



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΪΑΣ

# Διερεύνηση βασικών αρχών διεθνών μεθοδολογιών διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ - ΦΙΛΙΠΠΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΠΛΑΤΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ, Επικ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

# Ευχαριστίες

Έχοντας ολοκληρώσει την διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια μου, κ. Χριστίνα Πλατή, Επικ. Καθηγήτρια ΕΜΠ, για την ανάθεση, την επίβλεψη, την καθοδήγηση και την εξαιρετική συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ταυτόχρονα, οφείλω να ευχαριστήσω την κ. Αγγελική Αρμένη, Υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ, για την συνεισφορά και την πάντα πρόθυμη βοήθεια της για επίλυση α-ποριών. Η συμβολή της ήταν πολύτιμη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους, όπως τους φίλους μου, Γιώργο και Τόλη, για την ανιδιοτελή υποστήριξη που μου παρείχαν σε δύσκο-λες περιόδους, καθώς και τα αδέρφια μου, Πάνο και Χρήστο, για την καθοδήγηση και τις έμπειρες συμβουλές τους. Κυρίως όμως, οφείλω να ευχαριστήσω τη μητέρα μου, Φωτεινή, που βρισκόταν δίπλα μου σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου και με αυτοθυσίες της με στήριξε έμπρακτα με κάθε δυνατό τρόπο.

## Περίληψη

Ο σχεδιασμός ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, ένα από τα βασικά αντικείμενα ενασχόλησης του πολιτικού μηχανικού, είναι ένας τομέας για τον οποίο έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι. Στο πλαίσιο αυτό, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συγκριτική διερεύνηση των μεθόδων σχεδιασμού ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων του Engineer Research & Development Center (ERDC) και της Federal Aviation Administration (FAA). Για την υλοποίηση του υπόψη στόχου, σε πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε καταγραφή, διερεύνηση και σύγκριση των βασικών αρχών των μεθόδων. Σε δεύτερο στάδιο, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές υπολογισμού διατομών ευκάμπτου οδοστρώματος με κάθε μέθοδο προς σύγκριση και σχολιασμό των αποτελεσμάτων. Η εργασία ολοκληρώνεται με σχετικά συμπεράσματα, αλλά και με σκέψεις για περαιτέρω έρευνα.

Λέξεις κλειδιά: εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων, σχεδιασμός ευκάμπτων οδοστρωμάτων, σύγκριση μεθόδων σχεδιασμού, συντελεστής αθροιστικής φθοράς, νομοί αστοχίας, FAARFIELD, PCASE

## Abstract

The design of flexible airfield pavements, one of the key objectives of the civil engineer, is an area for which several design methods have been developed. In this context, the aim of this diploma thesis is the comparative investigation of the design methods for flexible airfield pavements of Engineer Research & Development Center (ERDC) and Federal Aviation Administration (FAA). For this purpose, a first step was to record, investigate and compare the basic principles of the methods. In a second step, design of pavement cross section of each method was performed to compare and comment on their results. The thesis concludes with relevant conclusions and thoughts for further research.

Key words: flexible airfield pavements, flexible pavement design, design method comparison, cumulative damage factor, strain criteria, FAARFIELD, PCase

# Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος Πινάκων .....	6
Κατάλογος Εικόνων.....	7
1 Εισαγωγή.....	10
1.1 Αντικείμενο της έρευνας .....	10
1.2 Στόχος της έρευνας και μεθοδολογία.....	11
1.3 Δομή της εργασίας .....	11
2 Η μέθοδος της FAA .....	12
2.1 Γενικά.....	12
2.2 Η αναλυτική μέθοδος της FAA .....	12
2.2.1 Βασικές αρχές.....	12
2.2.2 Κριτήρια σχεδιασμού.....	19
2.3 Τυπικά υλικά .....	20
2.4 Ελάχιστες τιμές παχών .....	22
3 Οι μέθοδοι του ERDC .....	23
3.1 Εισαγωγή.....	23
3.2 Η Μέθοδος CBR.....	23
3.2.1 Βασικές αρχές.....	23
3.2.2 Διαδικασία σχεδιασμού .....	29
3.3 Η Μέθοδος LED .....	31
3.3.1 Βασικές αρχές.....	32
3.3.2 Κριτήρια σχεδιασμού.....	34
3.4 Τυπικά υλικά .....	36
3.5 Ελάχιστες τιμές παχών .....	37
4 Σύγκριση μεθόδων .....	41
4.1 Εισαγωγή.....	41
4.2 Σύγκριση βασικών αρχών.....	41
4.2.1 Σύγκριση βασικών αρχών μεταξύ των μεθόδων CBR και LED του ERDC	41

4.2.2	Σύγκριση βασικών αρχών μεταξύ των μεθόδων LED του ERDC και αναλυτικής μεθόδου της FAA.....	42
5	Υπολογισμός διατομών.....	47
5.1	Γενικά στοιχεία .....	47
5.2	Σχεδιασμός με τα τυπικά υλικά του ERDC.....	47
5.2.1	Σχεδιασμός με τη μέθοδο CBR .....	48
5.2.2	Σχεδιασμός με τη μέθοδο LED .....	49
5.3	Σχεδιασμός με τα τυπικά υλικά της FAA .....	52
5.4	Σχεδιασμός με ίδια υλικά .....	55
6	Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	69
7	Βιβλιογραφία .....	71
	Παράρτημα .....	73

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Τιμές του συντελεστή CDF .....	14
Πίνακας 2.2 Τυπικά υλικά της FAA.....	21
Πίνακας 3.1 Πίνακας με συντελεστές ισοδυναμίας μετατροπής από ασύνδετο υλικό σε σταθεροποιημένο για οδοστρώματα του στρατού και της πολεμικής αεροπορίας (ERDC 2001).....	30
Πίνακας 3.2 Πίνακας με συντελεστές ισοδυναμίας μετατροπής από ασύνδετο υλικό σε σταθεροποιημένο για οδοστρώματα πολεμικού ναυτικού (ERDC 2001) .....	30
Πίνακας 3.3 Λόγος Poisson των υλικών (ERDC 2001).....	37
Πίνακας 3.4 Λόγος Poisson σταθεροποιημένων υλικών .....	37
Πίνακας 3.5 Ελάχιστο πάχος επιφανειακής στρώσης και βάσης από αμμοχάλικο για εύκαμπτο οδόστρωμα στρατιωτικού αεροδρομίου σε ίντσες (ERDC 2001) .....	38
Πίνακας 3.6 Ελάχιστο πάχος επιφανειακής στρώσης και βάσης από αμμοχάλικο για εύκαμπτο οδόστρωμα πολεμικού ναυτικού (ERDC 2001).....	39
Πίνακας 3.7 Ελάχιστο πάχος επιφανειακής στρώσης και βάσης από αμμοχάλικο για εύκαμπτο οδόστρωμα πολεμικής αεροπορίας σε ίντσες (ERDC 2001).....	39
Πίνακας 5.1 Μοντέλο κυκλοφορίας που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές .....	47
Πίνακας 5.2 Κυκλοφορία σχεδιασμού NAVY-II για τον υπολογισμό των διατομών	57
Πίνακας 5.3 Υλικά FAA και μέτρα ελαστικότητας για τον υπολογισμό των διατομών .....	57
Πίνακας 5.4 Δείκτες CBR των υλικών του ERDC για τον υπολογισμό των διατομών .....	57
Πίνακας 5.5 Μέτρα ελαστικότητας των υλικών της FAA για τον υπολογισμό των διατομών .....	64
Πίνακας 5.6 Μέτρα ελαστικότητας και δείκτες CBR των υλικών του ERDC για τον υπολογισμό των διατομών .....	65

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 Αρχή δείκτη αθροιστικής φθοράς .....	13
Εικόνα 2.2 Συντελεστές αθροιστικής φθοράς στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και στην κορυφή της στρώσης έδρασης. ....	14
Εικόνα 2.3 Ενεργά πλάτη δύο τροχών χωρίς επικάλυψη .....	16
Εικόνα 2.4 Ενεργό πλάτος τροχών με επικάλυψη .....	16
Εικόνα 2.5 Κρίσιμες θέσεις διατομής με σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση .....	17
Εικόνα 2.6 Υπολογισμός αθροιστικής φθοράς σε στρώση έδρασης οδοστρώματος .....	18
Εικόνα 2.7 Ενδεικτικό σύστημα τροχών προσγείωσης αεροσκάφους. ....	19
Εικόνα 3.1 Τυπική κάτοψη περιοχών κυκλοφορίας αεροδρομίου πολεμικής αεροπορίας .....	25
Εικόνα 3.2 Διατομή οδοστρώματος .....	26
Εικόνα 3.3 Ενδεικτικό νομογράφημα μεθόδου CBR του ERDC .....	27
Εικόνα 3.4 Ενδεικτικό νομογράφημα μεθόδου CBR του ERDC .....	28
Εικόνα 3.5 Ενεργό πλάτος μονού τροχού χωρίς επικάλυψη .....	33
Εικόνα 3.6 Ενεργό πλάτος δίδυμων τροχών με επικάλυψη.....	34
Εικόνα 3.7 Διάγραμμα σχέσης επιτρεπόμενων διελεύσεων και κατακόρυφης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης .....	35
Εικόνα 4.1 Σύγκριση θεωρίας ελαστικών στρώσεων - Μέθοδος CBR.....	42
Εικόνα 4.2 Συντελεστές αθροιστικής φθοράς στη στρώσης έδρασης και στην ασφαλτική στρώση .....	44
Εικόνα 4.3 ERDC: Περίπτωση που καθοριστικό κριτήριο είναι ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων.....	45
Εικόνα 4.4 FAA: Καθοριστικό κριτήριο είναι ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης .....	46
Εικόνα 5.1 Υπολογισμός διατομής .....	48
Εικόνα 5.2 Υπολογισμός διατομής .....	49
Εικόνα 5.3 Υπολογισμός διατομής .....	50
Εικόνα 5.4 Συντελεστες CDF διατομής .....	50



Εικόνα 5.5 Υπολογισμός διατομής .....	51
Εικόνα 5.6 Συντελεστές CDF διατομής .....	51
Εικόνα 5.7 Στιγμιότυπο του προγράμματος PCase του ERDC .....	52
Εικόνα 5.8 Υπολογισμός διατομής .....	53
Εικόνα 5.9 Συντελεστές CDF διατομής .....	53
Εικόνα 5.10 Στιγμιότυπο του προγράμματος FAARFIELD της FAA.....	54
Εικόνα 5.11 Σύγκριση σχεδιασμού με τυπικά υλικά .....	54
Εικόνα 5.12 Υπολογισμός διατομής της αναλυτικής μεθόδου της FAA.....	58
Εικόνα 5.13 Συντελεστές αθροιστικής φθοράς CDF της αναλυτικής μεθόδου της FAA .....	58
Εικόνα 5.14 Υπολογισμός διατομής της μεθόδου LED του ERDC.....	59
Εικόνα 5.15 Συντελεστές αθροιστικής φθοράς CDF της μεθόδου LED του ERDC .	59
Εικόνα 5.16 Υπολογισμός διατομής της μεθόδου CBR του ERDC .....	60
Εικόνα 5.17 Σύγκριση διατομών .....	61
Εικόνα 5.18 Διάγραμμα σχέσης επιτρεπόμενων διελεύσεων και κατακόρυφης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης σύμφωνα με το νόμο αστοχίας της στρώσης έδρασης του ERDC .....	62
Εικόνα 5.19 Διάγραμμα σχέσης επιτρεπόμενων διελεύσεων και κατακόρυφης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης σύμφωνα με το νόμο αστοχίας της στρώσης έδρασης της FAA.....	62
Εικόνα 5.20 Σύγκριση διαγραμμάτων σχέσης επιτρεπόμενων διελεύσεων και κατακόρυφης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης της FAA και του ERDC .....	63
Εικόνα 5.21 Σύγκριση καμπυλών σχέσης επιτρεπόμενων διελεύσεων και κατακόρυφης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης μεταξύ της FAA και του ERDC.....	64
Εικόνα 5.22 Υπολογισμός διατομής της αναλυτικής μεθόδου της FAA.....	65
Εικόνα 5.23 Συντελεστές αθροιστικής φθοράς CDF της αναλυτικής μεθόδου της FAA .....	66
Εικόνα 5.24 Υπολογισμός διατομής της μεθόδου LED του ERDC.....	66
Εικόνα 5.25 Συντελεστές αθροιστικής φθοράς CDF της μεθόδου LED του ERDC .	67
Εικόνα 5.26 Υπολογισμός διατομής της μεθόδου CBR του ERDC .....	67
Εικόνα 5.27 Σύγκριση διατομών .....	68

Εικόνα Π-1 Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος για αεροδρόμια Army Class III.....	74
Εικόνα Π-2 Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος για αεροδρόμια Army Class IV (C-17) με μήκος διαδρόμου >1525m, περιοχή κυκλοφορίας Α .....	75
Εικόνα Π-3 Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος για αεροσκάφος πολεμικού ναυτικού μονού τροχού, περιοχές κυκλοφορίας Α και Β..	76
Εικόνα Π-4 Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου πολεμικής αεροπορίας κυκλοφορίας τροποποιημένου βαρέος φορτίου.....	77
Εικόνα Π-5 Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου πολεμικής αεροπορίας, αεροσκάφους C-17 για ζώνη βραχείας προσγείωσης.....	78
Εικόνα Π-6 Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου πολεμικής αεροπορίας για αεροσκάφος F-15, περιοχής κυκλοφορίας Α.....	79

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο της έρευνας

Στη σύγχρονη εποχή ο τομέας των αερομεταφορών γνωρίζει μεγάλη ανάπτυξη τόσο μέσω της μεταφοράς εμπορευμάτων και επιβατών, όσο και μέσω των στρατιωτικών επιχειρήσεων που λαμβάνουν χώρα σε όλο τον κόσμο. Η σοβαρότητα και η επικινδυνότητα των αερομεταφορών δεν επιτρέπουν περιθώρια λάθους. Για τη διασφάλιση της άρτιας λειτουργίας των αερομεταφορών πρέπει να εξασφαλιστεί η ποιότητα των βασικών υποδομών των αεροδρομίων, όπως είναι το οδόστρωμα πάνω στο οποίο κινούνται τα αεροσκάφη. Ένα αεροσκάφος, στην πορεία που ακολουθεί μέσα στο χώρο του αεροδρομίου διέρχεται από διάφορους τύπους οδοστρωμάτων, εύκαμπτα και δύσκαμπτα, όπως το διάδρομο προσγείωσης-απογείωσης, το διάδρομο τροχοδρόμησης αλλά και τα δάπεδα στάθμευσης. Έτσι λοιπόν, είναι απαραίτητος ο σωστός σχεδιασμός και η αξιολόγηση των διαφόρων τύπων οδοστρωμάτων του αεροδρομίου, ώστε το οδόστρωμα που θα κατασκευασθεί να μπορεί να φέρει τα φόρτια των αεροσκαφών που πρόκειται να δεχθεί.

Ο όρος «σχεδιασμός οδοστρώματος αεροδρομίου» περιλαμβάνει την επιλογή των κατάλληλων υλικών των στρώσεων από τις οποίες αποτελείται το οδόστρωμα καθώς και τον προσδιορισμό του πάχους των επιμέρους στρώσεων (διαστασιολόγηση οδοστρώματος). Αξίζει δε να σημειωθεί ότι με το πέρασ των χρόνων, έχουν αναπτυχθεί ανά τον κόσμο πολλές και διαφορετικές μεθοδολογίες σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Ανάμεσα σε αυτές είναι η μέθοδος της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αεροπορίας FAA (Federal Aviation Administration) (FAA, 2009) (FAA, 1995), του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (STBA: Service Technique des Bases Aériennes) (STBA, 2001), της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μεγάλης Βρετανίας (Directorate of Civil Engineering Services) (DCES, 1989), του Κέντρου Ανάπτυξης και Έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (ERDC: Engineer Research and Development Center) (ERDC, 2001), του Ινστιτούτου Ασφάλτου (Asphalt Institute) που εφαρμόζεται μόνο σε ασφαλτικά οδοστρώματα και άλλες. Η παρούσα εργασία εστιάζει στις μεθόδους της FAA και του ERDC, των οποίων οι βασικές αρχές αποτελούν το κύριο αντικείμενο διερεύνησης.

## 1.2 Στόχος της έρευνας και μεθοδολογία

Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η συγκριτική διερεύνηση των μεθόδων σχεδιασμού ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA αναλυτικών υπολογισμών και του ERDC. Για την επίτευξη του στόχου, η μεθοδολογία που ακολουθείται περιγράφεται από δύο στάδια: τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και τον υπολογισμό διατομών. Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αναδεικνύονται οι βασικές αρχές των μεθόδων και προσδιορίζονται οι ομοιότητες και διαφορές τους. Εν συνεχεία, αξιοποιώντας τα χαρακτηριστικά των υπό διερεύνηση μεθόδων, πραγματοποιούνται διάφοροι υπολογισμοί διατομών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία, με κατάλληλο σχολιασμό.

## 1.3 Δομή της εργασίας

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος, αποτελείται από επτά κεφάλαια. Συνοπτικά:

Στο κεφάλαιο 2 αναδεικνύονται οι βασικές αρχές της μεθόδου της FAA που αφορούν στον σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων και περιγράφονται τα τυπικά υλικά της.

Στο κεφάλαιο 3 αναδεικνύονται οι βασικές αρχές των μεθόδων του ERDC που αφορούν στον σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων και περιγράφονται τα τυπικά υλικά τους.

Στο κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται η σύγκριση των βασικών αρχών των μεθόδων.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται ο υπολογισμός της διατομής οδοστρώματος που προκύπτει από κάθε μέθοδο για κοινή κυκλοφορία.

Στο κεφάλαιο 6 περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα της έρευνας, καθώς και σκέψεις για μελλοντική έρευνα.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας περιλαμβάνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε, κατά τη διάρκεια της διερεύνησης.

## 2 Η μέθοδος της FAA

### 2.1 Γενικά

Η FAA είναι η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας των ΗΠΑ. Στη δικαιοδοσία της περιλαμβάνεται η ρύθμιση και η εποπτεία παντός θέματος της πολιτικής αεροπορίας, εντός του εθνικού εναέριου χώρου, εκδίδοντας αεροπορικούς κανονισμούς και προβαίνοντας σε ελέγχους. Οι ρυθμίσεις που αναλαμβάνει η FAA αφορούν στην κατασκευή και στην λειτουργία αερολιμένων, στη διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας, στην πιστοποίηση του προσωπικού και των αεροσκαφών. Η αρχική μορφή της μεθόδου διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA δημοσιεύτηκε το 1958. Το 1995 εκδόθηκε η εμπειρική μέθοδος της FAA, η οποία δημιουργήθηκε μέσα από παρατηρήσεις και αναλύσεις της μετάδοσης των φορτίων (FAA, 1995). Η εμπειρική μέθοδος για τον σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων βασίζεται στη χρήση διαγραμμάτων. Στα επόμενα χρόνια, καθώς υπήρξαν νέα δεδομένα τόσο στον τομέα της ανάλυσης και του σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων, όσο και της κατασκευής νέων τύπων αεροσκαφών, συμβαδίζοντας με τις εξελίξεις στον τομέα των αεροσκαφών με τα νέα συστήματα προσγείωσης, η FAA ανέπτυξε το 2009 μία νέα αναλυτική μέθοδο η οποία βασίζεται στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων Layered Elastic Design (LED) και εξελίσσεται μέχρι και σήμερα (FAA, 2009).

### 2.2 Αναλυτική μέθοδος της FAA

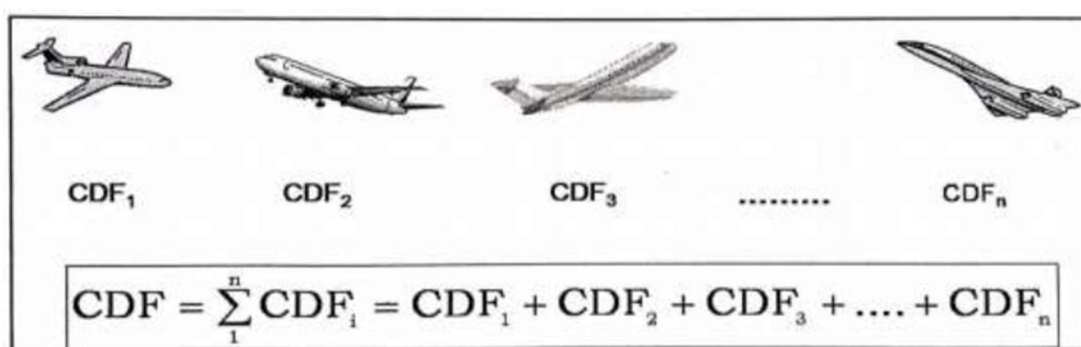
#### 2.2.1 Βασικές αρχές

Η αναλυτική μέθοδος της FAA βασίζεται στην θεωρία των ελαστικών στρώσεων για τον σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων. Η θεωρία των ελαστικών στρώσεων μπορεί να αντιμετωπίσει πολύπλοκα συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών (Berger, 2001). Μέσω της θεωρίας αυτής υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που εμφανίζονται στις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος υπό την επιβολή φορτίων και βασίζεται στις εξής παραδοχές (Λοΐζος & Πλατή, 2015):

- Τα υλικά των στρώσεων θεωρούνται ομοιογενή, ισότροπα και ελαστικά.

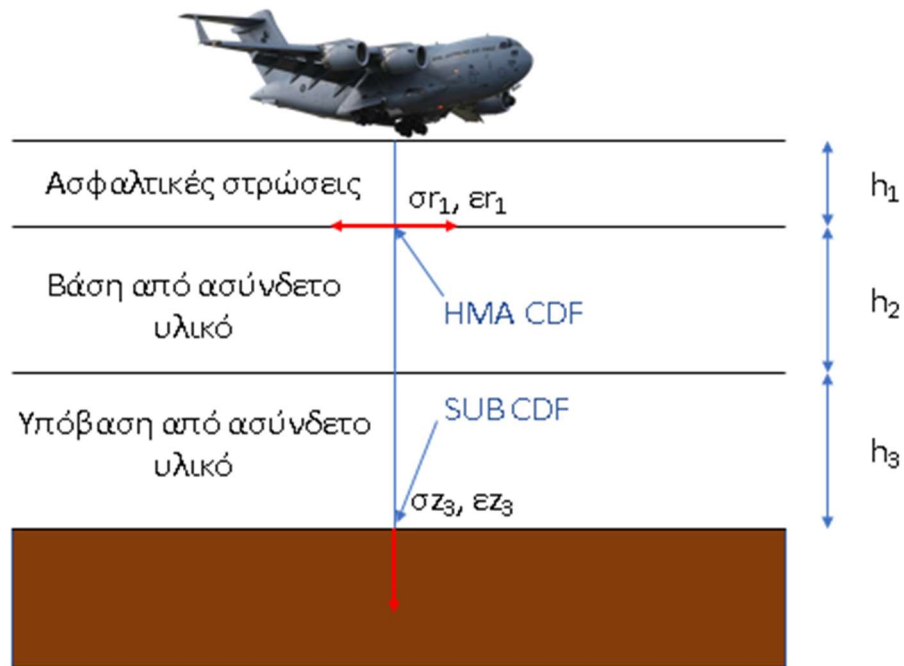
- Η επιφανειακή στρώση θεωρείται ότι εκτείνεται πλευρικά μέχρι το άπειρο ενώ το βάθος της είναι πεπερασμένο.
- Η υποκείμενη στρώση εκτείνεται μέχρι το άπειρο.

Στο σχεδιασμό λαμβάνεται υπόψη η αθροιστική φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη που δέχεται το οδόστρωμα και εκφράζεται μέσω του δείκτη CDF (Cumulative Damage Factor). Ο συντελεστής φθοράς CDF ορίζεται ως ο λόγος  $n/N$ , όπου  $n$  ο αριθμός των προβλεπόμενων διελεύσεων και  $N$  ο αριθμός των επιτρεπόμενων διελεύσεων. Ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς CDF (Cumulative Damage Factor) είναι το σύνολο των επιμέρους δεικτών φθοράς όλων των αεροσκαφών (βλ. Εικόνα 2.1).



*Εικόνα 2.1 Αρχή δείκτη αθροιστικής φθοράς*

Ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς υπολογίζεται στις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος. Οι κρίσιμες θέσεις σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα είναι ο πυθμένας των ασφαλικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Τα αντίστοιχα κρίσιμα εντατικά μεγέθη είναι η ορίζοντια εφελκυστική παραμόρφωση για αστοχία λόγω κόπωσης του ασφαλομίγματος και η κατακόρυφη παραμόρφωση για αστοχία λόγω παραμενουσών παραμορφώσεων. Επομένως, υπολογίζεται ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης και ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς στον πυθμένα του ασφαλομίγματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2.



**Εικόνα 2.2** Συντελεστές αθροιστικής φθοράς στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και στην κορυφή της στρώσης έδρασης.

Ο συντελεστής CDF έχει αναπτυχθεί σε αντιστοιχία με την θεωρία Miner που ισχύει για τα οδοστρώματα των οδών. Για να μην αστοχήσει κάποια από τις κρίσιμες θέσεις θα πρέπει ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς της θέσης αυτής να είναι μικρότερος από τη μονάδα. Όταν ο συντελεστής CDF γίνει ίσος με τη μονάδα σημαίνει ότι το οδόστρωμα έχει ολοκληρώσει τη διάρκεια ζωής του, ενώ όσο είναι μικρότερος της μονάδας σημαίνει ότι έχει εναπομένουσα διάρκεια ζωής (βλ. Πίνακας 2.1).

**Πίνακας 2.1** Τιμές του συντελεστή CDF

CDF	Εναπομένουσα διάρκεια ζωής του οδοστρώματος
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.

Καθοριστικό κριτήριο στο σχεδιασμό του οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο της FAA είναι ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης. Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή φθοράς κάθε αεροσκάφους ξεχωριστά φαίνεται στην Εξίσωση 2.1:

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

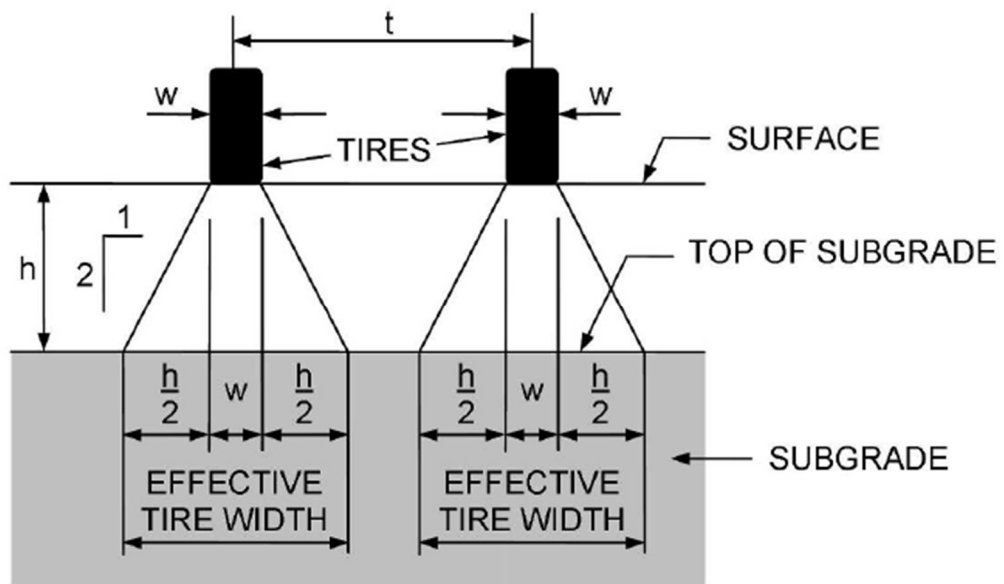
$$CDF = \frac{(\text{ετήσιες απογειώσεις αεροσκάφους}) \times (\text{περίοδος σχεδιασμού σε έτη})}{(\text{λόγος } P/C) \times (\text{καλύψεις-διελεύσεις ως την αστοχία})} \quad (2.1)$$

Όπου,

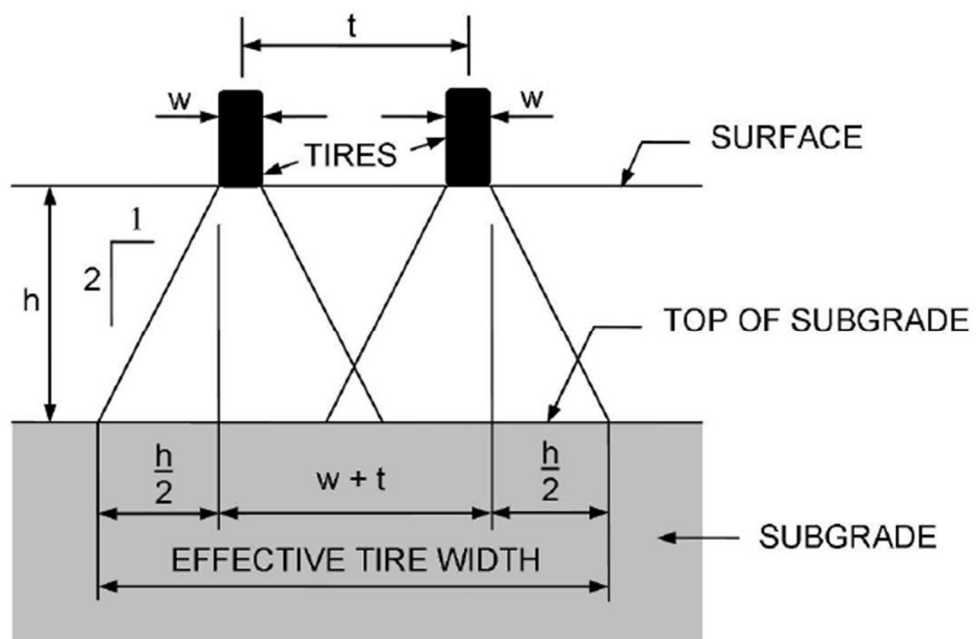
- *Ετήσιες απογειώσεις* = οι προβλεπόμενες διελεύσεις του αεροσκάφους.
- *Περίοδος σχεδιασμού σε έτη* = η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής, συνήθως 20 έτη
- *Καλύψεις - διελεύσεις ως την αστοχία*: Οι καλύψεις - διελεύσεις έχουν την έννοια των διελεύσεων πλήρους φόρτισης. Υπολογίζονται μέσω του νόμου κόπωσης της ασφαλικής στρώσης ή μέσω του νόμου αστοχίας της στρώσης έδρασης. Αυτοί οι νόμοι αναλύονται στο επόμενο υποκεφάλαιο.
- *Λόγος P/C*: Είναι ο λόγος διελεύσεων προς τις καλύψεις - διελεύσεις. Καθώς ένα αεροσκάφος κινείται πάνω σε ένα οδόστρωμα, είναι αδύνατον να κινηθεί σε εντελώς ευθεία γραμμή ή να ακολουθήσει ακριβώς την ίδια διαδρομή με τις προηγούμενες διελεύσεις του. Αυτού του είδους η απόκλιση περιγράφεται από τον όρο «περιπλάνηση του αεροσκάφους».

Μπορεί να χρειαστούν αρκετές διελεύσεις ώστε ένα οδόστρωμα να δεχθεί την πλήρη φόρτιση μιας κάλυψης-διέλευσης. Παρόλο που είναι εύκολο να μετρηθούν οι διελεύσεις ενός αεροσκάφους, ο αριθμός των καλύψεων διελεύσεων βασίζεται στον καθορισμένο λόγο *P/C* για κάθε αεροσκάφος. Για τον υπολογισμό του λόγου *P/C* η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την έννοια του ενεργού πλάτους του ελαστικού. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα για τον υπολογισμό της αστοχίας της στρώσης έδραση, το ενεργό πλάτος του ελαστικού ορίζεται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Οι γραμμές απόκρισης σχεδιάζονται με κλίση 1:2 από τα άκρα της περιοχής επαφής των ελαστικών μέχρι την επιφάνεια της στρώσης έδρασης όπως φαίνεται στις Εικόνες 2.3 & 2.4 . Τα ελαστικά θεωρούνται είτε ξεχωριστά είτε σε συνδυασμό ανάλογα με το εάν οι γραμμές απόκρισης επικαλύπτονται ή όχι. Όλα τα ενεργά πλάτη των ελαστικών και οι υπολογισμοί για τον λόγο *P/C* πραγματοποιούνται μέσω του λογισμικού που διαθέτει η FAA, το FAARFIELD (FAA, 2009).





*Εικόνα 2.3* Ενεργά πλάτη δύο τροχών χωρίς επικάλυψη



*Εικόνα 2.4* Ενεργό πλάτος τροχών με επικάλυψη

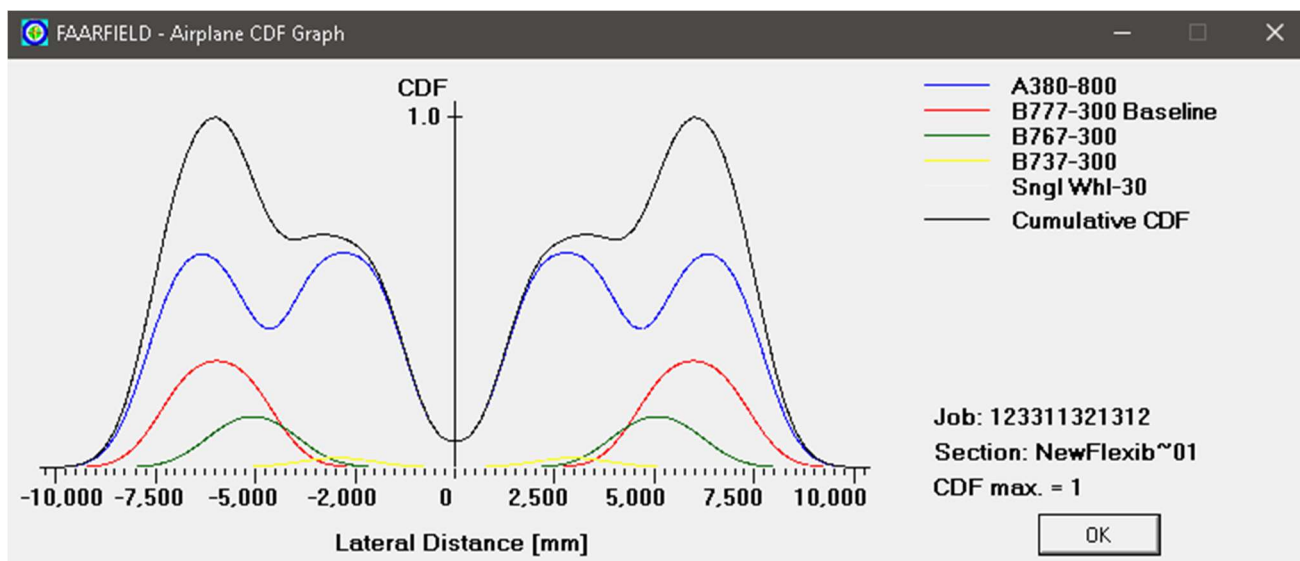
Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που έχει χρησιμοποιηθεί σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση, οι κρίσιμες θέσεις μετατοπίζονται στην επιφάνεια

νεια της στρώσης έδρασης και στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης. Επομένως, ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς υπολογίζεται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης και στον πυθμένα της σταθεροποιημένης με ασφαλτικό υλικό βάσης (βλ. Εικόνα 2.5).



**Εικόνα 2.5** Κρίσιμες θέσεις διατομής με σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση

Σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο της FAA, ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς υπολογίζεται κατά το πλάτος του οδοστρώματος σε λωρίδες πλάτους 254mm σε συνολικό πλάτος οδοστρώματος 20.828mm, δηλαδή 82 λωρίδες. Ο συντελεστής CDF 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 συντελεστή 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 υπόψη τη θέση των τροχών σε σχέση με τον κεντρικό άξονα του διαδρόμου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6. Συνεπώς, μια λωρίδα οδοστρώματος από την οποία διέρχεται το αεροσκάφος με τον μεγαλύτερο CDF, δεν είναι απαραίτητα η πιο κρίσιμη λωρίδα καθώς ενδέχεται, σε διαφορετικό σημείο του οδοστρώματος, ο συνδυασμός των CDF πολλών αεροσκαφών να επιφέρει μεγαλύτερη φθορά.

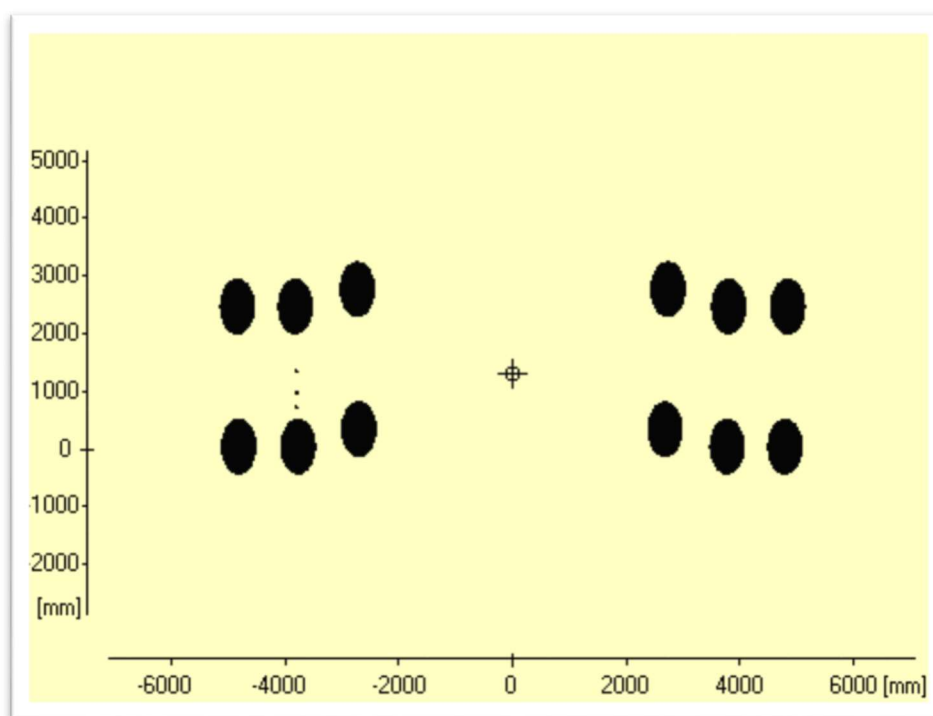


**Εικόνα 2.6** Υπολογισμός αθροιστικής φθοράς σε στρώση έδρασης οδοστρώματος

Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο της FAA, η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος γίνεται ώστε ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς CDF της στρώσης έδρασης να είναι ίσος με τη μονάδα.

Η διαδικασία υπολογισμού του πάχους της στρώσης βάσης από ασύνδετο υλικό αποτελείται από δύο βήματα:

1. Υπολογισμός του απαραίτητου πάχους της στρώσης βάσης από ασύνδετο υλικό με θεωρητικά υποκείμενη στρώση έδρασης, η οποία έχει δείκτη CBR ίσο με 20%.
2. Σύγκριση του πάχους που υπολογίστηκε με τις ελάχιστες απαιτήσεις πάχους που ορίζει η μέθοδος. Από αυτές τις δύο τιμές επιλέγεται η μεγαλύτερη.



*Εικόνα 2.7 Ενδεικτικό σύστημα τροχών προσγείωσης αεροσκάφους.*

Άλλη μια βασική αρχή της αναλυτικής μεθόδου της FAA είναι η δυνατότητα ανάλυσης του οδοστρώματος σύμφωνα με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους (βλ Εικόνα 2.7). Συγκεκριμένα, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση κάθε αεροσκάφους της κυκλοφορίας μέσω της φθοράς που προκαλεί στο οδόστρωμα (FAA, 2014).

## 2.2.2 Κριτήρια σχεδιασμού

Η αναλυτική μέθοδος της FAA για τον σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων έχει αναπτυχθεί με βάση τα κριτήρια σχεδιασμού έναντι κόπωσης για την ασφαλική στρώση και αστοχίας για τη στρώση έδρασης, από τα οποία και προκύπτει ο αριθμός των επιτρεπόμενων καλύψεων – διελεύσεων έως την αστοχία (FAA, 2004). Συγκεκριμένα, οι νόμοι που εφαρμόζονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου είναι οι εξής:

- 1) Νόμος κόπωσης ασφαλτομίγματος

$$\log(C) = 2,68 - 5 \times \log(\epsilon_h) - 2,665 \times \log(E_a) \quad (2.2)$$

Όπου,

C = οι επιτρεπόμενες καλύψεις - διελεύσεις ως την αστοχία

$\epsilon_h$  = η οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης

$E_a$  = το μέτρο ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος

## 2) Νόμος αστοχίας στρώσης έδρασης

$$C = \left( \frac{0,004}{\epsilon_v} \right)^{8,1} \quad C \leq 12.100 \quad (2.3)$$

$$C = \left( \frac{0,002428}{\epsilon_v} \right)^{14,21} \quad C > 12.100 \quad (2.4)$$

Όπου,

C = επιτρεπόμενες καλύψεις - διελεύσεις έως την αστοχία

$\epsilon_v$  = κατακόρυφη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης

## 2.3 Τυπικά υλικά

Τα υλικά με βάση τα οποία έχει αναπτυχθεί η μέθοδος για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων φαίνονται στον Πίνακα 2.2 (FAA, 2009).

Το τυπικό υλικό της FAA για την ασφαλτική στρώση είναι το P-401 με μέτρο ελαστικότητας 1380MPa. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι συντηρητικά επιλεγμένη και αντιστοιχεί σε θερμοκρασία ασφαλτομίγματος περίπου 32°C.

Για βάση από ασύνδετο υλικό, πρότυπο υλικό για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος θεωρείται το P-209 με μέτρο ελαστικότητας 518MPa. Η χρήση του υλικού P-208 ως βάση οδοστρώματος είναι αποκλειστικά για οδοστρώματα σχεδια-

σμένα για φορτία μέχρι 60.000lbs (27.216kgs) και του P-209 για οδοστρώματα σχεδιασμένα για φορτία μέχρι 100.000lbs. (45.340kgs). Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι, όταν στην κυκλοφορία υπάρχει αεροσκάφος με φορτίο μεγαλύτερο από 100.000lb. (45.340kgs) είναι απαραίτητη η χρήση σταθεροποιημένης με ασφαλτικό υλικό βάσης από το υλικό P-401 με μέτρο ελαστικότητας 2.760MPa (βλ. Πίνακα 2.2).

Για υπόβαση από ασύνδετο υλικό, το P-154 θεωρείται το πρότυπο υλικό με μέτρο ελαστικότητας 276MPa. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση είναι απαραίτητη η χρήση των υλικών P-209 ή P-208 ως υλικό ανώτερης ποιότητας για την στρώση υπόβασης. Επίσης, οποιοδήποτε υλικό κατάλληλο για στρώση βάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την στρώση της υπόβασης, αν ενδείκνυται από οικονομικούς και πρακτικούς λόγους.

Η στρώση έδρασης θεωρητικά έχει άπειρο βάθος και χαρακτηρίζεται είτε από το μέτρο ελαστικότητας, είτε από τον δείκτη CBR. Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης δίνεται από τον τύπο  $M_R=10.3 \times CBR$  (MPa).

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος, όταν πρόκειται για σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, θεωρεί τον λόγο Poisson όλων των υλικών ίσο με 0,35.

**Πίνακας 2.2** Τυπικά υλικά της FAA

	Υλικό	Στρώση	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)
P-401	Θερμό ασφαλτόμυγμα	Ασφαλτική στρώση	1.380
P-208	Ασύνδετο αμμοχάλικο	Στρώση βάσης	518
P-209	Θραυστό αμμοχάλικο	Στρώση βάσης	518
P-304	Υλικό σταθεροποιημένο με τσιμέντο	Στρώση βάσης	3.450
P-306	Υλικό σταθεροποιημένο με τσιμέντο	Στρώση βάσης	4.830
P-401	Θερμό ασφαλτόμυγμα	Στρώση βάσης	2.760
P-403	Θερμό ασφαλτόμυγμα	Στρώση βάσης	2.760
P-154	Αμμοχάλικο	Στρώση υπόβασης	276
P-301	Εδαφικό υλικό κατεργασμένο με τσιμέντο	Στρώση υπόβασης	1.730

## 2.4 Ελάχιστες τιμές παχών

Η FAA ορίζει τις ελάχιστες τιμές παχών των στρώσεων που θα χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό, κυρίως για κατασκευαστικούς λόγους. Συγκεκριμένα:

- Στις περισσότερες περιπτώσεις για την ασφαλική στρώση έχει οριστεί η ελάχιστη τιμή πάχους να είναι 102mm. Στην περίπτωση που έχει χρησιμοποιηθεί σαν υλικό βάσης το υλικό P-208 τότε η ελάχιστη τιμή της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης αυξάνεται στα 127mm. Στην περίπτωση όπου στην κυκλοφορία υπάρχουν μόνο αεροσκάφη μέχρι 30.000lbs. (13.601kgs) το ελάχιστο πάχος επιφανειακής ασφαλικής στρώσης μειώνεται στα 50mm.
- Για βάση από ασύνδετο υλικό προτείνεται ελάχιστο πάχος τα 102mm. Για αεροσκάφη μέχρι 30.000lbs (13.601kgs) η τιμή αυτή μειώνεται στα 75mm. Αντίθετα, για σταθεροποιημένη με ασφαλικό υλικό βάση το ελάχιστο πάχος ανέρχεται στα 127mm.
- Για την υπόβαση από ασύνδετο υλικό έχει οριστεί ελάχιστο πάχος ίσο με 102mm.

# 3 Οι μέθοδοι του ERDC

## 3.1 Εισαγωγή

Το Κέντρο Ανάπτυξης και Έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής ERDC δημιουργήθηκε τον Οκτώβριο του 1999 από το Σώμα Μηχανικών των Ηνωμένων Πολιτειών ως μια ενοποίηση επτά επιμέρους εργαστηρίων. Το ERDC έχει ως σκοπό την παροχή υπηρεσιών επιστήμης και τεχνολογίας σε θέματα μηχανικού για τον στρατό, την πολεμική αεροπορία και το πολεμικό ναυτικό των Ηνωμένων Πολιτειών. Το ERDC για τον σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων έχει αναπτύξει δύο διαδικασίες σχεδιασμού, με την πρώτη να βασίζεται στην μέθοδο California Bearing Ratio (CBR) και τη δεύτερη να βασίζεται στη θεωρία ελαστικών στρώσεων Layered Elastic Design (LED). Οι μέθοδοι του ERDC έχουν αναπτυχθεί με βάση συγκεκριμένα υλικά και ακολουθούν συγκεκριμένους κανονισμούς ως προς τον σχεδιασμό του οδοστρώματος (ERDC, 2001). Ο σκοπός είναι, με τη χρήση των μεθόδων CBR και LED, να δίνεται η δυνατότητα της σύγκρισης των αποτελεσμάτων και της επιλογής της καταλληλότερης διατομής σύμφωνα με τις ανάγκες του κάθε έργου. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναδειχθούν οι βασικές αρχές και το θεωρητικό υπόβαθρο τόσο της μεθόδου CBR, όσο και της μεθόδου LED.

## 3.2 Μέθοδος CBR

### 3.2.1 Βασικές αρχές

Η μέθοδος CBR έχει υπάρξει η βασική διαδικασία σχεδιασμού οδοστρωμάτων στρατιωτικών δρόμων και αεροδρομίων από τη δεκαετία του 1940 για να υποστηρίξει τα καινούρια μαχητικά αεροσκάφη της εποχής. Η μέθοδος CBR του ERDC για τον σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων έχει αναπτυχθεί σύμφωνα με βασικές αρχές που αφορούν την κυκλοφορία, τις περιοχές κυκλοφορίας του οδοστρώματος, καθώς και τα διαγράμματα σχεδιασμού.

#### ➤ *Κυκλοφορία*

Η κυκλοφορία που πρόκειται να δεχθεί ένα οδόστρωμα αποτελείται από διαφορετικούς τύπους αεροσκαφών με διαφορετικό σύστημα τροχών, διαφορετικά βάρη



και διαφορετικές διελεύσεις. Έτσι λοιπόν, υπάρχει η ανάγκη για τον προσδιορισμό ενός αεροσκάφους σχεδιασμού για το οποίο θα σχεδιαστεί το οδόστρωμα. Ως αεροσκάφος σχεδιασμού στα εύκαμπτα οδοστρώματα ορίζεται αυτό που, μέσω των νομογραφημάτων, απαιτεί το μέγιστο πάχος οδοστρώματος. Στην περίπτωση που δύο ή περισσότερα αεροσκάφη απαιτούν το μέγιστο πάχος οδοστρώματος, ως αεροσκάφος σχεδιασμού επιλέγεται συνήθως αυτό με το μεγαλύτερο μέγεθος αλλά είναι απαραίτητο να ελεγχθεί ο σχεδιασμός με όλα τα αεροσκάφη που απαιτούν το μέγιστο πάχος. Στην συνέχεια, αφού βρεθούν οι συντελεστές ισοδυναμίας κάθε αεροσκάφους ως προς το αεροσκάφος σχεδιασμού, προκύπτουν οι ισοδύναμες διελεύσεις των επιμέρους αεροσκαφών οι οποίες προστίθενται για τον υπολογισμό των συνολικών ισοδύναμων διελεύσεων του αεροσκάφους σχεδιασμού. Η διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών ισοδυναμίας αναλύεται στο επόμενο υποκεφάλαιο 3.2.2.

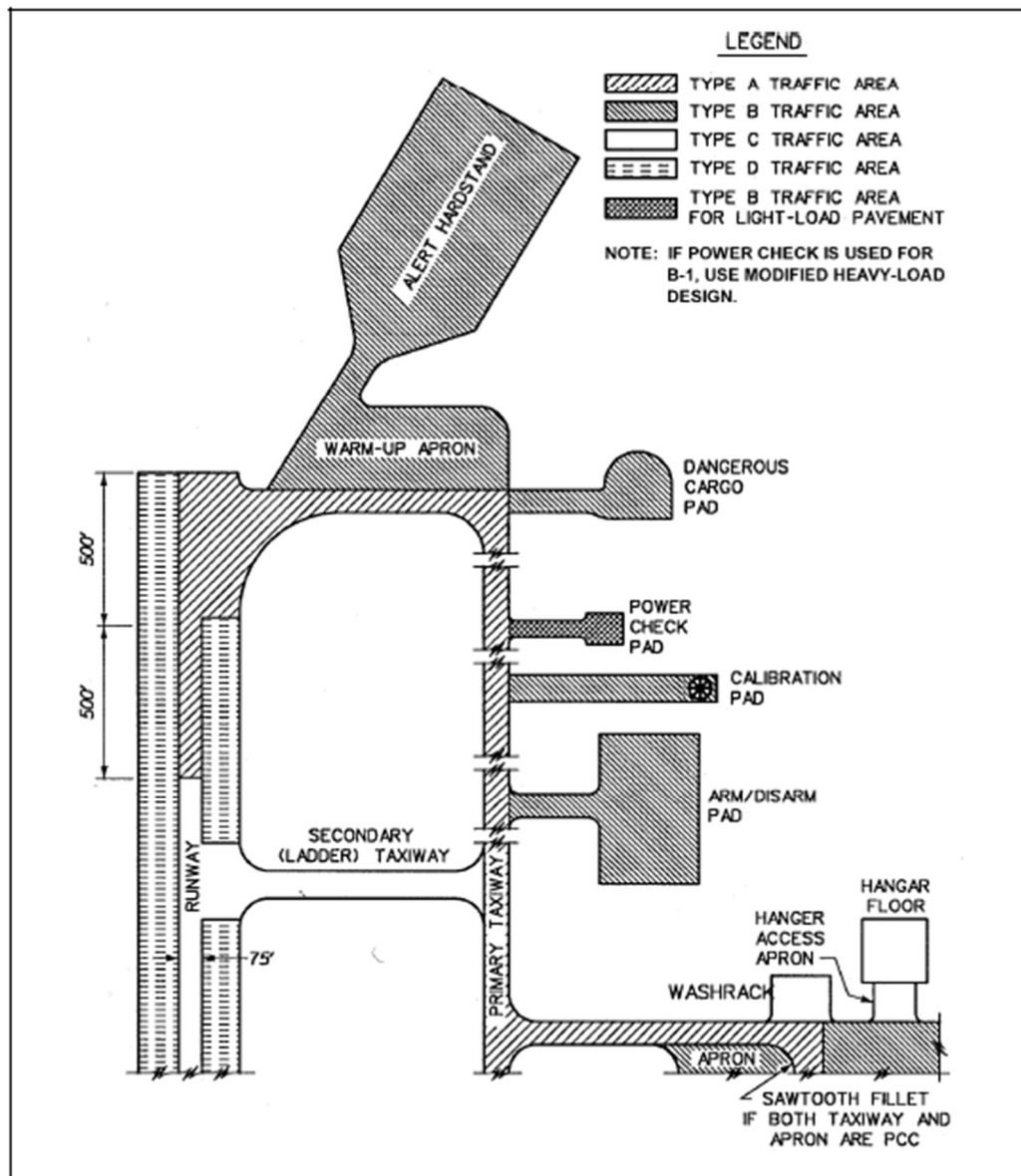
#### ➤ *Περιοχές Κυκλοφορίας*

Σε ένα αεροδρόμιο εντοπίζονται διάφορες κατηγορίες καταστρωμάτων. Σύμφωνα με το ERDC, στα αεροδρόμια το οδόστρωμα μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις περιοχές κυκλοφορίας, την περιοχή A, B, C και D (βλ. Εικόνα 3.1).

- i. **Περιοχή κυκλοφορίας A** είναι εκείνο το τμήμα του οδοστρώματος που δέχεται όλο το φορτίο σχεδιασμού του αεροσκάφους. Αεροσκάφη που μπορούν να στρίψουν και να εκτελούν ελιγμούς στο οδόστρωμα, συμπεριλαμβανομένων και πολεμικών αεροσκαφών, διέρχονται από μια σχετικά στενή λωρίδα στο οδόστρωμα προκαλώντας αρκετές καλύψεις - διελεύσεις ώστε να απαιτείται ειδικός σχεδιασμός αυτής της περιοχής. Αυτές οι περιοχές απαιτούν μεγαλύτερο πάχος οδοστρώματος από ότι άλλες περιοχές όπου η κυκλοφορία είναι πιο ομοιόμορφα κατανεμημένη.
- ii. **Περιοχή κυκλοφορίας B** είναι αυτή όπου η κυκλοφορία είναι πιο ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλο το πλάτος του οδοστρώματος αλλά θα δεχτεί επίσης ολόκληρο το φορτίο σχεδιασμού του αεροσκάφους. Εφόσον, δέχεται πιο ομοιόμορφα την κυκλοφορία, οι τάσεις που θα αναπτυχθούν λόγω αυτής θα είναι αρκετά μικρότερες από ότι στην περιοχή κυκλοφορίας A. Για τον λόγο αυτό, επιτρέπεται μια μείωση του πάχους του οδοστρώματος.
- iii. **Περιοχή κυκλοφορίας C** είναι εκείνη η περιοχή όπου το μέγεθος της κυκλοφορίας είναι σχετικά πιο μικρό ή το φορτίο του αεροσκάφους που δέχεται το οδόστρωμα είναι μικρότερο από το φορτίο για το οποίο σχεδιάστηκε. Στο εσωτερικό των διάδρομων υπάρχει αρκετή άνωση από τα πτερύγια του αεροσκάφους, όταν αυτό διέρχεται με ορισμένη ταχύτητα πάνω από το οδό-

στρώμα, ώστε οι τάσεις που αναπτύσσονται να είναι αισθητά πιο μικρές. Συνεπώς, το πάχος του οδοστρώματος σε αυτές τις περιοχές μπορεί να μειωθεί σε σχέση με το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος.

- iv. **Περιοχή κυκλοφορίας D** είναι εκείνη η περιοχή όπου το μέγεθος της κυκλοφορίας είναι πολύ πιο μικρό ή το φορτίο του αεροσκάφους που δέχεται το οδόστρωμα είναι πολύ μικρότερο από το φορτίο για το οποίο σχεδιάστηκε. Τέτοιες περιοχές είναι τα άκρα του οδοστρώματος του διαδρόμου.



**Εικόνα 3.1** Τυπική κάτοψη περιοχών κυκλοφορίας αεροδρομίου πολεμικής αεροπορίας

➤ Διαγράμματα σχεδιασμού

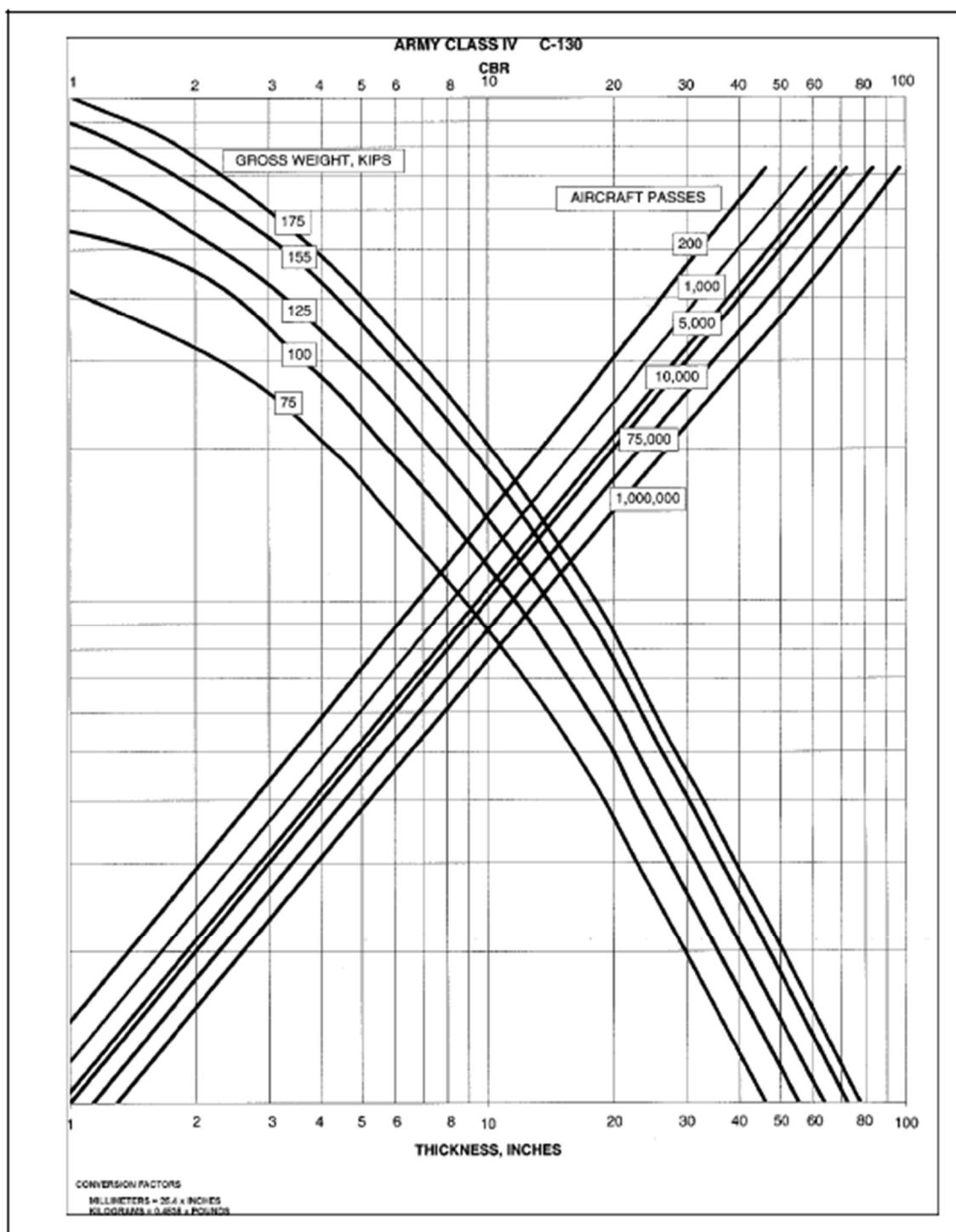
Ο σχεδιασμός ενός εύκαμπτου οδοστρώματος με την μέθοδο CBR γίνεται με τη χρήση διαγραμμάτων σχεδιασμού (νομογραφήματα). Οι αρχικές κάμπυλες σχεδιασμού οδοστρώματων αεροδρομίων ήταν μια επέκταση των εμπειρικών καμπύλων σχεδιασμού αυτοκινητοδρόμων. Αυτές οι καμπύλες σχεδιασμού οδοστρώματων αεροδρομίων χρησιμοποιούσαν τη θεωρία του Boussinesq για την κατανομή της τάσης σε ομοιογενή ημίχωρο και τροποποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα δοκιμών πεδίου και εκτενέστερες μελέτες της συμπεριφοράς των οδοστρώματων σε συνθήκες πραγματικής φόρτισής τους (Gonzalez, Barker & Bianchini, 2012). Τα διαγράμματα βασίζονται στο στατικό προσομοίωμα της Εικόνας 3.2 και έχουν αναπτυχθεί με την μέθοδο CBR, συνδυάζοντας το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου με τα αποτελέσματα εκτενών ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία της διαδικασίας σχεδιασμού (Choudhary 2014).



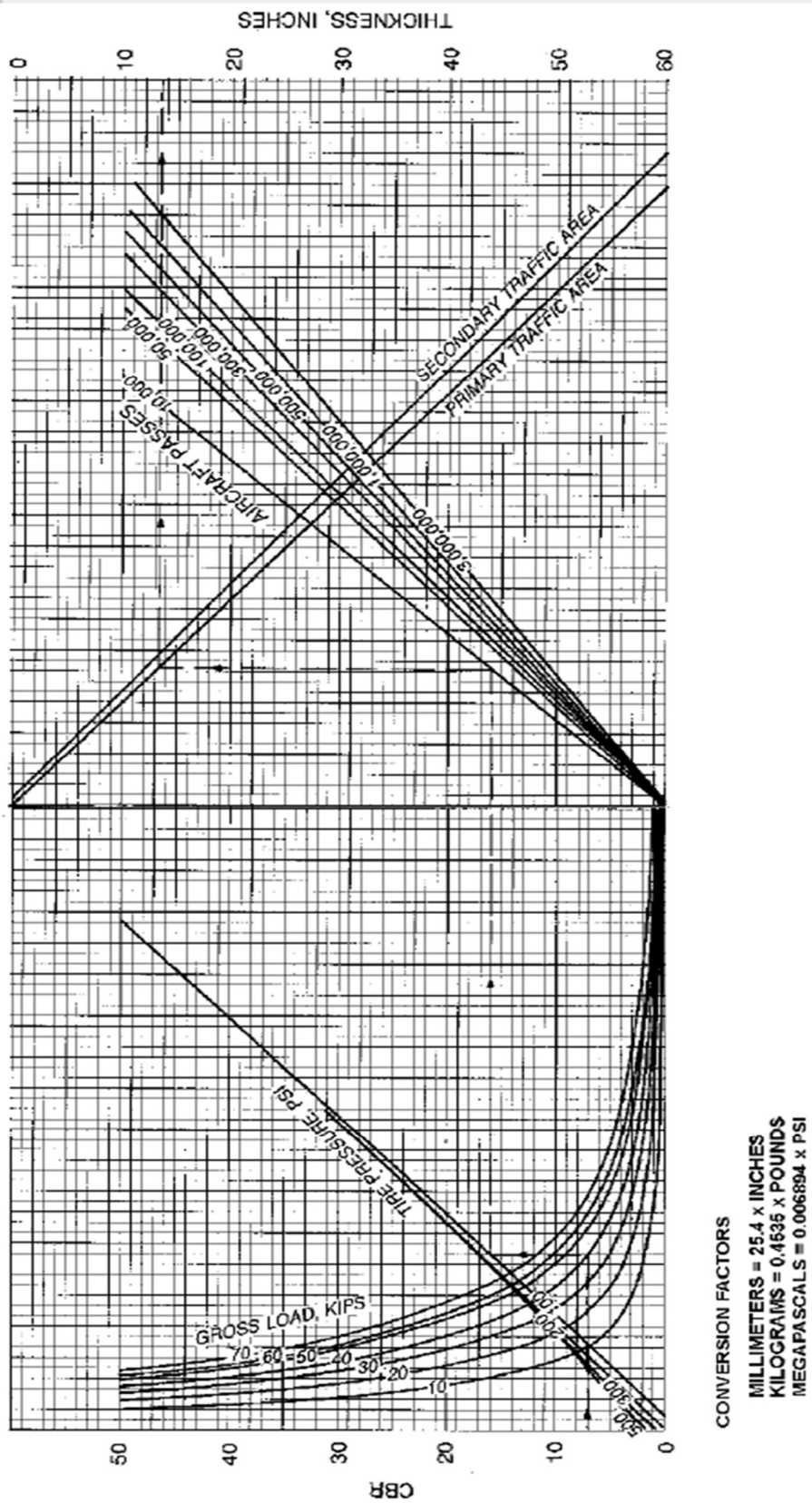
**Εικόνα 3.2** Διατομή οδοστρώματος

Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται ένα νομογράφημα της μεθόδου CBR σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος για περιοχή κυκλοφορίας A σε συσχέτιση με τον τύπο της κυκλοφορίας, το βάρος και τις διελεύσεις του αεροσκάφους. Επιπρόσθετα, στην Εικόνα 3.4 φαίνεται ένα νομογράφημα σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται το πάχος του οδοστρώματος για διαφορετικό τύπο κυκλοφορίας και συγκεκριμένο σύστημα τροχών ανάλογα με την πίεση των ελαστικών, το βάρος του αεροσκάφους, τις διελεύσεις και την περιοχή κυκλοφορίας. Διαφορετικά διαγράμματα έχουν αναπτυχθεί για του διάφορους τύπους κυκλοφορίας, τύπους αεροσκαφών, περιοχές οδοστρώματος και μήκη διαδρόμων. Τα νομο-

γραφήματα που αντιστοιχούν στις δοκιμές που γίνονται στη συγκεκριμένη έρευνα παρατίθενται στο Παράρτημα.



Εικόνα 3.3 Ενδεικτικό νομογράφημα μεθόδου CBR του ERDC



Εικόνα 3.4 Ενδεικτικό νομογράφημα μεθόδου CBR του ERDC

### 3.2.2 Διαδικασία σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός με τη μέθοδο CBR του ERDC βασίζεται στον προσδιορισμό του πάχους της στρώσης που απαιτείται να τοποθετηθεί πάνω από μια στρώση με συγκεκριμένο δείκτη CBR, προκειμένου να αποφευχθεί κατακόρυφη παραμόρφωση λόγω κυκλοφορίας σε αυτή τη στρώση. Ο προσδιορισμός του απαιτούμενου πάχους πραγματοποιείται μέσω των νομογραφημάτων της μεθόδου. Τα βήματα που ακολουθούνται κατά τον σχεδιασμό είναι τα εξής:

- i. Ο προσδιορισμός του δείκτη CBR σχεδιασμού της εδαφικής στρώσης
- ii. Ο προσδιορισμός του συνολικού πάχους πάνω από την εδαφική στρώση
- iii. Ο προσδιορισμός του δείκτη CBR σχεδιασμού της υπόβασης
- iv. Ο προσδιορισμός του πάχους των στρώσεων που απαιτούνται πάνω από την υπόβαση πηγαίνοντας στο κατάλληλο νομογράφημα χρησιμοποιώντας το CBR σχεδιασμού τις υπόβασης.
- v. Ο προσδιορισμός των ελάχιστων παχών της ασφαλτικής στρώσης και της βάσης από τους πίνακες του υποκεφαλαίου 3.5. Όταν τα ελάχιστα πάχη της ασφαλτικής στρώσης και της βάσης είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα απαιτούμενα πάχη τότε τα ελάχιστα πάχη αυξάνονται στα πραγματικά πάχη που απαιτούνται
- vi. Η αφαίρεση των παραπάνω παχών βάσης και ασφαλτικής στρώσης από το συνολικό απαιτούμενο πάχος πάνω από την εδαφική στρώση που προέκυψε στο βήμα ii). Από τη διαδικασία αυτή προκύπτει το απαιτούμενο πάχος υπόβασης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα διαγράμματα διαστασιολόγησης ευκάμπτων οδοστρωμάτων αναφέρονται σε οδόστρωμα με βάση και υπόβαση από ασύνδετο υλικό. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί σταθεροποιημένη στρώση, ο σχεδιασμός γίνεται για βάση και υπόβαση από ασύνδετο υλικό και στην συνέχεια τα πάχη των στρώσεων που υπολογίστηκαν μετατρέπονται σε πάχη σταθεροποιημένων στρώσεων με τους κατάλληλους συντελεστές ισοδυναμίας. Οι συντελεστές αυτοί προκύπτουν από διερευνήσεις που έχουν γίνει στα οδοστρώματα και εξαρτώνται από παραμέτρους όπως η θέση της σταθεροποιημένης στρώσης και η κυκλοφορία για την οποία σχεδιάζεται το οδόστρωμα πχ. στρατός, πολεμικό ναυτικό, πολεμική αεροπορία (βλ. Πίνακας 3.1 & 3.2).

**Πίνακας 3.1** Πίνακας με συντελεστές ισοδυναμίας μετατροπής από ασύνδετο υλικό σε σταθεροποιημένο για οδοστρώματα του στρατού και της πολεμικής αεροπορίας (ERDC 2001)

Material	Equivalency Factors	
	Base	Subbase
<b>Asphalt-Stabilized</b>		
All-Bituminous Concrete	1.15	2.30
GW, GP, GM, GC	1.00	2.00
SW, SP, SM, SC	-- <sup>1</sup>	1.50
<b>Cement-Stabilized</b>		
GW, GP, SW, SP	1.15 <sup>2</sup>	2.30
GC, GM	1.00 <sup>2</sup>	2.00
ML, MH, CL, CH	-- <sup>1</sup>	1.70
SC, SM	-- <sup>1</sup>	1.50
<b>Lime-Stabilized</b>		
ML, MH, CL, CH	-- <sup>1</sup>	1.00
SC, SM, GC, GM	-- <sup>1</sup>	1.10
<b>Lime, Cement, Fly Ash Stabilized</b>		
ML, MH, CL, CH	-- <sup>1</sup>	1.30
SC, SM, GC, GM	-- <sup>1</sup>	1.40
Unbound Crushed Stone	1.00	2.00
Unbound Aggregate	-- <sup>1</sup>	1.00

**Πίνακας 3.2** Πίνακας με συντελεστές ισοδυναμίας μετατροπής από ασύνδετο υλικό σε σταθεροποιημένο για οδοστρώματα πολεμικού ναυτικού (ERDC 2001)

Stabilized Material	Equivalency Factors
1 mm (in.) of lime-stabilized subbase	1.2 mm (in.) of unstabilized subbase course
1 mm (in.) of cement-stabilized subbase	1.2 mm (in.) of unstabilized subbase course
1 mm (in.) of cement-stabilized base	1.5 mm (in.) of unstabilized base course
1 mm (in.) of bituminous base	1.5 mm (in.) of unstabilized base course

Στην περίπτωση που δίνονται πολλοί διαφορετικοί τύποι αεροσκαφών για τον σχεδιασμό του οδοστρώματος, πρέπει να υπολογιστούν οι συντελεστές ισοδυ-

ναμίας των αεροσκαφών ως προς το αεροσκάφος σχεδιασμού για τον προσδιορισμό των συνολικών ισοδύναμων διελεύσεων. Τα βήματα της διαδικασίας που ακολουθούνται είναι τα εξής:

1. Προσδιορισμός των αεροσκαφών που θα χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό.
2. Προσδιορισμός του φορτίου κάθε αεροσκάφους.
3. Προσδιορισμός του νομογραφήματος που θα χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό του οδοστρώματος για κάθε αεροσκάφος ξεχωριστά.
4. Προσδιορισμός των διελεύσεων κάθε αεροσκάφους.
5. Υπολογισμός του πάχους οδοστρώματος που απαιτεί κάθε αεροσκάφος.
6. Υπολογισμός των επιτρεπόμενων διελεύσεων για κάθε αεροσκάφος στο οδόστρωμα που απαιτεί το αεροσκάφος σχεδιασμού. Οι επιτρεπόμενες διελεύσεις κάθε αεροσκάφους προκύπτουν με χρήση του κατάλληλου νομογραφήματος μέσω του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης, του φορτίου του αεροσκάφους που εξετάζουμε και του πάχους οδοστρώματος που απαιτεί το αεροσκάφος σχεδιασμού.
7. Διαίρεση των επιτρεπόμενων διελεύσεων κάθε αεροσκάφους με τις διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού. Αυτό που προκύπτει είναι ο συντελεστής ισοδυναμίας.
8. Διαίρεση των διελεύσεων κάθε αεροσκάφους με τον αντίστοιχο συντελεστή ισοδυναμίας για τον υπολογισμό των ισοδύναμων διελεύσεων.
9. Προσθέτοντας όλες τις ισοδύναμες διελεύσεις προκύπτουν οι συνολικές ισοδύναμες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού και πλέον από το αντίστοιχο νομογράφημα υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος για το αεροσκάφος σχεδιασμού για τις συνολικές ισοδύναμες διελεύσεις.

### 3.3 Μέθοδος LED

Το ERDC έχει αναπτύξει, εκτός από τη μέθοδο CBR, μία επιπλέον διαδικασία σχεδιασμού και αξιολόγησης ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, τη μέθοδο LED. Στη συνέχεια παρατίθενται οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται η μέθοδος, καθώς και τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία πραγματοποιείται ο σχεδιασμός.



### 3.3.1 Βασικές αρχές

Η μέθοδος βασίζεται στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων για το σχεδιασμό των ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, όπως και η αναλυτική μέθοδος της FAA. Η θεωρία των ελαστικών στρώσεων μπορεί και αντιμετωπίζει προβλήματα με πολύπλοκα συστήματα προσγείωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που είναι μηχανιστική διαδικασία, είναι απαραίτητη ακόμα η κρίση του μηχανικού. Για την εφαρμογή της μεθόδου, ο υπολογισμός των τάσεων που θα αναπτυχθούν στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και στην κορυφή της στρώσης έδρασης προκύπτει χρησιμοποιώντας τη θεωρία Burmister για συνεχές μέσο πολλαπλών στρώσεων μέσω του υπολογιστικού κώδικα JULEA. Ο κώδικας JULEA συμπεριλαμβάνεται στο λογισμικό PCASE που διαθέτει το ERDC. Στο σχεδιασμό γίνονται οι εξής υποθέσεις:

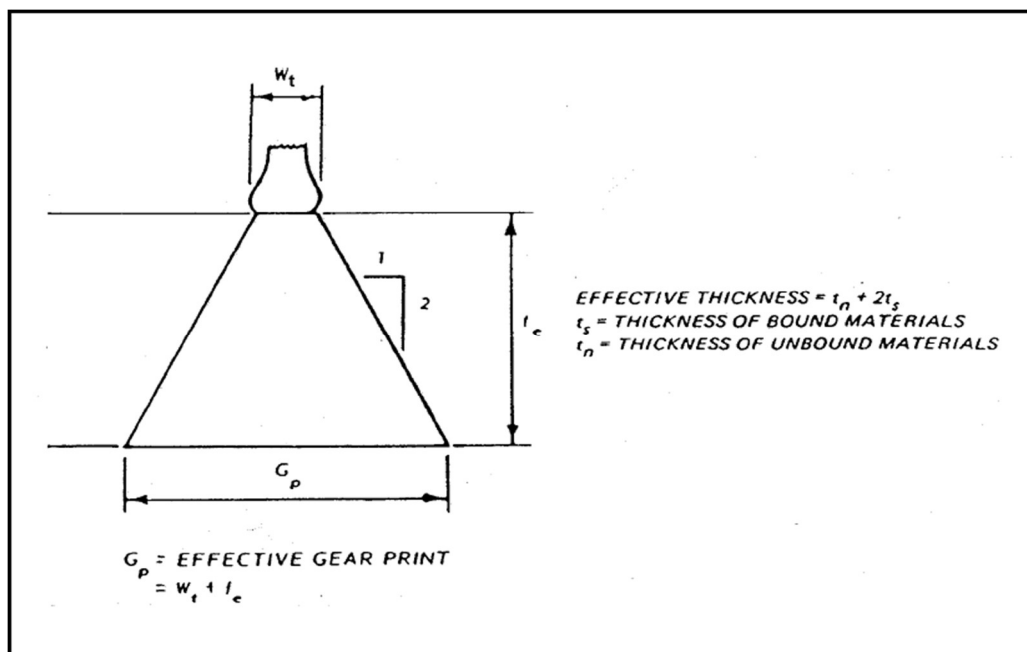
- Το οδόστρωμα αποτελείται από πολλές στρώσεις και κάθε στρώση αντιπροσωπεύεται από το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο Poisson της.
- Η επιφάνεια μεταξύ των στρώσεων είναι συνεχής, δηλαδή η αντίσταση της τριβής μεταξύ των στρώσεων είναι μεγαλύτερη από την διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται.
- Η στρώση έδρασης έχει απεριόριστο πάχος.
- Όλα τα φορτία είναι στατικά, κυκλικά και ομοιόμορφα πάνω στην περιοχή επαφής.

Στη μέθοδο LED του ERDC για τον σχεδιασμό λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής φθοράς των αεροσκαφών. Για τον αθροιστικό συντελεστή CDF ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για την ακρίβεια, υπάρχουν τρία κριτήρια για τον υπολογισμό των επιτρεπόμενων διελεύσεων. Αυτά είναι ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων σαν συνάρτηση της οριζόντιας τάσης στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων σαν συνάρτηση της κατακόρυφης τάσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης και ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων σαν συνάρτηση της οριζόντιας τάσης στον πυθμένα σταθεροποιημένης βάσης ή σταθεροποιημένης υπόβασης. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει νόμος αστοχίας για βάση από ασύνδετο υλικό καθώς θεωρείται ότι μια βάση ή υπόβαση από ασύνδετο υλικό, που πληρεί τις προϋποθέσεις για την ποιότητα των υλικών σχεδιασμού, επαρκεί και θα λειτουργεί ικανοποιητικά. Η μέθοδος για τον υπολογισμό των επιτρεπόμενων διελεύσεων λαμβάνει υπόψη τις καλύψεις διελεύσεις κάθε αεροσκάφους όπως αναφέρονται στην αναλυτική μέθοδο της FAA.

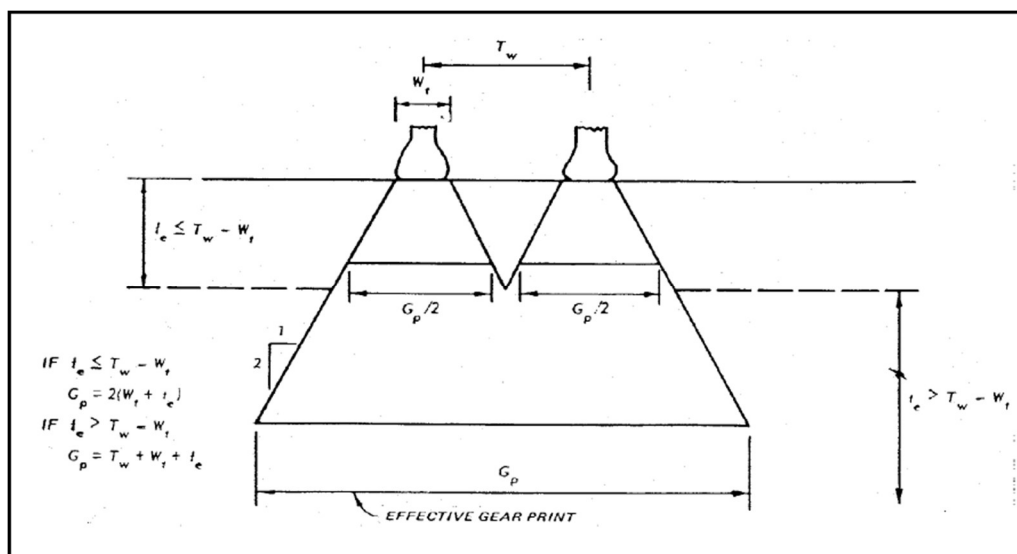
Στη συγκεκριμένη μέθοδο, καθοριστικό κριτήριο μπορεί να είναι είτε ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης, είτε συντελεστής αθροιστικής φθοράς στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, είτε και τα δύο αυτά κριτήρια ταυτόχρονα. Συνεπώς, υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος της ασφαλικής στρώσης ώστε να μπορεί να φέρει την κυκλοφορία σχεδιασμού για διάρκεια ζωής

20 ετών και ταυτόχρονα υπολογίζεται το πάχος της στρώσης που βρίσκεται πάνω από τη στρώση έδρασης, καθώς από οικονομική άποψη αυτή είναι πιο επωφελές να μεταβληθεί.

Τέλος, μια ακόμα βασική αρχή της μεθόδου είναι ότι παύει να υπάρχει ο όρος «αεροσκάφος σχεδιασμού» όπως αναφέρθηκε στην προαναφερόμενη μέθοδο CBR. Πλέον λαμβάνεται υπόψη η επίδραση κάθε αεροσκάφους της κυκλοφορίας μέσω της φθοράς που προκαλεί στο οδόστρωμα. Η κυκλοφορία για την οποία σχεδιάζεται ένα οδόστρωμα πρέπει να εκφραστεί μέσω του αναμενόμενου αριθμού καλύψεων-διελεύσεων. Για την μετατροπή αυτή εισάγεται η έννοια του ενεργού πλάτους του τροχού που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του λόγου των διελεύσεων προς τις καλύψεις - διελεύσεις. Για τον λόγο διελεύσεων προς τις καλύψεις - διελεύσεις ισχύουν όσα αναφέρονται στην αναλυτική μέθοδο της FAA. Το ενεργό πλάτος τροχού είναι το πλάτος του οδοστρώματος που θα υποστεί μια ενεργή κάλυψη - διέλευση σε ένα συγκεκριμένο βάθος. Το ενεργό πλάτος τροχού είναι συνάρτηση του αριθμού των τροχών εγκαρσίως, της εγκάρσιας απόστασης τους, του πάχους της περιοχής επαφής και του ενεργού πάχους του οδοστρώματος πάνω από το σημείο που εμφανίζεται η παραμόρφωση (βλ. Εικόνες 3.5 & 3.6). Το ενεργό πάχος οδοστρώματος είναι το άθροισμα του πάχους του ασύνδετου υλικού και του διπλάσιου του πάχους της ασφαλτικής στρώσης ή και της σταθεροποιημένης βάσης, όταν αυτή χρησιμοποιείται.



*Εικόνα 3.5 Ενεργό πλάτος μονού τροχού χωρίς επικάλυψη*



**Εικόνα 3.6** Ενεργό πλάτος δίδυμων τροχών με επικάλυψη

Για παράδειγμα, σε ένα οδόστρωμα με πάχος ασφαλτικής στρώσης 76mm και πάχος βάσης ασύνδετου αμμοχάλικου 381mm, το ενεργό πάχος οδοστρώματος ως προς την παραμόρφωση στην κορυφή της στρώσης έδρασης υπολογίζεται  $381 + (2 \times 76) = 533mm$ , ενώ το ενεργό πάχος οδοστρώματος ως προς την παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης είναι  $2 \times 76 = 152mm$ .

### 3.3.2 Κριτήρια σχεδιασμού

Η μέθοδος LED του ERDC για το σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων έχει αναπτυχθεί με βάση τα κριτήρια σχεδιασμού έναντι κόπωσης για την ασφαλτική στρώση και αστοχίας για τη στρώση έδρασης, από τα οποία και προκύπτει ο αριθμός των επιτρεπόμενων καλύψεων – διελεύσεων έως την αστοχία. Συγκεκριμένα, οι νόμοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της μεθόδου LED του ERDC είναι οι εξής:

#### A. Νόμος αστοχίας στρώσης έδρασης

Ο νόμος αστοχίας της στρώσης έδρασης αναπτύχθηκε από την ανάλυση στοιχείων δοκιμών πεδίου και παρουσιάζει τον επιτρεπόμενο αριθμό διελεύσεων ως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης και της κατακόρυφης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης (ERDC, 2001). Ο νόμος παρουσιάζεται σε γραφική μορφή στην Εικόνα 3.7 και μπορεί να εκφραστεί από την Εξίσωση 3.1.

$$\text{Επιτρεπόμενες Διελεύσεις} = 10.000 \times \left(\frac{A}{S_s}\right)^B \quad (3.1)$$

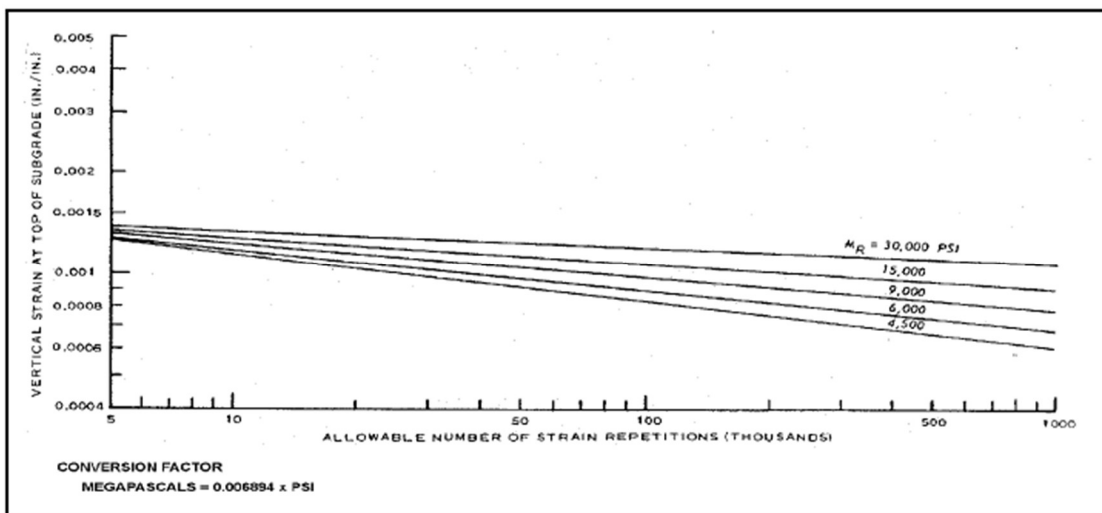
Όπου

$$A = 0.000247 + 0.000245 \log M_R$$

$M_R$  = μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης σε psi

$S_s$  = κατακόρυφη παραμόρφωση στην κορυφή της στρώσης έδρασης (in./in.)

$$B = 0,0658 M_R^{0,559}$$



*Εικόνα 3.7 Διάγραμμα σχέσης επιτρεπόμενων διελεύσεων και κατακόρυφης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης*

### *B. Νόμος κόπωσης ασφαλτομίγματος*

Ο νόμος κόπωσης του ασφαλτομίγματος προκύπτει από τη χρήση εργαστηριακών δεδομένων που χρησιμοποίησαν οι Heukelom και Klomp (ERDC, 2001). Ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων προσεγγίζεται από την Εξίσωση 3.2.

$$\text{Επιτρεπόμενες Διελεύσεις} = 10^X \quad (3.2)$$

Όπου

$$X = 2,68 - 5,0 \log SA - 2,665 \log E$$

SA = οριζόντια παραμόρφωση στην ασφαλτική στρώση  $\left(\frac{\text{in}}{\text{in}}\right)$

E = μέτρο ελαστικότητας ασφαλτομίγματος (psi)

### 3.4 Τυπικά υλικά

Για το σχεδιασμό του οδοστρώματος, κάθε στρώση στην περίπτωση της μεθόδου LED αντιπροσωπεύεται από ένα μέτρο ελαστικότητας και ένα λόγο Poisson ή από ένα δείκτη CBR στην περίπτωση της μεθόδου CBR. Οι μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί με βάση τα εξής τυπικά υλικά:

Στα εύκαμπτα οδοστρώματα η κύρια επιφανειακή στρώση είναι η ασφαλτική. Όσον αφορά στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων, το ERDC προτείνει τιμή του μέτρου ελαστικότητας ίση με 2413MPa.

Βάση από ασύνδετο θραυστό αμμοχάλικο είναι το τυπικό υλικό που χρησιμοποιείται στη μέθοδο για τη σωστή κατανομή του φορτίου στο οδόστρωμα και την προστασία από τον παγετό. Η βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο παρέχει επίσης μια ομοιόμορφη επιφάνεια στήριξης για την ασφαλτική στρώση του οδοστρώματος καθώς ταυτόχρονα αυξάνει την αντοχή του. Σύμφωνα με το ERDC, προτείνεται βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο με δείκτη CBR ίσο με 100% ή τουλάχιστον μεγαλύτερο ή ίσο του 80% και μέτρο ελαστικότητας 421MPa.

Σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση χρησιμοποιείται στο οδόστρωμα γιατί προσδίδει μεγάλη αντοχή ενώ ταυτόχρονα μειώνει το απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος. Ένας ακόμα λόγος που χρησιμοποιείται σταθεροποιημένη βάση είναι για να γίνει εφικτή η χρήση των υλικών που είναι διαθέσιμα τοπικά στην περιοχή του έργου αλλά δεν πληρούν τις απαραίτητες απαιτήσεις και τα κριτήρια για χρήση στον σχεδιασμό του οδοστρώματος. Σύμφωνα με το ERDC, το κύριο κριτήριο επιλογής αναμεσα σε σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση και βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο είναι ο οικονομικός παράγοντας και τίθεται στην κρίση του μηχανικού και τις ανάγκες του έργου. Σύμφωνα με το ERDC, προτείνεται δείκτης CBR ίσος με 100% και μέτρο ελαστικότητας μεγαλύτερο από 690MPa.

Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα επιλέγεται κυρίως για την καλύτερη κατανομή των φορτίων στο έδαφος και για να χρησιμοποιηθούν τοπικά διαθέσιμα ή άλλα άμεσα διαθέσιμα υλικά αναμεσα στη βάση και

στην εδαφική στρώση τα οποία δεν πληρούν τις προϋποθέσεις ώστε να χρησιμοποιηθούν ως υλικά στρώσης βάσης. Με αυτόν τον τρόπο, προσφέρεται μια οικονομικότερη λύση για τον σχεδιασμό του οδοστρώματος. Σύμφωνα με το ERDC, προτείνεται δείκτης CBR ίσο με 20% και μέτρο ελαστικότητας ίσο με 166MPa.

Τέλος, υπενθυμίζεται ότι η σχέση που συνδέει ο μέτρο ελαστικότητας με τον δείκτη CBR της στρώσης έδρασης δίνεται από τον τύπο  $M_R=10.3 \times CBR$  (MPa).

Ο λόγος Poisson των υλικών φαίνεται στους Πίνακες 3.3 & 3.4.

**Πίνακας 3.3** Λόγος Poisson των υλικών (ERDC 2001)

Pavement Materials	Poisson's Ratio $\nu$
Bituminous concrete	0.5 for $E < 3,450$ MPa (500,000 psi) 0.3 for $E > 3,450$ MPa (500,000 psi)
Unbound granular base- or subbase-course	0.3
Chemically stabilized base- or subbase-course	0.2
Subgrade	
Cohesive subgrade	0.4
Cohesionless subgrade	0.3

Note: E = elastic modulus of bituminous concrete (psi)

**Πίνακας 3.4** Λόγος Poisson σταθεροποιημένων υλικών

Material	Poisson's Ratio
Bituminous-stabilized	0.5 for $E < 3,447$ MPa (500,000 psi) 0.3 for $E > 3,447$ MPa (500,000 psi)
Chemically stabilized	0.2

Παρατηρείται ότι ο δείκτης Poisson ασφαλτικής στρώσης διαφοροποιείται ανάλογα με το μέτρο ελαστικότητας της.

### 3.5 Ελάχιστες τιμές παχών

Στο σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων τα ελάχιστα πάχη των στρώσεων εξαρτώνται από τον τύπο του αεροσκάφους, την κυκλοφορία και

τον δείκτη CBR των στρώσεων. Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη των αεροσκαφών σε μεγαλύτερα και βαρύτερα μοντέλα τα ελάχιστα πάχη αυξήθηκαν χρησιμοποιώντας μια εμπειρική προσέγγιση. Επίσης, οι απαιτήσεις για τα ελάχιστα πάχη των στρώσεων καθιερώθηκαν ώστε να εξαλειφθούν οι ανάγκες για υλικά με πολύ μεγάλο δείκτη CBR ή μεγάλο μέτρο ελαστικότητας πχ. στην υπόβαση.

Θεωρούνται λοιπόν οι εξής ελάχιστες τιμές παχών (ERDC, 2011) :

- Το ελάχιστο πάχος της ασφαλικής επιφανειακής στρώσης εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος αεροσκάφους, το μέγεθος της κυκλοφορίας και η περιοχή της κυκλοφορίας (Traffic Area A,B,C ή D) και οι τιμές του κυμαίνονται από 50 έως 127mm, όπως φαίνεται στους Πινάκες 3.5 & 3.6 & 3.7.
- Για το πάχος της σταθεροποιημένης με ασφαλικό υλικό βάσης θεωρείται ελάχιστη τιμή τα 203mm ενώ για πάχος της βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο η ελάχιστη τιμή εξαρτάται επίσης από αρκετούς παράγοντες όπως ο τύπος αεροσκάφους, το μέγεθος της κυκλοφορίας και η περιοχή της κυκλοφορίας.
- Τα ελάχιστο πάχος της υπόβασης από ασύνδετο αμμοχάλικο θεωρείται ίσο με 102mm

**Πίνακας 3.5** Ελάχιστο πάχος επιφανειακής στρώσης και βάσης από αμμοχάλικο για εύκαμπτο οδόστρωμα στρατιωτικού αεροδρομίου σε ίντσες (ERDC 2001)

Airfield Heliport Class	Traffic Area	100 CBR Base			80 CBR Base <sup>1</sup>		
		Surface	Base	Total	Surface	Base	Total
I	B	2	6	8	2	6	8
II	B	2	6	8	3	6	9
III	A	2	6	8	2	6	8
	B	2	6	8	2	6	8
	C	2	6	8	2	6	8
IV (Runway ≤ 5,000 feet)	A	4	6	10	5	6	11
	B	4	6	10	5	6	11
	C	3	6	9	4	6	10
IV (Runway > 5,000 feet)	A	4	6	10	5	6	11
	B	4	6	10	5	6	11
	C	3	6	9	4	6	10
IV (Runway ≥ 9,000 feet)	A	4	6	10	5	6	11
	B	4	6	10	5	6	11
	C	3	6	9	4	6	10
V	B	2	6	8	3	6	9

**Πίνακας 3.6** Ελάχιστο πάχος επιφανειακής στρώσης και βάσης από αμμοχάλικο για εύκαμπτο οδόστρωμα πολεμικού ναυτικού (ERDC 2001)

Aircraft Gross Weight kg (kips)	Tire Pressure MPa (psi)	Minimum Thicknesses, mm (in.)		
		Surface	Base <sup>1</sup>	Total
< 5,440 (<12)	All pressures	50 (2)	152 (6)	203 (8)
5,440 to 13,600 (12 to 30)	<1.38 (200)	76 (3)	152 (6)	228 (9)
5,440 to 13,600 (12 to 30)	1.38 (200) or greater	102 (4)	203 (8)	305 (12)
>13,600 (>30)	All pressures	102 (4)	203 (8)	305 (12)

**Πίνακας 3.7** Ελάχιστο πάχος επιφανειακής στρώσης και βάσης από αμμοχάλικο για εύκαμπτο οδόστρωμα πολεμικής αεροπορίας σε ίντσες (ERDC 2001)

Airfield Type	Traffic Area	100 CBR Base			80 CBR Base <sup>1,2,3</sup>		
		Surface	Base	Total	Surface	Base	Total
Light load	A	4	6	10	5	6	11
	B	4	6	10	5	6	11
	C	3	6	9	4	6	10
	Shoulders	2	6	8	2	6	8
Medium load	A	4	6	10	5	6	11
	B	4	6	10	5	6	11
	C	3	6	9	4	6	10
	D	3	6	9	3	6	9
	Shoulders	2	6	8	2	6	8
Heavy load	A	5	10	15	6	9	15
	B	5	9	14	6	8	14
	C	4	9	13	5	8	13
	D	3	6	9	3	6	9
	Shoulders	2	6	8	2	6	8
Modified heavy load	A	5	8	13	6	8	14
	B	5	8	13	6	8	14
	C	4	8	12	5	8	13
	D	3	6	9	3	6	9
	Shoulders	2	6	8	2	6	8
Shortfield	A	4	6	10	5	6	11
Auxiliary	A	3	6	9	3	6	9
	B	3	6	9	3	6	9
	C	3	6	9	3	6	9
	Shoulders	2	6	8	2	6	8



Όπως φαίνεται, οι ελάχιστες τιμές των παχών των στρώσεων εξαρτώνται από την περιοχή και το είδος της κυκλοφορίας, τα χαρακτηριστικά των αεροσκαφών αλλά και την ποιότητα των υλικών.

# 4 Σύγκριση μεθόδων

## 4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των μεθόδων της FAA και του ERDC. Ανάλογα λοιπόν με τις απαιτήσεις και τις προϋποθέσεις ενός έργου αλλά και με τα εφόδια που έχει στην ευχέρεια του ο μηχανικός, όπως ο τύπος των υλικών που είναι διαθέσιμα στην περιοχή του έργου, μπορεί να γίνει λόγος για καταλληλότερη μέθοδο. Για να συμβεί αυτό, πρέπει αφενός να συγκριθούν οι βασικές αρχές των μεθόδων και αφετέρου, να διερευνηθούν οι μέθοδοι ως προς τις διατομές, δημιουργώντας μια ολοκληρωμένη εικόνα για το πως οι βασικές αρχές επηρεάζουν στο σχεδιασμό.

## 4.2 Σύγκριση βασικών αρχών

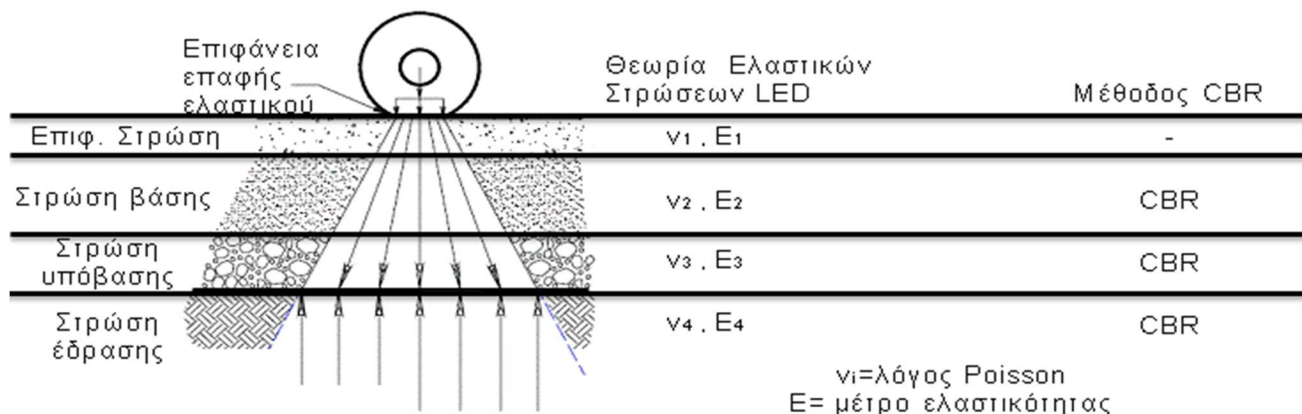
Για την σύγκριση των βασικών αρχών θα γίνει προσδιορισμός των ομοιοτήτων και των διαφορών των βασικών αρχών των μεθόδων. Προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητή η σύγκριση, στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου θα γίνει ο προσδιορισμός των διαφορών της μεθόδου CBR και των γενικών αρχών της μεθόδου LED του ERDC, ενώ στο δεύτερο μέρος θα γίνει η σύγκριση των βασικών αρχών αναμεσά στη μέθοδο LED του ERDC και την αναλυτική μέθοδο της FAA.

### 4.2.1 Σύγκριση βασικών αρχών μεταξύ των μεθόδων CBR και LED του ERDC

Η μέθοδος LED βασίζεται στην θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων για τον σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων σε αντίθεση με τη μέθοδο CBR, η οποία βασίζεται κατ'εξοχήν στη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης.

Όσον αφορά στις διαδικασίες σχεδιασμού, παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των μεθόδων. Η κύρια διαφορά στο σχεδιασμό είναι η κατάργηση της έννοιας «αεροσκάφος σχεδιασμού». Σε αντίθεση με τη μέθοδο CBR λοιπόν, σύμφωνα με την οποία η επίδραση της κυκλοφορίας λαμβάνεται υπόψη μέσω της μετατροπής των διελεύσεων όλων των αεροσκαφών σε ισοδύναμες διελεύσεις του αεροσκάφους

σχεδιασμού, σύμφωνα με τη μέθοδο LED λαμβάνεται υπόψη το πραγματικό σύστημα των τροχών προσγείωσης κάθε αεροσκάφους και υπολογίζεται η επίδραση κάθε αεροσκάφους ξεχωριστά.



**Εικόνα 4.1 Σύγκριση θεωρίας ελαστικών στρώσεων - Μέθοδος CBR**

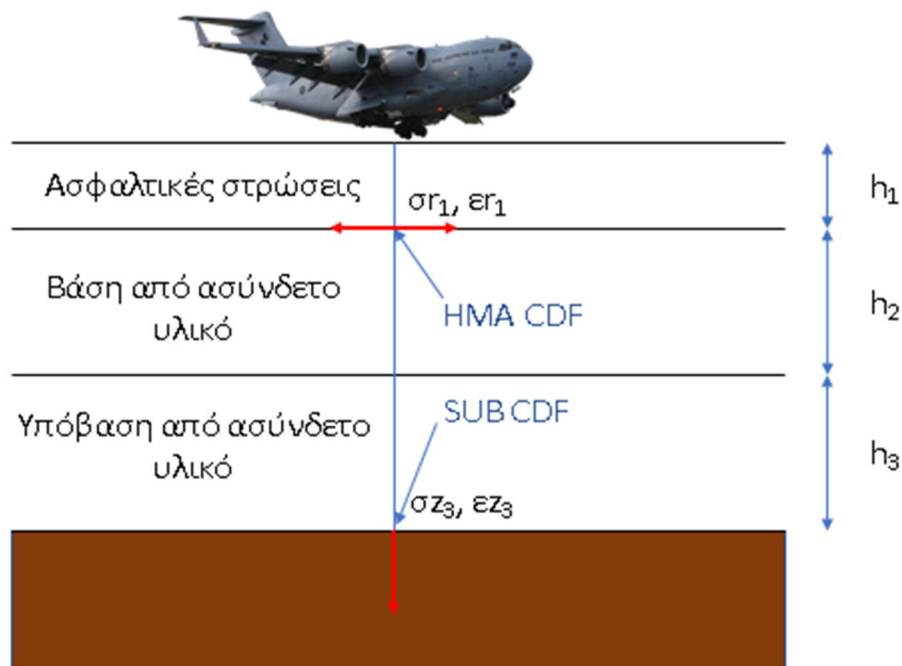
Στη μέθοδο LED, η κύρια ιδιότητα των υλικών σχεδιασμού του οδοστρώματος εκφράζεται μέσω του μέτρου ελαστικότητας, ενώ αντίθετα στην μέθοδο CBR χαρακτηρίζεται από τον δείκτη CBR (βλ. Εικόνα 4.1). Πλέον παρέχεται εξίσωση μετατροπής του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης σε μέτρο ελαστικότητας, καθώς το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης δεν είχε μετρηθεί σε δοκιμές πλήρους κλίμακας μέχρι το 1974. Επιπλέον, στο σχεδιασμό με τη μέθοδο CBR για τον υπολογισμό του συνολικού πάχους του οδοστρώματος λαμβάνεται υπόψη κατ'εξοχήν ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης, ενώ στη μέθοδο LED ο υπολογισμός γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά των υλικών των επιμέρους στρώσεων, όπως είναι οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson.

#### 4.2.2 Σύγκριση βασικών αρχών μεταξύ των μεθόδων LED του ERDC και αναλυτικής μεθόδου της FAA

Η μέθοδος LED του ERDC και η αναλυτική μέθοδος της FAA βασίζονται σε νόμους κόπωσης του ασφαλτομίγματος και αστοχίας της στρώσης έδρασης. Στις δύο αυτές μεθόδους ο νόμος κόπωσης του ασφαλτομίγματος είναι ακριβώς ο ίδιος, ο οποίος είναι γνωστός ως νόμος κόπωσης Heukelom & Klomp. Στο νόμο αστοχίας

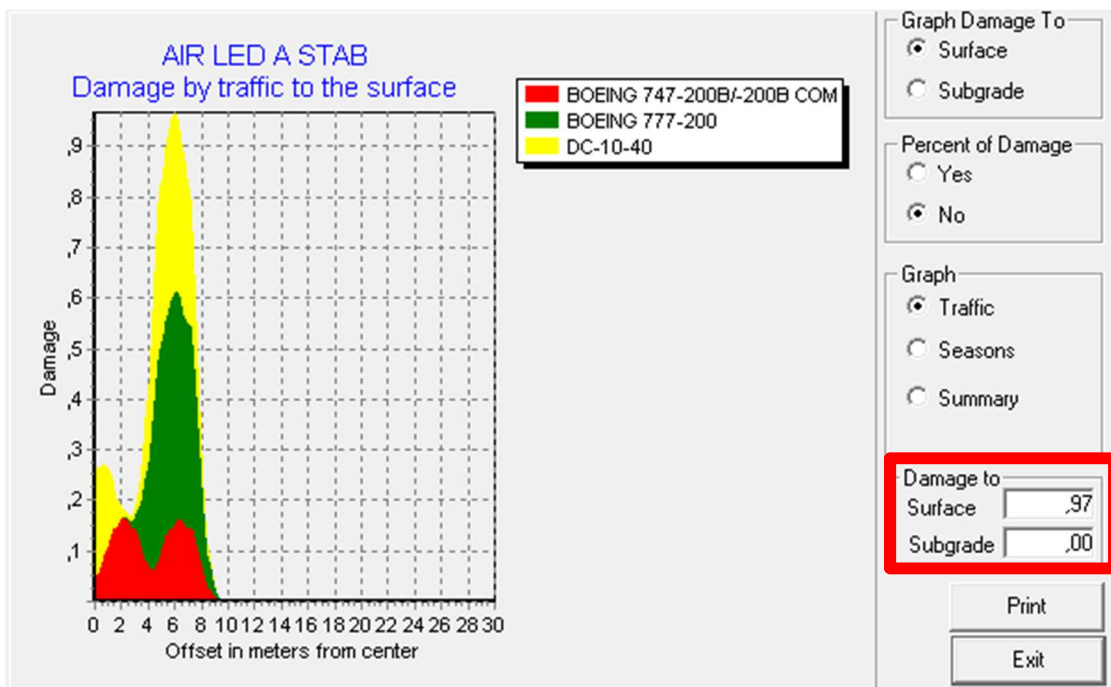
της στρώσης έδρασης όμως, οι δύο μέθοδοι φαίνεται να διαφέρουν καθώς στο νόμο αστοχίας της στρώσης έδρασης της μεθόδου LED του ERDC υπεισέρχεται το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης.

Μια ακόμα βασική διαφορά μεταξύ της μεθόδου LED του ERDC και της αναλυτικής μεθόδου της FAA είναι η αρχή με την οποία σχεδιάζεται το οδοστρώμα. Σύμφωνα με τις μεθόδους, θεωρείται ότι το οδόστρωμα έχει ολοκληρώσει την ζωή του όταν ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς γίνει ίσος με την μονάδα. Στην αναλυτική μέθοδο της FAA τα πάχη των στρώσεων υπολογίζονται έτσι ώστε, για διάρκεια ζωής οδοστρώματος ίση με 20 έτη, ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς CDF της στρώσης έδρασης να ισούται με την μονάδα. Με τη μέθοδο LED του ERDC το οδόστρωμα σχεδιάζεται ώστε, για διάρκεια ζωής επίσης 20 χρόνια, είτε ο CDF της στρώσης έδρασης, είτε ο CDF της ασφαλτικής στρώσης, είτε και οι δύο ταυτόχρονα να ισούνται με την μονάδα. Σύμφωνα με τα παραπάνω, στη μέθοδο της FAA μπορεί να προκύψει διατομή όπου για «βαριά» κυκλοφορία ο CDF της ασφαλτικής στρώσης είναι μεγαλύτερος της μονάδας καθώς η διαδικασία σχεδιασμού ολοκληρώνεται όταν ο CDF της στρώσης έδρασης γίνει ίσος με τη μονάδα. Για το λόγο αυτό, είναι πάντα απαραίτητος ο έλεγχος του συντελεστή αθροιστικής φθοράς της ασφαλτικής στρώσης κατά τον σχεδιασμό. Σε μια αντίστοιχη περίπτωση, στη μέθοδο του ERDC θα προέκυπτε διατομή με τον CDF της ασφαλτικής στρώσης ίσο με την μονάδα και τον CDF της στρώσης έδρασης μικρότερο της μονάδας αφού η διαδικασία σχεδιασμού ολοκληρώνεται όταν ένας από τους δύο συντελεστές αθροιστικής φθοράς γίνει ίσος με την μονάδα (βλ. Εικόνες 4.2 & 4.3 & 4.4).



**Εικόνα 4.2** Συντελεστές αθροιστικής φθοράς στη στρώσης έδρασης και στην ασφαλτική στρώση

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3, στο σχεδιασμό με τη μέθοδο LED του ERDC καθοριστικό κριτήριο, εκτός του συντελεστή αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης, μπορεί να είναι και ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων. Συνεπώς, ο σχεδιασμός του οδοστρώματος γίνεται ώστε ο συντελεστής CDF είτε της στρώσης έδρασης, είτε της ασφαλτικής στρώσης να ισούται με τη μονάδα. Άρα, το οδόστρωμα που σχεδιάζεται με τη μέθοδο LED του ERDC επαρκεί σε κάθε περίπτωση.



**Εικόνα 4.3 ERDC:** Περίπτωση που καθοριστικό κριτήριο είναι ο συντελεστής α-θροιστικής φθοράς στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων

Αντίθετα, στο παράδειγμα της Εικόνας 4.4, το οδόστρωμα που σχεδιάστηκε σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο της FAA έχει συντελεστή CDF της στρώσης έδρασης ίσο με τη μονάδα αλλά ο CDF της ασφαλτικής στρώσης έχει υπερβεί αυτή τη τιμή. Συνεπώς, στην αναλυτική μέθοδο της FAA απαιτείται έλεγχος του συντελεστή CDF της ασφαλτικής στρώσης καθώς ο σχεδιασμός δεν εξασφαλίζει ότι το οδόστρωμα που σχεδιάστηκε επαρκεί. Στην περίπτωση που ο συντελεστής CDF της ασφαλτικής στρώσης είναι μεγαλύτερος της μονάδας, απαιτείται διαστασιολόγηση εκ νέου.

test NewFlexib~01 Des. Life = 20		
Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
P-401/P-403 HMA Surface	101,6	1.378,95
P-401/P-403 St (flex)	326,4	2.757,90
P-209 CrAg	346,3	352,85
Subgrade	CBR = 10,0	103,42
N = 3; IMA CDF = 1,16; Sublayers; Subgrade CDF = 1,00; = 774,4 mm		

*Εικόνα 4.4 FAA: Καθοριστικό κριτήριο είναι ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης*

Μία επιπλέον διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους αφορά στο σύνολο των διελεύσεων που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό. Σύμφωνα με τη μέθοδο της FAA, προτείνεται να λαμβάνονται υπόψη οι αφίξεις των αεροσκαφών. Για λογούς οικονομίας, τα αεροσκάφη ταξιδεύουν με τα απαραίτητα καύσιμα ώστε να φτάσουν στον προορισμό προκειμένου να μειώσουν το βάρος τους κατά την απογείωση και συνεπώς το κόστος της μετακίνησής τους. Έτσι, κατά την άφιξη, το αεροπλάνο προσγειώνεται με ελάχιστα καύσιμα και το ελάχιστο βάρος, οπότε προτείνεται να αγνοηθεί ο αριθμός των αφίξεων στις διελεύσεις. Αντίθετα, σύμφωνα με το ERDC, λαμβάνονται υπόψη και οι αναχωρήσεις και οι αφίξεις στο σύνολο των διελεύσεων.

Τέλος, σύμφωνα με την FAA, ο σχεδιασμός γίνεται για ενιαία περιοχή κυκλοφορίας. Αντιθέτως, στο σχεδιασμό με το ERDC πραγματοποιείται επιμερισμός των περιοχών κυκλοφορίας των οδοστρωμάτων του αεροδρομίου ανάλογα με το ποσοστό του φορτίου που δέχεται κάθε περιοχή του οδοστρώματος αλλά και τον τρόπο κατανομής του φορτίου.

# 5 Υπολογισμός διατομών

## 5.1 Γενικά στοιχεία

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει ο υπολογισμός των διατομών που προκύπτουν με την χρήση των μεθόδων. Τόσο το ERDC όσο κι η FAA έχουν αναπτύξει προγράμματα για τον υπολογισμό της διατομής του οδοστρώματος που πρόκειται να σχεδιαστεί, το PCASE για το ERDC (Adolf, 2010) και το FAARFIELD για την FAA (FAA, 2009). Αυτά τα προγράμματα λειτουργούν με τις μεθόδους σχεδιασμού κάθε οργανισμού αντίστοιχα, φέροντας στο υπόβαθρό τους τους κανονισμούς και τις βασικές αρχές που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Αρχικά πραγματοποιείται υπολογισμός διατομών με τα τυπικά υλικά κάθε μεθόδου και στη συνέχεια ο υπολογισμός των διατομών χρησιμοποιώντας ίδια υλικά σε κάθε μέθοδο. Έτσι, επιτυγχάνεται μια πιο απτή εικόνα των μεθόδων και των αποτελεσμάτων τους.

*Πίνακας 5.1 Μοντέλο κυκλοφορίας που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές*

Τύπος αεροσκάφους	Φορτίο (Kg)	Συνολικές Διελεύσεις
C-17A GLOBEMASTER III	265352	1000
F-15C EAGLE	30844	50000
P-3C	64410	40000

Για τους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν χρησιμοποιήθηκε κοινή κυκλοφορία η οποία φαίνεται στον Πίνακα 5.1 και περιοχή κυκλοφορίας σπουδαιότητας A.

## 5.2 Σχεδιασμός με τα τυπικά υλικά του ERDC

Το ERDC δεν ορίζει πότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση και πότε βάση από ασύνδετο υλικό, σε αντίθεση με την FAA που απαιτεί τη χρήση σταθεροποιημένης με ασφαλτικό υλικό βάσης όταν στην κυκλοφορία υπάρχει αεροσκάφος με φορτίο μεγαλύτερο από 45.360Kgs (100.000lbs.). Το ERDC αφήνει αυτή την επιλογή στην κρίση του μηχανικού, τις ανάγκες του έργου και στον οικονομικό παράγοντα. Γι' αυτό το λόγο, στον υπολο-



γισμό των διατομών με τα τυπικά υλικά του ERDC, θα πραγματοποιηθούν δύο υπολογισμοί: ένας με βάση από ασύνδετο υλικό και ένας με σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση για την οποία θεωρείται μέτρο ελαστικότητας 1000MPa.

### 5.2.1 Σχεδιασμός με τη μέθοδο CBR

Για τον σχεδιασμό με τη μέθοδο CBR, χρησιμοποιώντας τα τυπικά υλικά του ERDC, πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές υπολογισμού διατομών: η πρώτη με βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο και η δεύτερη με σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση.

Η διατομή που προέκυψε από τον σχεδιασμό με βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο φαίνεται στην Εικόνα 5.1.



**Εικόνα 5.1** Υπολογισμός διατομής

Στην Εικόνα 5.2 φαίνεται η διατομή που προέκυψε από τον σχεδιασμό με σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση.



**Εικόνα 5.2** Υπολογισμός διατομής

Παρότι και στις δύο περιπτώσεις ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι ίδιος και ίσος με 10%, οι διατομές που προέκυψαν είναι διαφορετικές μεταξύ τους ως προς τη στρώση της βάσης και της υπόβασης. Η διαφορά αυτή οφείλεται στους συντελεστές ισοδυναμίας των υλικών και των στρώσεων που θεωρεί η μέθοδος για τη μετατροπή του πάχους στρώσεων από ασύνδετο αμμοχάλικο σε πάχος σταθεροποιημένων στρώσεων (βλ. Πίνακας 3.1 & 3.2).

### 5.2.2 Σχεδιασμός με τη μέθοδο LED

Για τον υπολογισμό των διατομών με τη μέθοδο LED, χρησιμοποιήθηκαν τα τυπικά υλικά με τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας (βλ. Εικόνες 5.3 & 5.5). Όσον αφορά στην αλληλεπίδραση των στρώσεων, θεωρείται ότι υπάρχει πλήρης συνεργασία μεταξύ τους ( $slip=1$ ). Οι τιμές του λόγου Poisson των υλικών κάθε στρώσης φαίνονται στις διατομές (βλ. Κεφαλαίο 3.5). Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκαν επίσης δύο δοκιμές υπολογισμών, η πρώτη για βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο και η δεύτερη για σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση.

Η διατομή που προέκυψε για βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο, καθώς και οι συντελεστές αθροιστικής φθοράς στις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος φαίνονται στις Εικόνες 5.3 & 5.4.

<p>Ασφαλτική στρώση (149mm) v=0.5    2413MPa</p>
<p>Βάση από ασύνδετο θραυστό αμμοχάλικο (203mm) v=0.3    421MPa</p>
<p>Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο (235mm) v=0.3    165MPa</p>
<p>Εδαφική Στρώση v=0.4    103MPa</p>

Σύνολο: 587mm

**Εικόνα 5.3** Υπολογισμός διατομής

AC CDF	1.00
SUBGRADE CDF	0.97

**Εικόνα 5.4** Συντελεστες CDF διατομής

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς της ασφαλτικής στρώσης ισούται με τη μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι το καθοριστικό κριτήριο για τη διαστασιολόγηση στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς της ασφαλτικής στρώσης.

Στις Εικόνες 5.5 & 5.7 φαίνεται η διατομή οδοστρώματος που προέκυψε για σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση.

<p>Ασφαλτική στρώση (102mm) ν=0.5    2413MPa</p>
<p>Σταθ. με ασφαλτικό υλικό βάση (203mm) ν=0.5    1000MPa</p>
<p>Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο (234mm) ν=0.3    165MPa</p>
<p>Εδαφική Στρώση ν=0.4    103MPa</p>

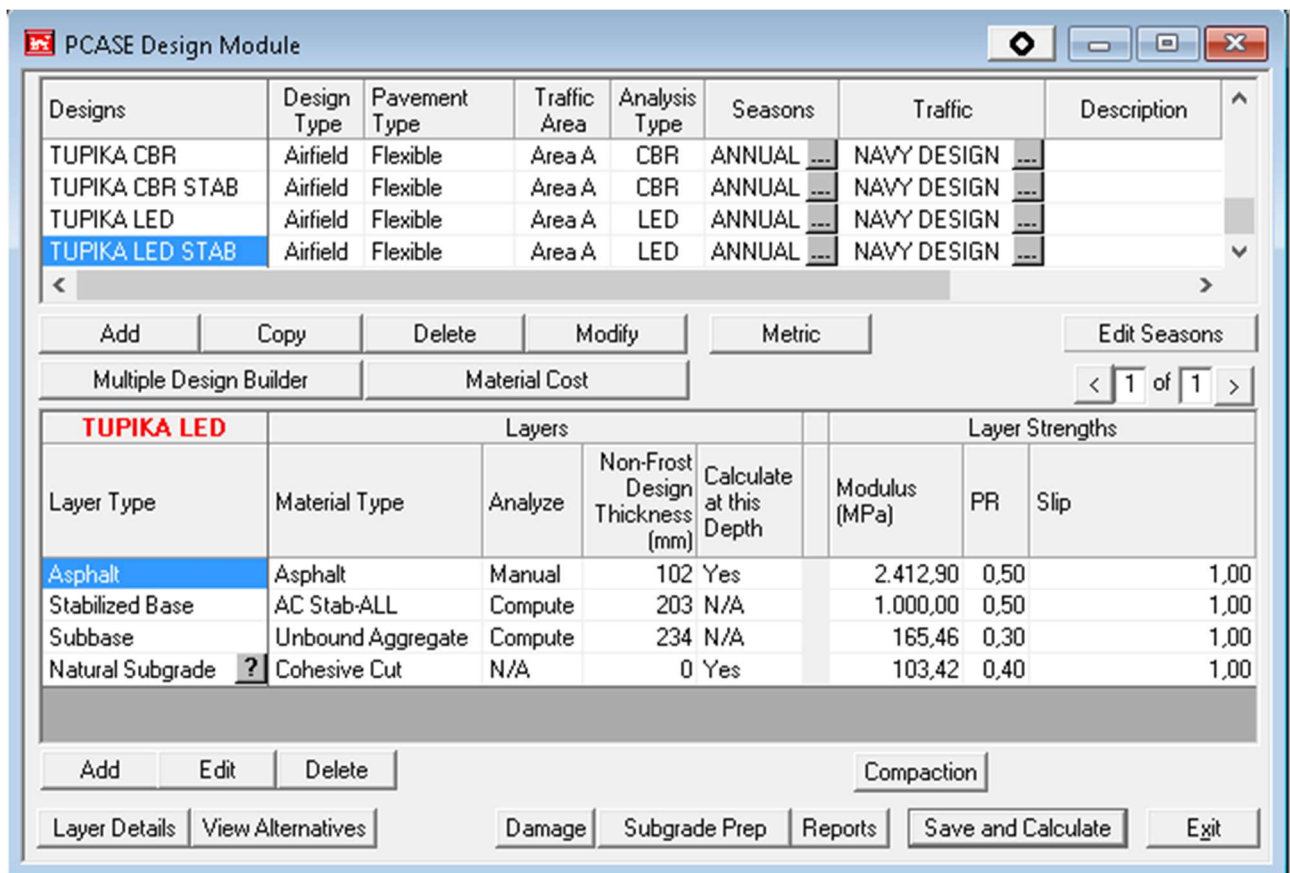
Σύνολο: 539mm

*Εικόνα 5.5 Υπολογισμός διατομής*

Οι συντελεστές αθροιστικής φθοράς CDF στις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος φαίνονται στην Εικόνα 5.6.

AC CDF	0.45
SUBGRADE CDF	1,00

*Εικόνα 5.6 Συντελεστές CDF διατομής*



*Εικόνα 5.7 Στιγμιότυπο του προγράμματος PCase του ERDC*

Στις δύο περιπτώσεις της μεθόδου LED, με σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση και με βάση από ασυνδετο αμμοχάλικο, τα πάχη των στρώσεων της βάσης και της υπόβασης προέκυψαν σχεδόν ίδια. Η διαφορά που παρατηρείται βρίσκεται στο πάχος της επιφανειακής στρώσης καθώς και στον συντελεστή αθροιστικής φθοράς της ασφαλτικής στρώσης. Στην πρώτη περίπτωση, χρειάστηκε μεγαλύτερο πάχος ασφαλτικής στρώσης ώστε το οδόστρωμα με τα υλικά που επιλέχθηκαν να φέρει την κυκλοφορία σχεδιασμού για διάρκεια ζωής 20 έτη. Επίσης, στην πρώτη περίπτωση ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς της ασφαλτικής στρώσης προέκυψε μεγαλύτερος από αυτόν της δεύτερης περίπτωσης.

### 5.3 Σχεδιασμός με τα τυπικά υλικά της FAA

Σύμφωνα με την FAA, για την συγκεκριμένη κυκλοφορία θεωρείται απαραίτητη η χρήση σταθεροποιημένης με ασφαλτικό υλικό βάσης. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τα τυπικά υλικά της μεθόδου, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός με την αναλυτική μέθοδο της FAA (Εικόνα 5.8 & 5.10).



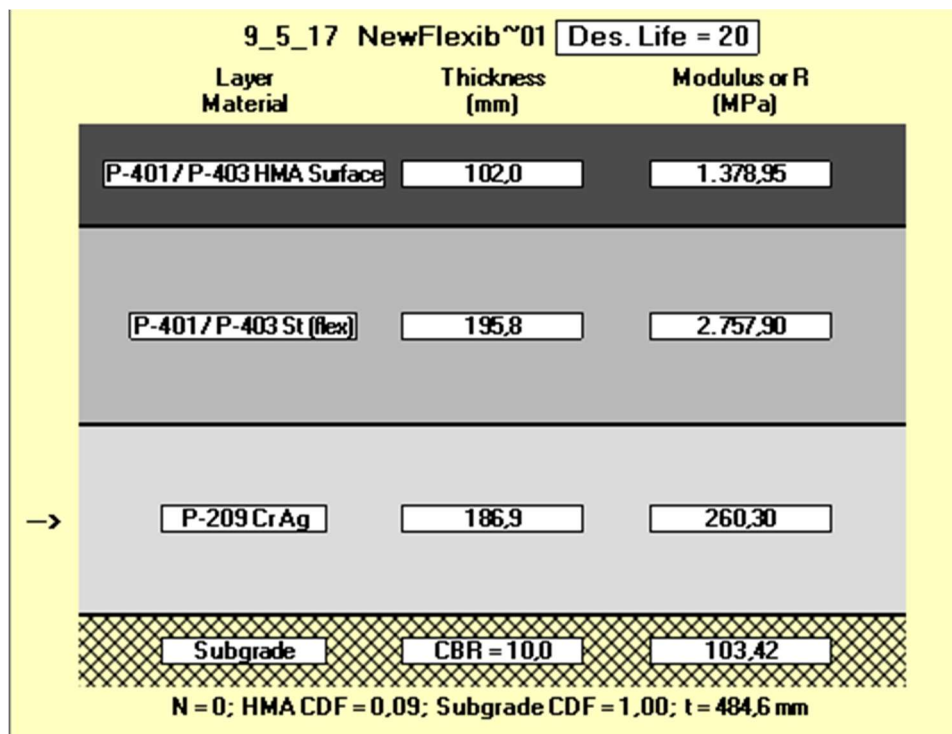
*Εικόνα 5.8 Υπολογισμός διατομής*

Οι συντελεστές αθροιστικής φθοράς στις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος φαίνονται στην Εικόνα 5.9.

AC CDF	0.09
SUBGRADE CDF	1,00

*Εικόνα 5.9 Συντελεστές CDF διατομής*

Το αποτέλεσμα διαφέρει από αυτό της μεθόδου LED του ERDC ως προς το συνολικό πάχος του οδοστρώματος. Αντίθετα, από την αναλυτική μέθοδο της FAA πρόεκυψε παρόμοιο αποτέλεσμα με αυτό της μεθόδου CBR του ERDC.



*Εικόνα 5.10 Στιγμιότυπο του προγράμματος FAARFIELD της FAA*

ERDC CBR	ERDC CBR STAB	ERDC LED	ERDC LED STAB	FAA
Ασφαλτική στρώση <b>(102mm)</b>	Ασφαλτική στρώση <b>(102mm)</b>	Ασφαλτική στρώση <b>(149mm)</b>	Ασφαλτική στρώση <b>(102mm)</b>	Ασφαλτική στρώση <b>P401 (102mm)</b>
Βάση από ασύνδετο θραυστό αμμοχάλικο <b>(228mm)</b> CBR=100%	Σταθ. με ασφαλτικό υλικό βάση <b>(203mm)</b> CBR=100%	Βάση από ασύνδετο θραυστό αμμοχάλικο <b>(203mm)</b> ν=0.3 421MPa	Σταθ. με ασφαλτικό υλικό βάση <b>(203mm)</b> ν=0.5 1000MPa	ν=0.35 1379MPa Σταθ. με ασφαλτικό υλικό βάση <b>P401 (196mm)</b> ν=0.35 2758MPa
Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο <b>(185mm)</b> CBR=20%	Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο <b>(175mm)</b> CBR=20%	Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο <b>(235mm)</b> ν=0.3 165MPa	Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο <b>(234mm)</b> ν=0.3 165MPa	Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο <b>P209 (187mm)</b> ν=0.35 260MPa
Εδαφική Στρώση CBR=10%	Εδαφική Στρώση CBR=10%	Εδαφική Στρώση ν=0.4 103MPa	Εδαφική Στρώση ν=0.4 103MPa	Εδαφική Στρώση ν=0.35 103MPa
Σύνολο: 515mm	Σύνολο: 480mm	Σύνολο: 587mm	Σύνολο: 539mm	Σύνολο: 485mm

*Εικόνα 5.11 Σύγκριση σχεδιασμού με τυπικά υλικά*

Παρατηρείται ότι, στο σχεδιασμό με τα τυπικά υλικά της κάθε μεθόδου, η διατομή με το μικρότερο συνολικό πάχος προέκυψε από τον σχεδιασμό με τη μέθοδο CBR του ERDC και την αναλυτική μέθοδο της FAA. Στις δοκιμές που χρησι-

μπορείται σταθεροποιημένη με ασφαλικό υλικό βάση, αντί της βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο, το συνολικό πάχος είναι αρκετά μικρότερο (Εικόνα 5.11).

Συνεπώς, στην περίπτωση που ο σχεδιασμός γίνει με τα τυπικά υλικά, η μέθοδος CBR του ERDC και η αναλυτική μέθοδος της FAA είναι λιγότερο συντηρητικές σε σύγκριση με την μέθοδο LED του ERDC. Αυτές οι διαφορές οφείλονται αρχικά στις διαφορές των τυπικών υλικών, όπως το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson. Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός με χρήση ίδιων υλικών σε όλες τις μεθόδους, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα και να αναδειχθεί καλύτερα που οφείλονται οι διαφορές.

## 5.4 Σχεδιασμός με ίδια υλικά

Για την εξαγωγή ακριβέστερων συμπερασμάτων από τον υπολογισμό διατομών πρέπει οι υπολογισμοί να γίνονται για ίδιες συνθήκες σε όλες τις περιπτώσεις. Έτσι λοιπόν, περιορίζονται οι διαφορετικές μεταβλητές που επηρεάζουν τα αποτελέσματα κάθε μεθόδου. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας συγκεκριμένες παραδοχές.

1. **Λόγος Poisson.** Σύμφωνα με τη μέθοδο LED του ERDC, ορίζονται οι τιμές του λόγου Poisson των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τον τύπο των υλικών αλλά και το μέτρο ελαστικότητας τους. Παρόλα αυτά, η μέθοδος δίνει την δυνατότητα να οριστούν αυθαίρετα οι τιμές του λόγου Poisson των υλικών. Αντίθετα, η μέθοδος της FAA ορίζει ότι όλα τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ευκάμπτων οδοστρωμάτων χαρακτηρίζονται από λόγο Poisson ίσο με 0,35. Συνεπώς, γίνεται η παραδοχή παραδοχή ότι σε όλες τις μεθόδους ο λόγος Poisson των υλικών είναι ίσος με 0,35.
2. **Κυκλοφορία.** Κάθε μέθοδος περιλαμβάνει βιβλιοθήκη με πολλούς και διαφορετικούς τύπους αεροσκαφών, τόσο στρατιωτικών όσο και επιβατικών, με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά κάθε αεροσκάφους. Για να επιτευχθεί η σύγκριση των μεθόδων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ίδια κυκλοφορία για τον υπολογισμό των διατομών. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να επιλεγθούν τα ίδια αεροσκάφη, με το ίδιο σύστημα τροχών προσγείωσης, την ίδια πίεση ελαστικών και τον ίδιο αριθμό διελεύσεων σε περίοδο σχεδιασμού 20 ετών. Επιπλέον, θα πρέπει τα αεροσκάφη που θα χρησιμοποιηθούν στις μεθόδους να φέρουν και το ίδιο φορτίο. Μεταξύ της FAA και του ERDC παρατηρήθηκαν μικρές αποκλίσεις στο φορτίο αρκετών αεροσκαφών και χρειάστηκε προσαρμογή του φορτίου ώστε να συμφωνεί με τις τιμές των άλλων μεθόδων. Έτσι, επιλέχθηκε το υπόδειγμα κυκλοφορίας NAVY-II του ERDC το ο-



ποίο διαθέτει έτοιμα υποδείγματα για διαφορετικούς τύπους κυκλοφορίας (Πίνακας 5.2)

3. **Συνεργασία στρώσεων (slip).** Το ERDC επιτρέπει την επιλογή του βαθμού της συνεργασίας των στρώσεων. Αντιθέτως, η FAA στον σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων θεωρεί πλήρη συνεργασία μεταξύ των στρώσεων, οπότε γίνεται η παραδοχή ότι σε όλες τις μεθόδους υπάρχει πλήρης συνεργασία μεταξύ των στρώσεων.
4. **Υλικά.** Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό των διατομών για κάθε μέθοδο πρέπει να είναι να ίδια και να έχουν ίδια μέτρα ελαστικότητας και ίδιους δείκτες CBR (στην ομώνυμη μέθοδο). Αυτό επιτυγχάνεται θέτοντας στις μεθόδους του ERDC τα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν από τον σχεδιασμό με την FAA. Στη μέθοδο CBR, το ERDC ορίζει για σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση δείκτη CBR ίσο με 100% για υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο ίσο με 20%. Θεωρήθηκε ότι ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης είναι ίσος με 10% ή αντίστοιχα, μέσω της εξίσωσης  $E_{sub} = 10.3 \times CBR (MPa) = 103,42 MPa$  (Πίνακας 5.3 & 5.4).
5. **Σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση.** Όταν στην κυκλοφορία σχεδιασμού υπάρχει αεροσκάφος με φορτίο μεγαλύτερο ή ίσο από 45.360kgs (100.000lbs.), η FAA απαιτεί την χρήση σταθεροποιημένης με ασφαλτικό υλικό βάσης. Το ERDC αφήνει αυτή την απόφαση στην κρίση του μηχανικού όπου εισέρχεται και ο οικονομικός παράγοντας. Συνεπώς, στους υπολογισμούς των διατομών που θα ακολουθήσουν και εφόσον στην κυκλοφορία σχεδιασμού υπάρχει αεροσκάφος με φορτίο μεγαλύτερο ή ίσο από 45.360kgs, σε όλες τις μεθόδους χρησιμοποιήθηκε σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση.

Σύμφωνα με αυτές τις παραδοχές προέκυψαν οι υπολογισμοί των διατομών για τα υλικά και την κυκλοφορία που φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν. Το υπόδειγμα κυκλοφορίας NAVY-II περιλαμβάνει τα αεροσκάφη F-15C, C-17A GLOBEMASTER III και P-3C για περιοχή κυκλοφορίας A.

**Πίνακας 5.2** Κυκλοφορία σχεδιασμού NAVY-II για τον υπολογισμό των διατομών

Τύπος αεροσκάφους	Φορτίο (Kg)	Διελεύσεις
C-17A GLOBEMASTER III	265352	1000
F-15C EAGLE	30844	50000
P-3C	64410	40000

**Πίνακας 5.3** Υλικά FAA και μέτρα ελαστικότητας για τον υπολογισμό των διατομών

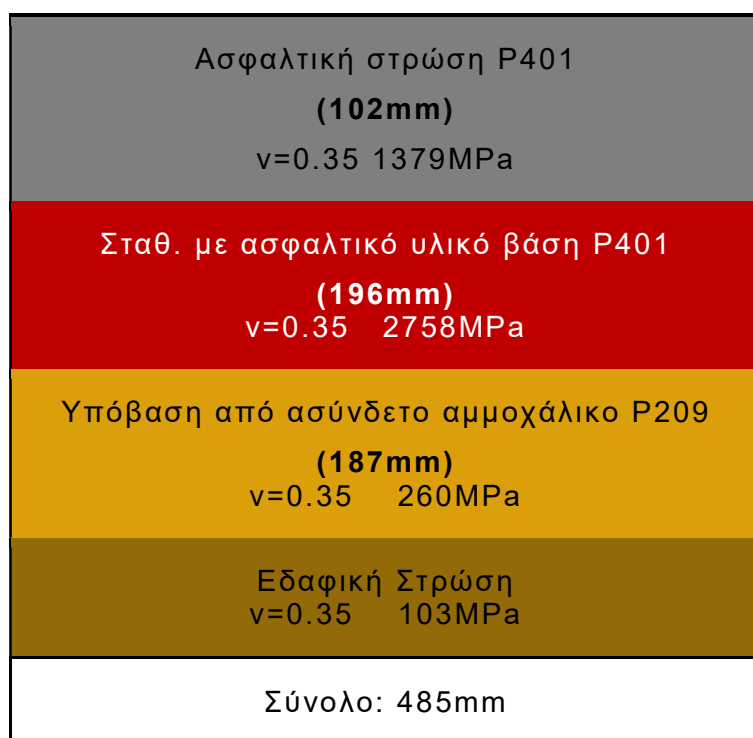
	Υλικά FAA	Μέτρα Ελαστικότητας (MPa)
Ασφαλτική στρώση	P-401 HMA	1.379
Σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση	P-401 Stab	2.758
Υπόβαση από ασύνδετο υλικό	P-209	260
Στρώση έδρασης	-	103

**Πίνακας 5.4** Δείκτες CBR των υλικών του ERDC για τον υπολογισμό των διατομών

	Δείκτης CBR (%)
Ασφαλτική στρώση	-
Σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση	100
Υπόβαση από ασύνδετο υλικό	20
Στρώση έδρασης	10

Σύμφωνα λοιπόν με τις παραδοχές που έγιναν ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των διατομών για τα υλικά των Πινάκων 5.3 & 5.4.

Η διατομή που προέκυψε από το σχεδιασμό με την αναλυτική μέθοδο της FAA, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές αθροιστικής φθοράς φαίνονται στις Εικόνες 5.12 & 5.13.



*Εικόνα 5.12 Υπολογισμός διατομής της αναλυτικής μεθόδου της FAA*

AC CDF	0,09
SUBGRADE CDF	1,00

*Εικόνα 5.13 Συντελεστές αθροιστικής φθοράς CDF της αναλυτικής μεθόδου της FAA*

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός με τη μέθοδο LED του ERDC, τα αποτελέσματα του οποίου φαίνονται στις Εικόνες 5.14 & 5.15.

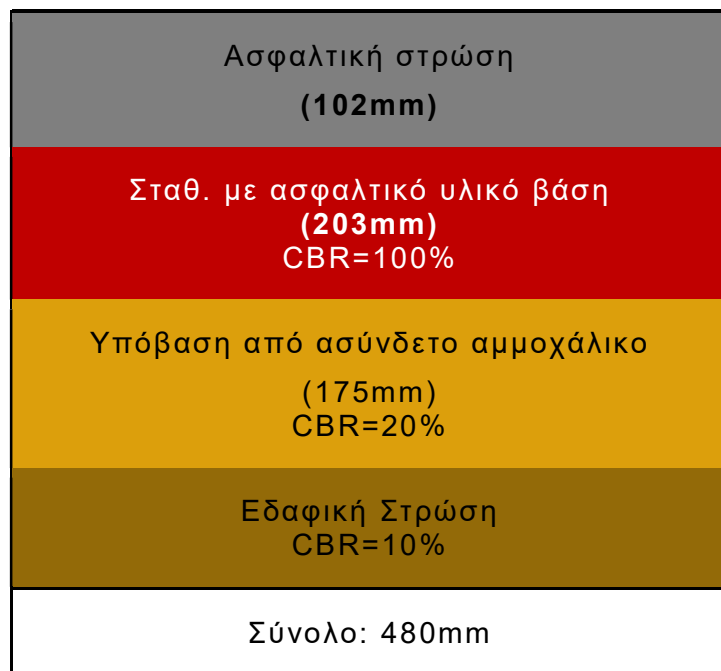


*Εικόνα 5.14 Υπολογισμός διατομής της μεθόδου LED του ERDC*

AC CDF	0,00
SUBGRADE CDF	1,00

*Εικόνα 5.15 Συντελεστές αθροιστικής φθοράς CDF της μεθόδου LED του ERDC*

Τέλος, από το σχεδιασμό με τη μέθοδο CBR του ERDC, προέκυψε η διατομή οδοστρώματος της Εικόνας 5.16.



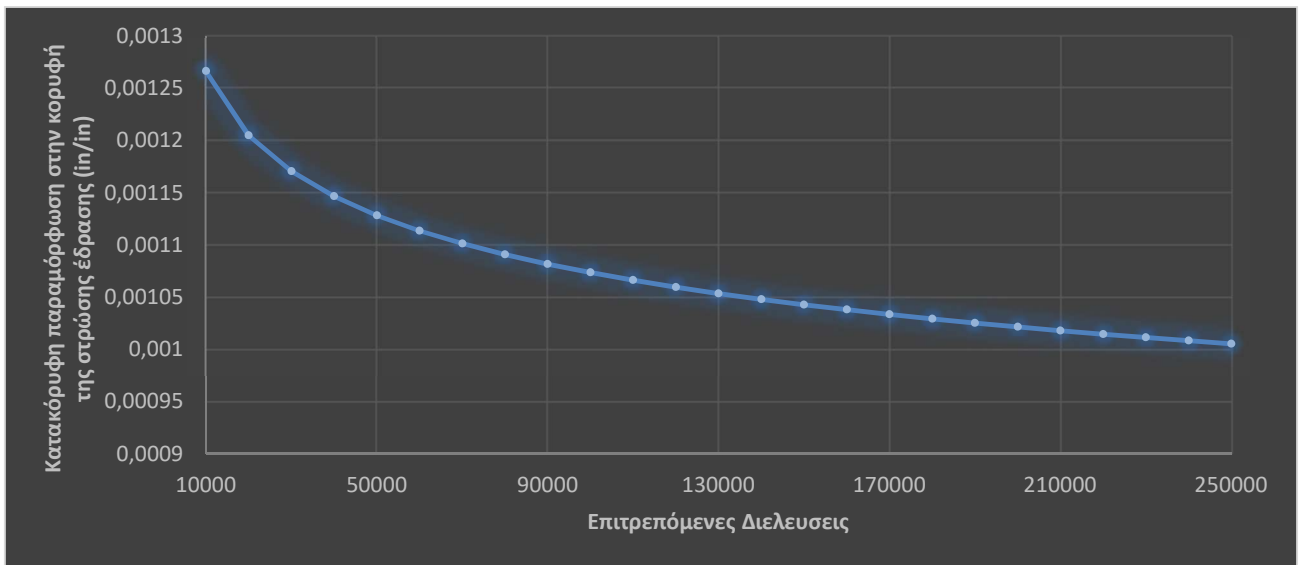
**Εικόνα 5.16** Υπολογισμός διατομής της μεθόδου CBR του ERDC

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια με ελάχιστες αποκλίσεις στο συνολικό πάχος του οδοστρώματος. Σύμφωνα και με την Εικόνα 5.17, όπου συνοψίζονται τα αποτελέσματα των τελευταίων υπολογισμών, παρατηρείται ότι οι μέθοδοι συγκλίνουν καθώς οι αποκλίσεις, τόσο στο πάχος κάθε στρώσης αλλά και στο συνολικό πάχος του οδοστρώματος, είναι της τάξης των 5-10mm. Στην αρχή του κεφαλαίου έγινε η παραδοχή ότι η στρώση έδρασης έχει δείκτη CBR ίσο με 10%, το οποίο μέσω της εξίσωσης  $E_{sub}=1.500 \times CBR$  (psi) ισοδυναμεί με 15.000psi ή αλλιώς 103MPa. Αναδείχθηκε ότι οι δύο μέθοδοι LED, της FAA και του ERDC, έχουν ίδιο νόμο κόπωσης ασφαλτομίγματος και διαφορετικό νόμο αστοχίας της στρώσης έδρασης, καθώς στο νόμο αστοχίας της στρώσης έδρασης του ERDC υπεισέρχεται και το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης. Στις συγκεκριμένες δοκιμές, που έγινε η παραδοχή ότι το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης ισούται με 103MPa, οι μέθοδοι συγκλίνουν.

ERDC CBR	ERDC LED	FAA
Ασφαλτική στρώση <b>(102mm)</b>	Ασφαλτική στρώση <b>(102mm)</b> $\nu=0.35$ 1379MPa	Ασφαλτική στρώση P401 <b>(102mm)</b> $\nu=0.35$ 1379MPa
Σταθ. με ασφαλτικό υλικό βάση <b>(203mm)</b> CBR=100%	Σταθ. με ασφαλτικό υλικό βάση <b>(203mm)</b> $\nu=0.35$ 2758MPa	Σταθ. με ασφαλτικό υλικό βάση P401 <b>(196mm)</b> $\nu=0.35$ 2758MPa
Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο <b>(175mm)</b> CBR=20%	Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο <b>(184mm)</b> $\nu=0.35$ 260MPa	Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο P209 <b>(187mm)</b> $\nu=0.35$ 260MPa
Εδαφική Στρώση CBR=10%	Εδαφική Στρώση $\nu=0.35$ 103MPa	Εδαφική Στρώση $\nu=0.35$ 103MPa
Σύνολο: 480mm	Σύνολο: 489mm	Σύνολο: 485mm

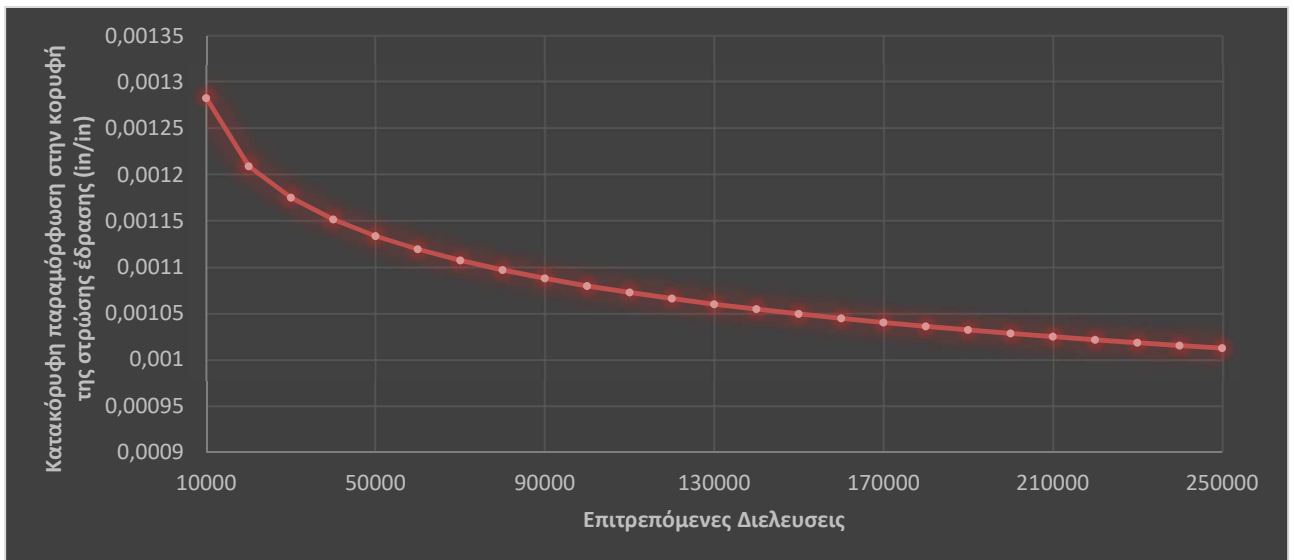
*Εικόνα 5.17 Σύγκριση διατομών*

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μελέτη ευαισθησίας του νόμου αστοχίας της στρώσης έδρασης της αναλυτικής μεθόδου της FAA και της μεθόδου LED του ERDC. Στις Εικόνες 5.18 & 5.19 παρουσιάζεται το διάγραμμα του νόμου αστοχίας της στρώσης έδρασης της μεθόδου LED του ERDC και της αναλυτικής μεθόδου της FAA αντίστοιχα. Το διάγραμμα του νόμου αστοχίας της στρώσης έδρασης του ERDC προέκυψε δίνοντας στο μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης την τιμή  $M_R=100\text{MPa}$  (14.500psi) και επιλύθηκε ως προς την κατακόρυφη παραμόρφωση στην κορυφή της στρώσης έδρασης δίνοντας στις επιτρεπόμενες διελεύσεις τιμές από το 10.000 έως το 250.000 (βλ. Εικόνα 5.18)



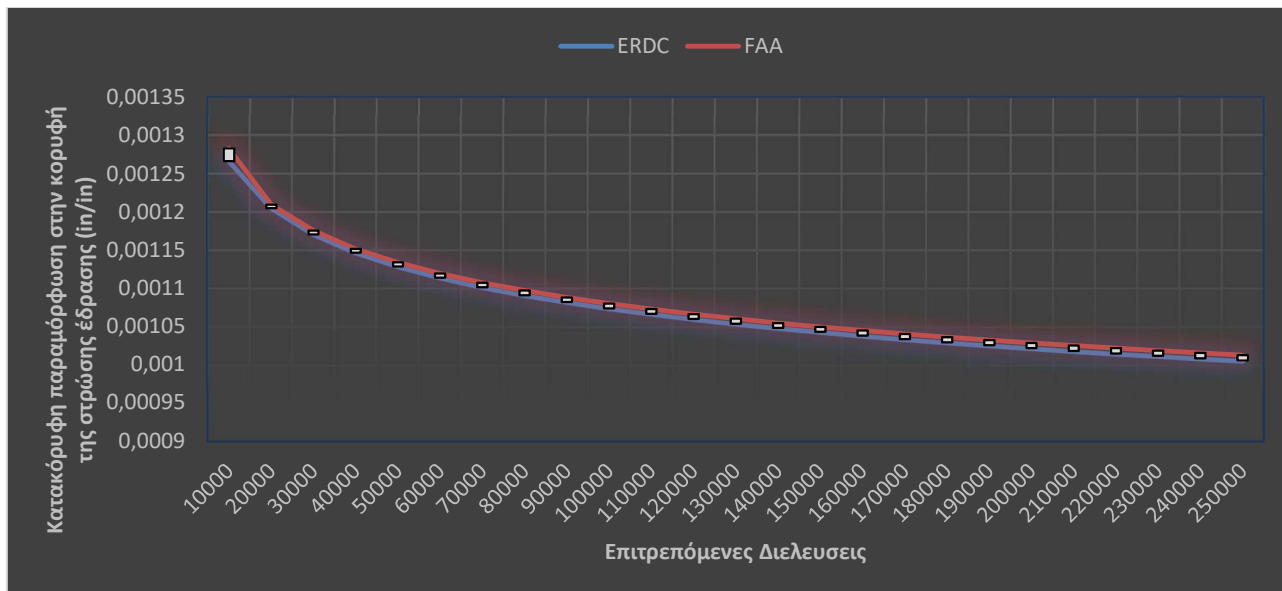
**Εικόνα 5.18** Διάγραμμα σχέσης επιτρεπόμενων διελεύσεων και κατακόρυφης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης σύμφωνα με το νόμο αστοχίας της στρώσης έδρασης του ERDC

Το διάγραμμα του νόμου αστοχίας της στρώσης έδρασης της FAA προέκυψε λύνοντας ως προς την κατακόρυφη παραμόρφωση στην κορυφή της στρώσης έδρασης και δίνοντας στις επιτρεπόμενες διελεύσεις τιμές από το 10.000 έως το 250.000 (βλ. Εικόνα 5.19).



**Εικόνα 5.19** Διάγραμμα σχέσης επιτρεπόμενων διελεύσεων και κατακόρυφης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης σύμφωνα με το νόμο αστοχίας της στρώσης έδρασης της FAA

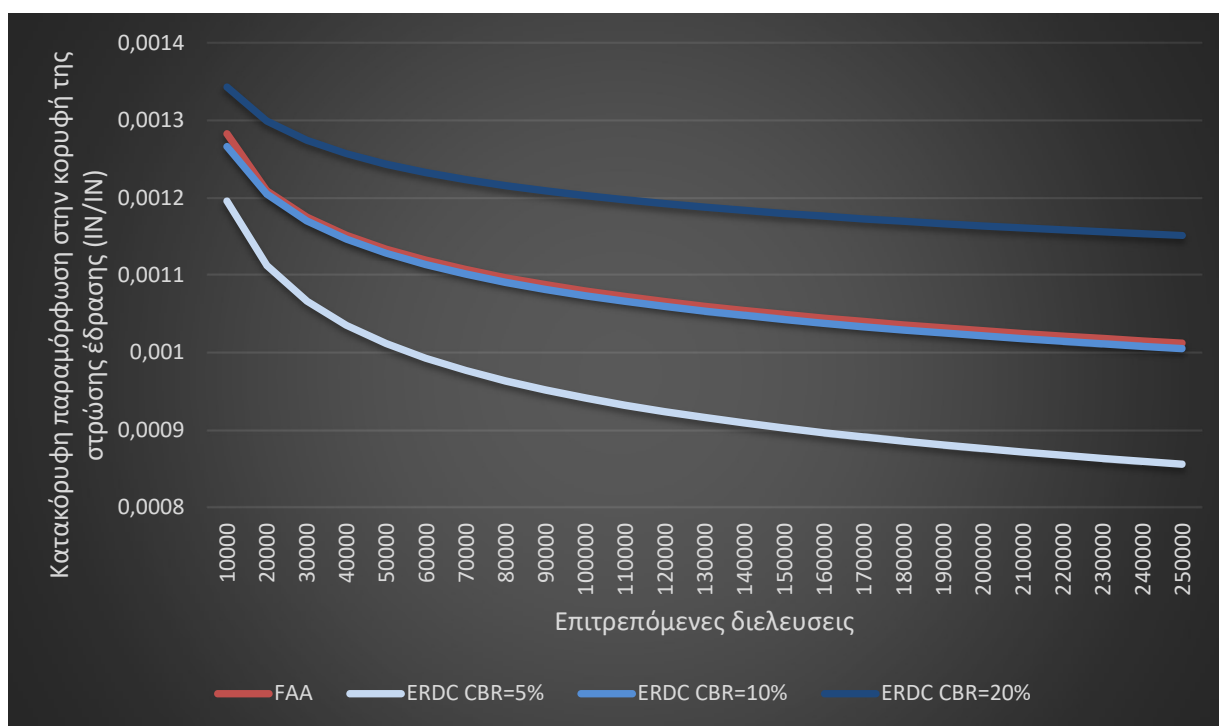
Για μια καλύτερη εικόνα της σύγκρισης, παρουσιάζονται οι δύο καμπύλες στο ίδιο διάγραμμα, όπου παρατηρείται σχεδόν πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων (βλ. Εικόνα 5.20).



**Εικόνα 5.20** Σύγκριση διαγραμμάτων σχέσης επιτρεπόμενων διελεύσεων και κατακόρυφης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης της FAA και του ERDC

Μπορεί οι καμπύλες να ταυτίζονται αλλά έπαιξε ρόλο η υπόθεση που έγινε για το μέτρο ελαστικότητας  $M_R$  της στρώσης έδρασης (Εικόνα 5.20). Για κάποια άλλη τιμή του μέτρου ελαστικότητας οι καμπύλες ενδεχομένως να είχαν απόκλιση. Πιο συγκεκριμένα, για τιμές του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης μεγαλύτερες από 14.500psi (100MPa) η καμπύλη του ERDC μετατοπίζεται προς τα πάνω, ενώ αντίθετα για τιμές μικρότερες από 14.500psi (100MPa) η καμπύλη του ERDC μετατοπίζεται προς τα κάτω. Η επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης στη σχέση κατακόρυφων παραμορφώσεων – επιτρεπόμενων διελεύσεων φαίνεται καλύτερα στο διάγραμμα της Εικόνας 5.21. Συνεπώς, οι δύο αυτές μέθοδοι έχουν διαφορετικό νόμο αστοχίας της στρώσης έδρασης, καθώς ο νόμος αστοχίας της μεθόδου του ERDC εξαρτάται σημαντικά από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης.





**Εικόνα 5.21** Σύγκριση καμπυλών σχέσης επιτρεπόμενων διεκτασεων και κατακόρυφης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης έδρασης μεταξύ της FAA και του ERDC

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ένας υπολογισμός διατομών με ίδια υλικά για στρώση έδρασης με μικρότερο μέτρο ελαστικότητας ώστε να εξακριβωθεί η παραπάνω διαπίστωση. Η κυκλοφορία σχεδιασμού είναι αυτή του Πίνακα 5.1, ενώ τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στους Πίνακες 5.5 & 5.6.

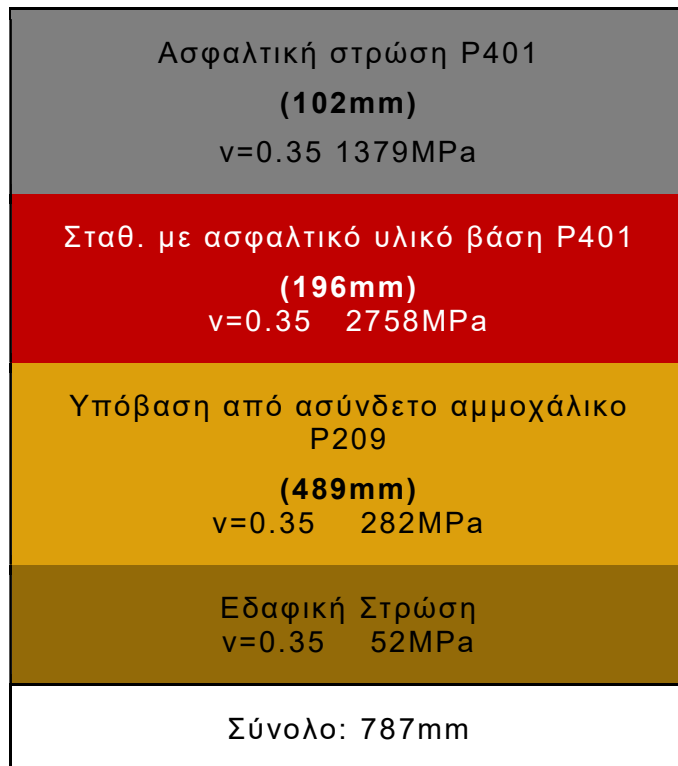
**Πίνακας 5.5** Μέτρα ελαστικότητας των υλικών της FAA για τον υπολογισμό των διατομών

	Υλικά FAA	Μέτρα Ελαστικότητας (MPa)
Ασφαλτική στρώση	P-401 HMA	1.379
Σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση	P-401 Stab	2.758
Υπόβαση από ασύνδετο υλικό	P-209	282
Στρώση έδρασης	-	52

**Πίνακας 5.6** Μέτρα ελαστικότητας και δείκτες CBR των υλικών του ERDC για τον υπολογισμό των διατομών

	Δείκτης CBR (%)
Ασφαλτική στρώση	-
Σταθεροποιημένη με ασφαλτικό υλικό βάση	100
Υπόβαση από ασύνδετο υλικό	20
Στρώση έδρασης	5

Για τα καινούρια δεδομένα, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το σχεδιασμό με την αναλυτική μέθοδο της FAA παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.22 & 5.23



**Εικόνα 5.22** Υπολογισμός διατομής της αναλυτικής μεθόδου της FAA

AC CDF	0,04
SUBGRADE CDF	1,00

**Εικόνα 5.23** Συντελεστές αθροιστικής φθοράς CDF της αναλυτικής μεθόδου της FAA

Παρατηρείται ότι η επιφανειακή στρώση και η βάση έχουν το ίδιο πάχος με πριν ενώ η υπόβαση έχει σχεδιαστεί με πάχος 489mm, αφού η υποκείμενη στρώση έδρασης πλέον είναι χαμηλότερης ποιότητας. Οι συντελεστές αθροιστικής φθοράς υπολογίστηκαν 0,04 και 1,00 για τον πυθμένα της σταθεροποιημένης με ασφαλτικό υλικό βάσης και την κορυφή της στρώσης έδρασης αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός με τη μέθοδο LED του ERDC, τα αποτελέσματα του οποίου δίνονται στις Εικόνες 5.24 & 5.25.



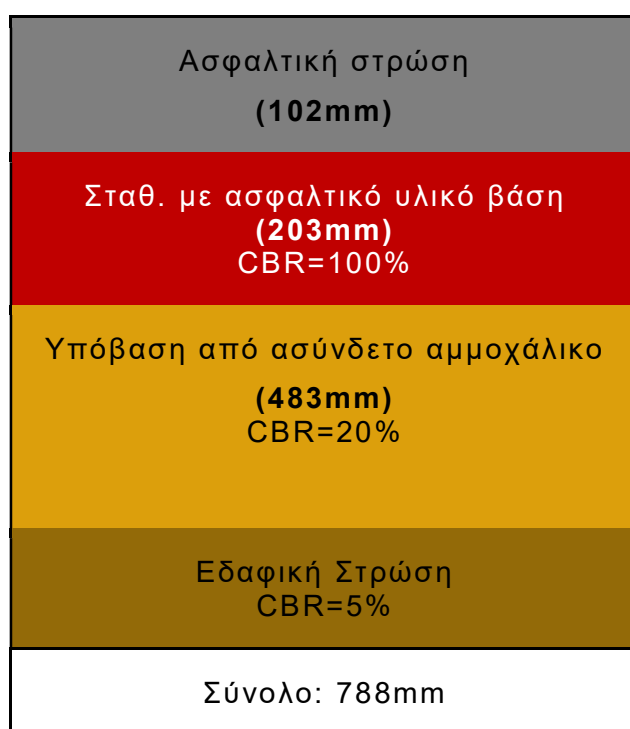
**Εικόνα 5.24** Υπολογισμός διατομής της μεθόδου LED του ERDC

AC CDF	0,00
SUBGRADE CDF	1,00

*Εικόνα 5.25 Συντελεστές αθροιστικής φθοράς CDF της μεθόδου LED του ERDC*

Το πάχος της επιφανειακής στρώσης και της βάσης έχουν επίσης τις ίδιες τιμές με τις προηγούμενες δοκιμές αλλά το πάχος της υπόβασης έχει αυξηθεί στα 539mm, δηλαδή 50mm μεγαλύτερη από ότι προέκυψε από τον σχεδιασμό με την FAA. Για την συγκεκριμένη διατομή προέκυψε ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και στην κορυφή της στρώσης έδρασης 0,00 και 1,00 αντίστοιχα

Τέλος, η διατομή οδοστρώματος που προέκυψε από το σχεδιασμό με τη μέθοδο CBR του ERDC φαίνεται στην Εικόνα 5.26.



*Εικόνα 5.26 Υπολογισμός διατομής της μεθόδου CBR του ERDC*

ERDC CBR	ERDC LED	FAA
Ασφαλτική στρώση (102mm)	Ασφαλτική στρώση (102mm) $\nu=0.35$ 1379MPa	Ασφαλτική στρώση P401(102mm) $\nu=0.35$ 1379MPa
Σταθ. με ασφαλτικό υλικό βάση (203mm) CBR=100%	Σταθ. με ασφαλτικό υλικό βάση (203mm) $\nu=0.35$ 2758MPa	Σταθ. με ασφαλτικό υλικό βάση P401 (196mm) $\nu=0.35$ 2758MPa
Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο (483mm) CBR=20%	Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο (539mm) $\nu=0.35$ 282MPa	Υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο P209 (489mm) $\nu=0.35$ 282MPa
Εδαφική Στρώση CBR=5%	Εδαφική Στρώση $\nu=0.35$ 52MPa	Εδαφική Στρώση $\nu=0.35$ 52MPa
Σύνολο: 788mm	Σύνολο: 844mm	Σύνολο: 787mm

**Εικόνα 5.27 Σύγκριση διατομών**

Στη μέθοδο CBR προέκυψε επίσης ίδιο με το προηγούμενο πάχος επιφανειακής στρώσης και βάσης αλλά το πάχος της υπόβασης έχει αυξηθεί στα 483mm, αφού ο δείκτης CBR της έδρασης μειώθηκε στο 5%. Αξίζει να σημειωθεί ότι, μεταξύ των μεθόδων του ERDC, η διατομή που σχεδιάστηκε σύμφωνα με την μέθοδο CBR έχει μικρότερο πάχος υπόβασης κατά 56mm. Σύμφωνα και με την άμεση σύγκριση των διατομών, η διαφορά των μεθόδων LED στο νόμο αστοχίας της στρώσης έδρασης έγινε εμφανής σε αυτή την περίπτωση που ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης μειώθηκε αισθητά. Όπως επισημάνθηκε στη μελέτη ευαισθησίας, η καμπύλη του διαγράμματος του νόμου αστοχίας του ERDC ταυτίζεται με αυτή της FAA για τιμές μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης της τάξης των 100MPa. Για χαμηλότερες τιμές, η καμπύλη μετατοπίζεται προς τα κάτω ενώ για υψηλότερες τιμές μετατοπίζεται προς τα πάνω. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, που δόθηκε τιμή χαμηλότερη των 100MPa, η καμπύλη βρέθηκε χαμηλότερα από αυτή της FAA. Έτσι λοιπόν, χρειάστηκε μεγαλύτερο πάχος για να φέρει το φορτίο και τις διελεύσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό. Αντίθετα, η διατομή της μεθόδου CBR συγκλίνει περισσότερο με την αναλυτική μέθοδο της FAA ανεξάρτητα από την τιμή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης (βλ. Εικόνα 5.27).

## 6 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα-Προτάσεις

Στις βασικές αρχές των μεθόδων FAA αναλυτικών υπολογισμών και του ERDC παρατηρούνται ομοιότητες και διαφορές, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό. Η συγκεκριμένη έρευνα, λοιπόν, ανέδειξε τις υπόψη ομοιότητες και διαφορές και εστίασε στο πώς αυτές οι διαφορές επηρεάζουν το σχεδιασμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, μέσω δοκιμών υπολογισμού διατομών.

Συγκεκριμένα, από την ενδελεχή βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις μεθόδους του ERDC προέκυψε ότι η μία διαδικασία βασίζεται στη μέθοδο CBR ενώ η άλλη βασίζεται στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων LED. Στη μέθοδο CBR οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται με βάση το αεροσκάφος σχεδιασμού, ενώ στη μέθοδο LED λαμβάνεται υπόψη όλη η κυκλοφορία που πρόκειται να δεχθεί το οδοστρωμα. Επιπλέον, στο σχεδιασμό με τη μέθοδο CBR για τον υπολογισμό του συνολικού πάχους του οδοστρώματος λαμβάνεται υπόψη κατ'εξοχήν η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης, ενώ στη μέθοδο LED ο υπολογισμός γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά των υλικών των επιμέρους στρώσεων. Στη μέθοδο LED τα υλικά των στρώσεων χαρακτηρίζονται από το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο Poisson, ενώ αντίθετα στη μέθοδο CBR χαρακτηρίζονται από τον δείκτη CBR.

Από τη σύγκριση της αναλυτικής μεθόδου της FAA με τη μέθοδο LED του ERDC προέκυψε ότι ο νόμος κόπωσης ασφαλτομίγματος είναι ακριβώς ίδιος, αλλά ο νόμος αστοχίας της στρώσης έδρασης είναι διαφορετικός, αφού στη μέθοδο του ERDC λαμβάνεται υπόψη και το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, ενώ ο νόμος αστοχίας της αναλυτικής μεθόδου της FAA περιγράφεται μόνο από τη σχέση διελεύσεων και παραμορφώσεων. Σημαντική επίδραση στο σχεδιασμό έχει το γεγονός ότι καθοριστικό κριτήριο για τον σχεδιασμό με την αναλυτική μέθοδο της FAA είναι ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης. Αντιθέτως, στο σχεδιασμό με τη μέθοδο LED του ERDC καθοριστικό κριτήριο μπορεί να είναι είτε ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης, είτε ο συντελεστής αθροιστικής φθοράς στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, είτε και τα δυο αυτά κριτήρια ταυτόχρονα. Επιπλέον, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο της FAA, ο σχεδιασμός γίνεται για ενιαία περιοχή κυκλοφορίας. Αντιθέτως, στο σχεδιασμό με το ERDC πραγματοποιείται επιμερισμός των περιοχών κυκλοφορίας του οδοστρώματος του αεροδρομίου.

Η διερεύνηση των διαφορών στις βασικές αρχές των μεθόδων συνδυάστηκε με τη σύγκριση των διατομών οδοστρώματος που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τα τυπικά υλικά κάθε μεθόδου. Από αυτή τη διαδικασία συμπεραίνεται ότι από το

σχεδιασμό με τη μέθοδο CBR του ERDC και την αναλυτική μέθοδο της FAA προέκυψε οδόστρωμα με μικρότερο συνολικό πάχος συγκριτικά με τη μέθοδο LED του ERDC.

Ενδιαφέροντα συμπεράσματα προέκυψαν και από τα αποτελέσματα μιας σειράς δοκιμών υπολογισμού διατομών χρησιμοποιώντας ίδια υλικά σχεδιασμού για λόγους άμεσης συγκρισιμότητας. Συγκεκριμένα, από τη μελέτη ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε αποδείχθηκε ότι οι μέθοδοι συγκλίνουν για στρώση έδρασης με δείκτη CBR με τιμές κοντά στο 10%. Ως εκ τούτου, ακολούθησε η διερεύνηση της επίδρασης του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης στους νόμους αστοχίας και στο σχεδιασμό. Αποδείχθηκε ότι, για μικρότερες τιμές του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης η αναλυτική μέθοδος της FAA συγκλίνει με τη μέθοδο CBR του ERDC, ενώ αντίθετα, η μέθοδος LED του ERDC είναι πιο συντηρητική.

Τέλος, αντικείμενο μελλοντικής έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει η διερεύνηση των μεθόδων ως προς τις βασικές αρχές της διαδικασίας ενίσχυσης ευκάμπτων οδοστρωμάτων με επίστρωση (overlay design). Το αντικείμενο αυτό χρήζει ιδιαίτερου ενδιαφέροντος καθώς η συντήρηση των οδοστρωμάτων εν λειτουργία αεροδρομίων αποτελεί καίριο ζήτημα διεθνώς.

# 7 Βιβλιογραφία

Adolf M., Engineer Research and Development Center (ERDC), «Pavement-Transportation Computer Assisted Structural Engineering v2.09 User manual», Mississippi USA, September 2010

Barker W. R., Bianchini A., Brown E. R., «Minimum Thickness Requirements for Asphalt Surface Course and Base Layer in Airfield Pavements», Report, ERDC/GSL TR-11-27, August 2011

Berger J. R., Karageorghis A., «The method of fundamental solutions for layered elastic materials», Engineering Analysis with Boundary Elements, 25(10), pp. 877-886, 2001

Choudhary D. K., Joshi Y. P., «A Detailed Study of CBR Method for Flexible Pavement Design», Engineering Research and Applications, 4(6), pp. 239-253, 2014

Directorate of Civil Engineering Services, «A Guide to Airfield Pavement Design and Evaluation», Property Services Agency, Department of the Environment, United Kingdom, 1989

Engineer Research and Development Center (ERDC), «Pavement Design for Airfields», US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station. UFC 3-260-02, Mississippi USA, 2001

Esfandani M. T., Mansourian A., Babaei A., «Investigation of Runway Pavement Design Software and Determination of Optimization Software», Basic and Applied Scientific Research, 3(4), pp. 143-150, 2013

Federal Aviation Administration (FAA), «Airport Design», Advisory Circular No 150/5300-13A, Washington DC, 2014

Federal Aviation Administration (FAA), «Airport Pavement Design and Evaluation», Advisory Circular No 150/5320-6D, 1995

Federal Aviation Administration (FAA), «Airport Pavement Design and Evaluation», Advisory Circular No 150/5320-6E, Washington DC, 2009



Gonzalez C. R., Barker R. W., Bianchini A., Engineer Research and Development Center (ERDC), «Reformulation of the CBR Procedure», Report, ERDC/GSL TR-12-16, 2012

Service des Bases Aeriennes, The Airport and Airforce Base Engineering (STBA), «Instruction Technique Sur les Aerodromes Civils», Paris, 2001

U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA), «Operational Life of Airport Pavements», 2004

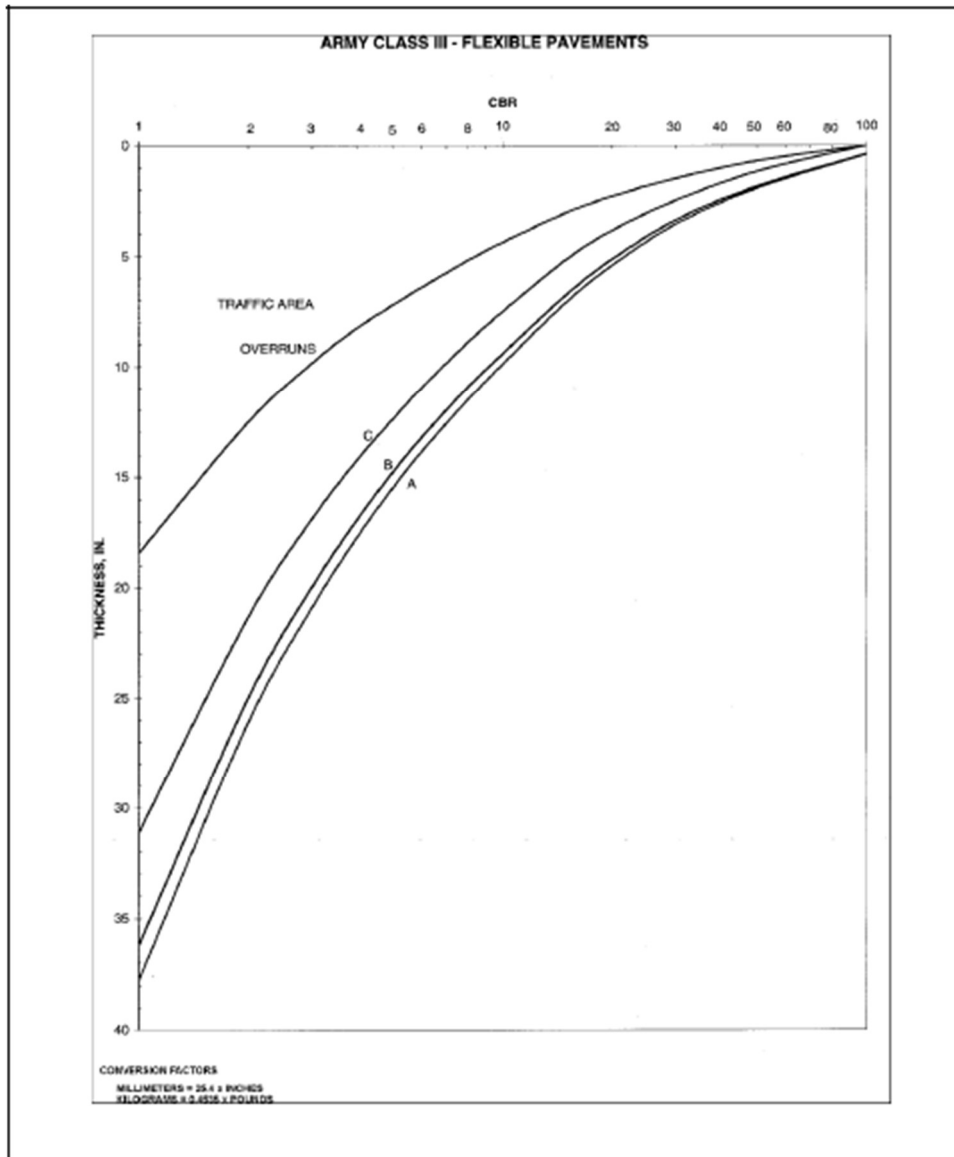
Λοΐζος Α., Πλατή Χ., «Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων», Τεύχος Α, Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Λοΐζος Α., Πλατή Χ., «Σημειώσεις για το μάθημα οδοστρώματα», Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

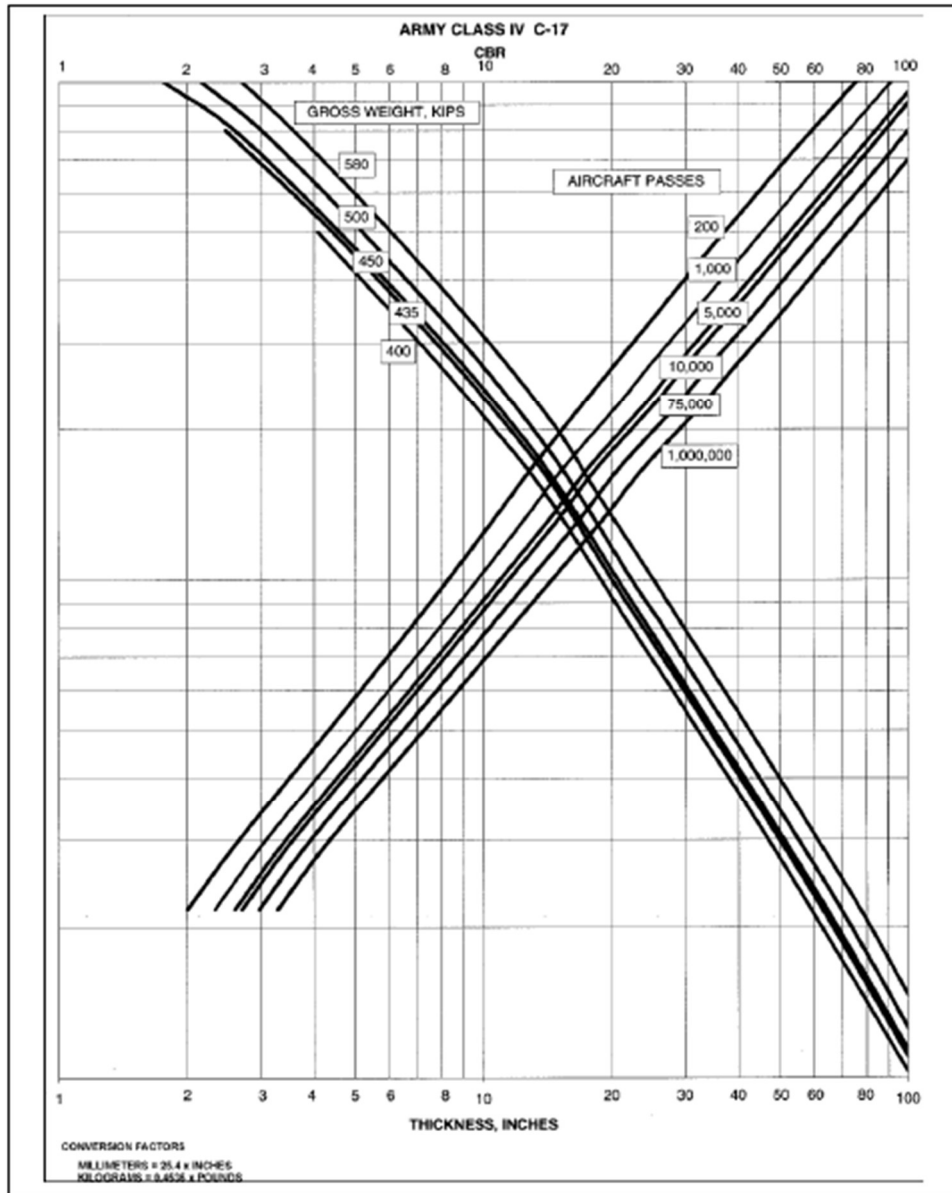
[https://en.wikipedia.org/wiki/Engineer\\_Research\\_and\\_Development\\_Center](https://en.wikipedia.org/wiki/Engineer_Research_and_Development_Center)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Federal\\_Aviation\\_Administration](https://en.wikipedia.org/wiki/Federal_Aviation_Administration)

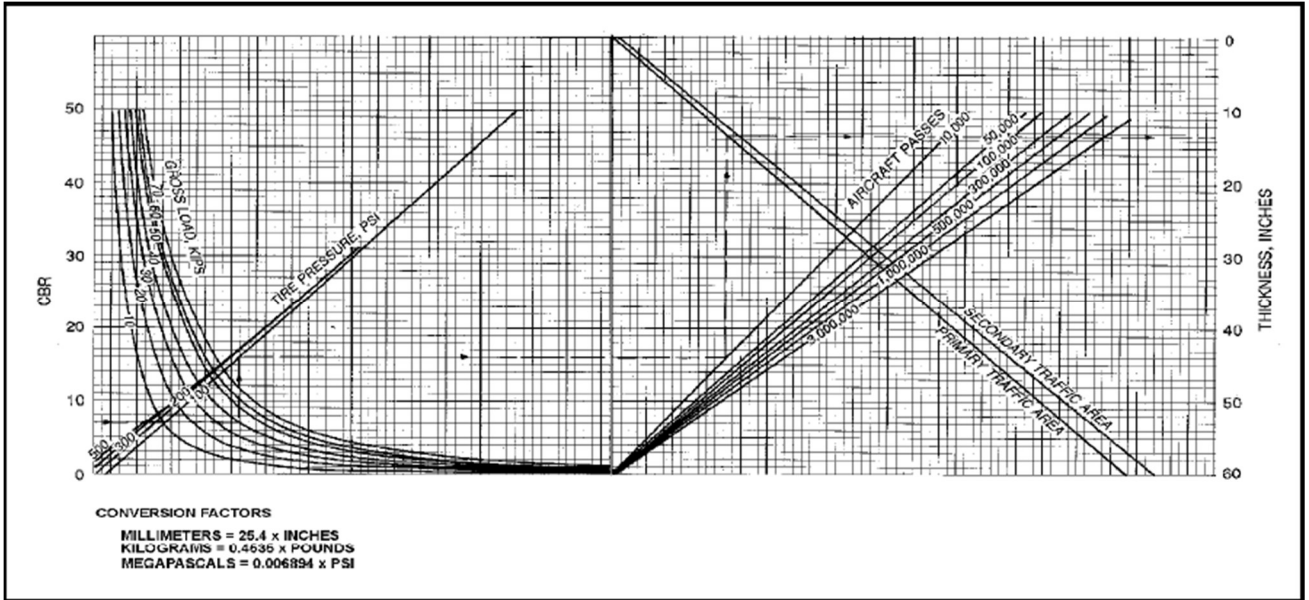
# Παράρτημα



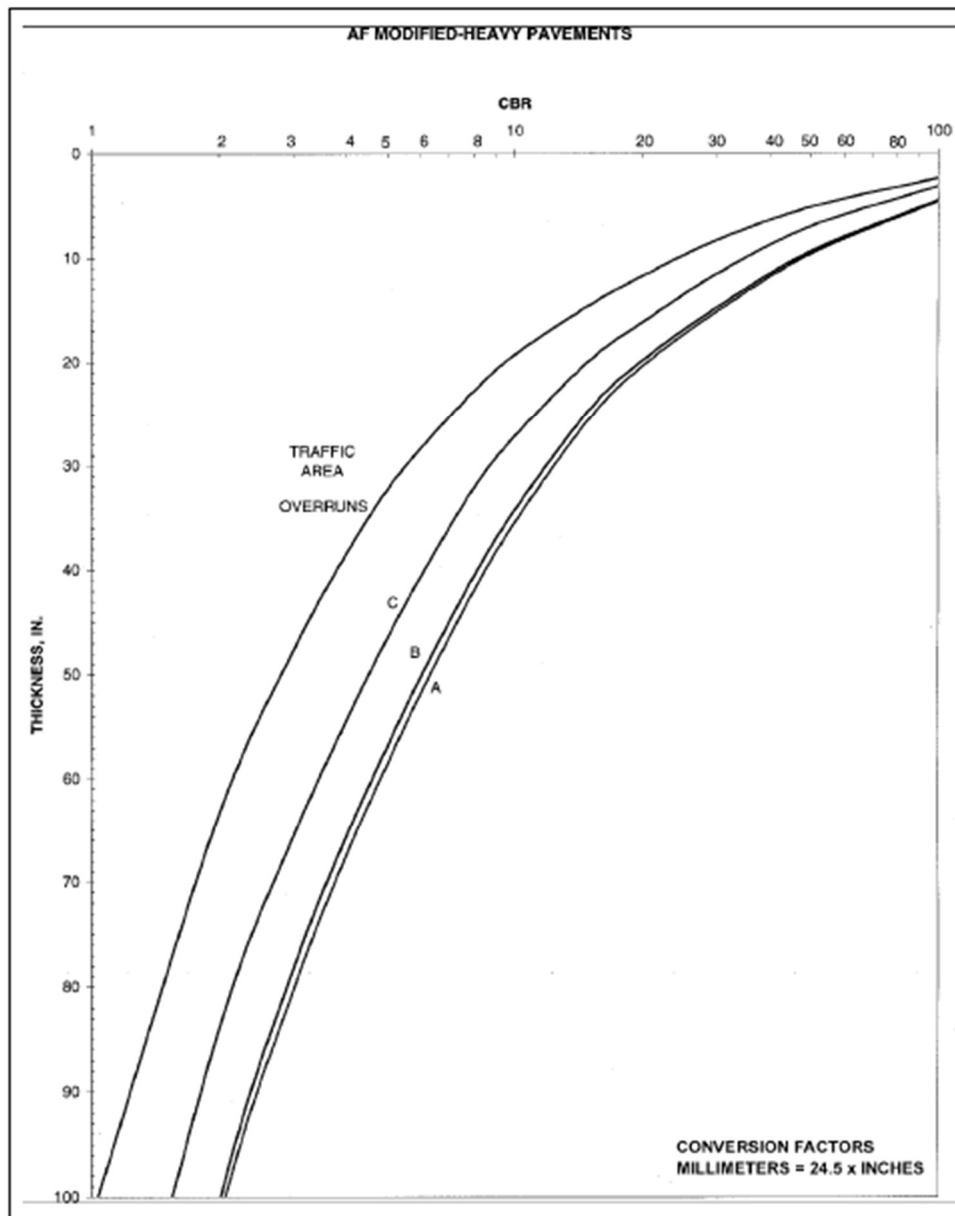
*Εικόνα Π-1 Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος για αεροδρόμια Army Class III*



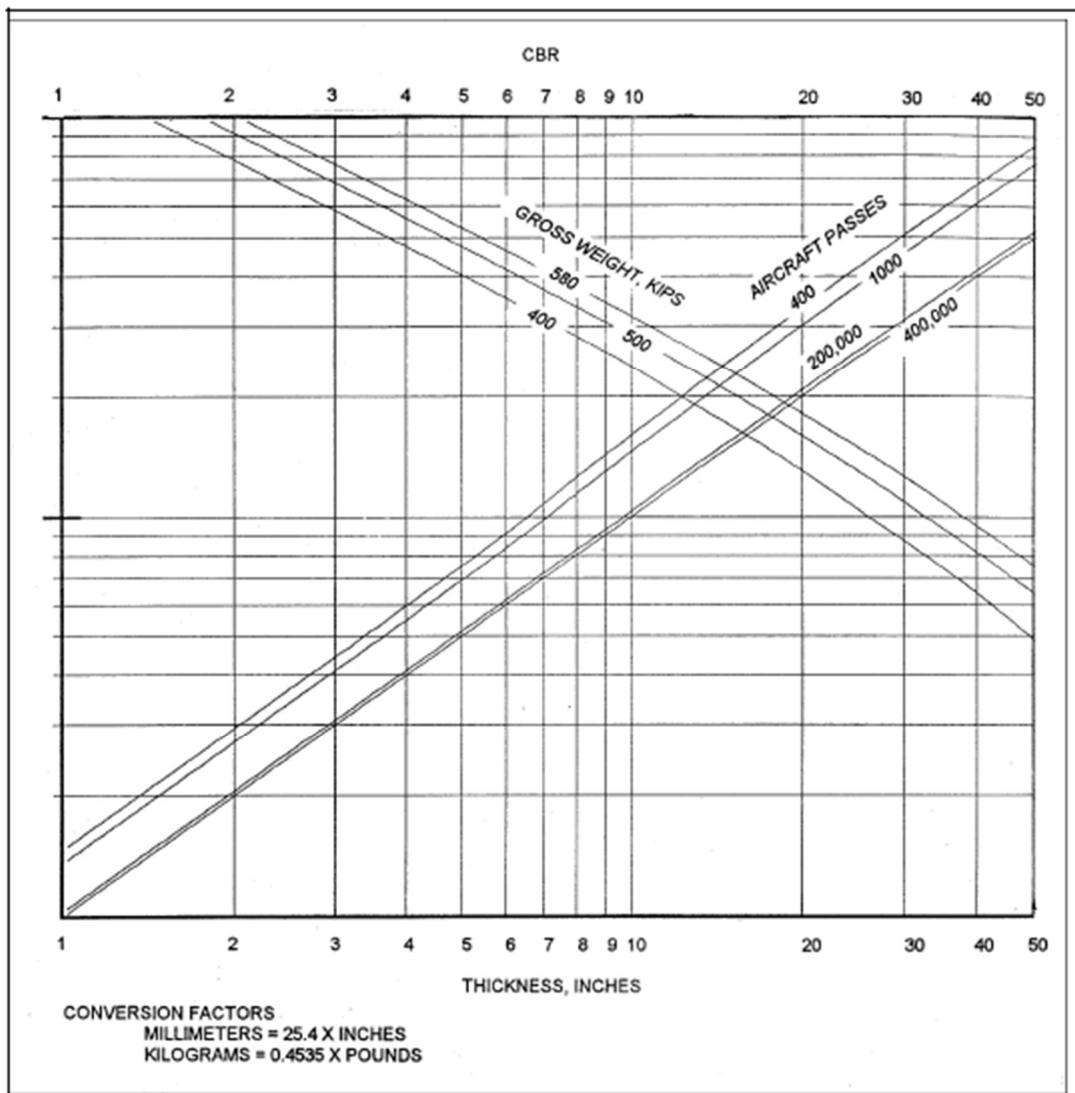
**Εικόνα Π-2** Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος για αεροδρόμια Army Class IV (C-17) με μήκος διαδρόμου >1525m, περιοχή κυκλοφορίας Α



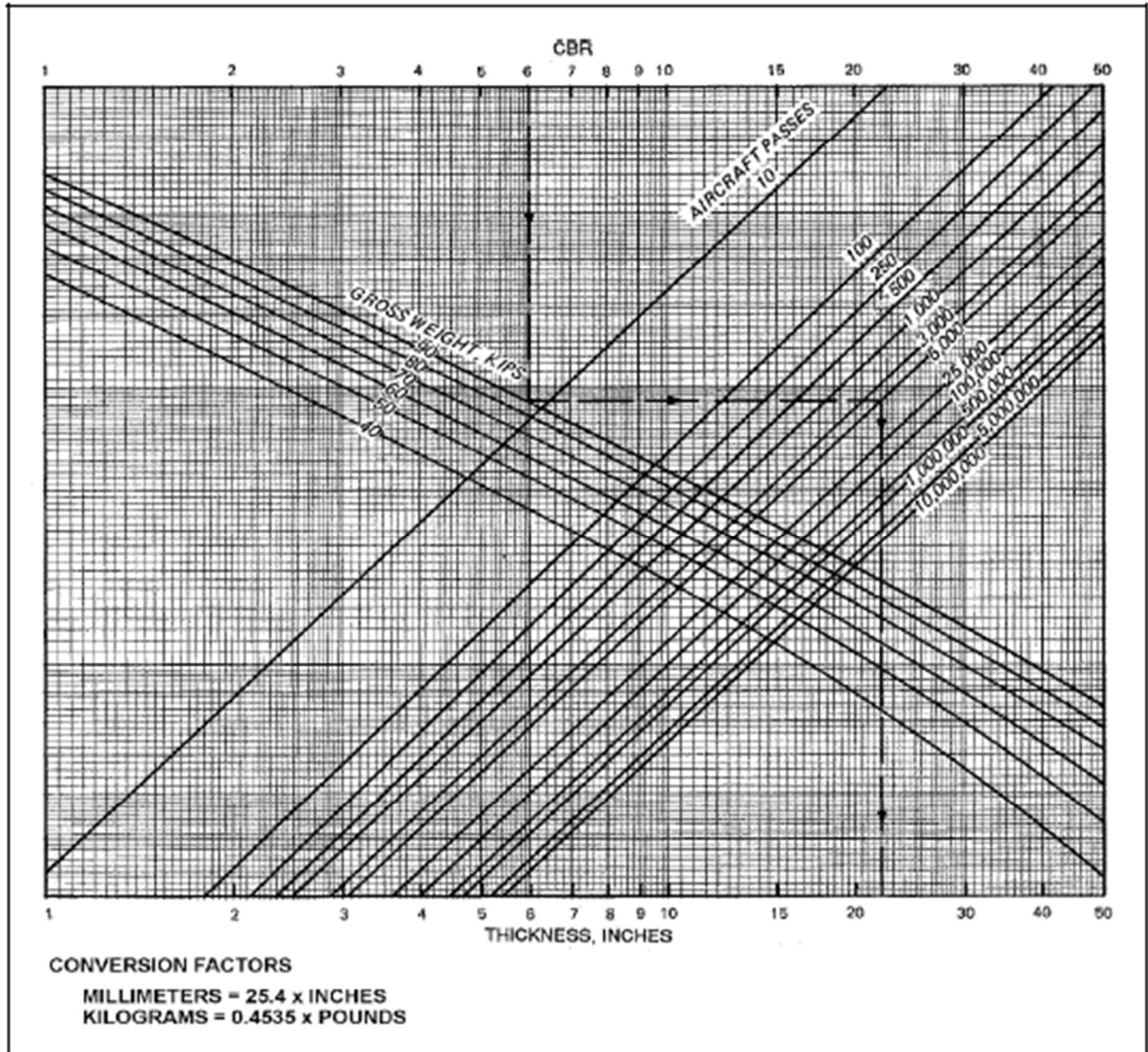
*Εικόνα Π-3 Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος για αεροσκά-  
φος πολεμικού ναυτικού μονού τροχού, περιοχές κυκλοφορίας Α και Β*



*Εικόνα Π-4 Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου πολεμικής αεροπορίας κυκλοφορίας τροποποιημένου βαρέος φορτίου*



*Εικόνα Π-5 Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου πολεμικής αεροπορίας, αεροσκάφους C-17 για ζώνη βραχείας προσγείωσης*



*Εικόνα Π-6 Νομογράφημα για σχεδιασμό ευκάμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου πολεμικής αεροπορίας για αεροσκάφος F-15, περιοχής κυκλοφορίας Α*