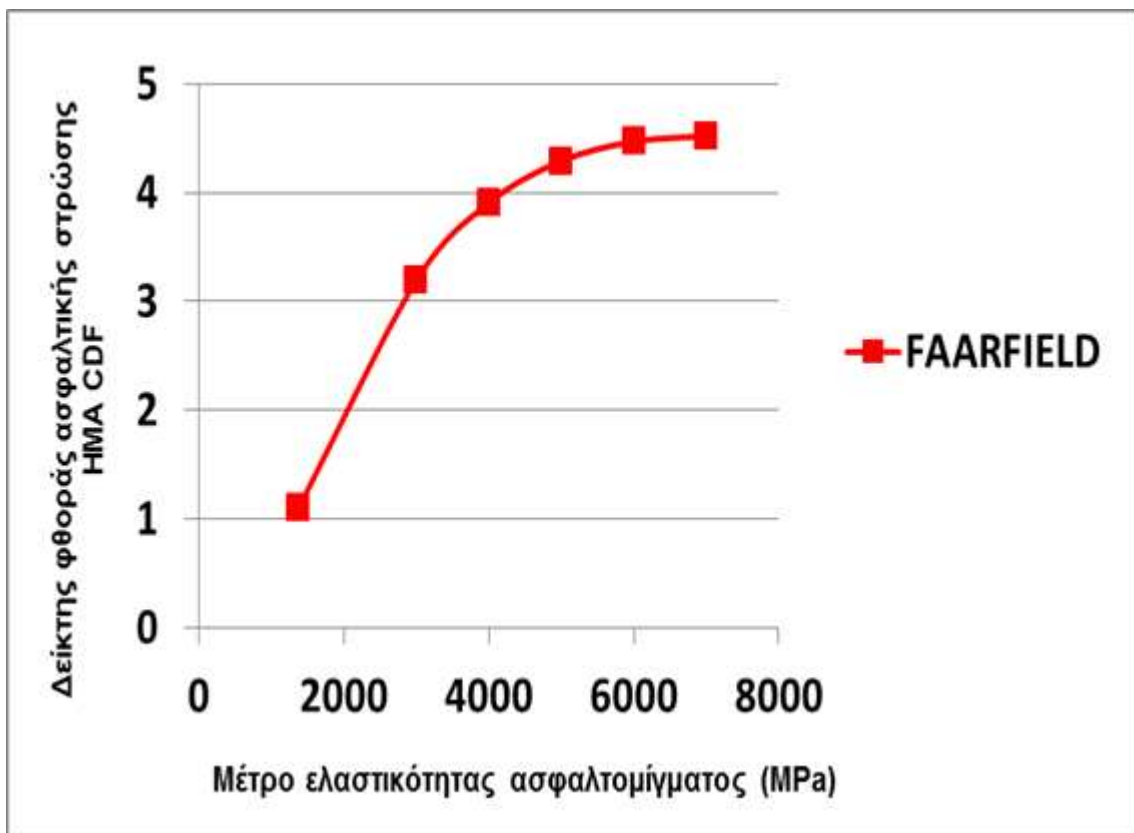
#### 5.3.1 Επιρροή μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος

Αρχικά, επιλέχθηκε να μεταβληθεί το μέτρο ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος. Για τις μεταβολές που έγιναν χρησιμοποιήθηκε στη θέση της ασφαλτικής στρώσης μία στρώση μεταβλητού μέτρου ελαστικότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Η διατομή κατά τα άλλα παραμένει ίδια, με την ίδια κυκλοφορία.



**Σχήμα 5.2: Διατομή με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας ασφαλτομίγματος**

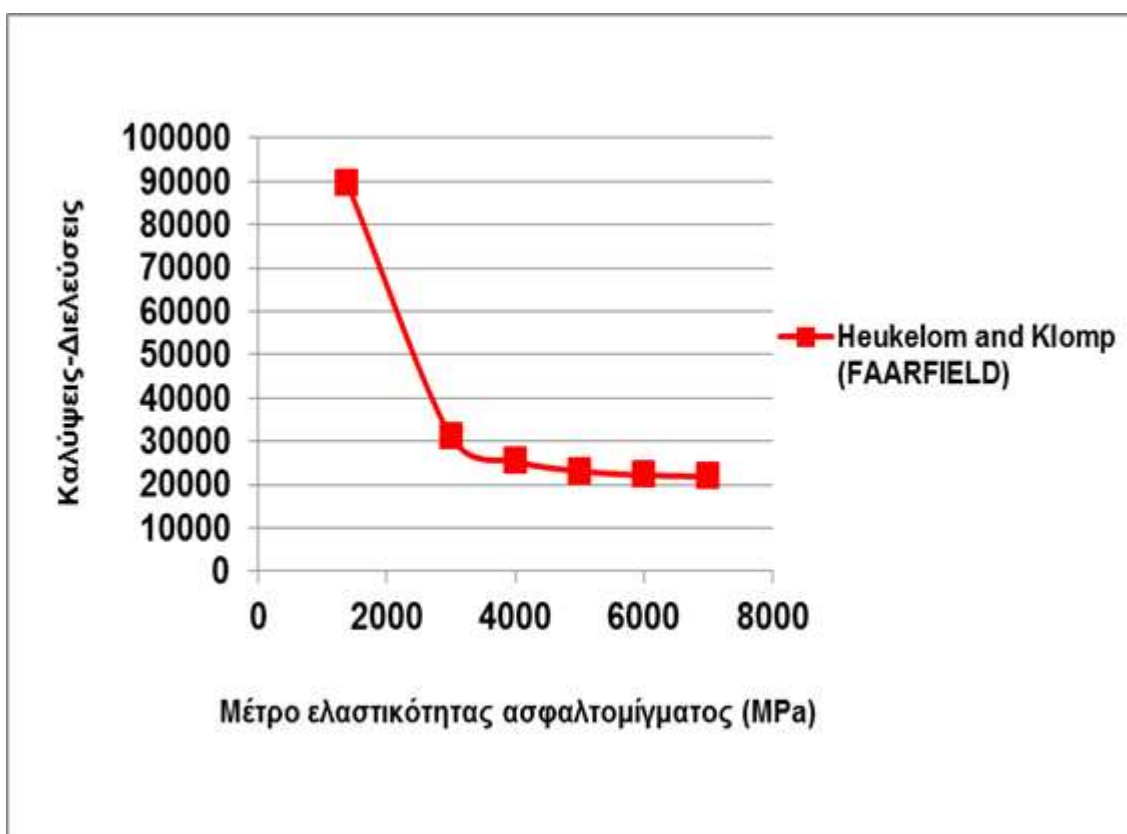
Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού P-401 της ασφαλτικής στρώσης της διατομής που αξιολογήθηκε είναι 1.380 MPa. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος κυμάνθηκαν από 3.000 MPa έως 7.000 MPa. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης φαίνονται στο σχήμα 5.3.



**Σχήμα 5.3: Επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος στον δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης**

Από το σχήμα 5.3 προκύπτει ότι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος οδήγησε σε αύξηση του δείκτη αθροιστικής φθοράς, γεγονός το οποίο δεν είναι αναμενόμενο.

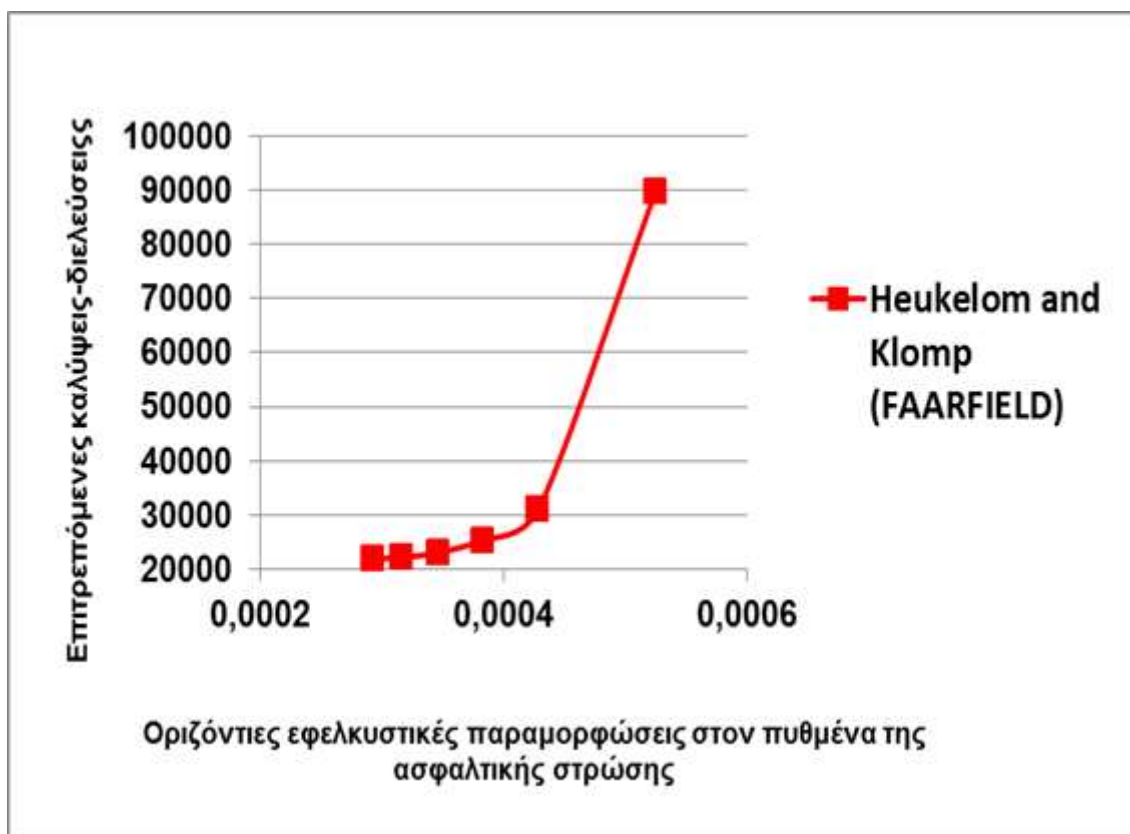
Δεδομένου ότι ο δείκτης αθροιστικής φθοράς εξαρτάται από το νόμο κόπωσης διερευνήθηκε η συμπεριφορά του υπόψη νόμου. Πιο συγκεκριμένα διερευνήθηκε η επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας στις καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία. Τα αποτελέσματα των επιτρεπομένων καλύψεων-διελεύσεων σε σχέση με τις μεταβολές του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζονται στο σχήμα 5.4.



**Σχήμα 5.4: Επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος στις επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις**

Αυξάνοντας το μέτρο ελαστικότητας αναμένεται αύξηση και των επιτρεπομένων καλύψεων-διελεύσεων. Το διάγραμμα, όμως, έχει αντίθετη τάση. Στην συνέχεια, ελέγχθηκε η σχέση των παραμορφώσεων με τις καλύψεις-διελεύσεις. Το διάγραμμα που προέκυψε από την σχέση των δύο μεγεθών φαίνεται στο σχήμα 5.5.





**Σχήμα 5.5: Επίδραση της μεταβολής των παραμορφώσεων στις επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις**

Παρατηρείται ότι, η αύξηση των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων επιφέρει αύξηση και των επιτρεπόμενων καλύψεων-διελεύσεων, το οποίο δεν είναι αναμενόμενο.

Δεδομένου ότι ο δείκτης φθοράς εξαρτάται άμεσα από το νόμο κόπωσης του ασφαλτομίγματος προέκυψε ότι ο νόμος των Heukelom και Klomp, που είναι ενσωματωμένος στο λογισμικό FAARFIELD, παρουσιάζει μη αναμενόμενη συμπεριφορά. Η συμπεριφορά αυτή του νόμου έχει μεγάλη σημασία, αφού ο υπολογισμός των παχών των στρώσεων γίνεται ώστε ο δείκτης φθοράς να είναι μικρότερος ή ίσος της μονάδας. Ως εκ τούτου στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση και άλλων νόμων κόπωσης στο δείκτη φθοράς.

Η χρήση άλλων νόμων κόπωσης για τον υπολογισμό του δείκτη φθοράς έγινε χειρονακτικά καθώς η μέθοδος δεν δίνει τη δυνατότητα μεταβολής του νόμου κόπωσης που χρησιμοποιεί. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις νόμοι κόπωσης των οποίων οι εκφράσεις είναι οι εξής [11]:

### Asphalt Institute

$$C = 0,0796 * (\epsilon h^{-3,291}) * (Ea^{-0,854}) \quad (4)$$

Όπου:

- $C$  = οι επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία
- $\epsilon h$  = οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης
- $Ea$  = μέτρο ελαστικότητας ασφαλτομίγματος (psi)

### Shell

$$C = 0,0685 * (\epsilon h^{-5,671}) * (Ea^{-2,363}) \quad (5)$$

Όπου:

- $C$  = οι επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία
- $\epsilon h$  = οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης
- $Ea$  = μέτρο ελαστικότητας ασφαλτομίγματος (psi)

### Illinois Department of Transportation

$$C = 5 * (10^{-6}) * (\epsilon h^{-3}) \quad (6)$$

Όπου:

- $C$  = οι επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία
- $\epsilon h$  = οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης

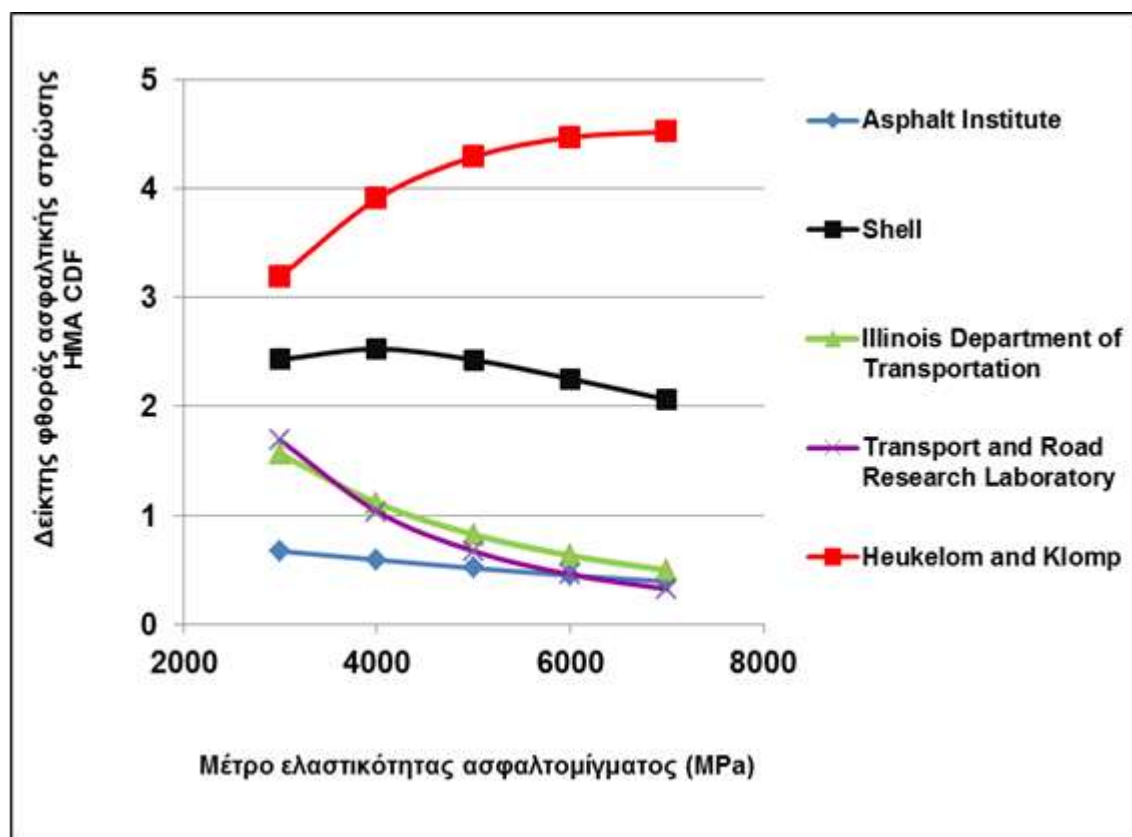
### Transport and Road Research Laboratory

$$C = 1,66 * (10^{-10}) * (\epsilon h^{-4,32}) \quad (7)$$

Όπου:

- $C$  = οι επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία
- $\epsilon h$  = οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης

Και σε αυτό το στάδιο πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες αλλαγές του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος, στην ίδια διατομή με την ίδια κυκλοφορία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 5.6.

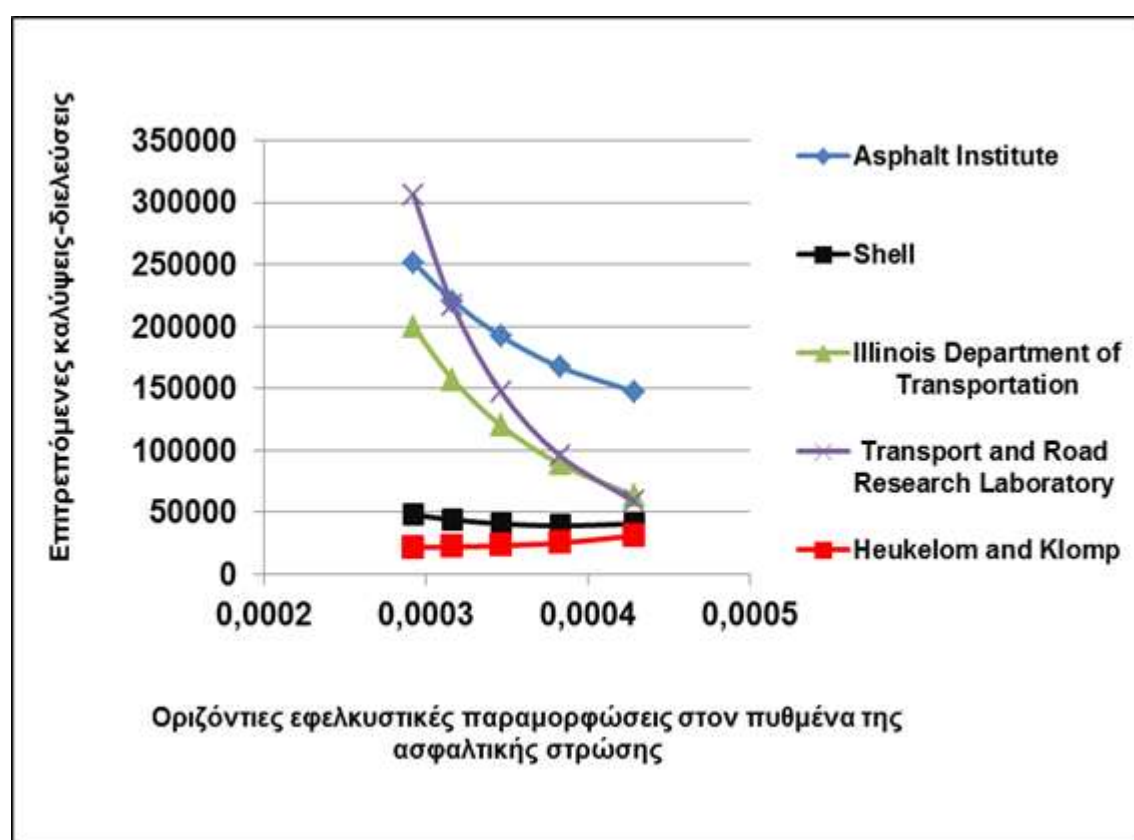


**Σχήμα 5.6: Επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος στον δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης, συγκριτικά με άλλους νόμους**

Προχωρώντας στα αποτελέσματα της διερεύνησης, προέκυψε ότι ο νόμος των Heukelom και Klomp διαφοροποιείται από τους υπόλοιπους ως προς την συμπεριφορά του στις μεταβολές του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος. Σε αντίθεση με το νόμο κόπωσης που χρησιμοποιεί η αναλυτική μέθοδος, οι άλλοι νόμοι έχουν ως αποτέλεσμα μείωση της φθοράς του οδοστρώματος αυξάνοντας το μέτρο ελαστικότητας. Η χρήση, επομένως, κάποιου άλλου νόμου δίνει διαφορετικά αποτελέσματα στον υπολογισμό των καλύψεων-διελεύσεων και κατ'επέκταση του δείκτη φθοράς. Επομένως, μία διατομή που έχει διαστασιολογηθεί με το νόμο Heukelom και Klomp και δεν επαρκεί, αν διαστασιολογηθεί με κάποιον άλλο νόμο και για συγκεκριμένες τιμές του μέτρου ελαστικότητας που έγινε η διερεύνηση, ενδεχομένως να επαρκεί.

Όσον αφορά στο σχεδιασμό, ο νόμος κόπωσης που χρησιμοποιεί η αναλυτική μέθοδος είναι πιο συντηρητικός σε σχέση με τους υπόλοιπους και τα αποτελέσματά του μπορεί να οδηγήσουν σε υπερδιαστασιολόγηση των στρώσεων του οδοστρώματος για τις συγκεκριμένες τιμές του μέτρου ελαστικότητας για τις οποίες πραγματοποιήθηκε η ανάλυση. Στην πράξη, η υπερδιαστασιολόγηση οδηγεί σε αύξηση του κόστους κατασκευής, το οποίο δεν είναι επιθυμητό κατά την υλοποίηση ενός έργου.

Ακολούθως, στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής των παραμορφώσεων στις επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις με τη χρήση και των άλλων νόμων.

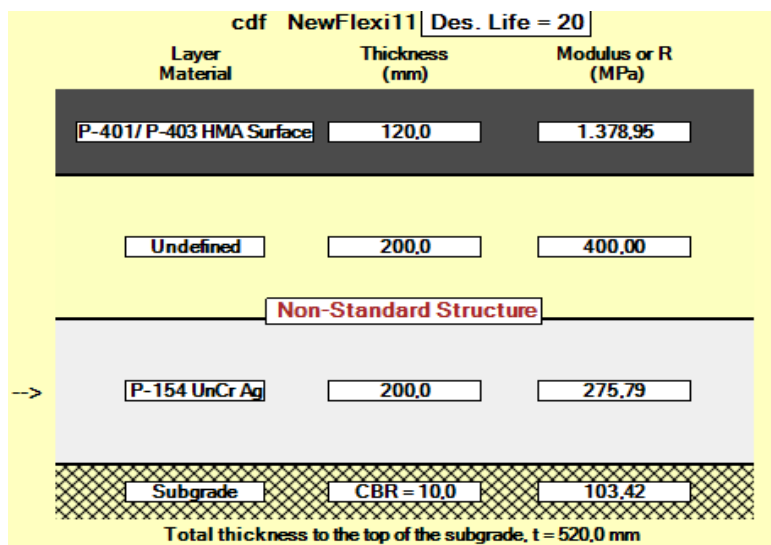


**Σχήμα 5.7: Επίδραση της μεταβολής των παραμορφώσεων στις επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις, συγκριτικά με άλλους νόμους**

Σε αντίθεση με την αύξηση των καλύψεων-διελεύσεων που προκύπτει από τη χρήση του νόμου της αναλυτικής μεθόδου, με τους άλλους νόμους οι καλύψεις-διελεύσεις μειώνονται. Επίσης παρατηρείται ότι, για κάθε τιμή της παραμόρφωσης, οι καλύψεις-διελεύσεις που υπολογίζονται με το νόμο Heukelom και Klomp είναι πάντα λιγότερες από τους άλλους νόμους.

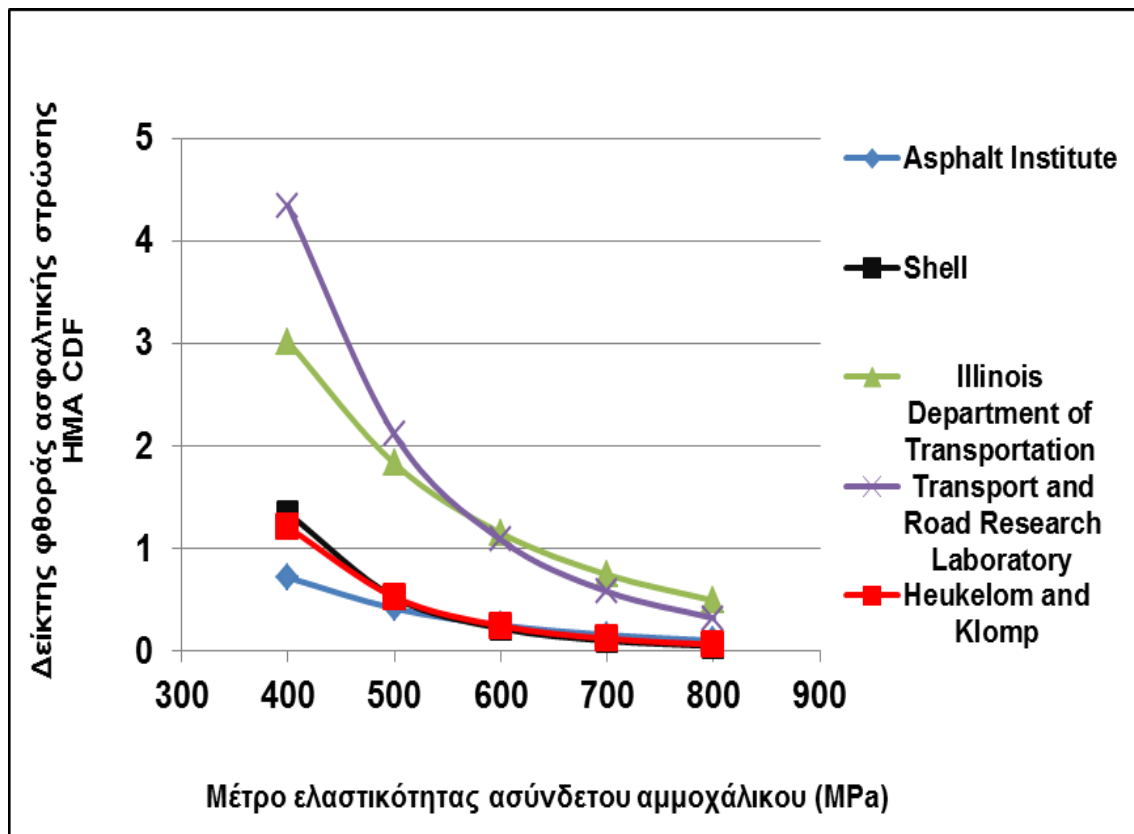
### 5.3.2 Επιρροή μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασύνδετου αμμοχάλικου

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε ανάλυση του νόμου κόπωσης μεταβάλλοντας το μέτρο ελαστικότητας του ασύνδετου αμμοχάλικου, συγκρίνοντας και πάλι τα αποτελέσματα με αυτά των άλλων νόμων. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας κυμάνθηκαν από 400 MPa έως 800 MPa. Και σε αυτή την περίπτωση, για τις μεταβολές του μέτρου ελαστικότητας, αντικαταστάθηκε η στρώση βάσης του ασύνδετου αμμοχάλικου με μία στρώση μεταβλητού μέτρου ελαστικότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8. Η διατομή κατά τα άλλα παραμένει ίδια και με την ίδια κυκλοφορία.



**Σχήμα 5.8: Διατομή με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας ασύνδετου αμμοχάλικου**

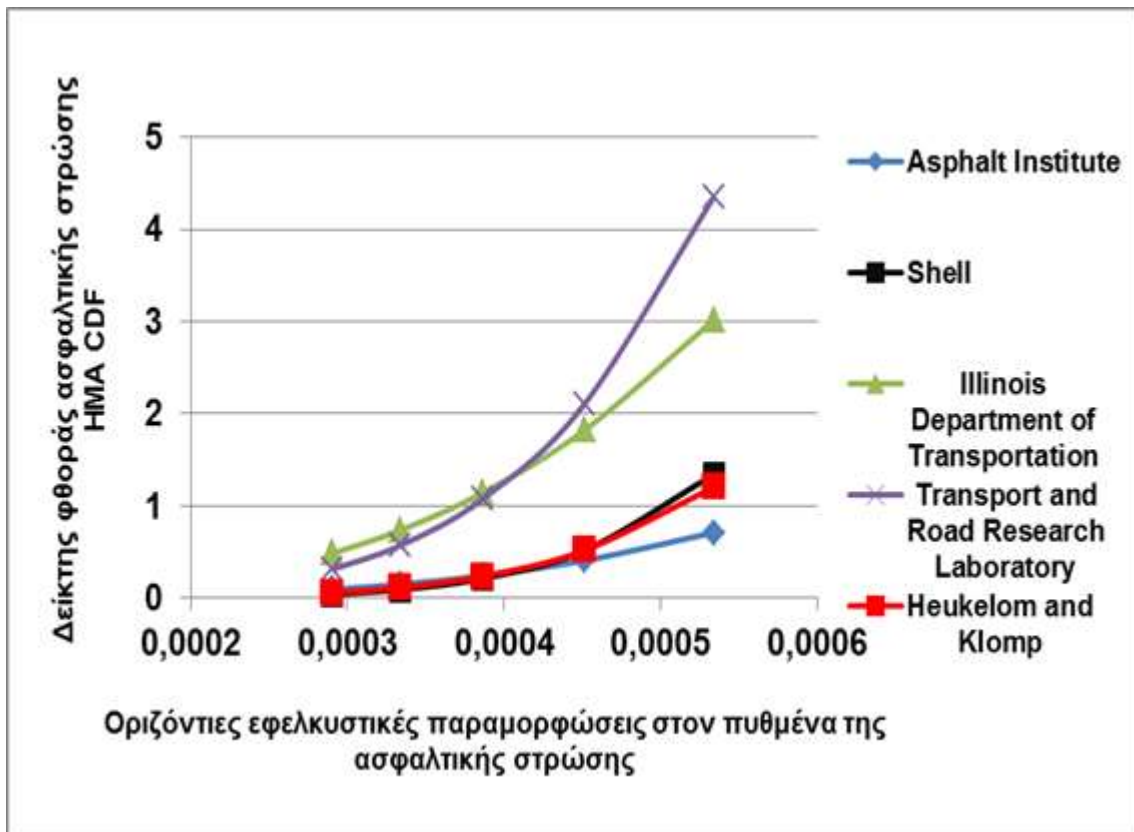
Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασύνδετου αμμοχάλικου στο δείκτη αθροιστικής φθοράς της ασφαλτικής στρώσης.



**Σχήμα 5.9: Επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασύνδετου αμμοχάλικου στον δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης, συγκριτικά με άλλους νόμους**

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9, όλοι οι νόμοι έχουν την ίδια τάση μεταβολής. Όσο αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας του ασύνδετου αμμοχάλικου, μειώνεται ο δείκτης φθοράς της ασφαλτικής στρώσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας οι τιμές του δείκτη φθοράς, από όλους τους νόμους, συγκλίνουν. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται η επίπτωση χρήσης κάποιου άλλου νόμου για τον υπολογισμό των καλύψεων-διελεύσεων.

Στο σχήμα 5.10 φαίνεται η σχέση του δείκτη φθοράς με τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνονται οι τιμές των παραμορφώσεων αυξάνεται και η φθορά του οδοστρώματος, το οποίο είναι αναμενόμενο.



**Σχήμα 5.10: Επίδραση της μεταβολής των παραμορφώσεων στον δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης, συγκριτικά με άλλους νόμους**

Και εδώ έχουμε αναμενόμενη συμπεριφορά του νόμου κόπωσης και σε μεγάλες τιμές του μέτρου ελαστικότητας (μικρές παραμορφώσεις) οι τιμές του δείκτη φθοράς συγκλίνουν.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, προκύπτει ότι στις αλλαγές του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος παρατηρείται μη αναμενόμενη συμπεριφορά του νόμου Heukelom και Klomp και μεγάλες αλλαγές του δείκτη φθοράς, το οποίο δείχνει ιδιαίτερη ευαισθησία. Αντίθετα, στις αλλαγές του μέτρου ελαστικότητας του ασύνδετου αμμοχάλικου είναι φυσιολογική η συμπεριφορά όλων των νόμων. Στη δεύτερη περίπτωση, για τις τιμές που εξετάζονται, οι μεταβολές του νόμου είναι πιο ήπιες για υψηλά μέτρα ελαστικότητας της βάσης από ασύνδετο υλικό σε σχέση με τους άλλους νόμους, το οποίο δείχνει μικρότερη ευαισθησία.

## 6. ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε διερεύνηση ορισμένων βασικών αρχών της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA. Για το σκοπό αυτό αρχικά υλοποιήθηκε σύγκριση των βασικών αρχών της αναλυτικής μεθόδου με εκείνες της υπάρχουσας εμπειρικής μεθόδου. Από την υπόψη διαδικασία προέκυψε ότι οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν αρκετές διαφορές τόσο ως προς το θεωρητικό υπόβαθρο που βασίζονται, όσο και ως προς τη διαδικασία διαστασιολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, η εμπειρική μέθοδος βασίζεται στη μέθοδο CBR ενώ η αναλυτική στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων. Επιπλέον, στην εμπειρική όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται μέσω του αεροσκάφους σχεδιασμού ενώ στην αναλυτική λαμβάνεται υπόψη η επίδραση όλων των αεροσκαφών που πρόκειται να δεχθεί το οδόστρωμα. Αξίζει να τονιστεί ότι η αναλυτική μέθοδος παρέχει μία διαδικασία σχεδιασμού πιο φιλική προς τον χρήστη και λιγότερο χρονοβόρα σε σχέση με την χρήση των διαγραμμάτων της εμπειρικής μεθόδου.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε διαστασιολόγηση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος με τις δύο μεθόδους με στόχο να διερευνηθεί η επίδραση των παραπάνω διαφοροποιήσεων στο σχεδιασμό ενός οδοστρώματος. Η διαστασιολόγηση υλοποιήθηκε για ενδεικτικά στοιχεία κυκλοφορίας και για τα τυπικά υλικά της FAA. Από την υπόψη διαδικασία προέκυψαν διαφορετικά πάχη στρώσεων που οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι παραπάνω διαφοροποιήσεις επηρεάζουν το σχεδιασμό.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε εμβάθυνση σε στοιχεία/παραμέτρους της αναλυτικής μεθόδου που κρίνονται καθοριστικά για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Προς τούτο ακολούθησε έλεγχος επάρκειας μίας διατομής ενός εύκαμπτου οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο. Από την αξιολόγηση προέκυψε ότι η διατομή δεν επαρκεί να φέρει την προβλεπόμενη φόρτιση και αναμένεται να παρατηρηθεί αστοχία των ασφαλτικών στρώσεων. Για το λόγο αυτό διερευνήθηκε η δυνατότητα βελτίωσης της διατομής μέσω αύξησης του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων. Από την παραπάνω διαδικασία προέκυψε ότι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων



οδήγησε σε αύξηση του δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης, γεγονός το οποίο δεν ήταν αναμενόμενο.

Δεδομένου ότι ο δείκτης φθοράς εξαρτάται άμεσα από το νόμο κόπωσης του ασφαλτομίγματος προέκυψε ότι ο νόμος των Heukelom και Klomp, που είναι ενσωματωμένος στο υπόψη λογισμικό FAARFIELD, παρουσιάζει μη αναμενόμενη συμπεριφορά. Ως εκ τούτου στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση και άλλων νόμων κόπωσης στο δείκτη φθοράς.

Από τη σχετική διερεύνηση προέκυψε ότι ο νόμος των Heukelom και Klomp διαφοροποιείται από τους υπόλοιπους ως προς την συμπεριφορά του στις μεταβολές του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος. Όσον αφορά στο σχεδιασμό, ο νόμος είναι πιο συντηρητικός σε σχέση με τους υπόλοιπους και τα αποτελέσματά του μπορεί να οδηγήσουν σε υπερδιαστασιολόγηση των στρώσεων του οδοστρώματος για τις συγκεκριμένες τιμές του μέτρου ελαστικότητας για τις οποίες πραγματοποιήθηκε η ανάλυση. Στην πράξη, η υπερδιαστασιολόγηση οδηγεί σε αύξηση του κόστους κατασκευής, το οποίο δεν είναι επιθυμητό κατά την υλοποίηση ενός έργου.

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του ασύνδετου αμμοχάλικου στο δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης. Από την υπόψη διαδικασία προέκυψε ότι όλοι οι νόμοι παρουσιάζουν την ίδια τάση μεταβολής. Επιπλέον παρατηρείται ότι για μικρές τιμές του μέτρου ελαστικότητας της βάσης ασύνδετου αμμοχάλικου οι διαφορές των νόμων είναι σημαντικές ενώ για μεγάλες τιμές του μέτρου ελαστικότητας οι διαφορές των αποτελεσμάτων μειώνονται σημαντικά.

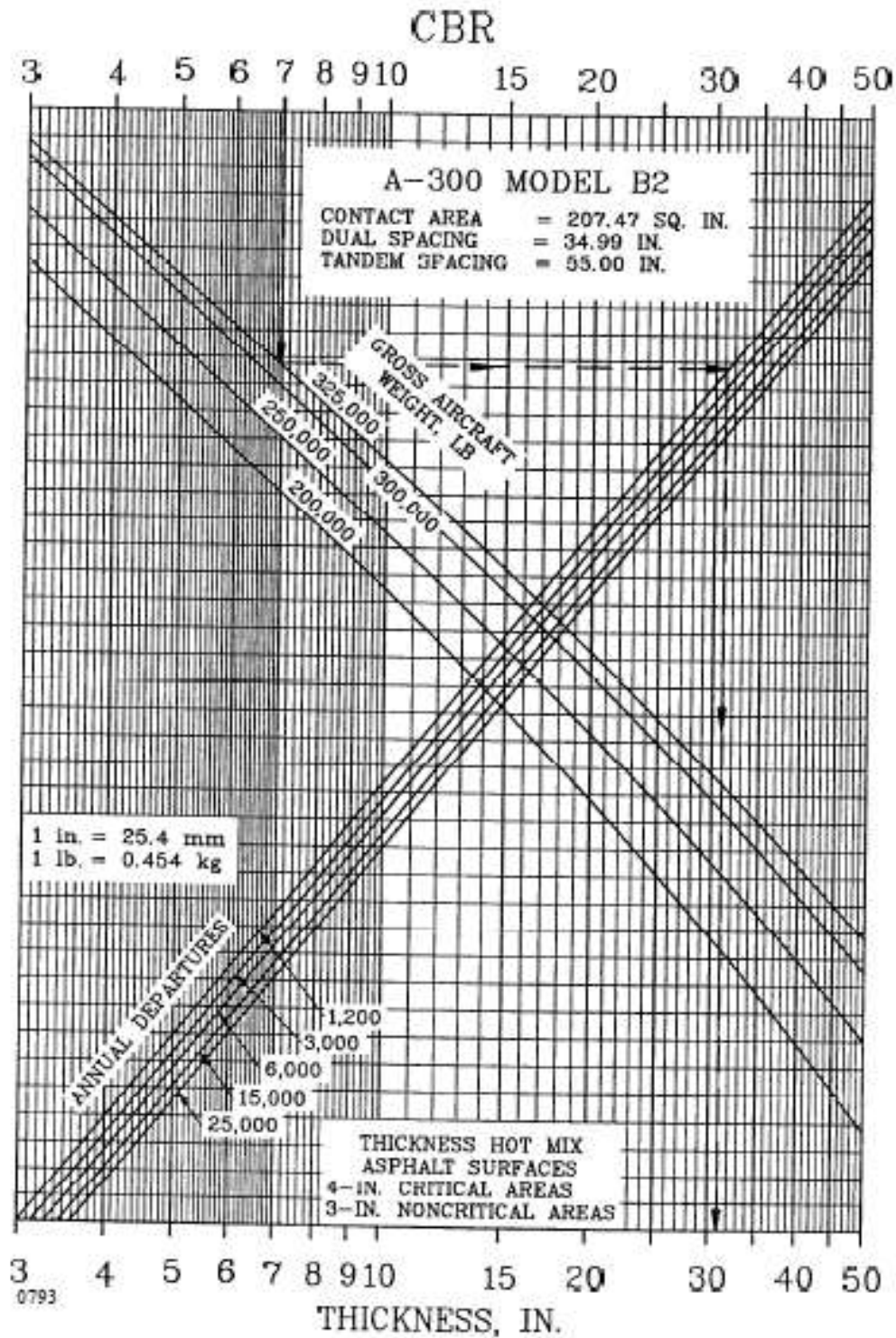
Καταλήγοντας, θεωρείται ότι είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί περαιτέρω διερεύνηση της μεθόδου. Αρχικά, προτείνεται να διερευνηθούν τα χαρακτηριστικά των υλικών της FAA τα οποία χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό. Επίσης, θα πρέπει να διερευνηθεί ο νόμος αστοχίας της στρώσης έδρασης καθώς και η διαδικασία ενίσχυσης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων με επίστρωση που περιλαμβάνονται στα πλαίσια της μεθόδου. Τέλος, είναι σημαντική η αναζήτηση για βελτιώσεις-διορθώσεις της αναλυτικής μορφής της μεθόδου.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

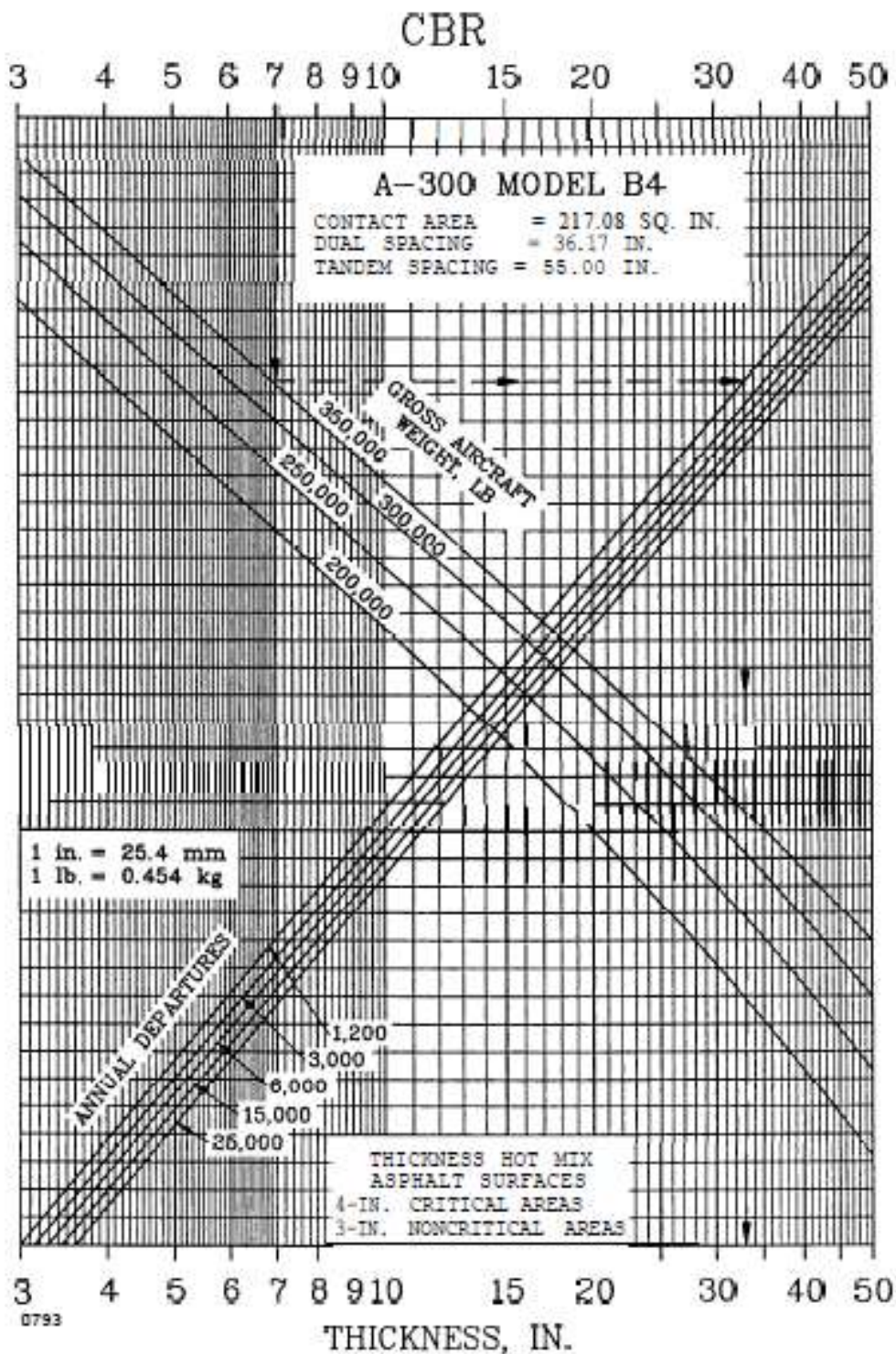
---

- [1] Federal Aviation Administration, «Airport Pavement Design and Evaluation», Advisory Circular No 150/5320-6D, Washington DC, 1995
- [2] Federal Aviation Administration, «Airport Pavement Design and Evaluation», Advisory Circular No 150/5320-6E, Washington DC, 2009
- [3] Service Technique des Bases Aériennes-The Airports and Airforce Base Engineering (STBA), «Instruction Technique Sur Les Aérodomes Civils», Paris, 2001
- [4] Directorate of Civil Engineering Services, «A Guide to Airfield Pavement Design and Evaluation», Property Services Agency, Department of the Environment, United Kingdom, 1989
- [5] Engineer Research and Development Center (ERDC), «Pavement Design for Airfields», US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station. UFC 3-260-03. Mississippi USA, 2001
- [6] Portland Cement Association (PCA), «Thickness Design for Concrete Pavements», Illinois, 1966
- [7] Α. Λοΐζος, Χ. Πλατή, «Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων», Τεύχος Α, Αθήνα, Οκτώβριος 2015
- [8] Qiang Li, Navneet Garg, Monir Haggag, «Evaluation of correlation between phenomenological approach and fracture mechanics approach for asphalt concrete fatigue performance», Galloway, New Jersey, USA, August 2014
- [9] Α. Λοΐζος, Χ. Πλατή, «Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα», Αθήνα, Φεβρουάριος 2015
- [10] <http://www.airtech.tc.faa.gov/NAPTF/Download/Operational%20Life.pdf>
- [11] Huang Y. H, «Pavement analysis and design», Pearson Education, Inc, 2004

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

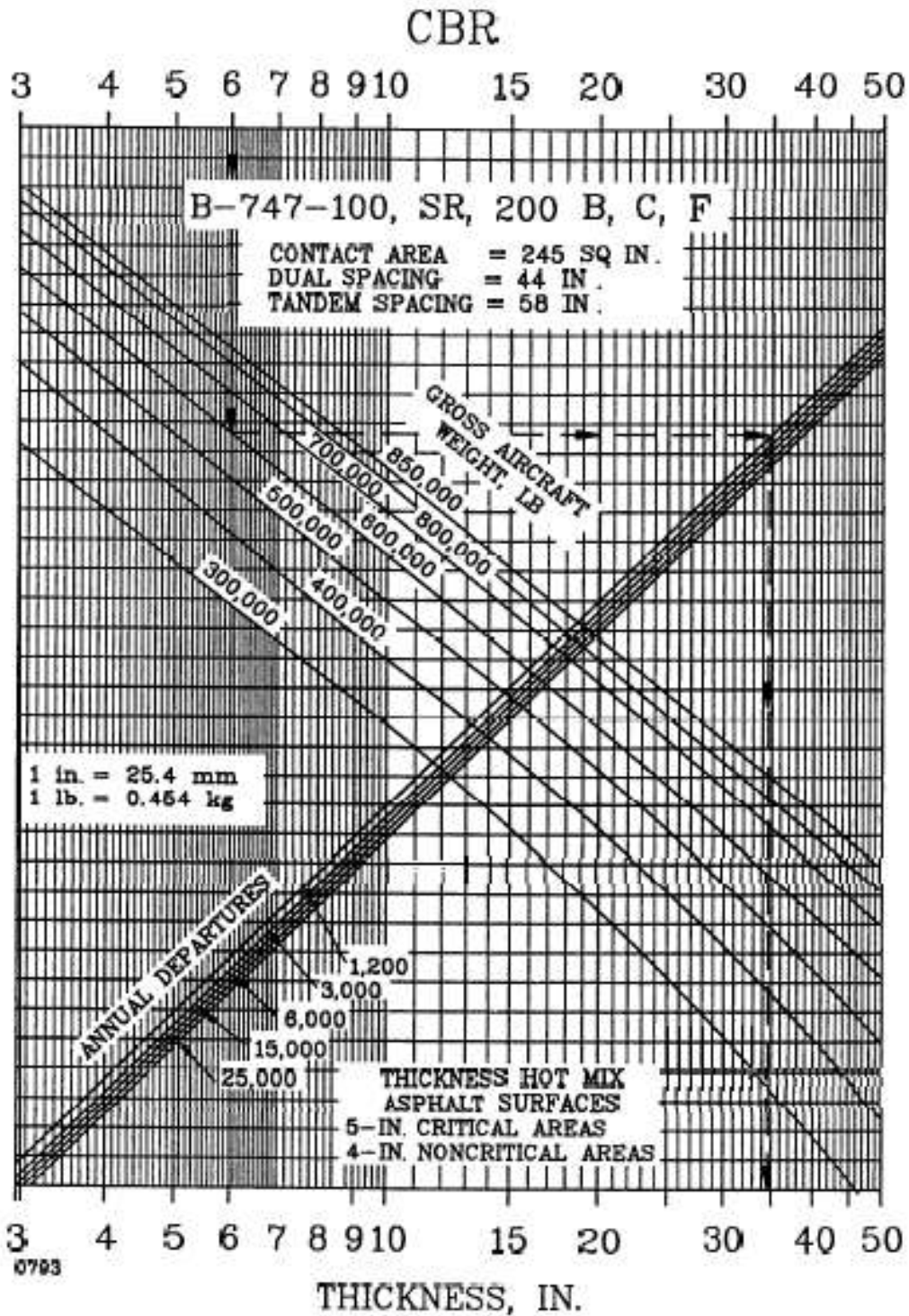


Σχήμα Π . 1 Διάγραμμα υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για το α/φ A-300 MODEL B2

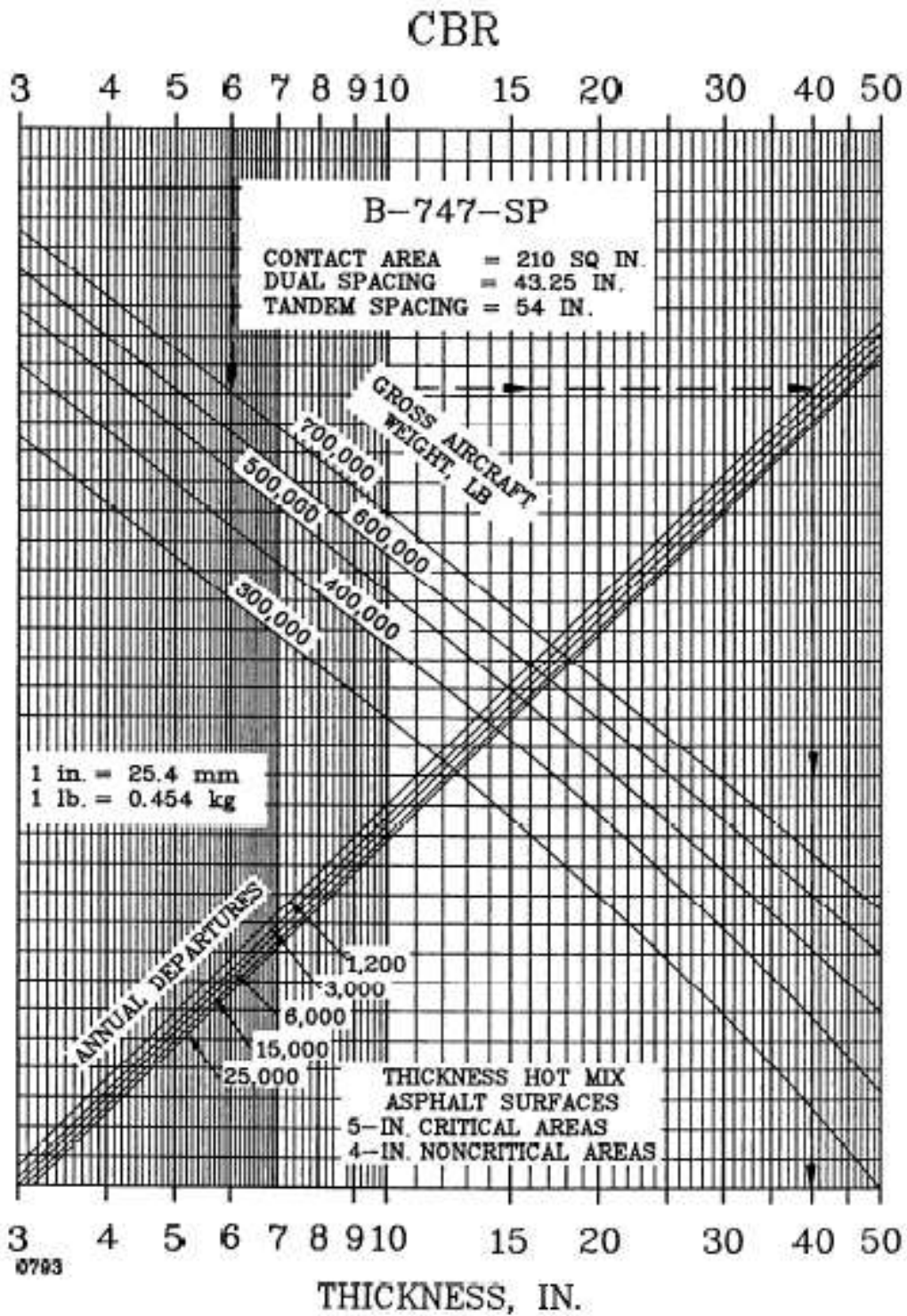


**Σχήμα Π . 2 Διάγραμμα υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για το α/φ A-300 MODEL B4**

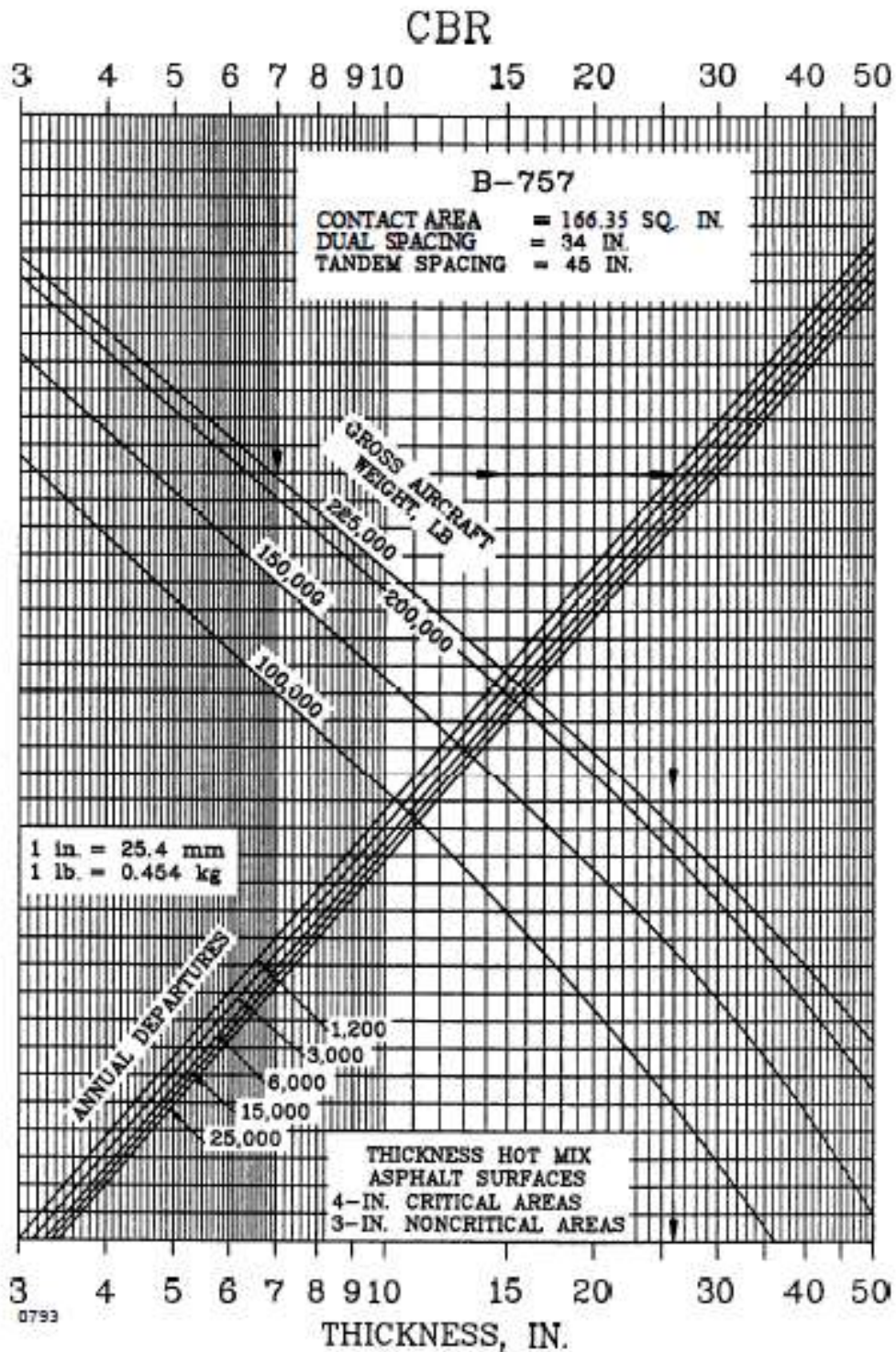




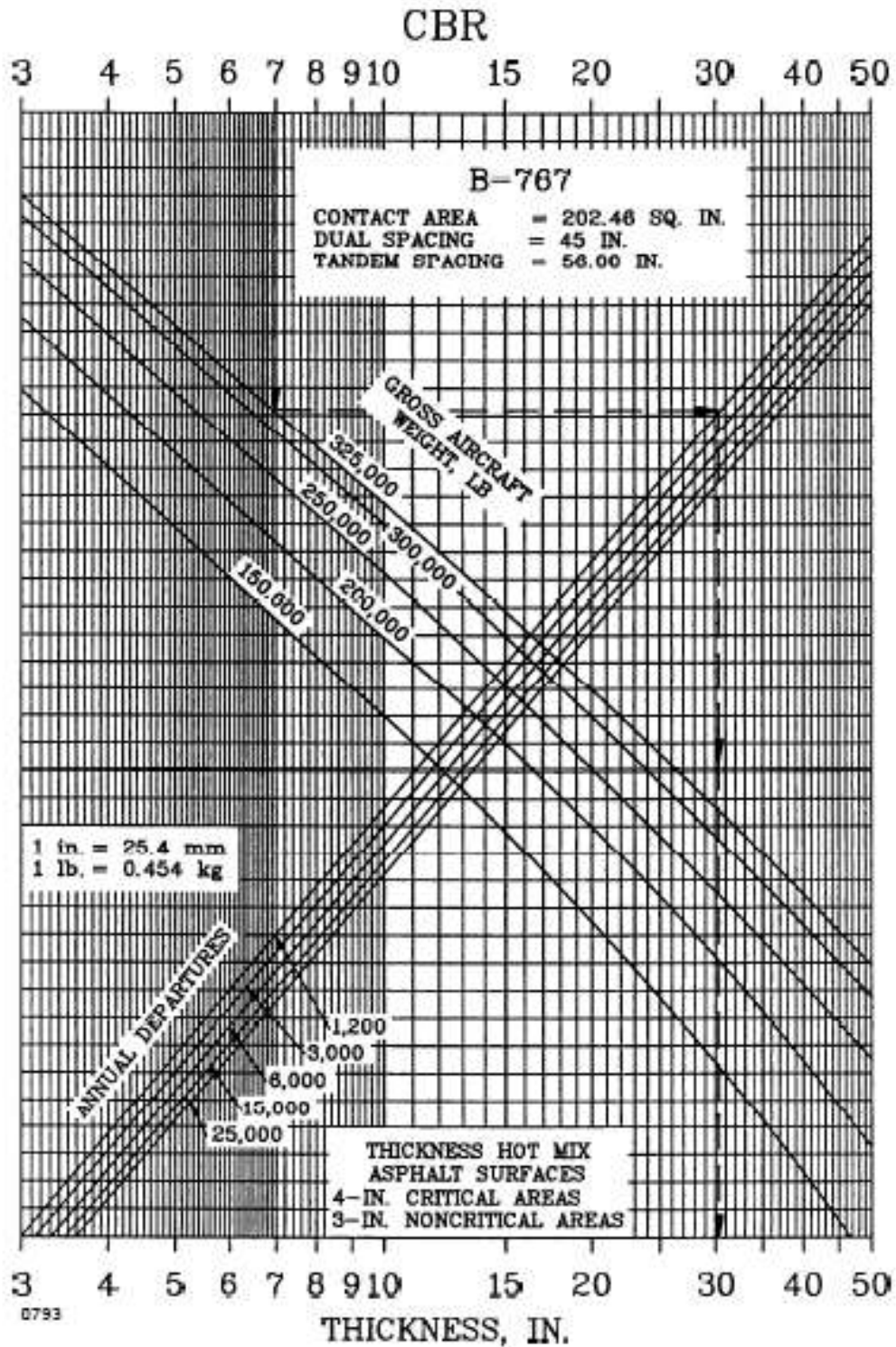
**Σχήμα Π . 3 Διάγραμμα υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για το α/φ B-747-100,SR,B,C,F**



**Σχήμα Π . 4 Διάγραμμα υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για το α/φ B-747-SP**

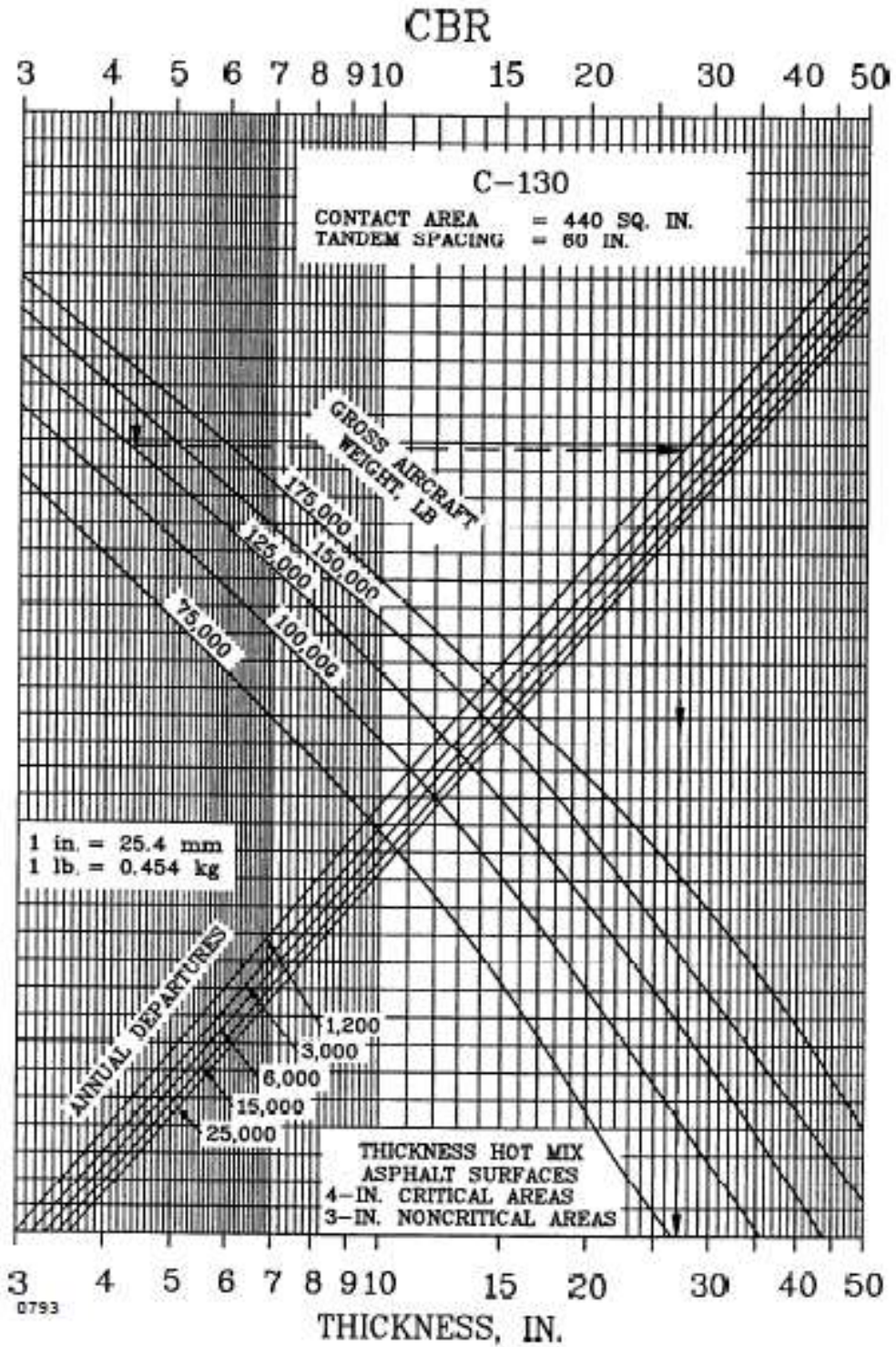


**Σχήμα Π . 5 Διάγραμμα υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για το α/φ B-757**



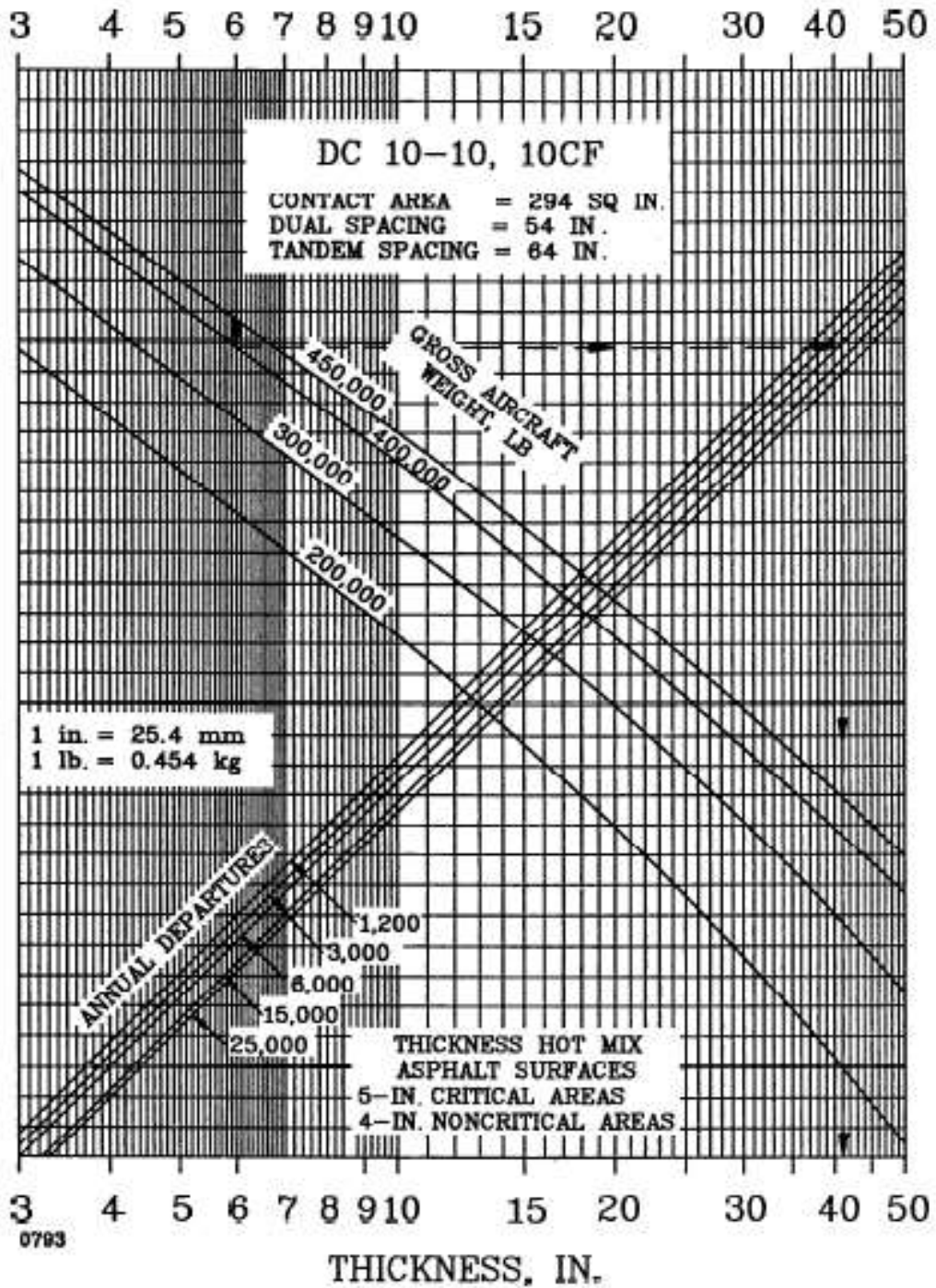
**Σχήμα Π . 6 Διάγραμμα υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για το α/φ B-767**





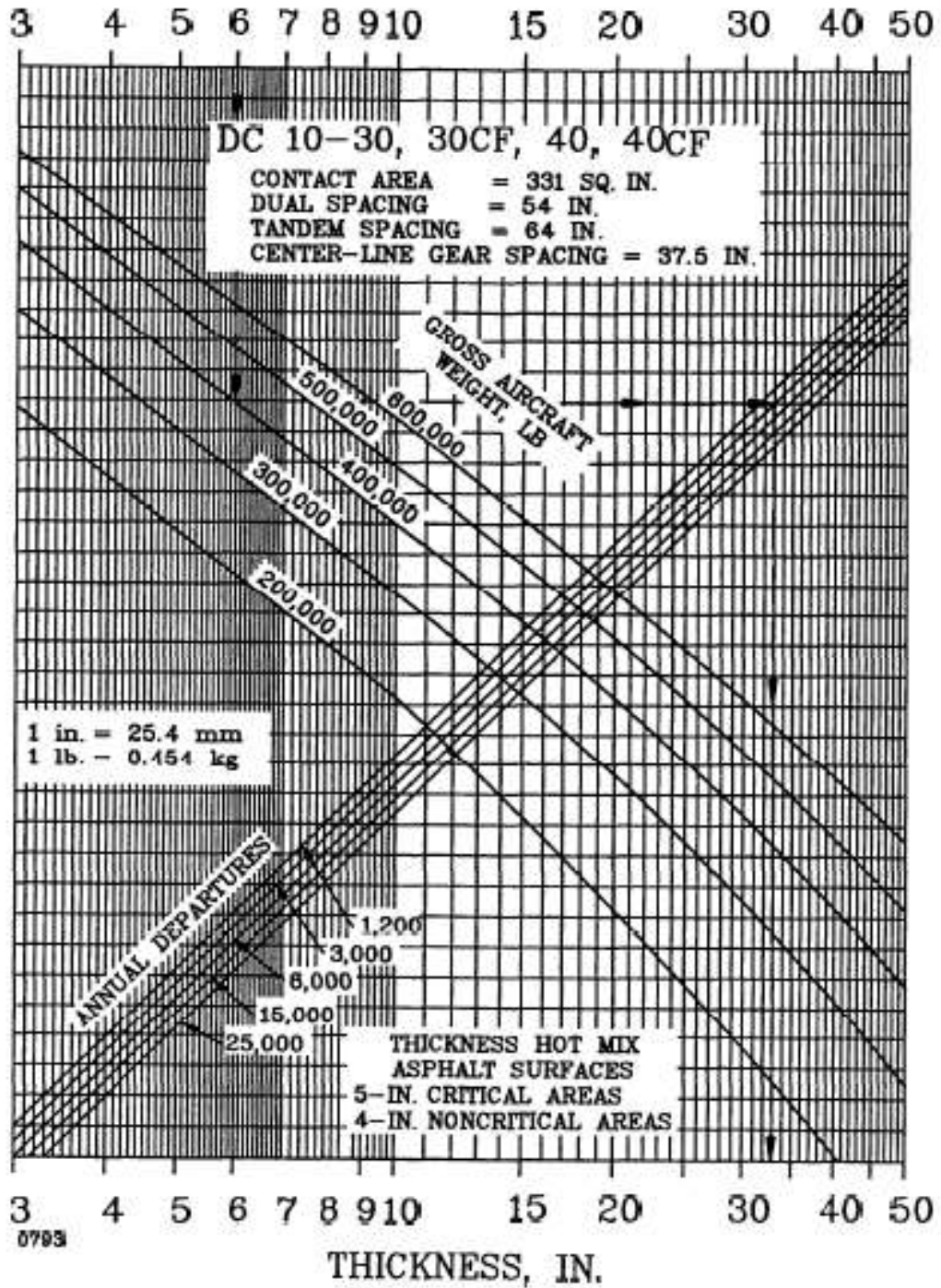
**Σχήμα Π . 7 Διάγραμμα υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για το α/φ C-130**

# CBR

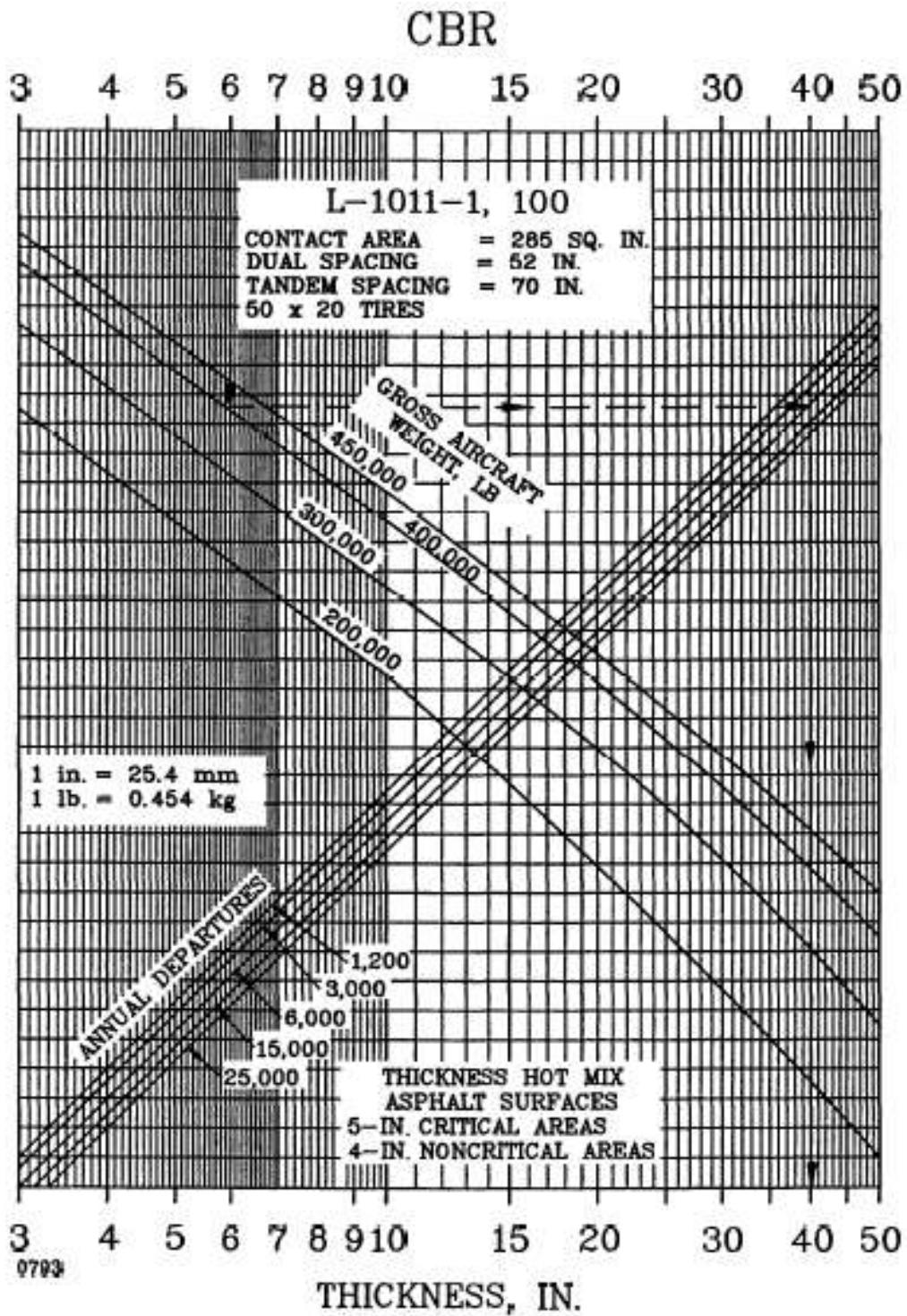


Σχήμα Π . 8 Διάγραμμα υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για το α/φ DC 10-10,10CF

# CBR

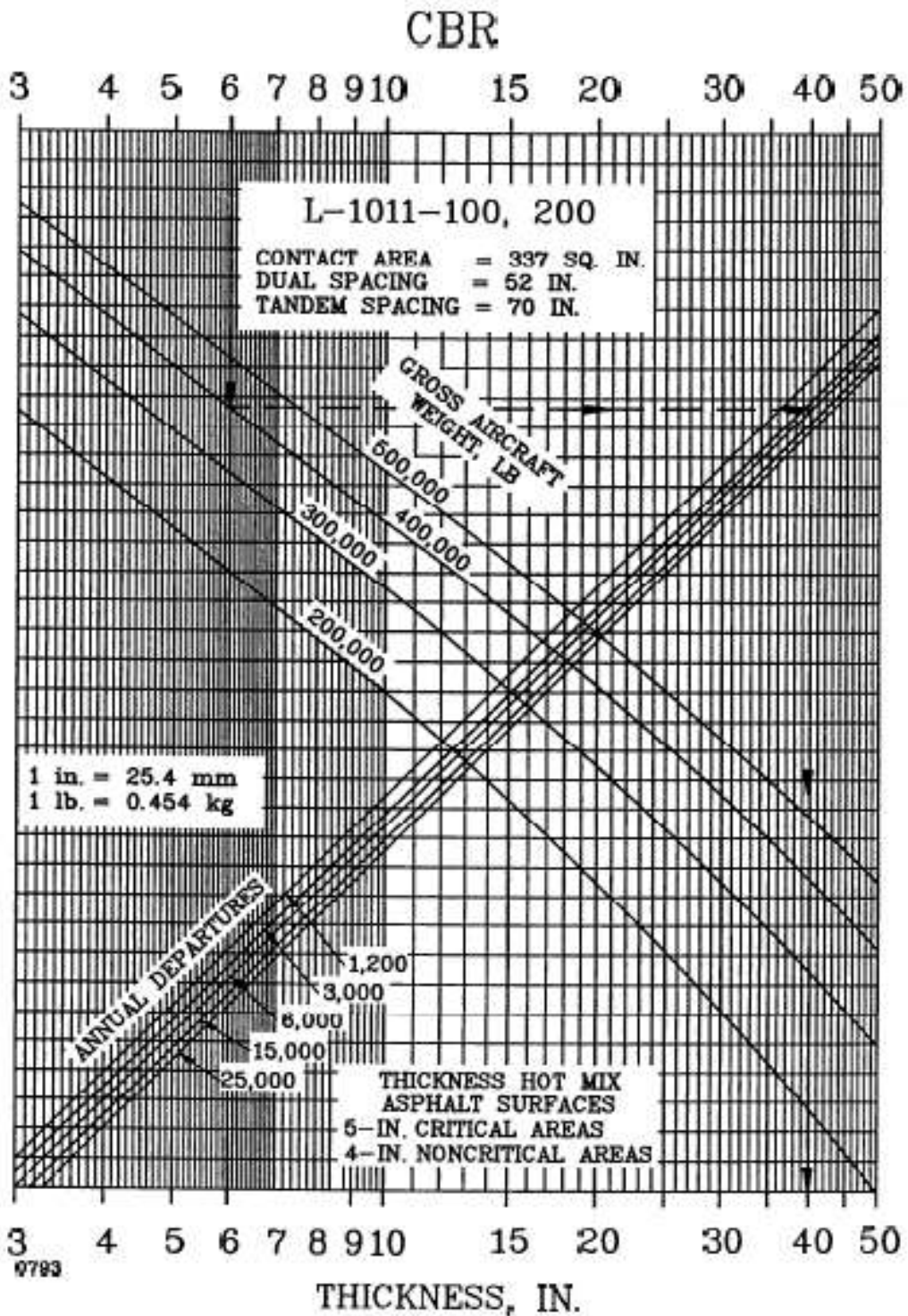


Σχήμα Π . 9 Διάγραμμα υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για το α/φ DC 10-30,30CF,40,40CF



**Σχήμα Π . 10 Διάγραμμα υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για το α/φ L-1011-1,100**





**Σχήμα Π . 11 Διάγραμμα υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για το α/φ L-1011, -100,200**

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

## Αποτελέσματα υπολογισμών:

α) Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας ασφαλτομίγματος στο δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης

Πίνακας Π . 1

Νόμος κόπωσης	Μέτρο ελαστικότητας ασφαλτομίγματος (MPa)				
	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000
	HMA CDF	HMA CDF	HMA CDF	HMA CDF	HMA CDF
Asphalt Institute	0,67	0,59	0,51	0,44	0,39
Shell	2,43	2,52	2,42	2,25	2,06
Illinois Department of Transportation	1,56	1,11	0,82	0,63	0,49
Transport and Road Research Laboratory	1,68	1,03	0,67	0,45	0,32
Heukelom and Klomp	3,19	3,90	4,28	4,46	4,51

Πίνακας Π . 2

Νόμος κόπωσης	Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις				
	0,000428874	0,000382919	0,000346441	0,000316936	0,000292582
	Καλύψεις- Διελεύσεις	Καλύψεις- Διελεύσεις	Καλύψεις- Διελεύσεις	Καλύψεις- Διελεύσεις	Καλύψεις- Διελεύσεις
<b>Asphalt Institute</b>	251695	220684	192384	167434	147514
<b>Shell</b>	48090	43988	40852	39233	40787
<b>Illinois Department of Transportation</b>	199631	157057	120250	89054	63385
<b>Transport and Road Research Laboratory</b>	306139	216726	147540	95739	58674
<b>Heukelom and Klomp</b>	21940	22183	23108	25388	31072

**β) Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας ασφαλτομίγματος στο δείκτη φθοράς της ασφαλτικής στρώσης**

**Πίνακας Π . 3**

Νόμος κόπωσης	Μέτρο ελαστικότητας ασύνδετου υλικού (MPa)				
	400	500	600	700	800
	HMA CDF	HMA CDF	HMA CDF	HMA CDF	HMA CDF
<b>Asphalt Institute</b>	0,71	0,40	0,24	0,15	0,09
<b>Shell</b>	1,34	0,51	0,21	0,09	0,04
<b>Illinois Department of Transportation</b>	3,01	1,82	1,14	0,74	0,48
<b>Transport and Road Research Laboratory</b>	4,34	2,10	1,07	0,57	0,31
<b>Heukelom and Klomp</b>	1,20	0,52	0,23	0,11	0,05



Πίνακας Π . 4

Νόμος κόπωσης	Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις				
	0,000290771	0,000334215	0,000386674	0,000451406	0,000533668
	HMA CDF	HMA CDF	HMA CDF	HMA CDF	HMA CDF
<b>Asphalt Institute</b>	0,09	0,15	0,24	0,40	0,71
<b>Shell</b>	0,042	0,09	0,21	0,51	1,34
<b>Illinois Department of Transportation</b>	0,48	0,74	1,14	1,82	3,01
<b>Transport and Road Research Laboratory</b>	0,31	0,57	1,07	2,10	4,34
<b>Heukelom and Klomp</b>	0,057	0,11	0,23	0,520	1,20